

інформатика

М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова

ОСНОВИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

підручник

ДЛЯ ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ

bhv ПИТЕР®

М. З. ЗГУРОВСЬКИЙ, Н. Д. ПАНКРАТОВА

ОСНОВИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

Затверджено Міністерством освіти і науки України як підручник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямками «Системний аналіз», «Прикладна математика», «Інформатика», «Комп'ютерні науки», «Комп'ютерна інженерія», «Системна інженерія»

Серія «ІНФОРМАТИКА»

За загальною редакцією академіка НАН України
М. З. Згуровського

Київ
Видавнича група BVH
2007

Рецензенти: І. В. Сергієнко, академік НАН України, директор Інституту кібернетики
НАН України;
В. М. Кунцевич, академік НАН України, директор Інституту космічних досліджень
НАН та НКА України.

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України,
лист № 14/18-Г-1174 від 22.11.2006 р.*

Згуровський М. З., Панкратова Н. Д.

345 Основи системного аналізу. — К.: Видавнича група BHV, 2007. — 544 с.: іл.
ISBN 978-966-552-153-2

У підручнику викладено основи системного аналізу як прикладної наукової методології, призначеної для дослідження складних, міждисциплінарних проблем різної природи. З позиції системного підходу подано базові визначення, методологічні і теоретичні основи формалізації й вирішення міждисциплінарних задач, які стосуються різних предметних галузей. Запропоновано методи формалізації системних задач, приведення їх до форми вирішення в реальних умовах, що характеризуються наявністю великої кількості суперечливих цілей, різних видів невизначеностей і ризиків. Крім того, у підручнику наведено обчислювальні алгоритми і процедури вирішення практичних задач міждисциплінарного характеру для застосувань, що відносяться до науково-технічної та соціально-економічної сфер діяльності людини.

Для студентів, аспірантів і науковців, котрі спеціалізуються в області теорії і використання системного аналізу, прийняття рішень, стратегічного планування, проектування, виробництва й експлуатації складних взаємозалежних систем різного призначення, що функціонують в умовах невизначеностей, множин конфліктуючих цілей і ризиків.

Foundation of system analysis as an applied scientific methodology assigned for research of complex, interdisciplinary, problems of different nature are stated in the textbook. From position of the system approach the basic definitions, methodological and theoretical bases of formalization and solution of interdisciplinary tasks concerning various subject domains are given. The methods of system tasks formalization, reduction them to solvable form in real conditions described by presence of set of the inconsistent purposes, different kinds of uncertainties and risks are offered. Computing algorithms and solution procedures of the practical interdisciplinary problems for the set of applications in the area of technology and socio-economy are present.

The textbook will be useful for scientists, post-graduates and students specializing in the field of theory and application of the system analysis, decision making, strategic planning, designing, manufacture and exploitation of the complex interconnected systems of various assignments functioning in conditions of uncertainties and risks.

ББК 32.817я73

Усі права захищено. Жодна частина цієї книжки не може бути відтворена в будь-якій формі без письмового дозволу власника авторських прав.

Інформація, що міститься в цьому виданні, отримана з джерел, які видавництво вважає надійними. Проте, маючи на увазі можливі людські та технічні помилки, видавництво не може гарантувати абсолютну точність та повноту відомостей, викладених у цій книжці, і не несе відповідальності за можливі помилки, пов'язані з їх використанням.

Стислий зміст

Передмова	15
Розділ 1. Предметна область системного аналізу	19
Розділ 2. Основні поняття системного аналізу	64
Розділ 3. Формалізованість задач системного аналізу	121
Розділ 4. Розкриття невизначеностей у задачах системного аналізу	142
Розділ 5. Пошук раціонального компромісу в задачах розкриття концептуальної невизначеності	186
Розділ 6. Розкриття невизначеностей у задачах взаємодії і протидії коаліцій	219
Розділ 7. Інформаційний аналіз системних задач	263
Розділ 8. Структурно-функціональний аналіз складних ієрархічних систем	305
Розділ 9. Задачі і методи системного аналізу багатофакторних ризиків	346
Розділ 10. Системне управління складними об'єктами	385
Розділ 11. Системна методологія передбачення	427
Додаток	485
Література	517
Алфавітний покажчик	532

Зміст

Передмова	15
Розділ 1. Предметна область системного аналізу	19
1.1. Становлення й розвиток системного аналізу	19
1.1.1. Основні особливості розвитку системного мислення	20
1.1.2. Роль фундаментальних відкриттів у системному сприйнятті світу	23
1.2. Етапи розвитку системного аналізу як прикладної наукової методології	24
1.2.1. Формування теоретичних засад концептуальної парадигми системного аналізу	25
1.2.2. Емпіричний розвиток системного аналізу	27
1.2.3. Розвиток наукових основ розробки і виробництва складних систем	29
1.2.4. Системний аналіз в епоху глобалізації світових процесів та проблем	34
1.3. Роль глобалізації світових процесів у розвитку системних досліджень	37
1.3.1. Особливості переходу від індустріального суспільства до інформаційного в епоху глобалізації	37
1.3.2. Перерозподіл трудових ресурсів в основних типах суспільства	38
1.4. Системність людської практики	41
1.4.1. Становлення і розвиток системності практичної діяльності людини	41
1.4.2. Системність інноваційної діяльності	44
1.5. Системний аналіз як універсальна наукова методологія	52
1.5.1. Роль і місце системного аналітика під час розв'язання складних задач	52
1.5.2. Системний аналіз як прикладна наукова методологія	56
Висновки	61
Розділ 2. Основні поняття системного аналізу	64
2.1. Об'єкти системного аналізу	64
2.1.1. Матеріальні та абстрактні об'єкти	65
2.1.2. Складна система як об'єкт дослідження	67
2.1.3. Складні ієрархічні системи	70
2.2. Властивості і принципи системної методології	76
2.2.1. Поняття системної задачі	76
2.2.2. Властивості та особливості системних задач	78
2.2.3. Методи дослідження систем	83
2.2.4. Фундаментальні властивості та принципи системної методології	85
2.2.5. Евристичні гіпотези системної методології	86
2.3. Класифікація задач і процедур системного аналізу	89
2.3.1. Концептуальні функціональні простори умов та властивостей складних систем	90
2.3.2. Класифікація процедур системного аналізу	93
2.4. Поняття складності системної задачі, спектри складності, трансобчислювальна складність	99
2.4.1. Поняття складності з погляду системної методології	99
2.4.2. Спектри складності системних задач	102
2.4.3. Поняття трансобчислювальної складності	105
2.5. Принципи подолання трансобчислювальної складності системних задач	110
2.5.1. Принципи раціональності	111
2.5.2. Прийоми розв'язання трансобчислювальної складності	114
Висновки	119

Розділ 3. Формалізованість задач системного аналізу	121
3.1. Характеристика формалізованих задач системного аналізу	121
3.1.1. Відмінний принцип, покладений в основу задач системного аналізу	121
3.1.2. Основні означення	122
3.1.3. Властивості та особливості СФС	123
3.1.4. Еколого-економічна система промислового регіону як приклад СФС	124
3.2. Характеристика рівнів задач, які розв'язуються під час системного дослідження складних формалізованих систем	127
3.2.1. Задачі першого рівня СФС	128
3.2.2. Задачі другого рівня СФС	128
3.2.3. Задачі третього рівня СФС	130
3.2.4. Задачі четвертого рівня СФС	131
3.3. Методи і засоби системного аналізу в дослідженні складних формалізованих задач	131
3.3.1. Методи і засоби обробки даних натурних спостережень для задач першого рівня	133
3.3.2. Математичні методи кількісного аналізу СФС другого рівня	134
3.3.3. Методи якісного аналізу СФС другого і третього рівнів	138
3.3.4. Прийняття рішень, що забезпечують цілеспрямовану поведінку СФС (4-й рівень задач)	140
Висновки	140
Розділ 4. Розкриття невизначеностей у задачах системного аналізу	142
4.1. Задачі та методи розкриття невизначеності цілей	143
4.1.1. Розкриття невизначеності цілей на підставі принципу Парето	143
4.1.2. Метод лінійної згортки	146
4.1.3. Метод технічних обмежень	147
4.1.4. Метод послідовного розкриття невизначеності цілей	151
4.1.5. Розкриття невизначеності цілей зведенням вихідної задачі до системи рівнянь	153
4.2. Розкриття ситуаційної невизначеності	158
4.3. Розкриття невизначеності в задачах взаємодії	161
4.3.1. Задача взаємодії двох партнерів	161
4.3.2. Задача взаємодії кількох партнерів	164
4.4. Розкриття невизначеності у задачах конфлікту стратегій	166
4.4.1. Задача розкриття невизначеності протидії двох супротивників	167
4.4.2. Оцінювання ступеня і рівня ризику під час розкриття невизначеності дій протидіючих сторін	169
4.4.3. Розкриття невизначеності поведінки протидіючих сторін на базі інтервального принципу	170
4.5. Задачі і методи розкриття системної невизначеності	175
4.5.1. Змістовне формулювання задачі	175
4.5.2. Математична постановка задачі	176
4.5.3. Розв'язання задачі розкриття системної невизначеності	177
Висновки	184
Розділ 5. Пошук раціонального компромісу в задачах розкриття концептуальної невизначеності	186
5.1. Відтворення функціональних залежностей у задачах розкриття концептуальної невизначеності	186
5.1.1. Поняття концептуальної невизначеності	187
5.1.2. Вибір класу і структури функцій наближення	188
5.1.3. Задача формування функцій наближення	188
5.1.4. Формування функцій наближення у вигляді ієрархічної багаторівневої системи моделей	189

5.2. Приклади відтворення функціональних закономірностей за дискретною вибіркою	195
5.2.1. Відтворення функціональних закономірностей в адитивній формі	195
5.2.2. Задача відтворення функцій у мультиплікативній формі за дискретною вибіркою	204
5.3. Системне узгодження суперечливих цілей у задачах пошуку раціональних компромісів	208
5.3.1. Математична постановка задачі	208
5.3.2. Системне узгодження вимог між зовнішніми і внутрішніми показниками виробу	210
5.3.3. Приклади пошуку раціональних компромісів	213
Висновки	217
Розділ 6. Розкриття невизначеностей у задачах взаємодії і протидії коаліцій	219
6.1. Математичне формулювання задачі	219
6.1.1. Специфіка та особливості об'єктів дослідження	219
6.1.2. Формалізований опис цілей у разі взаємодії коаліцій	221
6.1.3. Формалізований опис цілей у разі протидії коаліцій	224
6.2. Загальна стратегія розв'язання задач системної взаємодії або системної протидії коаліцій	226
6.2.1. Принципи практичних дій коаліцій	226
6.2.2. Принцип мінімізації ризику	227
6.2.3. Припущення та обмеження в задачах взаємодії і протидії коаліцій	229
6.3. Формалізація стратегії протидії коаліцій	231
6.3.1. Формалізація стратегії протидії двох коаліцій	231
6.3.2. Групи факторів ризику	234
6.3.3. Формалізація ризиків у задачах системної взаємодії або системної протидії коаліцій	237
6.4. Методи розв'язання задач протидії коаліцій	241
6.4.1. Характерні особливості задач протидії коаліцій	241
6.4.2. Розв'язання задач протидії коаліцій	243
6.5. Приклади розв'язування задач протидії коаліцій	249
6.5.1. Розв'язування задачі конкуренції корпорацій в умовах електронної комерції	249
6.5.2. Оцінювання впливу факторів ризику на значення цільових функцій коаліцій	258
Висновки	262
Розділ 7. Інформаційний аналіз системних задач	263
7.1. Аналіз кількісних та якісних характеристик інформації	263
7.1.1. Основні цілі й задачі інформаційного аналізу	263
7.1.2. Формування поняття «інформація»	264
7.1.3. Деякі відомості з теорії інформації	265
7.1.4. Якісні властивості інформації	267
7.2. Формалізація характеристик і показників інформованості ОПР	269
7.2.1. Формалізація показника повноти інформованості	269
7.2.2. Формалізація показника своєчасності інформованості	271
7.2.3. Класифікація множини ситуацій за показником своєчасності інформованості	274
7.2.4. Формалізація показника достовірності інформованості	275
7.2.5. Класифікація множини ситуацій за показниками повноти і достовірності інформованості	277
7.3. Класифікація і розпізнавання ситуацій за інтегральними і частковими показниками інформованості ОПР	279
7.3.1. Властивості та особливості інтегрального показника інформованості	279
7.3.2. Класифікація множини ситуацій за інтегральним показником інформованості	284
7.3.3. Класифікація множини ситуацій за сукупністю часткових показників інформованості	285
7.4. Розпізнавання ситуацій за умов нечіткої інформації	287
7.4.1. Математичні формулювання задач розпізнавання ситуацій	287
7.4.2. Розв'язання задач розпізнавання ситуацій за умов неповноти і нечіткості інформації	288

7.5. Приклади задач розпізнавання критичних і катастрофічних ситуацій у разі зміни характеристик інформованості ОПР	298
7.5.1. Визначення допустимого періоду часу на формування і реалізацію рішення, що запобігає катастрофічній ситуації	299
7.5.2. Класифікація і розпізнавання рівня небезпеки критичних ситуацій	302
Висновки	304
Розділ 8. Структурно-функціональний аналіз складних ієрархічних систем	305
8.1. Основні властивості та особливості складних ієрархічних систем	305
8.1.1. Особливості задач організованої складності	306
8.1.2. Основні властивості та особливості складних ієрархічних систем	306
8.1.3. Функціональні та конструктивно-технологічні властивості різних типів і видів систем	308
8.1.4. Обмеження і припущення задач системного аналізу складної ієрархічної системи	309
8.1.5. Змістовне формулювання загальної задачі системного аналізу СБІС	311
8.2. Формалізація задачі структурно-функціонального аналізу	311
8.2.1. Структуризація і формалізований опис властивостей системи та вимог до неї	312
8.2.2. Формалізований опис задачі	314
8.3. Загальна стратегія розв'язання задачі структурно-функціонального аналізу	316
8.3.1. Властивості та особливості задач СФА	316
8.3.2. Прийоми і підходи до розв'язання задач СФА	317
8.3.3. Структура узагальненого алгоритму СФА	319
8.3.4. Приклади процедур вибору ФЕ різних рівнів і визначення їх параметрів	323
8.4. Системна оптимізація складних конструктивних елементів сучасної техніки	329
8.4.1. Системна структурна оптимізація складних об'єктів	329
8.4.2. Вибір раціональної кількості ієрархічних рівнів	330
8.4.3. Формування раціональних вимог до функціональних елементів ієрархічної структури	331
8.4.4. Цілеспрямований вибір раціональної ієрархічної структури	332
8.4.5. Системна параметрична оптимізація	333
8.4.6. Алгоритм розв'язання задачі параметричної оптимізації	336
8.5. Приклади розв'язання задач структурної оптимізації	337
8.5.1. Вибір раціональної структури мобільного телефону	337
8.5.2. Вибір раціональної структури вітрової турбіни	340
Висновки	344
Розділ 9. Задачі і методи системного аналізу багатофакторних ризиків	346
9.1. Розробка методології забезпечення безпеки складних систем	346
9.1.1. Загальна задача системного аналізу багатофакторних ризиків	347
9.1.2. Декомпозиція загальної задачі аналізу багатофакторних ризиків у послідовність системно узгоджених задач	349
9.2. Властивості та особливості функціонування складних технічних систем в умовах багатофакторних ризиків	356
9.3. Аналіз багатофакторних ризиків виникнення аварій і катастроф	361
9.3.1. Основні поняття аварій і катастроф	361
9.3.2. Аксиома ситуацій ризику	362
9.3.3. Особливості процесів формування позаштатного режиму	363
9.4. Основні принципи та особливості управління безпекою складних систем	366
9.4.1. Гіпотеза про режим функціонування складної системи	367
9.4.2. Принципи формування і реалізації гарантованої безпеки складних систем	370
9.5. Основи стратегії гарантованої безпеки	370
9.5.1. Основні підходи і принципи	371
9.5.2. Системний аналіз властивостей та особливостей задач багатофакторних ризиків	374
9.6. Приклади розв'язання задач системного аналізу багатофакторних ризиків	375
Висновки	384

Розділ 10. Системне управління складними об'єктами	385
10.1. Аналіз і класифікація задач системного управління	385
10.1.1. Особливості задач системного управління	385
10.1.2. Види управління складними системами	387
10.1.3. Задачі оптимального управління складними об'єктами	390
10.2. Задачі системного управління працездатністю і безпекою складних об'єктів	393
10.2.1. Системна узгодженість управління працездатністю і безпекою складних об'єктів	394
10.2.2. Математична постановка задачі системного управління складними об'єктами	395
10.2.3. Стратегія розв'язання задачі системного управління складними об'єктами	396
10.3. Задачі системного управління структурою і властивостями складних об'єктів	403
10.3.1. Особливості задач управління структурою і властивостями складних об'єктів	403
10.3.2. Задача раціонального управління складною ієрархічною системою	405
10.4. Техніко-економічний аналіз системного управління складними об'єктами	410
10.5. Приклад розв'язання задачі системного управління працездатністю і безпекою авіаційного двигуна	415
Висновки	424
Розділ 11. Системна методологія передбачення	427
11.1. Актуальність і мета передбачення	427
11.1.1. Сфери застосування методів прогнозування та передбачення і принципи відмінності між ними	428
11.1.2. Передбачення як фундаментальний інструмент технологічного розвитку	430
11.1.3. Приклади регіональних і національних програм технологічного передбачення	430
11.2. Сценарний аналіз як методологічна основа передбачення	434
11.2.1. Складна система з людським фактором як об'єкт передбачення	435
11.2.2. Структурно-логічна схема та основні етапи сценарного аналізу	436
11.2.3. Попереднє вивчення проблеми з використанням методів сканування і мозкового штурму	438
11.2.4. Методи якісного аналізу в задачах передбачення	439
11.2.5. Написання сценаріїв як третій етап передбачення	443
11.2.6. Вивчення сценаріїв і надання їх групі ОПР	443
11.3. Загальна процедура експертного оцінювання в задачах передбачення	446
11.3.1. Змістовне і математичне формулювання задачі	446
11.3.2. Метод розв'язання задачі експертного оцінювання	448
11.4. Інформаційна платформа сценарного аналізу	450
11.4.1. Системне застосування творчих якостей людини та об'єктивних знань у задачах передбачення	450
11.4.2. Інформаційна платформа сценарного аналізу як інструмент передбачення	452
11.4.3. Рівні ієрархії ІПСА	454
11.5. Технологічне передбачення в інноваційній діяльності	455
11.5.1. Економічні та соціальні фактори використання передбачення в інноваційній діяльності	456
11.5.2. Національна і регіональна системи інноваційного розвитку в ринковій економіці	457
11.5.3. Експертні процедури в інноваційній діяльності	460
11.5.4. Основні принципи організації експертизи в інноваційних системах	463
11.6. Приклад розв'язання задачі передбачення для багатокритерійного оцінювання інноваційних об'єктів	464
11.6.1. Мета розв'язання задачі, її постановка та опис	465
11.6.2. Процедура багатокритерійного оцінювання інноваційних об'єктів	467
11.6.3. Математична та обчислювальна реалізація процедури багатокритерійного оцінювання	470
11.6.4. Аналіз результатів розв'язання задач	477
Висновки	483
Додаток	485
Література	517
Алфавітний покажчик	532

Contents in Brief

Introduction	15
Chapter 1. The Subject Domain of System Analysis	19
Chapter 2. Basic Notions of System Analysis	64
Chapter 3. Formalizability of System Analysis Problems	121
Chapter 4. Disclosing Uncertainties in System Analysis Problems	142
Chapter 5. Searching for Rational Compromise in Problems of Conceptual Uncertainty Disclosing	186
Chapter 6. Disclosing Uncertainties in Problems of Interaction and Counteraction of Coalitions	219
Chapter 7. Information Analysis of System Problems	263
Chapter 8. Structural-Functional Analysis of Complex Hierarchical Systems	305
Chapter 9. Problems and Methods of System Analysis of Multifactor Risks	346
Chapter 10. System Control of Complex Objects	385
Chapter 11. Foresight System Methodology	427
Appendix	485
Bibliography	517
Index	532

Contents

Introduction	15
Chapter 1. The Subject Domain of System Analysis	19
1.1 Formation and Development of System Analysis	19
1.1.1 Main Peculiarities of System Thinking Development	20
1.1.2 The Role of the Fundamental Achievements in System Perception of the World	23
1.2 Stages in the Development of System Analysis as an Applied Scientific Methodology	24
1.2.1 Forming of Theoretical Basis of System Analysis Conceptual Paradigm	25
1.2.2 Empirical Formation of System Analysis	27
1.2.3 Development of the Scientific Basis for Design and Development of Complex Systems	29
1.2.4 System Analysis in the Period of World Processes and Problems Globalization	34
1.3 The Role of World Processes Globalization in Development of System Research	37
1.3.1 Peculiarities of the transition from the industrial to the informational society in the period of globalization	37
1.3.2 Redistribution of the Labor Force in Main Types of Societies	38
1.4 Systemness of Human Practical Activity	41
1.4.1 Formation and Development of the Systemness of Human Practical Activity	41
1.4.2 The Systemness of Innovation Activity	44
1.5 System Analysis as a Universal Scientific Methodology	52
1.5.1 Role and Place of System Analyst in Solving Complex Problems	52
1.5.2 System Analysis as an Applied Scientific Methodology	56
Summary	61
Chapter 2. Basic Notions of System Analysis	64
2.1 Objects of System Analysis	64
2.1.1 Material and Abstract Objects	65
2.1.2 Complex System as an Object of Investigation	67
2.1.3 Complex Hierarchical Systems	70
2.2 Properties and Principles of System Methodology	76
2.2.1 The Notion of System Problem	76
2.2.2 Properties and Features of System Problems	78
2.2.3 Methods of Investigating Systems	83
2.2.4 Fundamental Properties and Principles of System Methodology	85
2.2.5 Heuristic Hypotheses of System Methodology	86
2.3 Classification of System Analysis Problems and Procedures	89
2.3.1 Conceptual Functional Spaces of Conditions and Properties of Complex Systems	90
2.3.2 Classification of System Analysis Procedures	93
2.4 Notion of Complexity of System Problems, Complexity Spectrums, Transcomputational Complexity	99
2.4.1 Notion of Complexity from the point of view of System Methodology	99
2.4.2 Complexity Spectrums of System Problems	102
2.4.3 Notion of Transcomputational complexity	105
2.5 Principles of Overcoming the Transcomputational Complexity of System Problems	110
2.5.1 Principle of Rationality	111
2.5.2 Techniques for Solving Transcomputational Complexity Problems	114
Summary	119

Chapter 3. Formalizability of System Analysis Problems	121
3.1 Characteristics of Formalizable Problems of System Analysis	121
3.1.1 Different Principle on Which System Analysis Problems Are Based	121
3.1.2 Basic Definitions	122
3.1.3 Properties and Features of Complex Formalizable Systems	123
3.1.4 Ecological-Economical System of Industrial Region as an Example of CFS	124
3.2 Characteristics of Levels of Problems Which Are Being Solved at the Time of System Research of Complex Formalizable Systems	127
3.2.1 Problems of the First Level of CFS	128
3.2.2 Problems of the Second Level of CFS	128
3.2.3 Problems of the Third Level of CFS	130
3.2.4 Problems of the Fourth Level of CFS	131
3.3 Methods and Tools of System Analysis for Investigating Complex Formalizable Problems	131
3.3.1 Methods and Tools of Processing In-Situ Measurements for Problems of the First Level	133
3.3.2 Mathematical Methods of Quantitative Analysis of CFS of the Second Level	134
3.3.3 Methods of Qualitative Analysis of SCF of the Third and the Fourth Levels	138
3.3.4 Making Decisions That Provide Goal-Seeking Behavior of CFS	140
Summary	140
Chapter 4. Disclosing Uncertainties in System Analysis Problems	142
4.1 Problems and Methods of Disclosing Goal Uncertainty	143
4.1.1 Disclosing Goal Uncertainty Based on the Pareto Principle	143
4.1.2 Method of Linear Convolution	146
4.1.3 Method of Technical Restrictions	147
4.1.4 Method of Consecutive Disclosing of Goal Uncertainty	151
4.1.5 Disclosing Goal Uncertainty by Reducing Initial Problem to the System of Equations	153
4.2 Disclosing Situation Uncertainty	158
4.3 Disclosing Uncertainty in Problems of Interactions	161
4.3.1 Problem of Two Partners Interaction	161
4.3.2 Problem of Multiple Partners Interaction	164
4.4 Disclosing Uncertainty in Problems of Strategies Conflict	166
4.4.1 Problem of Disclosing Uncertainty of Two Competitors Counteraction	167
4.4.2 Estimation of Risk Degree and Level at the Time of Disclosing Uncertainty of Actions for Two Counteracting Parties	169
4.4.3 Disclosing Uncertainty of Actions for Counteracting Parties Based on Interval Principle	170
4.5 Problems and Methods of System Uncertainty Disclosing	175
4.5.1 Contensive Statement of the Problem	175
4.5.2 Mathematical Statement of the Problem	176
4.5.3 Solving the Problem of System Uncertainty Disclosing	177
Summary	184
Chapter 5. Searching for Rational Compromise in Problems of Conceptual Uncertainty Disclosing	186
5.1 Recovering Functional Dependencies in Problems of Conceptual Uncertainty Disclosing	186
5.1.1 The Notion of Conceptual Uncertainty	187
5.1.2 Choice of Class and Structure of the Approximating Functions	188
5.1.3 Problem of Forming Approximating Functions	188
5.1.4 Forming Approximating Functions in the Form of a Multilevel Hierarchical System of Models	189
5.2 Examples of Recovering Functional Dependencies on a Discrete Sample	195
5.2.1 Recovering Functional Dependencies in Additive Form	195
5.2.2 Problem of Recovering Functional Dependencies on a Discrete Sample in Multiplicative Form	204

5.3 System Coordination of Contradictory Goals in Problems of Searching for Rational Compromises	208
5.3.1 Mathematical Statement of the Problem	208
5.3.2 System Coordination of Requirements between External and Internal Indicators of a Product	210
5.3.3 Examples of Searching for Rational Compromises	213
Summary	217
Chapter 6. Disclosing Uncertainties in Problems of Interaction and Counteraction of Coalitions	219
6.1 Mathematical Statement of the Problem	219
6.1.1 Specific Character and Features of Objects under Investigation	219
6.1.2 Formalized Description of Goals in the Case of Coalitions Interaction	221
6.1.3 Formalized Description of Goals in the Case of Coalitions Counteraction	224
6.2 General Strategy for Solving Problems of System Interaction or System Counteraction of Coalitions	226
6.2.1 Principles of Coalitions' Practical Actions	226
6.2.2 Principle of Risk Minimization	227
6.2.3 Assumptions and Restrictions in Problems of Coalitions Interaction and Counteraction	229
6.3 Formalization of Coalitions Counteraction Strategies	231
6.3.1 Formalization of the Two Coalitions Counteraction Strategy	231
6.3.2 Groups of Risk Factors	234
6.3.3 Formalization of Risks in Problems of System Interaction or System Counteraction of Coalitions	237
6.4 Methods of Solving Problems of Coalitions Counteraction	241
6.4.1 Characteristics of the Problem of Coalitions Counteraction	241
6.4.2 Solving Problems of Coalitions Counteraction	243
6.5 Examples of Solving Problems of Coalitions Counteraction	249
6.5.1 Solving the Problem of Corporations Competition in Conditions of Electronic Commerce	249
6.5.2 Estimating the Risk Factors Influence on the Value of Coalitions Objective Functions	258
Summary	262
Chapter 7. Information Analysis of System Problems	263
7.1 Analysis of Quantitative and Qualitative Properties of Information	263
7.1.1 Main Goals and Problems of Information Analysis	263
7.1.2 Forming the Notion of Information	264
7.1.3 Some Knowledge on the Theory of Information	265
7.1.4 Qualitative Properties of Information	267
7.2 Formalization of Characteristics and Indicators of a Decision Maker's Informedness	269
7.2.1 Formalization of the Informedness Completeness Indicator	269
7.2.2 Formalization of the Informedness Timeliness Indicator	271
7.2.3 Classification of Situations by the Informedness Timeliness Indicator	274
7.2.4 Formalization of the Informedness Credibility Indicator	275
7.2.5 Classification of Situations by Indicators of Informedness Timeliness and Credibility	277
7.3 Situations Classification and Recognition by Integral and Partial Indicators of Decision Maker's Informedness	279
7.3.1 Properties and Features of the Integral Informedness Indicator	279
7.3.2 Classification of Situations by the Integral Informedness Indicator	284
7.3.3 Classification of Situations by the Totality of Partial Informedness Indicators	285
7.4 Recognizing Situations in Conditions of Fuzzy Information	287
7.4.1 Mathematical Statement of the Situations Recognition Problem	287
7.4.2 Solving Problems of Situations Recognition in Conditions of Information Incompleteness and Fuzziness	288

7.5 Examples of Solving Problems of Catastrophic Situations Recognition in the Case of Decision Maker's Informedness Indicators Changing	298
7.5.1 Examples of Problems of Critical and Catastrophic Situations Recognition in Conditions of Decision Maker's Informedness Indicators Changing in Time	299
7.5.2 Classification and Recognition of the Level of Unsafeness of Critical Situations	302
Summary	304
Chapter 8. Structural-Functional Analysis of Complex Hierarchical Systems	305
8.1 Basic Properties and Features of Complex Hierarchical Systems	305
8.1.1 Features of Organized Complexity Problems	306
8.1.2 Basic properties and Features of Complex Hierarchical Systems	306
8.1.3 Functional and Constructive-Technological Properties of Various Types of Systems	308
8.1.4 Restrictions and Assumptions for Problems of System Analysis of Complex Hierarchical System	309
8.1.5 Contensive Statement of the General Problem of System Analysis of VLSI	311
8.2 Formalization of the Problem of Structural-Functional Analysis	311
8.2.1 Structuring and Formalized Description of System Properties and Requirements	312
8.2.2 Formalized Description of the Problem	314
8.3 General Strategy for Solving the Problem of Structural-Functional Analysis	316
8.3.1 Properties and Features of the SFA Problems	316
8.3.2 Techniques and Approaches to Solving Problems of SFA	317
8.3.3 Structure of the Generalized SFA Algorithm	319
8.3.4 Examples of Procedures for Choosing Functional Elements and Determining Their Parameters	323
8.4 System Optimization of Complex Constructive Elements of Modern Equipment	329
8.4.1 System Structural Optimization of Complex Objects	329
8.4.2 Choosing Rational Amount of Hierarchical Levels	330
8.4.3 Forming Rational Requirements to Functional Elements of a Hierarchical Structure	331
8.4.4 Purposeful Choice of a rational Hierarchical Structure	332
8.4.5 System Parametric Optimization	333
8.4.6 Algorithm for Solving problems of Parametrical Optimization	336
8.5 Examples of Solving Problems of Structural Optimization	337
8.5.1 Choice of a Rational Structure of a Mobile Phone	337
8.5.2 Choice of a Rational Structure of a Wind Turbine	340
Summary	344
Chapter 9. Problems and Methods of System Analysis of Multifactor Risks	346
9.1 Development of a Methodology for Providing Safety of Complex Systems	346
9.1.1 General Problem of System Analysis of Multifactor Risks	347
9.1.2 Decomposition of the General Problem of System Analysis of Multifactor Risks into the Sequence of Systemically Coordinated Problems	349
9.2 Properties and Features of Complex Engineering Systems Functioning in Conditions of Multifactor Risks	356
9.3 Analysis of Multifactor Risks of Occurrence of Accidents and Catastrophes	361
9.3.1 Basic Notions of Accidents and Catastrophes	361
9.3.2 Axiom of Risk Situations	362
9.3.3 Characteristics of Abnormal Mode Processes Formation	363
9.4 Basic Principles and Features of Complex Systems Safety Control	366
9.4.1 Hypotheses about the Mode of a Complex System	367
9.4.2 Principles of Formation and Realization of the Guaranteed Safety of Complex Systems	370
9.5 Foundations of the Strategy for Guaranteed Safety	370
9.5.1 Basic Approaches and Principles	371
9.5.2 System Analysis of Properties and Features of Multifactor Risks Problems	374
9.6 Examples of Solving Problems of System Analysis of Multifactor Risks	375
Summary	384

Chapter 10. System Control of Complex Objects	385
10.1 Analysis and Classification of System Control Problems	385
10.1.1 Properties of System Control Problems	385
10.1.2 Types of Complex Objects Control	387
10.1.3 Problems of Optimal Control of Complex Objects	390
10.2 Problems of System Control of Complex Objects Serviceability and Safety	393
10.2.1 System Coordinateness of Control of Complex Objects Serviceability and Safety	394
10.2.2 Mathematical Statement of the Problem of System Control of Complex Objects	395
10.2.3 Strategy for Solving the Problem of System Control of Complex Objects	396
10.3 Problems of System Control of Structure and Properties of Complex Objects	403
10.3.1 Properties of Problems of System Control of Structure and Properties of Complex Objects	403
10.3.2 Problem of a Rational Control of Complex Hierarchical System	405
10.4 Technical-Economical Analysis of System Control of Complex Objects	410
10.5 Example of Solving the Problem of System Control of Serviceability and Safety of the Aviation Engine	415
Summary	424
Chapter 11. Foresight System Methodology	427
11.1 Foresight Importance and Objectives	427
11.1.1 Range of Application of Forecast and Foresight Methods and Differences between Them	428
11.1.2 Foresight as a Fundamental Tool for Technological Development	430
11.1.3 Examples of Regional and National Programs of Technology Foresight	430
11.2 Scenario Analysis as a Basic Foresight Methodology	434
11.2.1 Complex System with a Human Factor as an Object of Foresight	435
11.2.2 Structural Logical Scheme and Main Stages of Technology Foresight	436
11.2.3 Preliminary Examination of the Problem Using Scanning and Brainstorming Methods	438
11.2.4 Methods of Qualitative Analysis in Foresight Problems	439
11.2.5 Scenarios Writing as the Third Stage of Foresight	443
11.2.6 Scenarios Examination and Submission to a Group of Experts	443
11.3 General Procedure of Expert Estimation in Foresight Problems	446
11.3.1 Contentive and Mathematical Statement of the Problem	446
11.3.2 Method of Solving the Problem of Expert Estimation	448
11.4 Scenario Analysis Information Platform	450
11.4.1 System Utilization of Human's Creative Abilities and Objective Knowledge in Problems of Foresight	450
11.4.2 Scenario Analysis Information Platform as the Tool of Foresight	452
11.4.3 SAIP Hierarchical Levels	454
11.5 Technology Foresight in Innovation Activity	455
11.5.1 Economical and Social Factors of Foresight Application in Innovation Activity	456
11.5.2 National and Regional Systems of Innovation Development in Market Economy	457
11.5.3 Expert Procedures in the Innovation Activity	460
11.5.4 Basic Principles of Organizing Expert Evaluations in Innovation Systems	463
11.6 Example of Solving the Problem of Foresight for Innovation Objects Estimation	464
11.6.1 Purpose of Solving the Problem, its Statement and Description	465
11.6.2 Procedure of Multicriterion Estimation of Innovation Objects	467
11.6.3 Mathematical and Computational Realization of Multicriterion Estimation Procedure	470
11.6.4 Analyzing Results of Problems Solution	477
Summary	483
Appendix	485
Bibliography	517
Index	532

Передмова

Необхідність вивчення методології, освоєння теорії та практики системного аналізу зумовлена невпинно зростаючими потребами розв'язування складних міждисциплінарних задач для різних цілей і призначень. Ці потреби визначає не лише стрімкий розвиток світової глобалізації, високі темпи удосконалення науки і техніки, розвитку інноваційних та інших технологій різного призначення, але й умови постійного наростання загроз екологічних, техногенних, природних та інших катастроф. Ці умови й фактори зумовлюють оперативну актуальність і практичну необхідність підготовки фахівців, що володіють апаратом розв'язування складних системних задач своєчасного передбачення, об'єктивного прогнозування і системного аналізу як наявних соціально-економічних, науково-технічних та інших проблем, задач і ситуацій, так і можливих техногенних, екологічних, природних та інших аварій і катастроф. Слід особливо наголосити, що ефективність і достовірність своєчасного передбачення, об'єктивного прогнозування, системного аналізу різних альтернатив можливих складних розв'язків і стратегій дій у практичній діяльності багато в чому залежать від здатності системного дослідника своєчасно оволодіти і раціонально використовувати можливості методології системного аналізу.

Підручник складається зі вступу та 11 розділів.

У розділі 1 розглянуто властивості та особливості предметної області системного аналізу. З прагматичної точки зору відображено етапи становлення і розвитку системного аналізу як прикладної наукової методології. Перший етап становлення системного аналізу припадає на першу половину XX століття і є періодом формулювання основних ідей системного мислення, а також формування теоретичних засад концептуальної парадигми системного аналізу. Другий етап формувався в 30-40-ві роки XX століття і є етапом емпіричного розвитку системного аналізу. Третій етап формувався в умовах післявоєнного часу. Його особливістю є синхронний розвиток теорії системного аналізу і практики системних досліджень. Четвертий етап — це сучасний період розвитку системної методології. Найважливішими його особливостями є швидке за темпами і значне за обсягом наростання різнотипних глобалізацій світових процесів. Визначальним принципом системних досліджень цього періоду стає глобальне бачення досліджуваних проблем з урахуванням зрослих взаємозв'язків і взаємозалежностей усіх країн та народів світу.

Визначено роль і показано місце системного аналітика у розв'язуванні загальної задачі системного аналізу для реальних систем різного призначення. Обґрунтовано роль і місце системного аналізу в науці та практиці і його взаємозв'язок з іншими фундаментальними дисциплінами. Встановлено принципи відмінності системного аналізу як наукової методології від аксіоматичних дисциплін.

У розділі 2 викладено основні поняття, аксіоми та означення системного аналізу. Дано коротку характеристику основних об'єктів системного аналізу: матеріальних і абстрактних, природних та штучних, активних і пасивних. Введено базові формулювання для типових об'єктів системного аналізу: системи, складної системи, великої системи, суперсистеми, глобальної системи. Розглянуто приклади різних систем. Дано змістовне формулювання загальної задачі системного аналізу. Наведено фундаментальні принципи, яких необхідно дотримуватись у формуванні системної методології

та її практичній реалізації. Введено концептуальні функціональні простори для умов і властивостей функціонування складної системи, які базуються на особливостях процедур розкриття невизначеностей різної природи цілеспрямованого аналізу складних систем. Дано поняття складності як фундаментальної властивості задач системного аналізу. Розглянуто різні види складності. Запропоновано принципи та прийоми розв'язування задач трансобчислювальної складності в рамках загальної проблеми системного аналізу.

У розділі 3 наведено загальну характеристику властивостей та особливостей різних класів формалізованих задач системного аналізу. Дано поняття формалізованих і формалізованих задач системного аналізу. Складні формалізовані системи показано як об'єкти дослідження системного аналізу. Наведено характеристику рівнів задач, розв'язуваних під час дослідження складних формалізованих систем.

На цих рівнях формалізовану систему вивчають як об'єкт системного аналізу і на цій підставі розв'язують задачі збирання, обробки та оцінювання інформації про систему, а також оперативного і технологічного впливу на процеси одержання інформації та процеси впливу на систему. Потім розв'язують задачі якісного та кількісного аналізу і підготовки до прийняття рішень щодо цілеспрямованої зміни поведінки формалізованої системи, а також керування системою натурних випробувань. А також розв'язують повний комплекс задач, які забезпечують прийняття рішень ОПР на підставі даних, знань і експертних оцінок, одержаних на попередніх рівнях.

У розділі 4 сформульовано задачі розкриття невизначеностей цілей, ситуацій і конфліктів. Описано методи розкриття невизначеностей цілей: лінійної згортки, використання технічних обмежень, зведення до системи нелінійних рівнянь, зведення до чебишевської задачі наближення. Дано поняття раціонального компромісу Парето. Наведено методи і прийоми відшукування множини Парето. Розглянуто задачі і методи розкриття природної та ситуаційної невизначеностей: розкриття невизначеностей за відомих характеристик випадкових факторів; розкриття невизначеностей у разі неповної інформації про випадкові фактори. Розглянуто задачі і методи розкриття невизначеності в конфліктних ситуаціях: задачу розкриття невизначеності активної взаємодії партнерів і задачу протидії супротивників, задачу багатоцільової взаємодії партнерів за умов ситуаційної невизначеності, задачу багатоцільової активної протидії супротивників за умов ситуаційної невизначеності.

Розділ 5 присвячено пошуку раціонального компромісу в задачах розкриття концептуальної невизначеності. Дано поняття раціонального компромісу за умов концептуальної невизначеності. Запропоновано підхід до відтворення функціональних залежностей у задачах розкриття концептуальної невизначеності. Ця задача відрізняється принциповою складністю від типової задачі відтворення функціональної залежності, що зумовлено не тільки різномірністю вихідної інформації, але й різномірністю властивостей розглянутих груп факторів. Для подолання трансобчислювальної складності запропоновано формувати функції наближення у вигляді ієрархічної багаторівневої системи моделей. Наведено підхід до системного узгодження суперечливих цілей у задачах пошуку раціональних компромісів. Подано методи і прийоми формування множини Парето за умов концептуальної невизначеності. Розв'язано практичні задачі на основі методології відтворення функціональних закономірностей і формування множини Парето за умов концептуальної невизначеності.

У розділі 6 розглянуто проблеми розкриття системних невизначеностей у задачах взаємодії і протидії коаліцій. Викладено основні поняття, прийоми та принципи сис-

темного аналізу активної взаємодії партнерів, протидії суб'єктів-конкурентів. Дано математичне формулювання задач у випадках активної взаємодії партнерів і протидії конкурентів у коаліціях, задачі розкриття невизначеності системної взаємодії і протидії коаліцій з урахуванням різних груп факторів ризику. Наведено процедури формалізації цілей і стратегії взаємодії партнерів, протидії суб'єктів-конкурентів, взаємодії та протидії коаліцій. Подано приклади розв'язування задач взаємодії і протидії коаліцій з урахуванням факторів ризику.

Розділ 7 присвячено розв'язуванню задач інформаційного забезпечення практичних задач системного аналізу. Показано, що для цього класу задач недостатньо тільки кількісного опису інформації, прийнятого в теорії інформації та суміжних дисциплінах. Обґрунтовано, що за реальних умов наявності невизначеностей і ризиків є практична необхідність опису та оцінювання якісних характеристик інформації під час формалізації практичних задач системного аналізу. Введено поняття, означення і формалізації якісних показників інформованості ОПР: повноти, достовірності та своєчасності. Запропоновано метод розв'язування задачі класифікації і розпізнавання ситуацій за інтегральним показником і за частковими показниками інформованості. Вивчено задачі розпізнавання ситуації за умов нечіткості інформації та зміни показників інформованості. Продемонстровано розв'язування задачі розпізнавання та запобігання критичним і катастрофічним ситуаціям у разі зміни характеристик інформованості ОПР.

У розділі 8 розглянуто питання, пов'язані з побудовою структури і функцій складних багаторівневих ієрархічних систем. Наведено принципи та прийоми структуризації формалізованого опису властивостей, структури і функцій такого класу систем. Дано математичне формулювання задачі системного аналізу складної багаторівневої ієрархічної системи, запропоновано загальну стратегію її розв'язання і структуру узагальненого алгоритму структурно-функціонального аналізу. Наведено математичне формулювання задачі вибору структури і функціональних елементів складної багаторівневої ієрархічної системи, а також запропоновано метод і проаналізовано прийоми та процедури її розв'язання.

Запропоновано підхід до розв'язування задачі системної структурної оптимізації складних конструктивних елементів сучасної техніки, що ґрунтується на цілеспрямованому виборі функціональних елементів кожного ієрархічного рівня. Показано розв'язування задачі системної параметричної оптимізації, яка дає змогу знайти раціональний компроміс суперечливих вимог до міцності, надійності, технологічності, техніко-економічної ефективності конструкції. Наведено практичні приклади розв'язування задач для зазначеного класу систем.

У розділі 9 викладено основні поняття, прийоми та принципи системного аналізу багатофакторних ризиків за умов невизначеності. Запропоновано загальне формулювання задачі системного аналізу багатофакторних ризиків. З використанням прийому декомпозиції цю задачу зображено у вигляді системно узгодженої за цілями, термінами та очікуваними результатами послідовності задач. Розглянуто підхід до формування концептуальних основ методології системного аналізу і прогнозування ризиків для задач керування безпекою складних технічних систем. Запропоновано новий принцип своєчасного виявлення та усунення причин можливого переходу об'єкта з працездатного стану в непрацездатний на основі системного аналізу багатофакторних ризиків нештатних ситуацій, достовірного оцінювання ресурсів допустимого ризику різних режимів функціонування складного технічного об'єкта і прогнозування основних показників живучості об'єкта упродовж заданого терміну його експлуатації.

Запропоновано апарат системно узгодженого розв'язання задач виявлення, розпізнавання, прогнозування та мінімізації ризиків нештатних, критичних, надзвичайних ситуацій, аварій і катастроф. Можливості методів та прийомів продемонстровано на прикладах розв'язування задач класифікації, розпізнавання і ранжування ситуацій ризику.

Розділ 10 присвячено проблемам системного узгодженого керування працездатністю і безпекою складних ієрархічних систем у реальних умовах їхнього функціонування, які характеризуються наявністю невизначеностей і ризиків. Запропоновано основні принципи розв'язування задач системного керування за умов невизначеностей і ризиків. Проаналізовано основні функціональні властивості системного керування: керованість, адаптивність, стійкість, координованість, живучість, ефективність. Розглянуто задачі системного керування, що включають такі процеси, як перетворення властивостей, структури, розвитку, призначення певних перспективних або неперспективних видів практичної діяльності, а також формування і прийняття рішень щодо оцінювання, планування і реалізації нових перспективних напрямів. Сформульовано загальну задачу керування складною багаторівневою ієрархічною системою за умов багатофакторних ризиків і запропоновано стратегію її розв'язання. Показано розв'язування задачі керування безпекою і функціонуванням складної технічної системи в процесі переходу штатного режиму в нештатний на прикладі авіаційного двигуна.

Наведено техніко-економічний аналіз функціонування складної багаторівневої ієрархічної системи за умов багатофакторних ризиків, у рамках якого розглянуто різні аспекти аналізу та оцінювання техніко-економічної ефективності складних систем різної природи.

У розділі 11 систематизовано й уніфіковано найефективніші практичні прийоми та методи розв'язування задач технологічного передбачення. Наведено приклади регіональних і національних програм технологічного передбачення. Обґрунтовано місце і роль експертного оцінювання в методології передбачення, створення сценарного аналізу як основи передбачення. Запропоновано методологічні та математичні принципи передбачення, методи і прийоми розробки та реалізації його стратегії, які відкривають нові можливості підвищення ефективності інноваційної діяльності. Для побудови сценаріїв майбутнього розроблено інструментарій у вигляді людино-машинної інформаційної платформи сценарного аналізу, що дає змогу підвищити оперативність прийняття і реалізації стратегічно важливих рішень у процесі керування інноваційним розвитком підприємств і галузей промисловості.

У всіх розділах наведено запитання для контролю знань і варіанти завдань для самопідготовки.

Книга буде корисна для аспірантів та студентів, а також науковців і практиків, які спеціалізуються в галузі системних досліджень, аналізу складних міждисциплінарних проблем різної природи.

Від видавництва

Свої зауваження, пропозиції та запитання надсилайте за адресою електронної пошти pg@bhv.kiev.ua, а також залишайте на сайті <http://www.osvita.info>. На цьому ж сайті можна отримати детальну інформацію про видання серії «Інформатика» для вищих навчальних закладів.

Інформацію про всі книжки Видавничої групи BHV ви знайдете на сайті <http://www.bhv.kiev.ua>.

Розділ 1

Предметна область системного аналізу

- ♦ Становлення і розвиток системного аналізу
- ♦ Основні властивості та особливості розвитку системного мислення
- ♦ Роль фундаментальних відкриттів у системному сприйнятті світу
- ♦ Етапи розвитку системного аналізу як прикладної наукової методології
- ♦ Роль глобалізації світових процесів у розвитку інформаційного суспільства
- ♦ Становлення і розвиток системності практичної діяльності людини
- ♦ Системний аналіз як універсальна прикладна наукова методологія

У процесі вивчення системного аналізу важливо передусім проаналізувати причини і фактори, що зумовили можливість його становлення й розвитку як універсальної наукової методології, зрозуміти роль і місце системного аналізу в сучасних галузях наукових знань, у різних сферах практичної діяльності, а також виявити міру його впливу на розвиток суспільства.

Необхідність такого підходу обумовлена видатними досягненнями ХХ століття, зокрема освоєнням космосу; розробкою й масовим впровадженням обчислювальної техніки, інформаційних технологій і світової мережі Інтернет; швидким розвитком і широким застосуванням авіації; дослідженням ядерних процесів, освоєнням і розвитком атомної енергетики. Стрімкий розвиток наукомістких технологій і технічного оснащення в різних галузях виробництва й обслуговування, включаючи медицину, фармакологію, генну інженерію, низка інших найбільших досягнень науково-технічного прогресу увійшли в історію цивілізації як результат погодженої взаємодії науки, освіти і промисловості.

В усі ці досягнення зробили свій вагомий внесок різні науки, які охоплюють багато галузей знань і різні історичні періоди. Це були науки, що зародилися у Стародавньому світі, і науки, формування яких почалося лише у ХХ столітті. До останніх поряд з іншими новітніми напрямками, такими як кібернетика, дослідження операцій, загальна теорія систем, системотехніка, теорія прийняття рішень, теорія оптимізації, належить і системний аналіз.

1.1. Становлення й розвиток системного аналізу

Щоб правильно зрозуміти роль та об'єктивно оцінити значення системних досліджень і системного аналізу в різних сферах практичної діяльності людини, необхідно мати чітку й обґрунтовану відповідь на запитання «Чи є ідеї та принципи системності породженням моди в науці?» або «Чи процес становлення і розвитку системного аналізу є об'єктивною необхідністю?».

1.1.1. Основні особливості розвитку системного мислення

У другій половині XX століття дати відповіді на зазначені вище питання намагався один з основоположників принципів системності Л. фон Берталанфі [11]: «Якщо ми хочемо вірно подати й оцінити сучасний системний підхід, то саму ідею системності є сенс розглядати не як породження минулої моди, а як явище, розвиток якого вплетено в історію людської думки». Однак ця фраза залишає без відповіді два дуже важливі запитання. По-перше, які обставини наводять на міркування про «минулу моду»? По-друге, що пов'язує «ідею системності» та «історію людської думки»?

Відповідь на перше запитання досить проста. Періодичним дискусіям сприяла ситуація в науці, яка склалася у другій половині XX століття. З одного боку, на передньому плані наукових досліджень опинилися роботи, об'єднані спільною назвою «системний аналіз» [113]. З іншого боку, для повсякденного життя з'явилася така цікава особливість: «Кожен, хто захотів би проаналізувати найуживаніші сучасні поняття й увичасні вислови, знайшов би на початку списку слово «система». Поняття системи поширилося на всі сфери науки і проникло у повсякденне мислення, розмовну мову і засоби масових комунікацій» [10]. Результатом цього стала не лише поява незліченної кількості публікацій, проведення конференцій, симпозіумів, але й різне, часом неоднозначне, розуміння і тлумачення таких основних понять, як «система», «системність», «системний підхід», «системний аналіз», «системне мислення», що мимоволі наводять на думку про минулу моду [196].

Така ж ситуація зберігається і на початку XXI століття. Як і раніше, виявляються суттєві різночитання й розбіжності у трактуванні багатьох практично важливих понять і визначень, що характерно навіть для тих авторів, які безпосередньо беруть участь у системних дослідженнях або є прихильниками системної методології. Відсутність загальноприйнятого розуміння багатьох ключових положень і проблем системного аналізу, зокрема сутності й специфіки системних досліджень, їхньої спрямованості та місця в сучасній науці, а також невисокі потенційні можливості і неусувні обмеження різних підходів та методів системного аналізу, різноманітність їхнього застосування порівняно з методологіями інших дисциплін свідчать, що процес формування системного аналізу як наукової дисципліни ще не завершений, його напрями остаточно не сформувалися.

Предметна область системного аналізу зводиться до вивчення складних багаторівневих множин систем різної природи та різних видів і класів з різноманітними властивостями і відношеннями між ними. Вона настільки широка, що не підлягає строгій та однозначній класифікації й впорядкуванню.

Ще чітко не формалізовано й однозначно не визначено *предмет цілей вивчення й апарат дослідження* як сукупність знань, описів, пояснень та передбачень властивостей, можливостей, процесів і явищ, що відбуваються в сучасних системах різного призначення.

Методи системного дослідження як способи чи шляхи практичного або теоретичного пізнання явищ і закономірностей функціонування і розвитку складних систем є досить різноманітними і не обмежуються будь-якими рамками.

Сьогодні можна говорити лише про формування *системного аналізу* як наукової методології, або сукупності методів вивчення структури, логічної організації, властивостей і характеристик поведінки та розвитку складних систем. На жаль, усе ще відсутнє загальноприйняте розуміння багатьох ключових понять проблематики і методології системного аналізу, зокрема понять, що відображають специфіку та інструментарій системного аналізу, особливості і властивості об'єктів системних досліджень, умови формалізації і розв'язання системних задач.

Разом із тим вражає факт надзвичайно широкого й швидкого поширення системних досліджень у найрізноманітніших галузях науки та практики. Це підтверджують високі кількісні та якісні показники темпів розвитку системних досліджень упродовж більш ніж 50 років [10, 12–14, 38, 40–42, 63, 88, 91, 102, 113, 115, 151, 155, 157, 158, 196, 199, 205, 208, 210, 214–216, 221–223]. Тенденції розширення зазначеної проблематики зберігаються й у XXI столітті. Ідеї і можливості системної методології привернули увагу фахівців із таких структурованих предметних галузей, як медицини, екології, соціології, фінансової сфери та інших галузей знань. Є багато прикладів, коли системне мислення, системна методологія і системний аналіз успішно витримали випробування у розв'язанні складних і практично важливих задач і забезпечили можливість одержання визначних якісно нових результатів.

Відповідь на запитання, що пов'яже «ідею системності» та «історію людської думки», не настільки очевидна, і тому потребує певних пояснень. Передусім варто звернути увагу на ту обставину, що ідею системності в цитованій фразі розглядають не як ординарну подію в житті суспільства, а як явище, «вплетене в історію людської думки». Тому слід виявити причини і фактори, що зумовлюють настільки високу значимість ідеї системності. Далі необхідно визначити сутність і новизну системного мислення, його практичне значення як своєрідного внеску ідей системності в розвиток людської думки. Оцінка світоглядної ролі системного мислення як антитези класичному раціоналізму і механіцизму та зумовлені ним досягнення в розвитку людської думки наведені в [159]. Однак для успішного розв'язання реальних системних задач вирішальне значення має інша, прагматична роль системного мислення. Тому так важливо виконувати подальші дослідження процесу становлення і розвитку системного аналізу з прагматичної точки зору.

Аналіз розвитку науки в цілому свідчить про те, що результативність кожної наукової дисципліни визначають такі групи факторів:

- ♦ актуальність, наукова і практична значимість проблематики;
- ♦ науковий рівень і практичні можливості теоретичного і методологічного інструментарію дослідження;
- ♦ здатність дослідника освоїти відповідну теорію і методологію, уміння раціонально застосовувати та вдосконалювати засоби, що використовуються.

У процесі становлення і розвитку науки перелічені групи факторів безупинно змінюються, уточнюються, вдосконалюються на основі взаємного стимулювання і раціонального узгодження потреб практики і можливостей науки. Розвиток відбувається у формі своєрідного тандема: нові задачі практики стимулюють розвиток науки, а нові досягнення науки створюють можливість для розв'язання нових практичних проблем, розширення сфери досліджень, розробки виробів і технологій.

Отже, теоретичну значимість і практичну корисність наукової дисципліни визначає як рівень можливостей кожної групи факторів, так і рівень взаємного узгодження їхніх можливостей. Досвід свідчить, що реалізація нових ідей і технічних рішень залежить від можливості науки і здатності дослідника формалізувати і розв'язати відповідні задачі проектування, а також від можливостей промислових технологій реалізувати проект і створити виріб із необхідними показниками якості.

Слід підкреслити особливу значимість процедури формалізації задач, зокрема, під час реалізації інноваційних ідей і технічних рішень, проектування новітніх зразків техніки, що не мають ані аналогів, ані прототипів. Такі задачі характеризуються концептуальною невизначеністю, яку розуміють як єдину систему невідомості, що включає:

неоднозначність і суперечливість вимог до виробу; суперечливість цілей і неоднозначність умов застосування виробу; невизначеність і непередбачуваність можливих дій конкурентів; необмеженість і неможливість прогнозування багатьох ситуацій ризику на різних стадіях життєвого циклу виробу.

Розкриття концептуальної невизначеності є системною задачею [120], оскільки розкриття усіх видів невизначеності слід виконувати на базі єдиних принципів, критеріїв і цілей. Складність задач і труднощі їхнього розв'язання зумовлені невизначеністю багатьох альтернатив і критеріїв вибору [43]. Тому результати цілком залежать від здібностей і вміння дослідника вирішити цю проблему. Звідси впливають найважливіші риси системного дослідника:

- ♦ здатність до самооцінювання і самоадаптації — повинен знати, як використовувати те, що йому відомо; розуміти, які ще відомості необхідно отримати; як і де дізнатися про те, чого він ще не знає;
- ♦ вміння оцінити та сформулювати апарат дослідження — має знати, як для досягнення цілей дослідження можна використати наявний інструментарій; розуміти, що необхідно додатково робити те, чого за допомогою наявного інструментарію реалізувати неможливо; бути здатним визначити, з використанням яких додаткових інструментальних засобів можна виконати те, чого не дозволяє реалізувати наявний інструментарій;
- ♦ здатність до оцінювання і формалізації задачі — повинен знати, як використовувати для формалізації задачі те, що апіорі відомо; вміти оцінити, наскільки для формалізації задачі необхідне, можливе і доцільне розкриття наявної невизначеності; бути спроможним визначити, що обов'язково слід зробити для розкриття невизначеності під час формалізації і розв'язання задачі.

Щоб задовольнити ці вимоги, досліднику недостатньо лише формально оволодіти системною методологією і навчитися раціонально використовувати її на практиці. Він має корінним чином змінити не лише своє ставлення до діяльності, але й принципово змінити стиль мислення, а саме оволодіти принципами та прийомами системного мислення.

Слід взяти до уваги ту обставину, що сьогодні, незважаючи на справді необмежений діапазон застосування терміна «системне мислення», відсутнє загальновизнане, розгорнуте означення даного поняття, хоча в літературі запропоновано багато часткових інтерпретацій його суттєвих ознак [156, 181, 212, 219, 260]. Надалі в це поняття буде вкладатися такий зміст: *системне мислення* — це вища форма людського пізнання, коли процеси відображення об'єктивної реальності базуються на цілісному відображенні досліджуваного об'єкта з позиції досягнення поставлених цілей дослідження на підставі знань, досвіду, інтуїції і передбачення. Принципово важливою деталлю цього означення є залежність меж об'єкта дослідження від поставлених цілей.

На підставі наведеного означення той самий фізичний об'єкт, наприклад літак, може бути єдиним об'єктом деякого системного дослідження, або лише певною складовою частиною об'єкта, під яким розуміють, скажімо, аеропорт. Більш того, у фізичному об'єкті, наприклад у літаку, можна виділити деякий функціональний елемент, припустимо авіаційний двигун, який може бути єдиним об'єктом системного дослідження у процесі розробки, випробувань і експлуатації.

Слід також зазначити, що системне мислення стає найважливішим фактором досягнення успіху в різних сферах практичної діяльності [204, 212].

Зазначені обставини зумовлюють необхідність і доцільність розгляду історії, тенденцій і перспектив розвитку методології системного аналізу і системних досліджень.

Подібний огляд доцільно здійснювати з урахуванням таких важливих складових розвитку цієї методології:

- ♦ становлення і розвиток ідей системності як засад системного мислення;
- ♦ розвиток системного уявлення про об'єкти дослідження;
- ♦ розвиток засобів і методів розв'язання практичних системних задач.

Слід зазначити, що така обмежена кількість розглянутих наукових напрямів системних досліджень та їх досить загальні формулювання обумовлено нечіткими межами системних досліджень, розмитістю визначень таких основних понять, як системні дослідження, системний підхід, системний аналіз, системне мислення.

Перелічені напрями розвитку системного аналізу є взаємозалежними і такими, що відображають різні аспекти загального процесу системних досліджень, хоча з'явилися вони не одночасно, а їхні взаємозв'язок і взаємозалежність проявилися, власне кажучи, лише у другій половині XX століття, у процесі розв'язання практичних системних задач.

1.1.2. Роль фундаментальних відкриттів у системному сприйнятті світу

У становленні та розвитку системного мислення важлива роль належить фундаментальним науковим відкриттям, історію яких прийнято відраховувати [11, 159] від постулату Арістотеля: «ціле більше суми своїх частин», що в сучасному розумінні відображає сутність суперадитивного закону складних систем. Не заглиблюючись у багатовікову історію, розглянемо процес становлення і розвитку ідей системності і системного мислення у найближчому минулому. Насамперед визначимо фундаментальні наукові відкриття, що сформували передумови становлення й розвитку системного мислення. В історії науки останніх століть, у відповідності до [111], можна виділити три основні рівні пізнання навколишнього світу.

- ♦ **Перший рівень.** Створення основ сучасної фізики і механіки. До цього рівня належать відкриття І. Ньютона, Г. Галілея, М. В. Ломоносова, А. Пуанкаре, А. Ейнштейна. Узагальнення ідеї руху, що виникла у Стародавній Греції, і перетворення її в струнку математичну теорію ньютонівської механіки стало початком нового етапу в розвитку природничих наук, заклало фундамент методології багатофакторного аналізу стану і розвитку еволюційних фізичних процесів і явищ, на базі якої згодом була створена сучасна техносфера.
- ♦ **Другий рівень.** Створення основ дарвінізму, перенесення ідеї руху та безперервної мінливості у сферу живої матерії. Ідею руху було покладено в основу нових уявлень про розвиток природи. Найважливішою особливістю цієї парадигми є якісна зміна в часі властивостей об'єктів, які розвиваються, що принципово відрізняє процеси розвитку від усіх інших динамічних процесів. Такі ключові для розуміння еволюції та її основних процесів і властивостей поняття, як спадковість, мінливість, добір, стали основою сучасного уявлення про природу розвитку живого, визначили вихідні позиції у методології біохімічних і фізіологічних досліджень, заклали фундамент багатофакторного аналізу стану й еволюційних процесів сучасної біосфери.
- ♦ **Третій рівень.** Виявлення єдності всіх еволюційних процесів, що відбуваються на Землі (хімічних, біологічних, фізичних, соціальних тощо), у розвитку живої природи

і людського суспільства. Перший принципово важливий крок у цьому напрямі зробив В. І. Вернадський в 30-х роках XX століття, у період, коли формувалися основи його вчення про ноосферу [19]. Вчений виявив системність взаємозв'язків різних еволюційних процесів у масштабах нашої планети, їхню залежність від процесів, що відбуваються у Всесвіті.

Висновки цього вчення мають чітко виражену практичну спрямованість. Так, одним із головних висновків є твердження про те, що на певному ступені розвитку цивілізації можливий такий рівень взаємодії людства з Природою, коли його потреби в ресурсах перевищать можливості Природи. Розв'язання цього протиріччя, на думку В. І. Вернадського, можливе лише за умови, що людство усвідомить практичну необхідність взяти на себе відповідальність за подальшу еволюцію планети; у протилежному випадку воно не матиме майбутнього.

Отже, зазначені фундаментальні досягнення в пізнанні Природи можна розглядати як початкові ступені до розуміння практичної необхідності системного сприйняття світу і системного мислення. Перші два досягнення підготували фундамент для наступного — системного розуміння явищ, що відбуваються на планеті, як складової частини процесів Всесвіту. З основних тверджень і висновків вчення В. І. Вернадського про ноосферу витікають питання про системність процесів Всесвіту, і це, у свою чергу, зумовлює, власне кажучи, потребу у системному осмисленні шляхів розвитку цивілізації та еволюції планети Земля, у формулюванні системних проблем глобального масштабу. Це є підставою вважати вчення В. І. Вернадського першоджерелом прикладного системного мислення.

1.2. Етапи розвитку системного аналізу як прикладної наукової методології

Далі коротко розглянемо основні віхи історії становлення та розвитку системного аналізу в недалекому минулому, а саме протягом XX століття. Насамперед слід зазначити, що тут не поставлено за ціль докладно проаналізувати роботи, які формували сучасні основи системного аналізу. Наша мета полягає у тому, щоб:

- ♦ відобразити роль та значення тих наукових результатів, які зумовили появу і становлення системного аналізу, і тих факторів, що визначили зміст основних напрямів та етапів розвитку;
- ♦ показати стан і тенденції розвитку системної проблематики і методології у сучасних умовах.

Гадаємо, що для досягнення поставленої мети аналіз доцільно виконувати з урахуванням стану і тенденцій розвитку інших найважливіших напрямів науки і техніки, які суттєво вплинули на розвиток цивілізації в розглянутий період. З огляду на те, що у XX столітті у світі сталося досить багато кардинальних політичних, економічних, структурних та інших змін, обмежимося розглядом тих процесів другої половини XX століття, що безпосередньо або опосередковано вплинули на стан і тенденції розвитку системної проблематики та методології.

Виділимо чотири етапи формування системного аналізу як прикладної наукової методології [124].

1.2.1. Формування теоретичних засад концептуальної парадигми системного аналізу

Перший етап становлення системного аналізу припадає на першу половину XX століття і є періодом появи та формулювання основних ідей системного мислення, основні історичні джерела якого будуть згадані нижче. Беручи до уваги наведене означення системного мислення, вважаємо доцільним за основу найважливіших, головних, робіт взяти перелік, запропонований у [159], але доповнити його працями В. І. Вернадського, важлива роль і практичне значення яких для становлення і розвитку системного аналізу показано раніше. Роботи вченого, на наш погляд, повинні займати чільне місце у списку не лише за хронологією, але й за їхньою практичною значимістю.

У підсумку одержимо такий перелік фундаментальних учень (в дужках зазначено відповідно роки виконання робіт із тематики і дати перших авторських публікацій): «Вчення про біосферу і її поступовий перехід у ноосферу» [19] Володимира Івановича Вернадського (1893–1918); «Загальна організаційна наука, або тектологія» [15] Олександра Олександровича Богданова (1913–1929); «Загальна теорія систем» [9] Людвіга фон Берталанфі (1934–1949); «Кібернетика або управління і зв'язок у тварині та машині» [261] Норберта Вінера (1948); «Праксеологія» [219] Тадеуша Котарбинського (1930–1940).

Роль, місце і значення праць О. О. Богданова, Л. фон Берталанфі, Н. Вінера, Т. Котарбинського у становленні та розвитку ідей системності й системного мислення досить детально проаналізовано у праці [159]. Тому відзначимо лише найважливіші аспекти аналізу і зробимо висновки. Почнемо з монографії О. О. Богданова, яка відрізняється глибоко системним змістом. Її ідеї та поняття базовано на постулаті «невід'ємна й найсуттєвіша властивість загальної організаційної науки — це її системність». Автора монографії можна заслужено вважати основоположником системного мислення, що стосується формування такого уявлення про об'єкти системного дослідження, яке пізніше було прийняте загальною теорією систем.

Праксеологію Т. Котарбинського задумано і реалізовано як загальну теорію раціональної діяльності. І хоча системна орієнтація роботи не викликає жодних сумнівів, але доказів та підтверджень її впливу на формування системного мислення не виявлено. Відсутні також явні докази взаємної історичної залежності системних парадигм тектології, кібернетики, загальної теорії систем і праксеології. Однак ці факти не означають, що ідеї О. О. Богданова і Т. Котарбинського взагалі забуто і що вони не знайшли практичного застосування у системному аналізі. Монографії вчених було перевидано у другій половині XX століття, завдяки чому їхні основні ідеї знайшли застосування на практиці, зокрема у сфері розв'язання системних проблем організаційного управління.

У становленні та розвитку системного мислення загальноновизнаними є роль і практичне значення фундаментальних робіт Людвіга фон Берталанфі [9] і Норберта Вінера [261]. Вчені незалежно один від одного запропонували нову ідею, суть якої полягає у переході до дослідження загальних властивостей, характерних для різних типів об'єктів. Проте слід звернути увагу на відмінності позицій, з яких вони визначають необхідність дослідження загальних властивостей різних типів об'єктів.

Л. фон Берталанфі розглядав питання з позиції спільності принципів побудови і структурних властивостей різних типів систем, а Н. Вінер віддавав перевагу позиції спільності принципів і особливостей управління різними типами складних об'єктів, зокрема у суб'єктів живого світу й об'єктів техніки різного призначення. І ці підходи досить довго розвивалися незалежно. Разом із тим обидва вчені мають безпосереднє

відношення до системних досліджень. Наприклад, під час розробки складних технічних систем однаково важливо створити раціональну багаторівневу ієрархічну структуру виробу та забезпечити як системно погоджене управління на стадіях проектування, виробництва, дослідження виробу, так і раціональне управління створеною системою в процесі її експлуатації.

Задачу формування структури та вигляду виробу і задачу обґрунтування цілей та функцій управління потрібно розглядати у такій системній постановці, яка враховувала б взаємозв'язок, взаємозалежність і взаємодію в замкнутій структурі цілісного об'єкта дослідження: людина $\Leftrightarrow$ виріб $\Leftrightarrow$ зовнішнє середовище $\Leftrightarrow$ людина. Необхідність формування такої структури зумовлено тим, що зовнішнє середовище визначає умови експлуатації виробу, а людина є розробником, виробником і (або) користувачем виробу. Звідси випливає практична необхідність системного узгодження розв'язків відповідних задач на стадії концептуального проектування виробу. Системна погодженість за цілями, ресурсами, термінами та очікуваними результатами повинна бути забезпечена на засадах взаємного, раціонального компромісу суперечливих цілей розробки виробу. Таке цілісне уявлення про об'єкт системного дослідження цілковито відповідає ідеї В. І. Вернадського про системність взаємодії, взаємозв'язків і взаємозалежності різних процесів на планеті.

Виконані незалежно дослідження В. І. Вернадського, Л. фон Берталанфі та Н. Вінера започаткували єдину ідейну базу для формування принципово нової фундаментальної парадигми в науці, концептуальна новизна якої полягає у переході:

- ♦ від дослідження конкретних властивостей об'єктів певного типу (фізичних, хімічних, біологічних, економічних тощо) до дослідження загальних властивостей, характерних для об'єктів різної природи;
- ♦ від дослідження властивостей та особливостей процесів певного виду до дослідження структури, властивостей та особливостей взаємозв'язків, взаємозалежності і взаємодії різнорідних процесів;
- ♦ від дослідження властивостей окремих об'єктів певного типу до дослідження властивостей і структури взаємозв'язків, взаємозалежності і взаємодії різнотипних об'єктів.

Ці ознаки новизни пізніше деякою мірою було реалізовано у формі основних принципів теорії системного аналізу, і тому наведену парадигму можна назвати теоретичною парадигмою системної методології.

Таким чином, перший етап становлення системного аналізу був періодом появи і формування системного мислення, головні теоретичні джерела якого створювались незалежно один від одного. Він належить до першої половини XX століття і характеризується незалежною появою, рознесеними у часі публікаціями філософських і методологічних ідей, принципів, підходів, які пізніше стали основою нового наукового напрямку, що отримав назву «системний аналіз». Найважливішим підсумком першого періоду слід вважати створення ідейної бази для формування нової фундаментальної парадигми у науці. Основні ідеї цієї парадигми, які відображають її різні аспекти, незалежно представлено у працях В. І. Вернадського, Л. фон Берталанфі та Н. Вінера. Праці останніх двох було опубліковано у кінці першої половини XX століття, і цією подією було завершено процес створення головних теоретичних джерел системного мислення. Таким чином, перший етап є етапом формування теоретичного базису системного мислення.

1.2.2. Емпіричний розвиток системного аналізу

Другий етап становлення системного аналізу формувався в період надзвичайних умов, пов'язаних із наростаючою військовою загрозою у 30-ті роки і майже глобальним розгортанням театру бойових дій Другої світової війни в 40-х роках ХХ століття. Тоді в багатьох країнах з'явилася потреба в оперативному розв'язанні найскладніших між-дисциплінарних задач підвищення обороноздатності. Цей етап характеризується якісно новими властивостями задач і принципово важливими умовами, за яких здійснювалося їхнє розв'язання. До них належать концептуальна невизначеність, неструктурованість, *NP*-складність і стратегічна важливість реальних задач; висока ціна помилкового або недостатньо обгрунтованого розв'язку, що відповідає катастрофічним наслідкам стратегічного рівня; наявність неподоланного, апіорі невідомого порогового обмеження часу на цикл формування і реалізацію стратегічних розв'язків, порушення якого може мати катастрофічні наслідки.

Слід відмітити особливу значимість концептуальної невизначеності у проблемних ситуаціях, що стосуються розробки та серійного виробництва нової техніки за наявності порогового обмеження часу на цикл формування й реалізації розв'язків. Подібні ситуації були характерні для початкового періоду Великої Вітчизняної війни, і про них зі знанням справи написав видатний радянський авіаконструктор О. С. Яковлев [197]. За цих умов поняття концептуальної невизначеності доповнювалося таким дуже важливим фактором, як невизначеність і непередбачуваність можливої активної протидії супротивника. Винятково важливим фактором проблемної ситуації є порогове обмеження часу на формування і реалізацію розв'язків, зумовлене прагненням кожної з протидіючих сторін забезпечити перевагу у стратегічно важливому виді техніки. Як відомо, переваги досягають за рахунок виготовлення великої кількості відповідної техніки, яка на певний момент часу має найкращу якість.

Перелічені вище фактори створили такі принципово важливі особливості та умови розв'язання реальних задач:

- ♦ необхідність забезпечення системної погодженості щодо цілей, термінів та очікуваних результатів процедур формалізації і розв'язання міждисциплінарних задач на всіх стадіях життєвого циклу виробу за наявності багатьох взаємозв'язків, взаємозалежностей і взаємодій різнотипних факторів;
- ♦ загострення протиріччя між необхідністю дослідження великої кількості факторів і вимогою скорочення часу на формування і реалізацію розв'язків на всіх стадіях життєвого циклу виробу;
- ♦ різке підвищення ступеня і рівня ризику, зумовленого прийняттям недостатньо обгрунтованих або помилкових розв'язків на різних стадіях життєвого циклу виробу.

У зв'язку з цим виникла практична потреба у формуванні системного інструментарію, який би за умов концептуальної невизначеності дозволив забезпечити можливість розв'язання реальних системних задач у допустимий термін та із практично прийнятною похибкою. Така можливість може бути реалізована у тому разі, коли інструментарій формуватиметься на базі системи взаємно погоджених за цілями, термінами і очікуваними результатами методологічних засобів:

- ♦ множини припущень, підходів, прийомів та інших засобів формалізації задач;
- ♦ множини показників, критеріїв, прийомів та інших засобів оцінювання якості й ефективності розв'язання задач;

- ♦ множини підходів, методів, методик, алгоритмів, програм та інших засобів розв'язання задач.

Необхідність розробки такого інструментарію була зумовлена характерною для того часу ситуацією: підходи, прийоми і методи розв'язання різних задач, що виконувалися для розробки нової техніки. Існуючі на той час прийоми, моделі, методи дослідження операцій не відповідали новим вимогам і умовам через властиві їм обмеження. Потрібні були нові підходи, які забезпечували б можливість: аналізувати з позиції поставлених цілей як єдиний цілісний об'єкт усю сукупність вимог, умов і методів розробки певного виробу нової техніки; з урахуванням результатів аналізу вимог формувати концепцію, задум, структуру і вигляд розроблювального виробу; на базі концепції виконувати формалізацію і розв'язання системно-погодженої сукупності реальних системних задач, пов'язаних із розробкою виробу в допустимий термін із практично прийнятною похибкою.

Умови розглянутого періоду виключали можливість розробки необхідного інструментарію на основі попереднього теоретичного обґрунтування. Крім того, вони диктували свої, більш жорсткі, вимоги як до нової техніки, так і до організації діяльності розробників, випробувачів і виробників. На практиці, як показано у [197], на головного конструктора військової техніки певного типу покладалася вся відповідальність не лише за розробку, дослідження, серійне виробництво нового зразка техніки, але й за усунення дефектів і недоліків, виявлених у процесі його застосування, за організацію спільної діяльності колективів розробників, випробувачів, виробників, зокрема кооперації підприємств виробників готових виробів, матеріалів і комплектуючих.

Діяльність колективів системно узгоджувалася за цілями, задачами, термінами й очікуваними результатами. Перед кожним колективом поставала потреба оперативно сформувати власну методологію розв'язання реальних міждисциплінарних задач з урахуванням їхньої специфіки. Формування здійснювалося емпірично на підставі досвіду, знань, інтуїції та передбачень співробітників відповідного колективу з використанням колективного системного мислення і методу індивідуальної генерації ідей та технічних рішень, що пізніше одержав назву методу мозкового штурму. Головним результатом діяльності такої кооперації мало стати досягнення переваги у стратегічно важливому виді військової техніки.

Очевидно, що рекордні темпи та унікальна якість виробів того періоду могли бути одержані лише за умов системно погодженої, планомірної діяльності кооперації колективів учених, розробників, випробувачів, виробників конкретного виду техніки, що вимагало системно погодженого розв'язання низки реальних багатоцільових, міждисциплінарних, організаційних і технічних задач. Досягнення такого успіху стало можливим завдяки спільній праці фахівців різних галузей, зокрема математиків, інженерів, учених — багато пізніше їх стали називати системними аналітиками. З часом у галузях військово-промислового комплексу накопичувався досвід системно погодженого розв'язання реальних, міждисциплінарних задач у режимі жорсткого ліміту часу. Такий досвід в авіапромисловості було узагальнено, і в 1940 році вийшов із друку «Посібник для конструкторів» [197]. На жаль, розроблені й апробовані на практиці методологічні засоби розв'язання найскладніших організаційних і технічних системних задач були відомі лише вузькому колу фахівців. Практичний досвід системних аналітиків у розв'язанні системних задач концептуальної невизначеності за умов жорсткого ліміту часу не став надбанням широких мас фахівців і вчених різних галузей науки і техніки, адже умови воєнного часу виключали можливість відкритої публікації

результатів оригінальних теоретичних і науково-технічних досліджень. Разом із тим певний досвід системних аналітиків, основні ідеї та принципи апробованих емпіричних засобів у подальшому було узагальнено в єдиному методі, що отримав назву методу програмно-цільового планування. У роки війни у СРСР його використовували під час розробки цільових програм випуску військової техніки, а згодом — під час розробки державних п'ятирічних планів, державних та відомчих цільових програм.

Подібні задачі розв'язували і в інших країнах. Так, командування ВПС США недовзі після початку Другої світової війни поставило перед Гарвардськими курсами ділової адміністрації завдання упродовж року знайти варіант розв'язання задачі стосовно збільшення складу ВПС від 4 тис. бойових літаків і 300 тис. чоловік особового складу до 80 тис. літаків і 2,5 млн. чоловік особового складу за умови, що витрати не повинні перевищувати 10 млрд. доларів [115]. У післявоєнний період це був один із перших прикладів публікації у відкритій пресі реальних даних щодо розробки і застосування системного підходу для розв'язання задачі, пов'язаної з розвитком збройних сил держави.

Вважається [115], що під час розв'язання цієї задачі вперше було застосовано певні прийоми, підходи і методики, які стали основою системного аналізу. Заслуга в його широкому застосуванні і його широкій популяризації у США належить корпорації RAND (Research and Development), що була створена в 1947 році. Того ж року розпочався процес централізації керівництва обороною країни — був створений Об'єднаний комітет начальників штабів. Починаючи з 1948 року у різних відомствах США запроваджуються принципи і методи системного керівництва, створюється система планування і фінансування озброєння [115]. У 1964 році Міністерством оборони було надруковано посібники та інструкції, що визначали порядок виконання процедур системного аналізу.

Таким чином, другий етап становлення системного аналізу формувався у надзвичайних умовах із початку 30-х до кінця 40-х років XX століття. Це був період появи практичної необхідності оперативного розв'язання реальних складних системних задач державного значення, створення різних технічних систем військового призначення в умовах жорсткого ліміту часу. Розробка методологічного апарату виконувалась емпірично і незалежно у різних організаціях різних країн. У результаті було створено емпіричні передумови формування парадигми системного аналізу як методології розв'язання реальних системних задач у практично допустимі терміни з практично прийнятною похибкою в умовах концептуальної невизначеності. Тому цей період можна вважати етапом емпіричного формування системної методології.

1.2.3. Розвиток наукових основ розробки і виробництва складних систем

Третій етап становлення і розвитку системного аналізу формувався в післявоєнних умовах, із середини 40-х до кінця 70-х років XX століття. Цей період принципово відрізнявся від попередніх якісно новими задачами, загальними соціально-політичними змінами, що відбулися у світі після закінчення Другої світової війни, унікальними науково-технічними досягненнями. Упродовж першого десятиліття післявоєнного періоду для багатьох країн світу головною метою було оперативне розв'язання найскладніших міждисциплінарних задач, пов'язаних із ліквідацією важких наслідків війни і корінною переорієнтацією економіки військового призначення на розв'язання завдань мирного

часу. Системність і складність цих задач обумовлені багатьма факторами: принциповою відмінністю цілей і задач; очікуваними результатами; обмеженістю фінансових та інших видів ресурсів, дефіцитом кваліфікованих кадрів тощо.

До найважливіших соціально-політичних змін у світі у першу чергу необхідно віднести створення міжнародних організацій ООН (1945 р.) і ЮНЕСКО (1946 р.), що відкрило принципово нові можливості для міжнародного співробітництва країн у сфері освіти, науки і культури. Це був початок консолідації наукових напрямів окремих країн у єдину світову науку. Важливість і практична значимість цього процесу були гідно оцінені згодом, зокрема коли світова наука довела [110, 111], що загроза глобальної екологічної катастрофи на Землі може стати реальністю навіть внаслідок продовження ядерних досліджень, і тим більше внаслідок ядерної війни. Доказ був строго обґрунтований на основі системного аналізу і моделювання на ЕОМ результатів випробувань ядерної зброї. Саме тоді було прийнято перше політичне рішення — Московський договір про часткову заборону ядерних досліджень (1963 р.).

Цей період був насичений унікальними науково-технічними досягненнями. Відзначимо лише три таких досягнення, що найбільшою мірою сприяли розвитку системного аналізу. Так, рік закінчення світової війни став першим роком використання ядерної енергії. Початок мирного використання ядерної енергії і народження атомної енергетики датують 27 червня 1954 року — днем, коли у СРСР (м. Обнінськ) було запущено першу у світі АЕС потужністю 5 МВт.

Названа подія стимулювала інтенсивне будівництво АЕС у розвинутих країнах і багатьох країнах, що розвиваються. До початку 1976 року у світі експлуатувалися понад 100 АЕС, загальна потужність яких становила близько 80 ГВт. У 1959 році в СРСР було створено криголам «Ленін», що став першим у світі цивільним судном з ядерною силовою установкою. Сьогодні подібні силові установки використовують у надводних і підводних об'єктах різного призначення. Важливими ознаками багатьох задач, які розв'язували вчені і фахівці різних галузей науки та техніки під час створення унікальних об'єктів і виробів різного призначення, базованих на використанні ядерної енергії, був найвищий рівень складності і системності.

Наступним надзвичайно важливим досягненням за рівнем невідомості, непрогнозованості, непередбачуваності проблемних ситуацій варто вважати освоєння космосу. Початок розвитку космонавтики покладено неповторними науково-технічними досягненнями СРСР як першовідкривача космосу, які назавжди увійшли в історію цивілізації: запуском 4 жовтня 1957 року першого у світі штучного супутника Землі та першим у світі польотом у космос 12 квітня 1961 року людини — Ю. О. Гагаріна.

Усі ці успіхи стали потужним каталізатором розвитку космонавтики [5]. До кінця 70-х років у світі було запущено понад 2500 космічних літальних апаратів, виконано понад 60 пілотованих польотів. Було створено космічні супутникові системи: радіозв'язку і ретрансляції, метеорологічних спостережень, дистанційного зондування для дослідження природних ресурсів; розпочато дослідження автоматичними станціями об'єктів сонячної системи: Місяця, Сонця, Марса, Венери, Юпітера, Сатурна, Меркурія та інших планет. 21 липня 1969 року американські астронавти США Н. Армстронг і Е. Олдрін висадилися на Місяць.

Унікальним досягненням людства є створення в СРСР та експлуатація у 1971–1977 роках серії орбітальних пілотованих космічних станцій «Салют», що забезпечували екіпажу можливість безперервного проведення різних технічних і біологічних експериментів у космічних умовах тривалістю понад 140 діб, а також проведення безперервного до-

слідження космосу, дистанційного зондування Землі і спостереження за Світовим океаном. Подальшим втіленням розвитку цього виду техніки і розширення її можливостей стала побудова орбітального населеного космічного комплексу «Мир», що безперервно експлуатувався понад 15 років. (У 2001 році впродовж кількох місяців було виконано керування із Землі планомірне сходження його з орбіти із затопленням у заздалегідь визначеному безлюдному районі Тихого океану.)

Третє унікальне досягнення в сфері космічних досліджень належить одночасно двом країнам. Мова йде про спільний експериментальний політ у липні 1975 року космічних кораблів «Аполлон» (США) і «Союз» (СРСР). Ці кораблі принципово різнилися між собою за багатьма параметрами, зокрема своїми системами життєзабезпечення. Проте члени обох екіпажів (О. Леонов, В. Кубасов з однієї сторони і Т. Стаффорд, Д. Слейтон, В. Бранд — з іншої) за 8 діб польоту повністю виконали програму: двічі здійснили стикування кораблів, кілька разів перейшли з борту на борт, провели низку спільних наукових досліджень і технічних експериментів.

Четвертим за хронологією видатним досягненням у зазначеній сфері стало створення космічних кораблів багаторазового використання серії «Спейс шаттл» у США і «Буран» у СРСР. Слід підкреслити, що під час освоєння космосу потрібно було розв'язувати задачі, рівних яким за різноманітністю, складністю, невизначеністю, системністю взаємозв'язків факторів та умов в історії цивілізації ще не було, використовуючи при цьому фундаментальні та прикладні досягнення і можливості практично всіх наук, від астрономії до ядерної фізики.

Надзвичайно важливим досягненням людства, що сприяло розвитку інструментарію системного аналізу і розв'язанню реальних системних задач у різних сферах життєдіяльності людини, вважається створення обчислювальної техніки. Цей напрям бере свій початок від лампових електронно-обчислювальних машин (ЕОМ), розробка яких у 40-х роках незалежно велась у кількох країнах. Перша в світі ЕОМ була створена в США (1948 р.), перша в Європі — у Великобританії (1951 р.), а перша ЕОМ у континентальній частині Європи та СРСР — в Україні (1952 р.). Усі ці машини було орієнтовано на широку сферу застосування, що відкрило принципово нові можливості для розв'язання складних задач у різних галузях практичної діяльності.

Водночас з'явилася потреба у розв'язанні якісно нових задач із різних наукових напрямів. Зокрема, у нових умовах необхідно було визначити предмет дослідження, відпрацювати термінологію, описати проблематику, розробити методологію і, в остаточному підсумку, створити нові науки — теорію алгоритмів, теорію програмування, теорію обчислювальних систем та інші. Тому технічний і теоретичний базиси обчислювальної техніки розвивалися паралельно.

Так, у багатьох країнах одночасно з ЕОМ загального призначення здійснювалася розробка спеціальних ЕОМ. Зокрема, у СРСР було створено ЕОМ для управління об'єктами й технологічними процесами, для наукових розрахунків і моделювання процесів, обробки вимірювальної інформації, для розв'язання задач, пов'язаних з обліком, статистикою, плануванням, моделюванням в економіці, тощо. У США вели розробки супер-ЕОМ. Разом із тим необхідно зазначити, що ЕОМ першого покоління не задовольняли багатьох практичних потреб.

Принципові зміни в технічний базис і апаратну частину ЕОМ дали змогу внести результати багатьох фундаментальних науково-технічних досліджень. Першорядне значення має винахід у 1948 році транзистора — його використання не лише дало змогу створити принципово нову елементну базу для логічних схем ЕОМ, але й відкрило можливість реалізації технології мікромініатюризації її функціональних елементів, яка

невпинно розвивається. Внаслідок цього кількість функціональних елементів на кристалі почала подвоюватися кожні півтора року упродовж 30 років, і практично тими ж темпами зростали обчислювальні можливості ЕОМ. Винайдення у 1969 році мікропроцесора і розробка технології його серійного виробництва дало новий поштовх до розвитку архітектури й поліпшення технічних показників ЕОМ.

Рациональне використання обчислювальних можливостей ЕОМ, розширення сфери їх практичних застосувань на тлі постійного розвитку технічної бази забезпечували безперервне удосконалення теоретичного базису обчислювальної техніки, високі темпи розвитку математичного середовища ЕОМ, швидке удосконалення інструментарію користувача. Внаслідок цього на певному етапі розвитку обчислювальної техніки з'явилася можливість безпосереднє спілкування користувача з технічними засобами замінити роботою з прикладними програмними системами. Власне кажучи, з'явилися умови для безпосереднього спілкування людини з ЕОМ незалежно від сфери її застосування.

У 1976 році було винайдено персональний комп'ютер (ПК). Це назавжди змінило прийоми і методи, якими людство користувалося для проведення обчислень та представлення різноманітних результатів, для оформлення документів, підготовки рукописів, передачі й читання повідомлень. Створення в 1977 році програмного забезпечення для ПК, орієнтованого на масового користувача, відкрило можливість для масового виробництва операційних систем і прикладного програмного забезпечення, а також для широкого застосування комп'ютерів із метою розв'язання реальних задач у всіх сферах практичної діяльності. Почали створюватися комп'ютерні системи й мережі.

Проведений аналіз показує, що ситуація, яка виникла у той період, характеризувалася, з одного боку, безупинним зростанням потреби у розв'язанні важливих для практики системних проблем багатопрофільного характеру, а з іншого боку, появою якісно нових можливостей для їхнього розв'язання, що їх надавала обчислювальна техніка. Ці фактори зумовлювали необхідність раціонального використання апаратно-програмних можливостей ЕОМ і наполегливо вимагали розробки математичного і методологічного забезпечення, адекватно виниклим потребам практики і наявним можливостям обчислювальної техніки. Зазначені обставини ініціювали процеси формування і теоретичного обґрунтування методології системного аналізу та безпосередньо пов'язаних із ним наукових напрямів і дисциплін: загальної теорії систем, системотехніки, комп'ютерної математики, прикладної математики, імітаційного моделювання, теорії обчислювальних систем, проектування обчислювальних машин, теорії програмування, теорії автоматичної обробки цифрової інформації тощо.

Найбільш вагомий внесок у розробку теорії й у вирішення найскладніших міждисциплінарних системно-технічних та організаційних проблем, у створення складних і великих систем різного призначення внесли наукові школи, засновниками яких є, зокрема, М. П. Бусленко, О. О. Вавілов, В. М. Глушков, Д. М. Гвішіані, А. О. Дородніцин, А. П. Єршов, М. В. Келдиш, Г. В. Кисунько, С. П. Корольов, В. О. Котельников, І. В. Курчатov, М. О. Лаврентьев, Г. І. Марчук, О. Л. Мішч, М. М. Моїсєєв.

Працями представників цих шкіл створено теоретичний базис, математичний і методологічний інструментарій формалізації та автоматизації розв'язання реальних системних проблем; практично реалізовано фундаментальну теоретичну парадигму системного аналізу, концептуальні ідеї якої закладено В. І. Вернадським, Л. фон Берталанфі та Н. Вінером; виконано й реалізовано проекти складних технічних систем різного призначення. Скажімо, серед багатьох робіт, що проводилися під керівництвом В. М. Глушкова [95], можна виділити розробку та реалізацію малих ЕОМ серії МИР (МИР-1,

МИР-2, МИР-3), мов високого рівня МИР і АНАЛИТИК [164, 165]. Так, ЕОМ МИР (Машина Инженерных Расчетов) першою у світі почала виконувати аналітичні перетворення, зокрема диференціювання та інтегрування, з одержанням кінцевого результату у вигляді формул, а також обчислювальні операції з дійсними числами довільної розрядності, цілими числами необмеженої розрядності, точні операції над дробовими раціональними числами та аналогічні їм операції. Крім того, програмувати на такій машині можна було безпосередньо з клавіатури, у той час як введення програм в ЕОМ інших типів виконували з перфострічок або перфокарт.

У створення теорії системного аналізу та системної методології вагомий внесок зробили вчені різних країн, проте в першу чергу необхідно відмітити наукові праці К. Боулдінга [200], Дж. Клїра [65], М. Месаровича [103], Т. Саатї [154], Г. Саймона [256], А. Холла [187], У. Р. Ешбі [195].

Наукові та технічні досягнення цього періоду унікальні за багатьма показниками. Уперше людина змогла жити і працювати поза межами Землі і побувати на Місяці, вперше почала використовувати принципово нове джерело енергії, вперше було реалізовано можливість автоматизації інтелектуальної діяльності людства. Було розв'язано найскладніші системні проблеми, створено якісно нові галузі промисловості та нову техносферу. Системна методологія і комп'ютерний інструментарій розвивалися синхронно зі зростанням потреб практики і складності задач, завдяки чому було забезпечено баланс потреб і можливостей їхньої реалізації.

Були створені та введені в експлуатацію складні технічні системи різного призначення. Теоретично обґрунтовано і практично реалізовано у спеціальному математичному і програмному забезпеченні фундаментальну парадигму системного аналізу, ідейна основа якої сформована у працях В. І. Вернадського, Л. фон Берталанфі та Н. Вінера. Цей період був унікальним етапом стрімкого розвитку цивілізації, що базувався на якісно нових ідеях, винаходах і відкриттях, на швидкому освоєнні, широкому застосуванні результатів і можливостей якісно нових теоретичних та прикладних наук і наукових напрямів для розробки та виробництва унікальних і складних систем, створення й розвитку нових промислових галузей.

Проте на кінець зазначеного періоду дали про себе знати глобальні системні проблеми, які неможливо було розв'язати з використанням наявного на той час арсеналу математичних і методологічних засобів системного аналізу.

Такий стан справ було пов'язано з деякими загальними особливостями розвитку системного аналізу. По-перше, у процесі розвитку цивілізації постійно виникали складні і практично важливі проблеми, нерозв'язані на основі наявного арсеналу теоретичних і технічних засобів науки, зокрема засобів системного аналізу. І такий стан цілком зрозумілий: якщо немає наукового передбачення відповідної проблемної ситуації, то неможливо заздалегідь підготувати засоби для її розв'язання. У таких випадках шукати відповідні засоби починають лише після появи проблеми. По-друге, не можна не погодитися з твердженням [64], що розвиток системного аналізу аж ніяк не був схожий на «тріумфальний хід» у формі послідовного переможного вирішення все нових і нових системних задач. Поряд зі значними успіхами явно проявилися й певні труднощі, пов'язані з реалізацією системного підходу, передусім у слабко структурованих предметних галузях: у сфері соціального управління, в екології, економіці тощо [64]. І до кінця 70-х років було накопичено «критичну масу» невдалих спроб застосування системного підходу та системної методології до тих чи інших проблем.

Це дало привід критикам системного аналізу характеризувати його як суму методів, що мають вузько обмежену область застосування, і говорити про безпідставність його претензій на статус загальнонаукової методології [64]. Однак труднощі, з якими доволі часто доводилося зіткнутися, почасти були обумовлені тим, що математичні й методологічні засоби системного аналізу, які успішно застосовувались для розв'язання задач щодо об'єктів дослідження одного типу, намагалися механічно використовувати для розв'язання задач щодо об'єктів якісно іншого типу.

Іншою причиною такої ситуації була недоступність для широкого застосування арсеналу математичних, методологічних і обчислювальних засобів системного аналізу, який розробляли й успішно використовували в оборонних галузях, а також у космонавтиці та ядерній енергетиці. Разом із тим з'явилися важливі практичні проблеми, які неможливо було розв'язати на основі наявного на той час відкритого арсеналу математичних і методологічних засобів системного аналізу. І тому ситуація в системній методології наприкінці 70-х років визначалася як методологічна криза [64].

Можна назвати кілька обставин, що призвели до виникнення цієї кризової ситуації. Однією з головних стало швидке збільшення темпів зростання складності й масштабів реальних системних проблем, зумовлене глобалізацією світових процесів. Взаємозв'язки, взаємозалежності, взаємодії економічних, соціальних, екологічних та інших глобальних і регіональних процесів ставали визначальними факторами світового розвитку. У підсумку з'явився новий ефект розвитку, який французький економіст М. Годє чітко і повно охарактеризував фразою: «майбутнє перестало бути схожим на минуле» [213]. У цих умовах глобальні процеси світової системи підпали під вплив складно структурованої, багаторівневої ієрархічної множини майже непрогнозованих, безупинно мінливих взаємозв'язків, взаємозалежностей і взаємодій. Результатами такого стану справ ставали «наслідки непередбачувані та неприємні» [213].

Таким чином, третій етап становлення і розвитку системного аналізу формувався у післявоєнних умовах із середини 40-х до кінця 70-х років XX століття. Цей етап принципово відрізняється від попередніх періодів якісно новими задачами, принциповими соціально-політичними змінами у світі, унікальними теоретичними і практичними науково-технічними досягненнями. Було створено теоретичний базис математичного і методологічного інструментарію формалізації і автоматизації на базі ЕОМ процедур розв'язання реальних найскладніших організаційних і технічних системних проблем у різних сферах практичної діяльності. Створено принципово нові галузі — космонавтика і атомна енергетика. Розроблено, створено і введено в експлуатацію складні і великі унікальні технічні системи різного призначення. Теоретично обґрунтовано і практично реалізовано у спеціальному математичному і програмному забезпеченні фундаментальну парадигму системного аналізу, ідейну основу якої сформовано працями В. І. Вернадського, Л. фон Берталанфі і Н. Вінера. Цей етап характеризується синхронним розвитком теорії системного аналізу і практики системних досліджень.

1.2.4. Системний аналіз в епоху глобалізації світових процесів та проблем

Четвертий етап розвитку системного аналізу триває від початку 80-х років минулого століття дотепер. Він принципово відрізняється від попередніх глобалізацією світових процесів і загроз. З одного боку, глобалізація економічних, соціальних, інформа-

ційних та інших процесів відкриває нові можливості для використання досягнень науково-технічного прогресу. Зокрема, глобалізація інформаційних процесів і телекомунікаційних мереж створила умови для швидкого обміну інформацією, появи системи дистанційного навчання, створення інформаційного ринку й електронної комерції, обумовила розповсюдження інших нововведень [163, 119]. З іншого боку, неоднакові можливості отримати доступ до інформації розвинутих країн і країн, що розвиваються, постійно призводять до нерівноправної конкуренції та соціальної нерівності [194]. З'явилася низка проблем [211], зумовлених специфікою поширення інформації з Інтернету. Серед них проблеми захисту інформації, інтелектуальної власності, транзакційних відомостей тощо, а також проблеми комп'ютерних вірусів, різноманітного навмисного несанкціонованого впливу на комп'ютери.

На початку 70-х років XX століття особливого значення набувають процеси глобалізації економічних, соціальних, екологічних, техногенних загроз. Людство увійшло у такий період свого розвитку, коли стало реальністю передбачення В. І. Вернадського про те, що господарська діяльність людини здатна поставити планету на грань глобальної екологічної катастрофи [97]. Економічний і соціальний розвиток суспільства зайшов у явну суперечність з обмеженими можливостями природи. Проявленням такої суперечності насамперед є виснаження природних ресурсів суші й океану, безповоротна втрата різних видів рослин і тварин, техногенне порушення біогеохімічного кругообігу речовини, забруднення всіх складових природного середовища, деградація екосистем.

Невпинно загострюються пов'язані з глобальними змінами у світі чотири категорії загроз: безпосередні загрози існуванню людини (голод, хвороби, радіація, тероризм тощо); загрози великим регіонам і територіям (спустелювання, підйом рівня океану, глобальне потепління, транскордонне перенесення забруднень, забір стоку рік країнами, розташованими у верхній течії рік тощо); загрози системам прісної води, лісам тощо; загрози економічному розвитку (дефіцит природних ресурсів, наростаюча глобальна нерівність, нерівномірність економічного становища і розвитку країн, нестабільність фінансової системи та ринків тощо).

Загальну ситуацію взаємозв'язку, взаємозалежності і взаємодії реальних проблем у різних галузях практичної діяльності, що склалася на той час у світі, образно описав А. Печчеї — економіст і суспільний діяч, ініціатор створення міжнародної наукової організації «Римський клуб» (1972). Його діяльність і роль у становленні глобальної проблематики докладно описано у [22]. У своїй книзі [145] А. Печчеї доводив: «Немає більше економічних, технічних або соціальних проблем, які існували б відокремлено, незалежно одна від одної, які можна було б обговорювати в межах однієї спеціальної термінології і розв'язувати не поспішаючи, окремо, одну за одною. У нашому штучно створеному світі буквально все досягло нечуваних розмірів і масштабів: швидкість, енергія, складність, а також наші проблеми. Вони тепер одночасно і психологічні, і соціальні, і економічні, і технічні, до того ж ще й політичні; більш того, тісно переплітаючись і взаємодіючи, вони пускають корені та дають наростки в суміжних і віддалених сферах». Автор перелічує процеси й фактори, що є причинами виниклої ситуації. Серед них: нерівність і неоднорідність суспільства; соціальна несправедливість, голод, недоїдання та бідність; неписьменність, безробіття, відчуття нестабільності та занепад моральних цінностей; зростання злочинності і насильства; погіршення стану навколишнього середовища й потенційна або вже наявна нестача природних ресурсів тощо.

Далі А. Печчеї доходить висновку, що причиною такої ситуації є насамперед неусвідомленість людством взаємозв'язків і взаємозалежності цих факторів, процесів і проблем, що утворюють складний, заплутаний клубок. І тому необхідно вживати рішучі заходи з оцінювання й роз'яснення суті проблем, поки ще не стало занадто пізно.

Римський клуб прийняв парадигму обмеженого зростання і холистичного розвитку в знаменитій праці «Межі росту». Заслужовують на увагу такі її положення [22]:

- ♦ розвиток повинен бути систематичним, багатоаспектним і взаємозалежним, щоб жоден елемент системи не міг зростати за рахунок інших;
- ♦ несуперечливість світу має бути гарантована координацією цілей;
- ♦ головний аспект має зосереджуватися на якості розвитку, забезпеченні зростання добробуту людської особистості.

Римський клуб за чверть століття свого існування зробив багато чого для розуміння стану і процесів розвитку глобальної проблематики, можливих їх негативних наслідків [22, 97, 100, 101, 144, 145, 231]. За цей період під впливом результатів діяльності Клубу створювалися інші міжнародні організації, зокрема Міжнародний інститут прикладного системного аналізу (Лаксенбург, Австрія), що виконав, зокрема, кілька важливих програм з екології та ризиків, певні результати і відомості про які наведені у [23].

Продовжуючи досліджувати сучасний стан світу, у якому за останні 15 років відбулися фундаментальні зміни, Римський клуб змушений визнати, що становище у глобальній проблематиці не тільки не покращилося, але й продовжує погіршуватися [22, 100, 101, 168]. Є багато різних причин, зокрема політичних, економічних, соціальних, котрі перешкоджають розробці й реалізації раціональних стратегій, спільних дій усього людства у справі запобігання глобальній катастрофі, що насувається. Відзначимо одну з найважливіших таких причин: сучасна методологія системного аналізу не відповідає глобальній, багаторівневій, ієрархічній, багатодисциплінарній структурі різноманітних, багатфакторних, багатфункціональних взаємозв'язків, взаємозалежностей і взаємодій об'єктів дослідження. Вона недостатньо використовує потенційні можливості глобальної, багаторівневої, ієрархічної системи інформаційних комп'ютерних систем і мереж, що є потенційним інструментарієм дослідження глобальної проблематики.

Одним із шляхів усунення зазначеного недоліку можна вважати послідовну розробку концепцій, стратегій і програм дослідження найважливіших проблем сучасності. Мова насамперед йде про проблеми передбачення якісних і кількісних змін у різних сферах практичної діяльності [54, 55, 232, 263], управління ризиками і безпекою складних технічних систем, техногенно та екологічно небезпечних процесів [166, 209, 246, 247], розвитку інтелектуальних інформаційних технологій і мереж підтримки наукових досліджень [116], взаємодії природи і суспільства на основі глобального екологічного моніторингу, оцінювання тенденцій і управління розвитком світової екологічної системи [97, 111].

Отже, визначальним принципом системних досліджень четвертого етапу стає глобальне бачення досліджуваних проблем з урахуванням зростаючих взаємозв'язків і взаємозалежностей усіх країн світу. Головною метою досліджень стає досягнення такого системно погодженого, взаємозалежного розвитку всіх компонентів цивілізації, при якому жоден елемент світової системи не може зростати за рахунок інших. Для досягнення цієї мети необхідно зосередити зусилля на подоланні методологічної кризи,

що виникла наприкінці 70-х років минулого століття. Доцільно сформувати структуру методології системного аналізу, забезпечивши її системне, функціональне узгодження з ієрархічною структурою взаємозв'язків, взаємозалежностей і взаємодій об'єктів дослідження і відповідно з ієрархічною структурою інформаційних комп'ютерних систем і мереж як інструментальної основи її реалізації. Таким чином, четвертий етап є етапом глобалізації системної проблематики.

1.3. Роль глобалізації світових процесів у розвитку системних досліджень

Як впливає з попереднього підрозділу, етап глобалізації суттєво вплинув на розвиток методології і сфери застосування системного аналізу. Одним із прикладів системного підходу до аналізу процесів розвитку цивілізації на цьому етапі є глобальне моделювання — напрям системних досліджень, початок якому поклала відома робота Дж. Форрестера «Світова динаміка» [183]. Характерним прикладом підвищення інтересу до зазначеної проблематики може бути дослідження науково-технічних інновацій. У 70-ті роки минулого століття поряд із традиційними для цієї сфери проблемами інноваційної політики фірм і компаній, взаємопроникнення нововведень тощо починають широко обговорювати вплив інновацій на довгострокові тенденції економічного розвитку, їхню роль у формуванні так званих великих циклів.

1.3.1. Особливості переходу від індустріального суспільства до інформаційного в епоху глобалізації

Важливо виділити стрімкий за темпами і глобальний за масштабами перехід від індустріального суспільства до інформаційного. Цей процес характеризується насамперед зростанням ролі інформаційних технологій та телекомунікаційних мереж як у світовій економіці загалом, так і в кожній окремій країні. Вже сьогодні інформаційний сектор економіки деяких країн приносить їм більш ніж 20 % валового національного доходу. Оцінки провідних експертів світу свідчать про надзвичайно високі темпи розвитку ринку інформаційних систем, технологій і послуг. Темпи зростання становлять понад 11 % на рік, а обсяг ринку подвоюється кожні 5 років. Ще більш вражаючими є темпи розвитку мережі Інтернет — упродовж останніх 5 років вона щомісяця зростає приблизно на 10 %. Практика розвитку світової економіки передбачає, що світовий ринок інформатизації за своїм обсягом може перевершити найближчим часом такі високоекономічні галузі, як газову, нафтову, енергетичну.

Визначна роль інформаційно-телекомунікаційного сектору й у створенні нових робочих місць, й у підвищенні експортних можливостей розвинутих держав. Найпоказовішим у цьому контексті можна вважати досвід США як країни, що є світовим лідером у справі переходу до інформаційного суспільства. З огляду на те, що все пізнається у порівнянні, наведемо такі дані щодо рівня інформатизації. До середини 90-х років минулого століття у США було зосереджено 43 % світового парку комп'ютерів, а частка її найближчих конкурентів із найрозвинутіших країн становила: Японія — 7 %, Німеччина — 6 %, Великобританія — 5 %, Франція — 4 %, Канада — 3 %, Італія — 2,5 %. Іспанія — 1,8 %, Південна Корея — 0,96 %. Інші країни мали показник менш ніж 1 %.

У США зосереджено 52,2 % баз даних і знань із точних і технічних дисциплін, 69,1 % — із соціально-економічних. Із десяти найбільших фірм-виробників програмного забезпечення шість є американськими.

Досить цікавим є соціально-економічний ефект, що виникає внаслідок бурхливого розвитку інформаційного сектору світової економіки. Спостерігається, здавалося б, парадоксальне явище: інформатизація начебто повинна породжувати безробіття, а не створювати нові робочі місця. Однак насправді відбувається автоматизація і комп'ютеризація робочих місць із важкою фізичною працею і створення в інформаційно-телекомунікаційному секторі промисловості нових місць. Особливо яскраво ця тенденція проявлялася в США до середини 90-х років минулого століття: на той час сектор став найбільшим «роботодавцем» у промисловості, забезпечивши тільки у 1996 році створення 4,3 млн. нових робочих місць. Згідно з результатами досліджень Американської дослідницької асоціації, індустрія інформаційних технологій принесла США 6,2 % національного доходу. Середня заробітна плата робітників у цьому секторі була на 73 % вища, ніж середня у приватному секторі в інших галузях. Зазначений сектор домінував у витратах на дослідження і розвиток з обсягом 40 млрд. доларів на рік або 37 % усіх витрат на науку. Економічна депресія на початку нового століття дещо послабила окреслену тенденцію, але не призвела до втрати провідного становища цього сектору економіки не лише в США, але й в інших розвинутих країнах.

1.3.2. Перерозподіл трудових ресурсів в основних типах суспільства

Внаслідок перерозподілу трудових ресурсів між визначальними секторами економіки вже сьогодні в деяких країнах світу в інформаційно-телекомунікаційній сфері зосереджено понад 50 % трудових ресурсів, зокрема у США — близько 80 %. За оцінками експертів, у першому десятилітті XXI століття таке становище стане характерним для більшості розвинутих країн Європи, Азії та Америки.

Зазначимо, що незалежно від типу суспільства трудові ресурси завжди концентруються там, де розв'язуються головні завдання, пов'язані з його розвитком. Перед аграрним суспільством стояло завдання звільнити людство від голодної смерті, і тому переважну частину трудових ресурсів було зосереджено в сільському господарстві. Індустріальне суспільство мало розв'язати інше завдання — забезпечити можливість пересування людини в будь-яку точку планети, механізацію та автоматизацію фізичної праці в різних сферах діяльності, і переважна частина трудових ресурсів була зосереджена у промисловості. Інформаційне суспільство ставить принципово нове, комплексне завдання, а саме: забезпечити автоматизацію розумової праці на основі раціонального використання технічних досягнень індустріального суспільства, звільнити людину від рутинної роботи, пов'язаної з передачею, збором, обробкою і збереженням інформації, створити умови для доступу до глобальних інформаційних ресурсів людства з будь-якої точки планети, забезпечити раціональне використання накопичених знань для розв'язання різноманітних проблем, що виникають перед суспільством. Сформована технологічна культура кінця XX століття, насамперед поява принципово нових можливостей обробки, передачі та збереження інформації створили необхідні передумови й умови для практичної реалізації цього завдання. Зазначені тенденції схематично показано на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Розподіл трудових ресурсів у суспільстві різного типу: аграрному, індустріальному, інформаційному

Розглянемо деякі інші важливі властивості та особливості інформаційного суспільства, що значною мірою зумовили необхідність і доцільність становлення та розвитку ідей системності:

- ♦ різке підвищення динамічності економічних, соціальних, політичних процесів як у світі загалом, так і в окремих регіонах зокрема;
- ♦ безперервне зростання кількості даних: сьогодні обсяг щорічно оброблюваної у світі інформації дорівнює загальному обсягу інформації, накопиченої людством до початку Першої світової війни;
- ♦ в інформаційному суспільстві первинною є не вартість праці, а вартість знань (основна тенденція розвитку сучасного суспільства — значне підвищення інтелектуалізації процесів управління і виробництва);
- ♦ зростання соціально-економічного значення наукомістких технологій, безперервне нарощування темпів їхньої розробки і впровадження в різні галузі економіки.

У сучасному розумінні *наукомістка технологія* — це великомасштабна системна технологія, технічно реалізована у вигляді складної багаторівневої ієрархічної системи, яка з метою досягнення практичних цілей поєднує структурно і зв'язує функціонально різномірні фізичні, хімічні, механічні та інші технологічні процеси в єдиний виробничий процес. Кожна така технологія зазвичай є унікальною, тобто не має аналогів і прототипів. Зазначимо, що термін «наукомістка технологія» пояснюється значним внеском результатів наукових досліджень у її розробку і реалізацію. Наукомісткі технології відкрили можливості для реалізації принципово нових ідей і рішень у різних сферах людської діяльності. Вони дають змогу стрибкоподібно долати технічні бар'єри та створювати раніше невідомі вироби різного призначення.

Історія розвитку цивілізації знає багато прикладів стрибкоподібної зміни основних властивостей і характеристик різних видів техніки. Наприклад, перехід від авіації з поршневими двигунами до реактивної авіації дав якісний стрибок у швидкості переміщення літальних апаратів. Як найбільш вражаючий приклад принципово нового виду техніки можна навести широкий перелік зразків космічної техніки різного призначення. Її поява поклала початок широкому вивченню та освоєнню людиною космічного простору, використанню властивостей мікрогравітації і мікровакууму космосу

для створення нових технологій, одержання речовин і сплавів, що практично неможливо реалізувати в земних умовах. Вагомий внесок у розвиток космонавтики зробила і Україна, на підприємствах якої було створено 67 типів космічних апаратів, 12 космічних і 4 ракетно-космічних комплекси.

Науково-технічний прогрес поставив принципово нові завдання перед наукою і технікою, зумовив необхідність нового підходу до створення сучасних технічних об'єктів і технологій, а також до вивчення явищ і атрибутів сучасного світу. Серед цих завдань особливе місце займають задачі системного аналізу. Практична важливість розв'язання системних задач зумовлена тим, що в сучасному світі наукові, технічні, технологічні, соціальні, економічні, політичні й інші сфери діяльності людини не можуть існувати окремо. Вони завжди складають цілісне середовище проживання й активної діяльності людей. Зміни в кожній із цих сфер неодмінно позначаються на інших сферах, проблеми однієї сфери впливають на проблеми інших. Таку залежність визначають взаємозв'язки різної природи — фінансової, матеріальної, енергетичної — у формі трудових ресурсів, складу, рівня і якості життя, рівня й тенденцій розвитку технологій тощо.

Звідси випливає необхідність системного підходу до розв'язання комплексних задач у різних сферах діяльності. На цей факт звернув увагу Л. фон Берталанфі, який зазначив [9], що «...системний підхід став нагальною потребою. Коли задано деяку ціль, то для знаходження шляхів і засобів її досягнення потрібен фахівець (або група фахівців) у галузі систем, який розглядає альтернативні розв'язки і вибирає ті з них, котрі забезпечують оптимізацію, найбільшу ефективність і мінімальні витрати в надзвичайно складних схемах взаємодій». Відсутність системного підходу під час розв'язування комплексних практичних задач може призвести до небажаних, непрогнозованих або катастрофічних наслідків. Як приклад можна згадати відому історію буму і подальшого різкого падіння попиту на електричні друкарські машинки. Багато фірм, що виготовляли такі машинки, стали банкрутами лише тому, що не здійснили всебічного системного аналізу потенційних конкурентів, не оцінили вчасно можливості та переваги персональних комп'ютерів у підготовці рукописів і оформленні друкованих видань.

Характерною рисою сучасного етапу науково-технічного прогресу є також стрімко зростаюча складність взаємозв'язків і взаємодії різних сфер діяльності людини і навколишнього середовища. Глобальні масштаби взаємного позитивного й негативного впливу різних процесів та їхній високий динамізм викликали зміну звичних стереотипів у розумінні ступеня й рівня впливу цивілізації на навколишнє середовище. Пророцтво глобальних екологічних катастроф стало реальністю. Це підтверджує той факт, що вплив людства на біосферу вже перевищує реальні можливості планети компенсувати його наслідки. Тому головний висновок вчення В. І. Вернадського про те, що на певному щаблі свого розвитку людство має взяти на себе відповідальність за подальшу еволюцію нашої планети, повинен бути негайно втілений у життя. У протилежному випадку людство не матиме майбутнього. Розв'язання цієї надзвичайно важливої проблеми неможливе без виконання системного аналізу виниклої глобальної проблемної ситуації, без передбачення на основі системного мислення сценаріїв її розвитку, без прогнозування на базі системної методології необхідних дій для виключення негативних результатів.

Таким чином, виникнення і розвиток системного мислення, системної методології й системного аналізу зумовлено об'єктивною необхідністю пізнання світу в усьому його різноманітті і цілісності в інтересах найраціональнішого використання матеріальних, енергетичних та інформаційних ресурсів планети на благо людства.

1.4. Системність людської практики

У попередніх підрозділах цього розділу було розглянуто властивості та особливості етапів становлення й розвитку системного аналізу з позиції виявлення факторів, причин та умов, що призвели до необхідності і довели доцільність формування системного мислення, системної методології, системних досліджень.

Далі будуть розглянуті процеси становлення та розвитку системного аналізу з інших позицій — виявлення й дослідження факторів, причин і умов, що спричинили становлення та розвиток системності практичної діяльності людини. Основну увагу необхідно приділити формуванню і реалізації нових ідей та прийомів рішення системних проблем, пов'язаних із практичною діяльністю, системним оцінюванням винаходів, інноваційними проектами та іншими аспектами розвитку нової техніки, нових технологій, нових сфер практичної діяльності. Також розглядатимуться роль і місце системних аналітиків у розробці нових ідей та створенні нової техніки.

1.4.1. Становлення і розвиток системності практичної діяльності людини

Зростання інтересу до системних досліджень зумовлено глибокими якісними змінами в науково-технічному та соціально-економічному розвитку цивілізації, які пов'язані з безперервним ускладненням технічних засобів і технологій виробництва, з появою принципово нових видів техніки, з посиленням взаємозв'язку і взаємозалежності явищ і процесів різної природи: економічних, соціальних, екологічних, технологічних, інформаційних. Важлива роль у цих змінах належить науково-технічному прогресу. Власне кажучи, системні дослідження з'явилися як відповідь на постійно зростаючу складність інфраструктури світу:

- ♦ ускладнення техносфери і структуризація її відображення та формалізації як багатопольової, багаторівневої, багатозв'язної ієрархічної системи;
- ♦ безперервне прискорення темпів зміни поколінь технологій у різних галузях виробництва і поколінь різноманітної техніки різного призначення;
- ♦ невпинне зростання складності, взаємозалежності і взаємозв'язку практичних задач управління економічними, соціальними, екологічними, технологічними, науково-технічними та іншими процесами.

Перелічені фактори зумовили суттєве підвищення вимог до якості та ефективності управління у різних сферах людської діяльності, сприяли створенню потреби в нових засобах і методах формування та обґрунтування розв'язків. Тому на певному етапі розвитку цивілізації виникає все більша потреба у системному мисленні, системній методології, системних дослідженнях.

Назвемо деякі фактори та причини, що зумовили становлення, а сьогодні ще й стимулюють розвиток системності практичної діяльності людини. Так, безперечно, що від ефективності виробництва залежать темпи розвитку економіки і зростання соціального добробуту країни. Темпи підвищення ефективності виробництва, у свою чергу, визначаються насамперед динамікою зростання продуктивності праці. Звідси випливає практична потреба в розробці та впровадженні у практику як прийомів і методів раціональної організації праці, так і нових технологій і технічних засобів підвищення її продуктивності. На ранньому етапі розвитку цивілізації переважала ручна праця з використанням

найпростіших знарядь і тяглової сили тварин, а єдиним доступним засобом підвищення продуктивності праці могла бути лише її раціональна організація.

Бурхливий розвиток технічних засобів підвищення продуктивності праці й зумовлена цим поява нових технологій припадають на період першої науково-технічної революції, початок якій поклав винахід парової машини. Парова машина стала не лише якісно новим знаряддям виробництва, що замінило тяглову силу тварин, але й потужним каталізатором створення й впровадження нових технічних засобів і промислових технологій. Ці фактори стимулювали процес досить швидкого переходу від кустарного виробництва до промислового, завдяки чому стали можливими розробка й впровадження у практику нових способів і технологій підвищення продуктивності праці. Першим таким способом стала механізація. Вона дала змогу відмовитися від багатьох видів важкої ручної праці у виробництві та суттєво підвищити його продуктивність. Однак механізація має певні недоліки та природні обмеження, що пояснюються багатьма обставинами. До найважливіших із них можна віднести обмеженість сфери механізації, збереження фізичного навантаження на людину. Наявність досить складних виробництв, що використовували різні типи засоби механізації, потребувала спільної погодженої діяльності обслуговуючого персоналу, що створило один із перших прецедентів системності функціонування механізмів і персоналу. Тому механізацію можна розглядати як *перший рівень системності* практичної діяльності людини.

Більш досконалим способом підвищення продуктивності праці є створення автоматизованих і автоматичних виробничих технологій та систем, що характеризують *другий рівень системності* практичної діяльності людини. Його головна ціль полягає в тому, щоб у процесі експлуатації автоматизованих виробничих систем суттєво обмежити участь людини у виробничому процесі, покласти виконання найбільш трудомістких, небезпечних, одноманітних операцій саме на такі системи, а функції управління й контролю за цими процесами передати людині.

Незважаючи на високий рівень розвитку сучасних систем автоматизації, їхні можливості виявляються також обмеженими. Автоматизувати можна лише такі технологічні процеси, які детально вивчені й підлягають алгоритмізації та програмному керуванню. У реальних виробничих умовах часто доводиться стикатися з непередбаченими позаштатними ситуаціями, що можуть призвести до випуску браку або, що ще значно гірше, до аварії або катастрофи. За цих умов у системах управління необхідно використовувати людину, її інтелект, інтуїцію та досвід, здатність орієнтуватися в незнайомих умовах і знаходити розв'язки погано формалізованих задач, здатність передбачати сценарії розвитку ситуації у процесі формування й реалізації розв'язків. У такому разі людина виконує саме ті операції з управління, що не піддаються формалізації (наприклад, експертну оцінку, якісне порівняння багатofакторних альтернатив, прийняття і реалізацію управлінських рішень тощо). Такі проблеми нерідко виникають у процесі управління багатofункціональними виробничими системами, для яких характерно періодичне багаторазове переналагоджування технологічних ліній і верстатів із вбудованим програмним управлінням. Крім того, у складних виробничих системах присутні технологічні процеси, що не можна формалізувати. Для них формалізація деяких практично важливих технологічних операцій є вкрай складною або недоцільною. Найчастіше такі проблеми виникають на етапах проектування й модернізації просторово віддалених, великих багатогалузевих технологічних комплексів.

Третій рівень системності практичної діяльності людини пов'язаний із впровадженням у виробництво потужних обчислювальних методів і засобів. Комп'ютеризація забезпе-

чує кращі можливості для підвищення продуктивності праці порівняно з автоматизацією, оскільки відкриває можливість автоматизації не лише фізичної праці, а й розумової. Останній вид автоматизації є якісно новим, він з'явився внаслідок другої науково-технічної революції, що відкрила можливість виробництва та впровадження у практику обчислювальної техніки, в першу чергу персональних комп'ютерів, і високоефективного системного та прикладного програмного забезпечення.

Якісно новим видом комп'ютеризації, який відкриває можливість системної автоматизації фізичної і розумової праці на інтелектуальному рівні, є інтелектуалізація. Саме зі створенням засобів і методів штучного інтелекту пов'язаний *четвертий рівень системності* практичної діяльності людини. З'являється можливість створювати робототехнічні комплекси із широким спектром робочих функцій і застосовувати їх у різних сферах практичної діяльності, у тому числі для роботи в умовах, небезпечних для життя людини. Такі комплекси здібні, зокрема, виконувати замість людини певні інтелектуальні функції, що потребують прийняття рішень. Крім того, відкриваються можливості для створення інтелектуальних засобів спілкування людини з комп'ютером, який буде розрізняти голос, текст, схеми.

Таким чином, до початку XXI століття цивілізація створила кілька типів засобів технічного удосконалення праці людини, які одержали практичне застосування у різних сферах її життя та діяльності. Кожний тип є характерним для певного виду робіт і певного етапу розвитку науки і техніки, що відповідним чином впливало на організацію і технологію виробництва, на структуру та функції управління ним, і тому належить до відповідних рівнів системності практичної діяльності людини. Взаємозв'язок цих типів засобів технічного удосконалювання праці і деяких їхніх властивостей відображено на діаграмах (рис. 1.2).

Отже, системність є невід'ємною властивістю практичної діяльності людини. Не викликає сумнівів, що виробництво з вищим рівнем системності здатне випускати продукцію вищої якості й більшого обсягу порівняно з виробництвом, що має нижчий рівень системності. Тому досягнутий рівень системності технологічних процесів є не тільки важливим показником потенційної продуктивності та ефективності конкретного виробництва, але й показником потенційної конкурентоспроможності його продукції. Однак не можна не зазначити, що рівень реалізації цих показників безпосередньо залежить від рівня системності, мобільності й оперативності системи управління виробництвом. Таким чином, для практичної реалізації високих показників конкретного виробництва необхідно забезпечити системну погодженість можливостей виробництва й можливостей управління за цілями, задачами, термінами, ресурсами та очікуваними результатами.

Ця умова є необхідною, але не достатньою для досягнення успіху за наявності жорсткої ринкової конкуренції. Подбати необхідно не лише про високу якість продукції, але й про її місце на національному і світовому ринках. Для досягнення цієї цілі потрібно виконати дві найважливіші умови. По-перше, забезпечити системну погодженість усіх показників і обмежень технологій та всіх якісних показників і контрольованих параметрів продукції з вимогами й обмеженнями міжнародного права, міжнародних стандартів та міжнародних договорів. У протилежному випадку може так статися, що на світовий ринок не буде допущено перспективну високоякісну продукцію, що не має у світі прототипів чи аналогів. Таку ситуацію буде проілюстровано далі на прикладі надзвукового літака ТУ-144. По-друге, необхідно апріорно забезпечити системну погодженість усіх якісних показників і контрольованих обмежень продукції з конкретними запитами та потребами потенційного споживача.

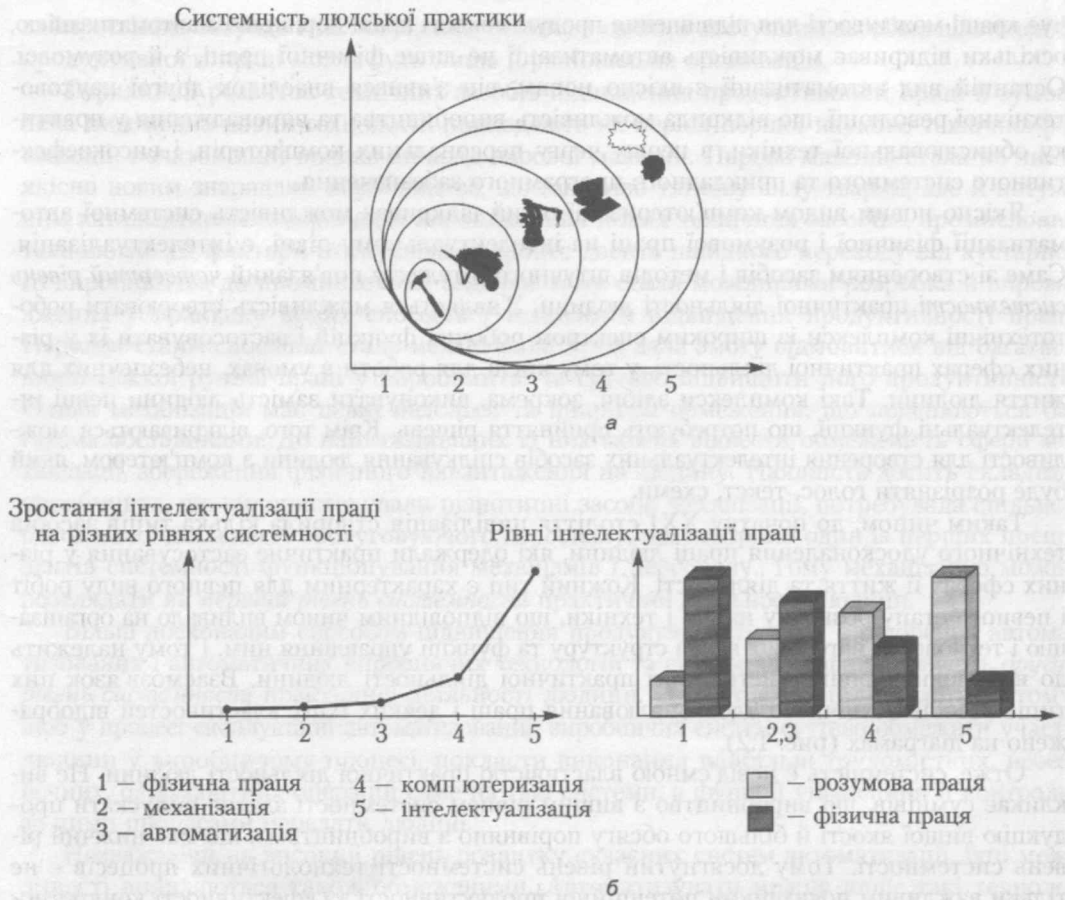


Рис. 1.2. Рівні системності у практичній діяльності людини: еволюція засобів праці з переходом від одного рівня системності до іншого (а); співвідношення між розумовою і фізичною працею на різних рівнях системності (б)

Не викликає сумнівів той факт, що склад рівнів системності та їхніх процентних співвідношень у конкретній галузі виробництва є своєрідними базовими показниками її можливостей та недоліків, які достатньо повно характеризують технологічний рівень і виробничий потенціал цієї галузі, а також побічно відображують ступінь системної погодженості її виробництв за цілями, задачами, термінами, ресурсами та очікуваними результатами.

1.4.2. Системність інноваційної діяльності

Зростання системності практичної діяльності зумовлюють не лише розглянуті раніше фактори. Воно також спричинене безупинним збільшенням обсягу та рівня залежності, динамізму і складності взаємодії багатьох взаємозалежних і суперечливих факторів. Особливо наочно роль і значення системності, мобільності й взаємозв'язку різних об'єктивних та суб'єктивних факторів виявляється у становленні та розвитку інноваційної діяльності як у світовій економіці, так і в економіці окремих держав. Цілком очевидно, що стан та інноваційний розвиток економіки кожної країни залежать від

таких об'єктивних факторів, як наявність фінансових, матеріальних, енергетичних та інших ресурсів.

Але разом із тим стан економіки суттєво залежить від рівня продуктивності праці, який, у свою чергу, визначається багатьма різнорідними факторами: рівень розвитку технологій і технологічного устаткування, мобільність, рівень життя, освіти й культури населення, а також місцеві та регіональні умови, зокрема можливість наймати робочу силу, вартість життя й загальні життєві умови в різних регіонах тощо. Крім того, продуктивність у тій чи іншій галузі суттєво залежить від рівня капіталовкладень, а отже, від наявності кредиту та рівня інвестицій, від процентних ставок та податкового обкладання. У той же час наявність і рівень інвестицій, а також рівень процентних ставок багато в чому залежать від стану й стабільності економіки країни, від стану, перспектив і тенденцій розвитку інвестицій у галузі загалом і на конкретному підприємстві галузі зокрема, а також від багатьох інших економічних та соціальних факторів. До найважливіших соціальних факторів слід віднести такий латентний показник, як ступінь довіри різних верств населення до соціально-економічної політики керівництва країни.

Проте важливе значення має не лише довіра різних верств населення до керівництва країни, а й довіра до нього державних діячів і ділових кіл інших країн. Наявність високого ступеня довіри до соціально-економічної політики, яка проводиться керівництвом країни, є найважливішою умовою досягнення й забезпечення життєздатності економіки. Слід особливо наголосити, що позитивних результатів можна досягти шляхом проведення багатьох різноманітних заходів, які повинні бути, з одного боку, системно погодженими за цілями і задачами, очікуваними результатами й термінами, з іншого боку, постійно доводити незмінність і демонструвати результативність чинної політики. Позитивний приклад такого підходу в економічній політиці продемонстрував президент США Ф. Рузвельт під час виводу країни з великої депресії 1929–1932 років. Разом із тим протилежний підхід, а саме відсутність належної оцінки системного взаємозв'язку різних процесів і факторів, відсутність системного аналізу, відмова від прогнозування сценаріїв розвитку і намагання передбачити позитивні та негативні наслідки прийнятих рішень у проведенні соціально-економічної політики може швидко призвести до суттєвого погіршення економічного і соціального становища в країні. Приклади такого нераціонального підходу до ведення соціально-економічної політики наочно продемонстрували всі нові незалежні держави, що утворилися на території колишнього СРСР, у перші роки становлення їхньої державності і незалежності.

Фактори системності проявляються не лише в економіці держави загалом, але й в окремих галузях, зокрема під час розробки та реалізації окремих великих технічних проєктів. Як негативний приклад можна ще раз згадати історію першого у світі надзвукового пасажирського літака ТУ-144, що почалася тріумфом наприкінці 70-х років минулого століття і закінчилася дуже сумно на початку 80-х, тому що літак не пішов у серійне виробництво. Необхідно зазначити, що найважливіші стадії життєвого циклу, які передують серійному виробництву і подальшій експлуатації лайнера, були виконані на найвищому рівні у повній відповідності з теорією і практикою розробки авіаційної техніки, що доводять випробування і дослідні польоти перших зразків літака. Літак мав такі льотно-технічні показники, які свідчили про створення якісно нового класу пасажирських літальних апаратів. Наприклад, його швидкість перевищувала швидкість звуку у 2,5 рази, тобто дорівнювала $M = 2,5$. Цей показник пасажирських літальних

апаратів не перевершено й дотепер. Наприклад, швидкість його конкурента, літака «Конкорд», створеного кількома роками пізніше, дорівнювала $M = 2,3$. Одним словом, усе було зроблено у повній відповідності як з усіма потрібними в такій ситуації теоріями, зокрема з теорією складних систем, так і з досвідом авіабудівельної та авіаційної практики. Більш того, в експлуатацію не було допущено навіть дослідні зразки. Цілком природно, що виникає низка запитань.

- ♦ Що призвело до настільки несподіваного фіналу процесу розробки й впровадження такого складного, технічно досконалого виробу?
- ♦ Чому явні переваги й нові можливості літака, який на той час не мав ані конкурентів, ані аналогів та прототипів, виявилися недостатніми для ухвалення рішення про його серійне виробництво і практичне використання?
- ♦ Які помилки розробників чи недоліки літака перекреслили всі його переваги і нові можливості?

Аналіз показує, що в осіб, які приймають рішення (ОПР), справді було достатньо підстав зробити висновок не лише не вигідний економічно, але й настільки несподіваний і принизливий для розробників. Не заглиблюючись у деталі, подамо тільки факти, що мають безпосереднє відношення до розглянутої тут проблеми. Насамперед, аби не допустити хибного тлумачення подальших висновків і тверджень, наведемо деякі важливі відомості. По-перше, літак практично цілком відповідав усім загальним і льотно-технічним вимогам державних стандартів. По-друге, він не мав жодних недоліків, що хоча б трохи зменшували його переваги і можливості. По-третє, немає підстав стверджувати, що на певному етапі проектування розробники невірно сприймали вихідні дані або задані вимоги і тому припустилися помилок.

Суть виниклої у свій час ситуації зводиться до такого. Розробники технічного завдання, очевидно, розглядали літак як складну технічну систему не з позиції загальної теорії систем, а з використанням тільки авіаційних і аеродинамічних знань, і тому під час формування вимог не приділили належної уваги системному узгодженню льотно-технічних вимог до надзвукового літака із технічними можливостями системи його наземного обслуговування. Не надали цим аспектам належної уваги і розробники літака. Тому принципово новий літак проектували як окремий технічний об'єкт, а не як певний елемент нової складної авіаційно-технічної системи, до складу якої входять служби управління польотами, наземного обслуговування та інші функціональні підрозділи обслуговування. Отже, не було здійснено на належному рівні системного аналізу об'єкта, що складається з літального апарата і середовища його функціонування. Ця обставина не дала змоги вчасно виявити, обґрунтувати, розробити і реалізувати заходи щодо створення принципово нової системи обслуговування. На етапі випробування ТУ-144 з'ясувалося, що наявні системи управління польотами і наземним обслуговуванням нездатні забезпечити експлуатацію цього літака, тому що його надзвукова швидкість потребувала принципово нової технології забезпечення польотів. Крім того, не повною мірою було дотримано міжнародних стандартів, зокрема не забезпечено вимог щодо шумових показників у межах аеродромів. Цей приклад є, на нашу думку, переконливим доказом високої значимості системності практичної діяльності в інноваційній сфері, особливо на етапі формування об'єкта системного дослідження.

Тепер перейдемо до розгляду досить яскравого позитивного прикладу, а саме історії появи персонального комп'ютера (ПК). Передусім слід наголосити, що історія електронних обчислювальних машин відлічує шостий десятик років. А перший ПК, «Apple-1»,

був випущений у 1976 році. У ньому було передбачено можливість, яку умовно можна назвати «програмуванням користувача». Він став тією продукцією, котра зробила революцію у світі обчислювальної техніки. Наступний ПК, «Apple-2», що побачив світ у 1977 році, було оснащено клавіатурою і кольоровим монітором. Саме цей комп'ютер за виконуваними функціями і складом комплектуючих елементів уперше визначив стандарт ПК, що діє дотепер.

Винахідником першого персонального комп'ютера був американський конструктор Стів Возняк, однак тільки його співвітчизник Стів Джобс, який узявся за втілення проекту в життя, перетворив винахід С. Возняка в реальну продукцію. С. Джобс продав свій автобус, умовив С. Возняка продати калькулятор і на одержані гроші організував у будинку батьків міні-фабрику. Реакція фахівців на випуск ПК «Apple-1» і «Apple-2» була неоднозначною. Так, компанія IBM, яка на той час вважалась найбільшим у світі виробником і незмінним лідером комп'ютерної промисловості, та сім інших відомих, але дещо дрібніших фірм, стверджували, що ринок користувачів ПК становитимуть лише самі винахідники цього комп'ютера. Такі фахівці, як Роберт Нойс — винахідник інтегральних мікросхем і творець компанії Intel, Нолан Бушнел — засновник індустрії відеоігор, президент фірми «ATARI» Білл Х'юллет — один із творців Hewlett Packard, також запевняли, що ані «Apple-1» чи «Apple-2», ані будь-який інший ПК такого класу не буде користуватися попитом. Однак, незважаючи на такі песимістичні прогнози корифеїв комп'ютерної промисловості, роботу з випуску та удосконалення ПК «Apple» було продовжено. С. Джобс, володіючи здатністю технологічного передбачення, не мав жодних сумнівів щодо значення ПК для практичної діяльності спеціалістів із найрізноманітніших галузей науки й техніки, у чому переконав і свого партнера С. Возняка.

Чим закінчилася ця історія відомо, проте не зайвим буде відзначити два такі факти. Якщо великі, середні та малі ЕОМ протягом всієї історії їхнього виробництва рахувалися одиницями, то ПК відразу почали лічити тисячами, а до кінця XX століття рахунок ішов вже на десятки й сотні мільйонів. Ринок ПК за 5 років сягнув 30 млрд. доларів, а бізнесу великих обчислювальних машин для цього знадобилося 30 років. Пояснюється це тим, що ПК наблизився до потреб людини, назавжди змінив прийоми і методи, якими людство користувалося в роботі під час оформлення документів, підготовки рукописів, передачі і читання повідомлень, різноманітних обчислень та оформлення їхніх результатів. Внесок персонального комп'ютера у розвиток науково-технічного прогресу на кілька порядків вищий, ніж обчислювальної техніки будь-якого іншого типу. ПК стимулював розвиток інформаційних технологій і систем, став основним функціональним елементом наукомістких технологій і, власне кажучи, головним катализатором стрімкого переходу цивілізації до інформаційного суспільства. Разом із тим не слід вважати, що процес переходу від індустріального суспільства до інформаційного став можливим лише завдяки винаходу ПК. Віддаючи належне ПК і його творцям, не можна не враховувати того, що цей процес стимулювали й багато інших факторів та обставин. Серед них найважливішими досягненнями, безумовно, є:

- ♦ створення дубльованого програмного забезпечення для ПК, орієнтованого на масового користувача;
- ♦ винахід мікропроцесора і розробка технології його серійного виробництва.

Перше досягнення, що належить Біллові Гейтсу, Полу Аллену та їхній фірмі Microsoft, відкрило можливість для масового виробництва операційних систем і прикладного

програмного забезпечення для ПК. Білл Гейтс став наймолодшим мільярдером у світі і увійшов в історію XX століття як найбагатша людина планети. Друге досягнення, що належить Робертові Нойсу і його компанії Intel, дало можливість розпочати масове виробництво процесорів, які є найскладнішим функціональним елементом ПК. Ці інновації стали основою для створення індустрії персональних комп'ютерів. Так, перший у світі промисловий ПК «Apple-2» був запущений у виробництво у 1977 році, а вже у 1982 році його річний обсяг становив 700 000 штук. До кінця XX століття більш ніж 80 % ПК у світі мали програмне забезпечення Microsoft і процесор Intel.

Ця історія є досить повчальною і потребує відповіді на низку цілком природних запитань. Як могло статися, що не лише експерти найвідоміших комп'ютерних компаній світу, але й провідні спеціалісти цієї галузі, які зробили великий особистий внесок у її становлення й розвиток, були творцями і досвідченими керівниками власних великих фірм, не змогли в такому перспективному винаході, як ПК, побачити його майбутнє, зрозуміти його місце і роль у практичній діяльності людства? Чому керівники IBM та Hewlett Packard продемонстрували неймовірну короткозорість і відмовилися реалізувати проект, який їм пропонували їх колишні співробітники? Що перешкодило провідним фірмам і спеціалістам комп'ютерної галузі повірити у можливість промислової реалізації персонального комп'ютера, зрозуміти її необхідність та доцільність? А що допомогло молодому фахівцю С. Джобсу у віці 19 років, всупереч негативним прогнозам, самому взятися за втілення проекту і досягти нечуваних та непередбачуваних успіхів?

Відповідь на останнє запитання є одночасно і досить простою, і досить складною. Може здатися, що людині пощастило. Але цей фактор не зробив вирішального внеску у кінцевий результат хоча б тому, що задум С. Джобса й С. Возняка постійно зазнавав нападок з боку виробників ЕОМ. Головний фактор успіху полягає в тому, що С. Джобс, володіючи системним мисленням, усвідомив як єдину систему взаємозв'язок потреб людини під час роботи з ЕОМ і можливостей їхньої реалізації у ПК. І він зміг передбачити, з одного боку, потреби потенційних користувачів у зручному спілкуванні з ЕОМ, а з іншого боку, зумів побачити реальні шляхи їхньої реалізації. Практика довела справедливості технологічного передбачення С. Джобса. Основною ж причиною помилок, допущених зазначеними компаніями та фахівцями, є відсутність системності в оцінюванні факторів, від яких залежить обсяг ринку ПК. З огляду на високий рівень невизначеності вихідних умов і блискучі результати, що було отримано, створення ПК можна справедливо вважати одним із найяскравіших прикладів технологічного передбачення й системності практичної діяльності у реалізації нових ідей.

Як другий позитивний приклад найвищого рівня організованості і системності інноваційної практичної діяльності людини слід згадати розробку, виробництво та експлуатацію широкої номенклатури космічних апаратів у колишньому СРСР. Насамперед варто згадати, що два покоління орбітальних населених космічних комплексів, «Союз» і «Мир», експлуатували на орбіті більш ніж 20 років. Жодна інша країна світу не змогла створити за цей час жодного аналогічного комплексу. Так, США планували запустити у 1995 році у космос станцію «Фрідом», аналогічну до головного модуля комплексу «Союз», і почати її орбітальну експлуатацію з 1996 року, однак ці плани не було реалізовано. З 1997 року США стали брати участь в експериментах на комплексі «Альфа».

І лише протягом декількох останніх років США вдалося наблизитися до досягнень колишнього СРСР в освоєнні космосу за допомогою орбітальних космічних станцій.

Головними досягненнями космічної діяльності СРСР, що назавжди увійшли у світову історію, стали перший у світі запуск штучного супутника Землі, перший у світі

політ людини у космос, перший її вихід у відкритий космічний простір. Подібного успіху можна було досягти лише за умови застосування цілеспрямованого системного аналізу з урахуванням усієї сукупності факторів і проблем, взаємозв'язків та взаємодії всіх функціональних систем і пристроїв унікального наземно-космічного комплексу, що включає космічні апарати, ракети-носії, просторово-розподілені об'єкти систем запуску, засоби зв'язку й управління, різні об'єкти та устаткування систем забезпечення тощо. Цей унікальний комплекс було створено шляхом раціонально обгрунтованого, програмно-цільового планування і системно-цілеспрямованої організації колективної діяльності з розробки, виробництва, випробування, технологічної підготовки та введення в експлуатацію всіх його функціональних елементів за єдиним стратегічним задумом і системно-погодженими програмами, пов'язаними єдиною ціллю вивчення та освоєння космічного простору.

Необхідно звернути увагу на дві принципово важливі умови розробки розглянутого класу об'єктів. По-перше, розробка практично кожного космічного апарата велася за відсутності багатьох необхідних даних — важливих якісних характеристик і кількісних показників космічного середовища експлуатації апаратів, показників і характерних властивостей матеріалів в умовах інтенсивного впливу різних факторів у відкритому космосі, зокрема впливу різних видів випромінювань, мікрогравітації, мікровакууму, а також неповноти іншої кількісної та якісної інформації, що вперше стала використовуватися на практиці. Друга особливість безпосередньо впливає з першої. Суть її полягає у тому, що на етапі розробки космічного апарата практично неможливо чітко визначити, які ймовірні умови зовнішнього середовища відповідатимуть штатному режиму експлуатації, а які умови призведуть до позаштатної критичної або надзвичайної ситуації. Тому виникає потреба у прогнозуванні, аналізі та оцінці наслідків штатних ситуацій, а також можливих результатів, які у разі розробки інших об'єктів навіть не враховуються. Ці обставини є яскравою ілюстрацією не тільки загальних властивостей факторів, що визначають системність взаємозв'язку і взаємодії середовища та об'єкта, але й детального системного аналізу тонкої структури взаємозалежності властивостей цих факторів. Вони також демонструють наскільки велика складність умов розробки унікальних об'єктів, складність формування вихідної інформації, складність системного взаємозв'язку різнорідних прикладних задач, пов'язаних із розробкою, випробуванням, технічною діагностикою, експлуатацією сучасних технічних об'єктів.

Звідси випливає необхідність для розробників мати у своєму розпорядженні системно-погоджену технологію розв'язання всієї сукупності науково-технічних проблем і практичних задач, що впливають на різних етапах життєвого циклу сучасних технічних об'єктів. Ця технологія має забезпечити можливість досягнення багатьох цілей, і насамперед таких:

- ♦ раціональне використання наявної інформації різного виду, включаючи точні й наближені дані, різноманітну кількісну та якісну інформацію, зокрема нечітку, неповну, неточну і навіть суперечливу, яку нерідко формують емпірично — керуючись певним досвідом, інтуїтивно, на підставі різних здогадок, припущень, міркувань;
- ♦ своєчасне формування достатньо обгрунтованих і достовірних розв'язків за умови, що вихідна інформація не досить повна та чітка, що вона певною мірою невизначена, неточна й суперечлива.

На перший погляд цей висновок може здатися парадоксальним. Справді, чому після розв'язання найскладніших задач, що потребують розробки універсальних комплексів унікальних космічних систем і цілої низки складних технічних об'єктів інших

класів, розвитку і широкого впровадження у різні галузі виробництва наукомістких технологій, безперервного стрімкого підвищення технічних можливостей обчислювальної техніки, розробникам, як і раніше, необхідно дбати про удосконалення єдиної інтегрованої технології системно погодженого розв'язування задач, пов'язаних із розробкою виробництвом, випробуваннями, технологічною підготовкою до введення в експлуатацію та експлуатацією виробів нової техніки? Відповідь на це запитання впливає й на загальних закономірностей розвитку попиту та пропозицій. Про це дуже образно й точно сказав Д. Хіммельблад: «Складається враження, що з розширенням наших можливостей у розв'язанні складних задач із тією ж швидкістю розширюється й їхнє коло. У результаті завжди існує категорія задач, рішення яких потребує ще великих зусиль».

На завершення цього підрозділу варто сформулювати загальні висновки про сутність і значення системності у практичній діяльності людини. Із наведених вище прикладів, які демонструють її досягнення та невдачі, є очевидним, що системність, завдяки у першу чергу своїй багатогранності, відіграє важливу роль у розв'язанні складних практичних задач. Системність визначають як об'єктивні, так і суб'єктивні фактори. Її визначальними об'єктивними факторами є різноманітність взаємозв'язків і складність взаємодії різних елементів структури розглянутого об'єкта, а також високий динамізм, різноманітність і складність взаємодії даного об'єкта із зовнішнім середовищем. Найважливішими суб'єктивними факторами системності є численні форми взаємодії дослідника, системного аналітика та розробника об'єкта дослідження.

Зазначені фактори стосуються різних організаційних, науково-технічних і методологічних проблем. Серед останніх основними з позиції досягнення поставлених цілей дослідження є такі:

- ♦ визначення граничних властивостей і характеристик об'єкта дослідження;
- ♦ формулювання загальної задачі системного аналізу для об'єкта дослідження;
- ♦ вибір або розробка необхідного інструментарію для розв'язання задачі.

Під час розробки та виготовлення виробів нової техніки завжди враховують деякі умови, що визначають складність розв'язання відповідних задач. Приміром, для виробничника це будуть умови, які визначають: об'єкт праці, ціль праці, інструментарій праці та, нарешті, принцип організації праці.

Важливість зазначених умов прокоментуємо на прикладі, що на перший погляд може здатися простим чи навіть елементарним.

Насамперед потрібно звернути увагу на те, що будь-які реальні об'єкти мають практично необмежену кількість власних властивостей і необмежену кількість властивостей різних видів взаємозв'язків і взаємодій з іншими об'єктами і зовнішнім середовищем. Кожну з цих властивостей або їхню певну сукупність можна цілеспрямовано вивчати, але практично жодного реального об'єкта неможливо вивчити повністю. Більш того, вивчення багатьох властивостей складного об'єкта може виявитися зайвим чи навіть безглуздим із позиції поставленої мети дослідження. Так, безглуздо вивчати хімічний склад, радіоактивність та інші хімічні й фізичні властивості матеріалів, з яких виконано персональні комп'ютери, якщо метою системного дослідження є здатність локальної мережі деякого підприємства опрацьовувати інформацію про попит і номенклатуру продукції, яку воно випускає. Очевидно, що для досягнення поставленої мети необхідно знати інші властивості, особливості та взаємозв'язки складових об'єкта. У цьому випадку визначальними є відомості про структуру підприємства, принцип організації взаємодії його структурних підрозділів, інша інформація, що дає змогу визначити зовнішні і внутрішні інформаційні потоки, обсяг і швидкість відновлення баз

даних, необхідне математичне і програмне забезпечення для розв'язання прикладних задач забезпечення діяльності досліджуваного підприємства. Розглянутий приклад наочно показує, що в кожному конкретному дослідженні для досягнення поставленої мети дослідження потрібно з усього різноманіття властивостей, характеристик і показників об'єкта вибрати обмежену і порівняно невелику їхню кількість, але таких, що досить повно описують цей об'єкт з урахуванням його внутрішніх і зовнішніх взаємозв'язків. Іншими словами, у виборі меж досліджуваного об'єкта необхідно керуватися принципами системного аналізу, насамперед принципами цілісності.

Це твердження справедливе як у разі виконання аналізу конкретного технічного, організаційного чи іншого об'єкта на різних етапах його життєвого циклу, так і у разі виконання аналізу різних процесів його розвитку, включаючи штатні, позаштатні, критичні та надзвичайні ситуації. Звідси випливає, що об'єкт дослідження повинен бути визначений як деякий елемент реального світу, який упродовж всього його життєвого циклу можна розглядати як єдине ціле з позиції досягнення певних цілей у певних умовах. Але різні дослідники можуть трактувати цілі та очікувані результати за однакових умов по-різному через суб'єктивні фактори. Це можуть бути індивідуальні психометричні характеристики працівників, різний рівень їхніх знань, навички і досвід, уміння передбачати майбутнє і висувати гіпотези, використовувати інтуїцію під час розв'язання різних задач за умов невизначеності, неповноти, неточності і суперечливості вихідної інформації, а також нечіткості формулювання умов, критеріїв, властивостей і показників задач певного типу.

Отже, розв'язанню подібних задач притаманна певна частка суб'єктивізму. І це цілком природно, оскільки процедура формування умов і критеріїв для них є принципово неформалізованою, дослідник виконує її суб'єктивно на підставі власного досвіду та інтуїції. Неформалізованість, нечіткість, невизначеність вихідної інформації та низка інших найважливіших особливостей системності практичної діяльності людини визначає доцільність раціонального поєднання під час проведення системного аналізу як інтуїції і досвіду дослідника, так і об'єктивних знань, а також обчислювальних можливостей комп'ютерів. У цьому своєрідному симбіозі можливостей та об'єктивних наукових знань комп'ютер відіграє роль підсилювача інтуїції і творчого начала людини, тобто роль потужного інструмента у розв'язанні задач системного аналізу.

Отже, системність практичної діяльності людини визначається самою сутністю навколишнього цілісного світу, тобто вона не є результатом трактування та розуміння об'єкта дослідження відповідним розробником чи системним аналітиком. Іншими словами ця категорія є об'єктивною. І чим повніше людина опановує метод системності, тим складнішим і загадковим для неї стає цей феномен. Це положення створює значні труднощі у виявленні та інтерпретації фізичного змісту системності. Труднощі інтерпретації фізичного чи іншого змісту системності зумовлено як складністю та цілісністю навколишнього світу, так і складністю та багатогранністю взаємодії з ним людини. Отже, інтерпретація системності повинна бути пов'язана з інтерпретацією складності. Але, як справедливо зазначив Р. Розен: «Наші інтерпретації поняття «складності» майже настільки ж різноманітні, як і сама складність». Тому узагальнені інтерпретації системності не можуть бути єдиними.

Наведемо одну з можливих інтерпретацій. Системність є такою багатогранною властивістю практичної діяльності людини, яка зумовлює ефективність і результативність суб'єктивної взаємодії з об'єктивним навколишнім світом у процесі розв'язання конкретних практичних задач. За своєю природою системність є латентною, безпосередньо

невимірюваною властивістю, по суті аналогічною коефіцієнту корисної дії певного технічного пристрою.

У широкому значенні під системністю слід розуміти структурний взаємозв'язок і цілеспрямовану функціональну взаємодію певних елементів та частин як матерії, так і матеріальних об'єктів. З цієї точки зору системність є глобальною властивістю Всесвіту, що виражена як загальна властивість матерії, зокрема людського суспільства.

Слід зазначити, що різні аспекти цієї властивості з тією чи іншою мірою повноти вивчають різні природні, технічні та суспільні науки. Разом із тим жодна з цих наук не дає достатньо цілісного уявлення як про об'єкти, які мають зазначену властивість, так і про методи розв'язання системних задач, що за різноманітністю досліджуваних факторів та умов є міждисциплінарними. Припущення та обмеження аксіоматичних наукових дисциплін не завжди виконуються на практиці, і тому їхні методи в багатьох випадках неможливо застосовувати для розв'язання практичних задач. Зокрема, методи теорії дослідження операцій виявилися непридатними для знаходження розв'язків задач системного вибору раціональних альтернатив під час розв'язання складних практичних, системних проблем. І ця обставина стимулювала пошук нових підходів та методів їхнього розв'язання, які принципово відрізнялися б від прийомів і методів аксіоматичних дисциплін.

1.5. Системний аналіз як універсальна наукова методологія

Проведений аналіз основних етапів розвитку системності дає змогу визначити загальну роль і місце системного аналізу у практичній діяльності людини. Для цього розглянемо докладніше загальну структуру системної взаємодії людини, об'єкта його вивчення і навколишнього середовища. Можна показати, що до такої взаємодії зводиться задача системного аналізу багатьох типів реальних складних систем різного призначення.

Наведемо трактування деяких понять. Під *об'єктом вивчення* будемо розуміти матеріальний об'єкт природного або штучного походження, що використовується чи виробляється у процесі практичної діяльності людини, або певну ситуацію, яка з'являється внаслідок впливу природних процесів або складається в результаті практичної діяльності. *Середовище* — зовнішнє оточення людини та об'єкта дослідження (природне середовище, зовнішні об'єкти, що залежать від розглянутого об'єкта або взаємодіють із ним). *Людина* — розробник, виробник, користувач, продавець чи покупець об'єкта або фахівець-дослідник відповідної предметної галузі, до якої належить досліджуваний об'єкт.

1.5.1. Роль і місце системного аналітика під час розв'язання складних задач

Розглянемо роль системного аналітика у практичній діяльності людини. Для цього наперед необхідно з'ясувати роль системного аналізу шляхом зіставлення двох задач: традиційної фізичної задачі гравітаційної взаємодії трьох тіл і задачі системної взаємодії людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище. Схематично системну взаємодію можна зобразити у вигляді трикутника, вершинами якого є людина, об'єкт і середовище. Цю схему

називатимемо схемою 1 (рис. 1.3). Вибір фізичної задачі зумовлений тим, що її структурна схема найближче збігається з прийнятою схемою 1.

Однак властивості взаємодії об'єктів у цих задачах принципово відрізняються. Справді, для задачі взаємодії трьох тіл єдиним і визначальним фактором є взаємні гравітаційні впливи. Тому системні властивості визначає лише взаємодія трьох гравітаційних мас. Вона має точний математичний опис. Єдина складність дослідження такої взаємодії полягає в тому, що динамічні рівняння, які описують подібну систему, не можуть бути розв'язані аналітично. Від дослідника залежить тільки вибір методу чисельного розв'язання системи рівнянь і, як наслідок, точність отриманого розв'язку. Отже, розв'язки, одержані різними дослідниками, відрізнятимуться лише величиною похибки і, можливо, часом, що витрачається на процес обчислення. Зіставлення таких розв'язків не становить ані математичної, ані методологічної складності.

Принципово іншою є взаємодія людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище в процесі практичної діяльності людини. У цьому випадку визначальною особливістю задачі є неповнота, невизначеність, неточність, нечіткість і суперечливість вихідної інформації. Справді, під час розробки, експлуатації або дослідження об'єкта не вдається повною мірою враховувати властивості і вплив середовища. Але зовнішнє оточення об'єкта зазвичай не має чітких меж, оскільки будь-який об'єкт у практичній діяльності людини має різноманітні зв'язки із зовнішнім світом — енергетичні, матеріальні, інформаційні, природні тощо. Більш того, не існує в принципі системи універсальних сталих, котрі дали б змогу чітко й однозначно кількісно характеризувати всі можливі зв'язки та взаємодії. Приміром, не можна кількісно однозначно визначити уніфіковані природні умови експлуатації техніки, зокрема для транспортних наземних засобів. Так, умови Крайньої Півночі принципово відрізняються від умов пустель і напівпустель, а ті, у свою чергу, різко відрізняються від умов джунглів. Крім того, навіть у межах однієї кліматичної зони різні групи факторів за багатьма характеристиками є протилежними, висувають протилежні вимоги до об'єкта (спорудження, технології, транспортного засобу тощо).

Ще однією особливістю системної задачі у структурі взаємодії людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище є невизначеність і неоднозначність цілей. У задачі взаємодії неможливо кількісно однозначно охарактеризувати цілі розробки або дослідження певного об'єкта. Справа в тому, що будь-який об'єкт повинен задовольняти одночасно багатьом цілям, які зазвичай є суперечливими або протилежними. Приміром, суперечливими є цілі досягнення високої міцності конструкції й малої ваги, високої надійності та низької вартості тощо. До того ж цілі розробки повинні враховувати багато латентних факторів, що можуть мати принципове значення у разі наявності альтернативних розв'язків. Це можуть бути естетичні, ергономічні, етнічні та деякі інші фактори, зокрема певні звички та навички потенційного користувача тощо. Звідси випливає необхідність у пошуку раціонального компромісу як між різними групами факторів взаємодії людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище, так і всередині кожної групи. Зокрема, під час визначення меж об'єкта, розробки загального формулювання задачі дослідження необхідно забезпечити раціональний компроміс між визначальними узагальненими протилежними критеріями — максимізацією якості розв'язку і мінімізацією складності процедури розв'язування.

Подібних прикладів можна навести багато. Але й розглянутих досить для того, щоб став очевидним висновок: розв'язання багатьох задач у процесі практичної діяльності людини потребує пошуку раціонального компромісу. А така процедура є достатньо

суб'єктивною, оскільки критерії порівняння і переваги альтернативних варіантів вибираються особою, що приймає рішення (ОПР). Звідси випливає висновок, що за тих самих вихідних даних різні ОПР можуть одержувати розв'язки, що суттєво різняться між собою практично за більшістю показників. У житті є чимало переконливих прикладів, які практично підтверджують цю тезу. Зокрема, переконливим доказом є велика різноманітність однотипної продукції навіть за умов жорстких обмежень національних та міжнародних стандартів.

Цілком природно, що за умови різноманітності виробів однакового призначення постає необхідність оцінити та порівняти якість деяких альтернативних варіантів однотипних виробів. Така задача ставиться багатьма категоріями осіб. Вона насамперед має важливе значення для споживача. Але не менш важливе значення обґрунтоване та достовірне розв'язання цієї задачі має для виробника відповідної продукції, якщо він прагне забезпечити її конкурентоспроможність на ринку. Більше того, для розробника і виробника продукції важливість і складність розв'язання цієї задачі суттєво вище, ніж для споживача. Справді, виробник повинен розглядати всі аспекти якості продукції не лише з позиції власних уподобань і можливостей, але й з урахуванням дій конкурентів на ринку, а також динаміки росту запитів покупців. Отже, під час практичної діяльності з'являється потреба в аналізі взаємодії людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище з більш загальної позиції, ніж у схемі 1. Такий аналіз, по суті, є дослідженням якості та ефективності прийнятої методології й стратегії дій людини в зазначеній системі.

Подібну задачу повинен розв'язувати *системний аналітик*. Тому приходимо до структурної схеми 2 — взаємодії системного аналітика та розглянутої вище системи, тобто до нової системи: системний аналітик $\Leftrightarrow$ людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Взаємодія системного аналітика і системи людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище

У цій схемі дослідження слід виконувати шляхом зіставлення, порівняльної оцінки результату, одержаного в розглянутій системі, з аналогічними результатами конкурентів, а також із загальними тенденціями і перспективами розвитку виробництва, ринку збуту і запитів споживачів.

Виникає запитання: чому цю задачу не може розв'язати людина (розробник, користувач, дослідник чи інша особа) у рамках схеми 1, чому необхідно аналізувати такі взаємодії з іншої позиції — позиції системного аналітика, що вивчає взаємодію в рамках схеми 2? Справді, будь-який досвідчений розробник або виробник виконує аналіз запитів споживача, прогнозує та оцінює дії конкурентів, оцінює ринок збуту та попиту, розробляє відповідну стратегію дій з урахуванням багатьох факторів, власних цілей

і можливостей. Існує практична необхідність у проведенні системного аналізу взаємодії на основі схеми 2, який зумовлюють багато факторів. Відзначимо найсуттєвіші.

Будь-який розробник чи виробник під час розв'язання задачі формує власну систему критеріїв, показників і припущень. Подібна система критеріїв зазвичай є суб'єктивною, а отже, суб'єктивною є і відповідна оцінка. Внаслідок такого підходу розробник чи виробник, що спеціалізується на певному класі продукції, часто переоцінює її позитивні властивості, можливості та перспективи, і недооцінює її недоліки, а також можливості та перспективи конкурентного класу продукції. Доказом цього є приклади банкрутства, збитковості, які практично щорічно спостерігаються в масовій кількості у країнах із ринковою економікою.

Другий фактор визначає необхідність участі у прийнятті рішень подібних задач системного аналітика. Оцінити якість прийнятої методології і стратегії одержання розв'язку, його вірогідність і обґрунтованість із використанням системи критеріїв, прийнятих для схеми 1, практично неможливо. Такий висновок впливає безпосередньо з математично обґрунтованого принципу додатковості К. Геделя [56]. Згідно з цим принципом, для оцінки якості та ефективності прийнятої стратегії й методів розв'язання з використанням певної системи критеріїв необхідно перейти до більш потужної системи критеріїв, яка доповнює вихідну систему новими властивостями і відкриває можливість для використання додаткового апарату оцінки. Саме така можливість з'явиться внаслідок системного аналізу задачі за схемою 2. Звідси випливає, що розв'язання подібних задач із методологічної точки зору принципово відрізняється від розв'язання традиційних фізичних задач.

Проведений аналіз дає змогу зробити такий висновок. Системність практичної діяльності людини зумовлює необхідність системного аналізу на різних рівнях дослідження взаємодії елементів як усередині системи людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище, так і на більш високому рівні: системний аналітик $\Leftrightarrow$ людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище.

Розглянутий приклад по суті визначає роль і місце системного аналітика у практичній діяльності. Показана його роль як експерта, що повинен оцінити можливий ступінь досягнення поставлених цілей на основі результатів діяльності складної системи. Очевидно, що тільки цією функцією значення системного аналітика і відповідно роль системного аналізу як наукової методології не обмежуються. Такий висновок впливає безпосередньо з принципових особливостей і відмінностей практичних системних задач від типових задач аксіоматичних дисциплін, наприклад, розглянутих у рамках теорії дослідження операції, теорії оптимізації тощо. Ця відмінність полягає у тому, що практичні системні задачі є концептуально невизначеними [120], адже їм властиві принципові невизначеності, неоднозначності, ризики, суперечливості множинних цілей, наявність у досліджуваних системах елементів різної природи та інформації різного характеру (кількісного і якісного), що циркулює між цими елементами. Звідси випливає, що складність таких задач набагато вища за складність задач з аксіоматичних дисциплін, оскільки у вихідній постановці вони є неформалізованими. Формалізація є однією з найскладніших процедур під час постановки та розв'язання системних задач будь-якого типу. Проте на практиці формалізації підлягають лише окремі складові більш складних задач. Зокрема, однією з найважливіших складових є визначення і формулювання цілей у вигляді цільових функцій. Задачу їхнього формування можна зобразити такою послідовністю взаємозалежних задач:

♦ зведення вихідної вербальної, числової, емпіричної та інших видів інформації до деякого стандартного вигляду, що дає можливість сформулювати цілі дослідження;

- ♦ вибір класу і структури наближувальних функцій під час формування цілей;
- ♦ вибір критеріїв, принципів, підходів та методів побудови цільових функцій;
- ♦ відшукування цільових функцій у прийнятому класі функцій, які забезпечують формалізацію вербально сформульованих цілей із допустимою на практиці похибкою.

Від обґрунтованості і вірогідності результатів виконання цієї початкової процедур під час розв'язання практичних системних задач може залежати кінцевий результат розробки нового складного технічного виробу або результат аналізу складної проблемної ситуації. У той же час від кінцевого результату може залежати діяльність великих колективів виконавців, наукових організацій і промислових підприємств, що характерно для розробки складних технічних систем, наприклад, космічних апаратів, електростанцій тощо. Аналогічні властивості притаманні багатьом локальним задачам, що виникають після декомпозиції загальної задачі системного аналізу. Очевидно, що розв'язання цих задач потребує системного мислення і системних досліджень.

Звідси випливає, що для розв'язання системних задач на різних стадіях життєвого циклу багаторівневих ієрархічних складних систем або для дослідження багаторівневих, багатоцільових, багатофакторних проблемних ситуацій необхідно створити адекватну багаторівневу ієрархічну організаційну систему, на кожному рівні якої повинні приймати рішення групи системних аналітиків, здатних розв'язувати складні практичні задачі або аналізувати проблемні ситуації. Можливу структуру такої організаційної системи буде показано в наступних розділах.

1.5.2. Системний аналіз як прикладна наукова методологія

Історія становлення та розвитку системних досліджень і системного аналізу тісно пов'язана з проблемами та тенденціями безперервного підвищення складності систем різної природи, наприклад, технічних, біологічних, соціальних, економічних тощо, з якими людина стикається в різних сферах своєї діяльності. Характерною рисою таких систем є неформалізованість ряду процесів, що в них відбувається, невизначеність зовнішніх умов, неповнота, неточність, нечіткість вихідної інформації, можливість появи під час функціонування позаштатних, критичних і надзвичайних ситуацій.

Одним з основних проявів тенденції зростання складності було виникнення великих, надзвичайно складних систем сучасного суспільства. З одного боку, це організаційні, нефізичні системи, наприклад соціальні або економічні, з іншого — великі фізичні системи, зокрема космічні, екологічні, енергетичні, телекомунікаційні, транспортні. Складність аналізу й управління такими системами різко зросла, що зумовило необхідність розробки методів, які дають змогу здійснювати ефективне планування і проектування у складних ситуаціях, де жодна традиційна наукова дисципліна не здатна врахувати усі фактори [145].

Сучасні традиційні наукові дисципліни поділяють на дві великі групи: ті, що вивчають певний тип об'єктів і об'єктивні закони, які описують їхній розвиток та життєдіяльність, і ті, предметом вивчення яких є принципи і закони відношень між об'єктами. До першої групи належать дисципліни, кожна з яких займається певним типом об'єктів, наприклад, фізичних, хімічних, біологічних, політичних, економічних, соціальних, незалежно від типу відношень між цими об'єктами. Наукові дисципліни, що вивчають відношення між об'єктами (тип об'єктів може бути довільним), належать до другої групи.

У цю групу входять, зокрема, кібернетика, теорія управління, теорія прийняття рішень тощо. Ці дві групи дисциплін умовно можна розглядати як «ортогональні».

Системний аналіз застосовується в обох зазначених групах, тобто має міждисциплінарний характер. Це зумовлено кількома факторами. По-перше, системні принципи, прийоми і методологію можна використовувати для дослідження проблем, характерних практично для всіх традиційних дисциплін першої групи. По-друге, за його допомогою зручно вивчати властивості відношень між різними об'єктами в різних умовах і ситуаціях, що властиво другій групі дисциплін. По-третє, системний аналіз дає змогу розглядати досліджуваний об'єкт із позиції цілісності, розглядаючи одночасно як властивості елементів об'єкта, так і властивості взаємодії елементів об'єкта між собою.

Завдяки переліченим особливостям системний аналіз можна сприймати як універсальну наукову методологію, що з єдиних позицій вивчає і властивості об'єктів, і відношення між ними. Становлення та розвиток теорії та практики системного аналізу підтверджує справедливність висловлювання відомого системного аналітика Дж. Кліра [66]: «Головне у розвитку науки у другій половині нашого століття — це перехід від одновимірної науки, що спиралася переважно на експериментування, до науки двовимірної, в яку наука про системи, базована переважно на відношеннях, поступово входить як другий вимір». Безумовно, спираючись на це визначення, системний аналіз можна віднести до *двовимірної наукової методології*.

Поняття одновимірної та двовимірної наукових методологій базуються на двох фундаментальних критеріях:

- ♦ спільність типів елементів;
- ♦ спільність типів відношень.

Вважається, що критерії утворюють взаємно ортогональну систему координат.

Прикладом класифікації за першим критерієм служить традиційний поділ науки і техніки на дисципліни, спеціальності, галузі. Кожна дисципліна (спеціальність, галузь) займається певним типом елементів (фізичні, хімічні, біологічні, політичні, економічні тощо). При цьому тип відношень не фіксується, і відношення між елементами одного конкретного типу можуть бути різними.

Використання другого критерію приводить до зовсім іншої класифікації, згідно з якою задається певний тип відношень, а тип елементів не фіксується. При цьому термін «відношення» використовується у найширшому розумінні, що включає набір таких споріднених понять, як організація, структура, взаємозв'язок, залежність, кореляція, обмеження тощо. Ця класифікація ґрунтується, власне кажучи, на результатах обробки інформації про взаємовідношення певного типу для об'єктів різних класів.

Прикладами класифікації за другим критерієм можуть служити різні способи групування розділів знань, прийняті в кібернетиці виходячи зі спільності формалізованого опису відношень елементів, принципу класифікації задач математичного програмування тощо.

Сучасні системні дослідження виконуються з використанням великого комплексу наукових, технічних, організаційно-управлінських методів, а також спеціальних обчислювальних підходів. Представляючи, таким чином, певну галузь сучасної науки і техніки, системні дослідження як одна з форм науково-технічної діяльності потребують, поза всяким сумнівом, теоретичного обґрунтування. Цілком природно, що настільки складний і багатогранний феномен, яким є системні дослідження, має потребу у визначенні свого місця в сучасній методології наук.

Сучасне методологічне знання не є якимось однорідним гомогенним утворенням. Бурхливий розвиток науки у XX столітті, ускладнення її структури та суттєве зростання в ній ролі теоретичного, абстрактного мислення, широка математизація і формалізація сучасної науки супроводжувалися процесом інтенсивної диференціації методологічного інструментарію досліджень поряд із розвитком загальнофілософських методологічних принципів пізнання. Ця нова ситуація в методології науки дає змогу виділити її чотири основних рівні [66].

- ♦ **Філософська методологія.** Аналіз загальних принципів пізнання і категорійного базису науки. Цей рівень методології є розділом філософського знання, що розробляються властивими тільки для філософії методами.
- ♦ **Загальнонаукова методологія.** Розробка загальнонаукових концепцій пізнання та формальних методологічних теорій (логіка науки, розроблювана із застосуванням апарату математичної логіки, тощо). Загальнонауковий характер методологічних концепцій, по суті, свідчить про їхню міждисциплінарну природу, тобто застосованість до різних галузей науки, на стиках традиційних дисциплін, і принципову можливість перенесення засобів і методів таких концепцій з однієї сфери наукових знань в інші. Оскільки загальнонаукові методологічні концепції не претендують на розв'язання світоглядних, загальнофілософських проблем, їхню розробку здійснюють у сфері нефілософського знання, а саме у рамках сучасної логіки та методології науки.
- ♦ **Конкретно-наукова методологія.** На цьому рівні аналізують методи, принципи і процедури дослідження, що застосовуються у спеціальних наукових дисциплінах. Основне завдання цього рівня методології полягає у виявленні та описі сукупності методологічних прийомів і принципів, специфічних для тієї чи іншої дисципліни — фізики, біології, хімії, психології, соціології тощо.
- ♦ **Методологія прикладних досліджень.** Опис способів одержання релевантної інформації, умов проведення експериментів, врахування похибок, методів обробки експериментальних даних тощо. Методологічні знання на цьому рівні складаються з вимог, регламентацій та практичних прийомів використання тих чи інших наукових результатів.

Врахування різних рівнів методології дає можливість охарактеризувати системний аналіз як загальнонаукове міждисциплінарне методологічне знання. Відповідно до цієї класифікації системний аналіз можна віднести до другого рівня загальнонаукової методології. Тому методологія системного аналізу має більшу загальність, ніж методологічні твердження, які формують і приймають у конкретних галузях наукових знань, але при цьому вони не претендують на філософський рівень узагальнень і не займаються розробкою загальних принципів пізнання.

Розмежування рівнів методології дає змогу не лише виділити різні типи методологічного аналізу, але й встановити взаємозв'язок між ними. Зокрема, воно передбачає, що філософську методологію покладено в основу для будь-яких форм методологічних знань. Важливим наслідком такого уявлення є переважаючий вплив більш загальних рівнів методології на часткові. Так, наприклад, загальнонаукові методології і, зокрема, системний аналіз впливають на формування методологічного знання на рівні конкретно-наукової методології і на рівні методики та техніки дослідження.

Отже, системний аналіз як загальнонаукова міждисциплінарна методологія має такі особливості:

- ♦ являє собою погоджену сукупність методологічних принципів, процедур і методів досліджень, орієнтованих на діалектичне пізнання загальних властивостей та особливостей міждисциплінарних системних задач і способів їхнього розв'язання з метою одержання конкретно-наукових і прикладних результатів у різних сферах людської діяльності;
- ♦ є наступним кроком у розвитку сучасної науки, а саме перехідним етапом від двовимірної науки до багатовимірної, здатної всебічно досліджувати не лише власне систему, але й вихідні умови її створення, а також умови її функціонування та управління у штатних і позаштатних ситуаціях, тому виникає необхідність, по-перше, у багатовимірному системному аналізі умов функціонування системи і, по-друге, у багатовимірному системному аналізі системи як цілісного об'єкта.

Вкажемо на ще одну принципову відмінність системного аналізу від традиційних одновимірних дисциплін. Її суть полягає у дещо інших цілях дослідження. Так, в основі традиційних дисциплін лежить аксіоматична теорія, що базується на певній системі аксіом, постулатів, допущень. При цьому головна мета дослідження полягає у тому, щоб, по-перше, довести, що для прийнятих допущень, аксіом і обмежень сформульована задача розв'язана, а по-друге, обґрунтувати, що методи її розв'язання мають певні властивості (збіжність, точність, коректність, існування розв'язку тощо). А питання про те, чи існує практична інтерпретація сформульованої теорії, чи реалізовані на практиці введені теоретичні обмеження і допущення, не є метою дослідження цих дисциплін. Відповіді на такі питання шукають «фахівці-прикладники», що ставлять перед собою мету знайти практичні інтерпретації аксіоматичних теорій і створити методичні засоби для конкретного використання цих теорій на практиці.

Виходячи з цих позицій, системний аналіз можна інтерпретувати як прикладну наукову методологію, арсенал засобів якої базується не тільки і не стільки на аксіомах, скільки на евристичних методах, прийомах, алгоритмах. Системний аналіз на відміну від аксіоматичних дисциплін має прямо протилежну мету дослідження: за умови, що існує практична задача, для якої відомі фізичні, технологічні, економічні та інші обмеження, потрібно знайти систему прийомів і методів, що дадуть змогу одержати її розв'язок із практично прийнятною точністю, за допустимий час та за прийнятних витрат усіх видів ресурсів. При цьому системний аналіз дає можливість вивчати все різноманіття властивостей об'єкта з позиції досягнення поставленої мети його дослідження як єдиного цілого. У той же час аксіоматичні дисципліни дають змогу вивчати окремі властивості об'єкта з позиції аналізу тільки цих властивостей, без врахування впливу на них інших властивостей. Приміром, під час дослідження властивостей і характеристик міцності об'єкта не враховують такі важливі властивості, як технологічність, техніко-економічну ефективність тощо. І навпаки, у разі дослідження техніко-економічної ефективності не враховуються міцність та інші конструктивні властивості.

Наступна відмінність прикладного системного аналізу від аксіоматичних дисциплін полягає у відмінності їхніх вихідних інформаційних платформ. В аксіоматичних дисциплінах всю інформацію, необхідну для формалізованого опису об'єкта дослідження, вважають заданою. Зокрема, покладають відомими:

- ♦ параметри, що характеризують досліджувані властивості об'єкта;
- ♦ залежність зазначених параметрів від показників зовнішніх впливів і управління;

- ♦ критерії, за якими можна оцінювати ступінь досягнення мети дослідження; допущення та обмеження на параметри і критерії;
- ♦ іншу додаткову інформацію, яка визначає властивості та особливості об'єкта, що розглядається.

При цьому вихідної інформації цілком достатньо для розробки змістовного формулювання і математичної постановки задачі дослідження об'єкта. Більш того, часто як вихідну інформацію наводять повне математичне формулювання задачі з необхідними залежностями, критеріями, обмеженнями і допущеннями.

Принципово інший обсяг і характер вихідної інформації властивий прикладним задачам системного аналізу. Передусім вихідну інформацію про об'єкт дослідження відрізняють неповнота, неточність, нечіткість і суперечливість. До того ж зазвичай відсутня найважливіша інформація, зокрема про критерії оцінювання ступеня досягнення цілей дослідження. Більше того, у багатьох випадках, зокрема у разі проектування складних систем, ставляться суперечливі вимоги до заданих технічних, експлуатаційних, технологічних показників і характеристик. Потрібно знайти раціональний компроміс, однак умови і критерії компромісу мають бути обрані й обґрунтовані у процесі проведення системного дослідження.

Цей перелік особливостей вихідного інформаційного забезпечення прикладних системних задач можна значно розширити. Усі вони призводять до того, що у загальному випадку задачі системного аналізу для реальних об'єктів є принципово неформалізованими, оскільки містять принципово неформалізовані процедури. Наприклад, вибір критеріїв, вибір умов раціонального компромісу тощо. Задачі системного аналізу для реальних об'єктів розв'язуються шляхом раціонального об'єднання можливостей людини-експерта та можливостей, які дає застосування сучасних об'єктивних знань і наукового інструментарію, насамперед обчислювальної техніки, можливостей евристичних прийомів і процедур та можливостей математичних методів і алгоритмів.

Отже, стосовно традиційних наукових дисциплін системний аналіз можна розглядати як наступний крок у розвитку методології сучасної науки, а саме як перехід від одновимірної науки до багатовимірної, де всебічно досліджують не лише власне систему, але й умови її створення й функціонування, умови управління функціонуванням системи у штатних, позаштатних, критичних і надзвичайних ситуаціях з урахуванням факторів ризику, а також неповноти, неточності і недостовірності інформації.

Враховуючи наведені особливості системного аналізу, його змістове визначення як наукової методології може бути таким.

Системний аналіз — це прикладна наукова методологія, що спирається на широке різноманіття системно організованих, структурно взаємозалежних і функціонально взаємодіючих евристичних процедур, методичних прийомів, математичних методів, алгоритмічних програмних і обчислювальних засобів, що забезпечує формування цілісних міждисциплінарних знань про досліджуваний об'єкт як про сукупність взаємозалежних процесів різної природи. Ці знання використовуються для прийняття рішень щодо подальшого розвитку і поведінки об'єкта з урахуванням багатьох конфліктних критеріїв і цілей, наявності факторів ризику, неповноти і недостовірності інформації.

Зазначимо, що класичне визначення наукової дисципліни не може бути строго застосоване до системного аналізу у зв'язку з неможливістю хоча б більш-менш точно окреслити арсенал методів і засобів, якими він оперує, принциповою міждисциплінарністю і багатовимірністю його наукового підходу до вивчення складних об'єктів.

Умови переходу людства до інформаційного суспільства, проникнення нових інформаційних технологій у різні сфери життя та діяльності людини якісно змінюють не лише цілі, задачі та зміст освіти, але і роль, місце й значення окремих дисциплін у загальній системі освіти. Потреба у формуванні людини і дослідника, здатного адаптуватися до швидко змінюваних умов та норм сучасного суспільства і націленого на удосконалення цього суспільства, зумовлює необхідність перегляду парадигми освіти і зміни багатьох аспектів процесу пізнання. У світовій практиці чітко простежується тенденція корінної зміни цього процесу — тепер більше уваги приділяється системному мисленню, що дає можливість виявляти глибинні явища, взаємні зв'язки та вплив елементів навколишнього світу. Тому формування і розвиток теоретичних основ системного аналізу як прикладної наукової методології повинні бути системно погоджені з цілями, задачами, очікуваними результатами і стратегією розвитку систем освіти, а також із загальними тенденціями розвитку сучасного суспільства. Необхідність у такому підході випливає з основних вимог до випереджальної системи освіти і, зокрема, з вимоги освоєння наукової методології та способів застосування системного аналізу на практиці з метою виявлення суті і визначення шляхів розв'язання політичних, економічних, соціальних, науково-технічних та інших практично важливих проблем.

Висновки

- ♦ Для розуміння ролі та об'єктивної оцінки значення системних досліджень і системного аналізу в різних сферах практичної діяльності людини проведено дослідження процесу становлення і розвитку системного аналізу із прагматичної точки зору. Наведено визначення поняття «системне мислення», виявлено основні властивості та особливості розвитку системного мислення. Обґрунтовано вимоги до системного аналітика: здатність до самооцінки та самоадаптації, до оцінювання і формування апарату дослідження, до оцінювання і формалізації задачі.
- ♦ Виділено чотири етапи формування системного аналізу як прикладної наукової методології. Найважливішим підсумком першого періоду слід вважати створення ідейної бази для формування нової фундаментальної парадигми в науці. Основні ідеї цієї парадигми, що відображають її різні аспекти, незалежно подано у працях В. І. Вернадського, Л. фон Берталанфі та Н. Вінера. Перший етап є періодом формування теоретичної бази системного мислення як основи концептуальної парадигми системного аналізу. Другий етап становлення системного аналізу формувався у надзвичайних умовах у період від початку 30-х до кінця 40-х років XX століття. Саме тоді з'явилася необхідність у створенні різних технічних систем військового призначення за умов жорсткого ліміту часу. Розробка методологічного апарату велася емпірично і незалежно в різних країнах. Обмін досвідом в умовах воєнного часу був неможливим. У результаті було створено емпіричні передумови формування парадигми системного аналізу як методології розв'язання реальних системних задач за допустимий термін із практично прийнятною похибкою за умов концептуальної невизначеності. Цей період можна вважати етапом емпіричного розвитку теорії і практики системного аналізу, колективного формування системної методології. Третій етап становлення і розвитку системного аналізу формувався в умовах післявоєнного часу — із середини 40-х до кінця 70-х років XX століття. Він суттєво відрізняється від попередніх етапів якісно новими задачами, пов'язаними з принциповими

соціально-політичними змінами у світі, унікальними теоретичними і практичними науково-технічними досягненнями. Було створено теоретичний базис математичного і методологічного інструментарію формалізації та автоматизації на базі ЕОМ процедур розв'язання реальних найскладніших організаційних і технічних системних проблем у різних сферах практичної діяльності. Створено такі принципово нові галузі, як космонавтика й атомна енергетика. Розроблено й введено в експлуатацію складні унікальні технічні системи різного призначення. Теоретично обґрунтовано і практично реалізовано у спеціальному математичному та програмному забезпеченні фундаментальну парадигму системного аналізу. Цей етап є періодом синхронного розвитку теорії системного аналізу та практики системних досліджень. На кінець цього періоду з'явилися глобальні системні проблеми, що не були розв'язані з використанням арсеналу, наявного на той час, зокрема математичних і методологічних засобів системного аналізу.

- ♦ Четвертий етап розвитку системного аналізу триває від початку 80-х років минулого століття і дотепер та є періодом глобалізації світових процесів і загроз. Світові процеси розвитку характеризуються високими темпами глобалізації й безперервним зростанням складності їх взаємозалежності і взаємодії. Сучасна методологія прикладного системного аналізу не відповідає глобальній, багаторівневій ієрархічній структурі різномірних, багатофакторних, багатофункціональних взаємозв'язків, взаємозалежностей і взаємодій об'єктів дослідження і не в повній мірі використовує потенційні можливості глобальної, багаторівневої системи інформаційних комп'ютерних мереж. Одним із перспективних шляхів усунення недоліків можна вважати оперативну, послідовну розробку концепцій, стратегій і програм дослідження найважливіших глобальних проблем сучасності. І на цій основі доцільно виконувати формування багаторівневої ієрархічної структури метаметодології системного аналізу глобальної проблематики, забезпечивши її системне, функціональне узгодження з ієрархічною структурою взаємозв'язків, взаємозалежностей і взаємодій об'єктів дослідження відповідно до ієрархічної структури інформаційних комп'ютерних систем і мереж як інструментальної основи її реалізації. Отже, четвертий етап є етапом глобалізації системної проблематики.
- ♦ Показано роль глобалізації світових процесів у розвитку інформаційного суспільства. Розкрито особливості світових процесів переходу від індустріального суспільства до інформаційного.
- ♦ Показано, що системність є такою багатогранною властивістю практичної діяльності людини, яка визначає ефективність і результативність її суб'єктивної взаємодії з об'єктивним навколишнім світом у процесі розв'язання конкретних практичних задач. Описано рівні системності у практичній діяльності людини: механізація, автоматизація, комп'ютеризація, інтелектуалізація. На прикладах унікальних складних систем показано системність інноваційної практики.
- ♦ Визначено роль у практичній діяльності системного аналітика як експерта, який повинен оцінити ступінь досягнення системою поставлених цілей на підставі результатів її функціонування.
- ♦ Визначено роль і місце системного аналізу як наукової методології у практичній діяльності людини, показано принципові відмінності системного аналізу від традиційних аксіоматичних одновимірних дисциплін. Доведено необхідність здійснення системного аналізу на різних рівнях дослідження взаємодії як усередині системи

людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище, так і на більш високому рівні: системний аналітик $\Leftrightarrow$ людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище. Показано, що системний аналіз як загальнонаукова міждисциплінарна методологія характеризується погодженою сукупністю методологічних принципів, процедур і методів дослідження, орієнтованих на діалектичне пізнання загальних властивостей та особливостей міждисциплінарних системних задач і способів їхнього розв'язання для одержання конкретно-наукових та прикладних результатів у різних сферах людської діяльності. Системний аналіз — це наступний крок у розвитку сучасної науки, а саме перехід від двовимірної науки до багатовимірної, де всебічно досліджують не лише власне систему, але й вихідні умови її створення, а також умови функціонування й управління у штатних та позаштатних ситуаціях.

1.1. Матеріальні та абстрактні об'єкти

Важливо розрізняти матеріальні та абстрактні об'єкти. Матеріальні об'єкти — це ті, які можна побачити, торкнутися, виміряти тощо. Абстрактні об'єкти — це ті, які не можна побачити, торкнутися, виміряти тощо. Наприклад, матеріальні об'єкти: автомобіль, будинок, книга. Абстрактні об'єкти: ідея, душа, любов. Системний аналіз працює з обома типами об'єктів. Він допомагає зрозуміти, як матеріальні об'єкти функціонують у системі, і як абстрактні об'єкти впливають на цю функцію. Наприклад, системний аналіз може допомогти зрозуміти, як автомобіль функціонує в системі дорожнього руху, і як ідея впливає на систему управління компанією.

Розділ 2

Основні поняття системного аналізу

- ♦ Об'єкти системного аналізу
- ♦ Принципи системної методології
- ♦ Класифікація задач і процедур системного аналізу
- ♦ Концептуальні функціональні простори умов і властивостей складних систем
- ♦ Поняття складності системної задачі; спектри складності; трансобчислювальна складність

Системний аналіз належить до категорії таких наукових феноменів, що викликають численні дискусії з багатьох питань. Більше того, загальноприйнятих відповідей на деякі з розглядуваних ним задач немає й дотепер. Існують суттєві різночитання та розбіжності у трактуванні багатьох основних, важливих для практики понять та означень, зокрема таких, як «об'єкт дослідження», «система», «системність», «складність», «системний підхід», «системна задача». Тому вважаємо за необхідне розглянути відомі тлумачення цих понять, запропонувати й обґрунтувати свою версію їхніх означень.

2.1. Об'єкти системного аналізу

Розв'язуючи реальні практичні задачі системного аналізу, людина найчастіше оперує такими важливими поняттями, як «об'єкти» та «моделі». У традиційних дисциплінах вони мають досить точні та однозначні визначення, проте у системному аналізі ці загальноприйняті поняття значно доповнюють і розширюють, виходячи з їхньої відповідності сучасній специфіці проблем та наявного інструментарію, особливостям і властивостям об'єктів системних досліджень, умовам та особливостям формалізації і розв'язання системних задач.

Основні ідеї відомих підходів до опису й формалізації об'єктів системного аналізу досить повно відображають цитати, які відомий системний аналітик Дж. Клір узяв як епіграфи до розділів своєї монографії [66]. Так, Дж. Гоген і Ф. Варела стверджують: «Світ більшою частиною не поділяється для нас на системи, підсистеми, середовище тощо. Ми самі його поділяємо, виходячи з різних міркувань, які для зручності зазвичай зводяться до одного спільного» [66]. М. Бейтсон підтверджує зручність такого уявлення про світ, але висловлює певні сумніви: «Поділ світу на частини зручний і, можливо, необхідний, але точно невідомо, як він має бути здійснений» [66]. С. Ватанабе уточнює особливості проблеми уявлення про світ і акцентує увагу на неоднозначності процедури поділу: «Повертаючись до загальної проблеми цілого і його частин, необхідно визнати, що складність, а отже й багатство ідей, пов'язаних із цією проблемою, зумовлені, принаймні почасти, тим, що одна система може бути розбита на частини багатьма

способами» [66]. Усі ці цитати свідчать про те, що вибір об'єкта системного дослідження, визначення його меж і меж навколишнього середовища є досить складною задачею. Постановка, формалізація, методи розв'язання задачі залежать від цілої низки факторів. Вони в значній мірі обумовлюються цілями дослідження, особистими якостями ОНР, а також умовами й ситуаціями, що складаються під час проведення дослідження.

Передусім розглянемо деякі фактори та передумови, що призводять до розбіжностей у підході різних системних аналітиків до вибору об'єктів дослідження. Так, згідно з підходом Дж. Кліра [66], необхідно враховувати, що людина у повсякденному житті взаємодіє з різними об'єктами із навколишнього середовища, причому ця взаємодія здебільшого обмежується кількома представницькими властивостями, що характеризують його якість і можливості. У міру зацікавленості у дослідженні конкретного об'єкта така взаємодія може ставати усе різностороннішою, але її завжди обмежують рамки сприйняття людини, її здатність до оцінювання, вибору, спостереження.

Інша ситуація характерна для фахівців, що працюють у традиційних галузях науки чи техніки, у будь-якій іншій сфері практичної діяльності людини. Їх цікавлять досить конкретні типи об'єктів дослідження. Наприклад, лікарі працюють із людьми різного віку та різного стану здоров'я. Психологи вивчають окремих пацієнтів і малі соціальні групи. Екологів цікавлять об'єкти навколишнього середовища — озера, ліси, ріки тощо; вони досліджують стан цих об'єктів і вплив на них техногенних факторів. Інженери займаються всілякими реальними об'єктами, які розробляє і використовує людина (різноманітними технічними виробами, інженерними конструкціями, будівельними спорудами, зокрема атомними, тепловими й гідроелектростанціями, різними транспортними, виробничими й іншими засобами забезпечення життєдіяльності тощо).

2.1.1. Матеріальні та абстрактні об'єкти

Наведені вище приклади свідчать про те, що вибір фахівцем об'єкта дослідження багато в чому визначає специфіка його професії. Разом із тим фахівці однієї професії можуть працювати з різними об'єктами або з тим самим об'єктом, але в різних умовах. Наприклад, інженери-механіки з авіаційної техніки стежать за всіма стадіями життєвого циклу літака, починаючи з етапів концептуального, ескізного, технічного і технологічного проектування на стадії розробки виробу, продовжуючи на стадіях дослідного та серійного виробництва, випробування, поточної експлуатації і капітального ремонту і закінчуючи стадією утилізації виробу, що вичерпав встановлений ресурс. Однак цілі та завдання конструкторів на різних стадіях життєвого циклу літака суттєво відрізняються, а отже, різняться об'єкти їхньої діяльності. Так, на стадії проектування метою діяльності є розробка проекту літака із заданими технічними, економічними та іншими показниками, а основними об'єктами і результатами стають проектні документи: технічні завдання, стандарти, ескізний та технічний проекти тощо. Як інструментарій використовують комп'ютери, програмні системи, розмножувальну техніку та інші технічні засоби.

На стадії експлуатації метою діяльності конструктора є забезпечення безаварійності польотів, а основним об'єктом діяльності стає сам літак. При цьому діяльність екіпажу й інженерно-технічного персоналу строго визначається відповідними регламентуючими документами й забезпечується певними технічними засобами та приладами. Звідси випливає, що об'єкт дослідження людини залежить не тільки від її професії,

але й від умов, завдань і результатів практичної діяльності. Слід звернути увагу на той факт, що об'єктом дослідження не завжди є предмет об'єктивної реальності, і це не залежить від людини чи її свідомості. Справді, на етапі концептуального проектування нового технічного виробу існує велика кількість невизначеностей, у тому числі невизначеність і суперечливість перспектив конкурентоспроможності виробу, невизначеність ринків збуту виробу, викликана, зокрема, активною протидією конкурентів, а також ситуаційною невизначеністю ризиків у процесі розробки, виробництва, збуту та експлуатації виробу. Результати розкриття невизначеності значною мірою залежать від людини, в першу чергу від особистих якостей головного конструктора виробу як ОНР, тобто її знань, умінь, досвіду, інтуїції, передбачення. Від цих результатів, у свою чергу, залежать основні технічні рішення і показники розроблюваного виробу. Справедливість такої думки підтверджують, зокрема, якість та довголіття цивільних і військових літаків, розроблених авіаконструкторами О. К. Антоновим, А. М. Туполєвим, О. С. Яковлєвим.

Отже, до ухвалення рішення відповідною ОНР, подальшої розробки на цій основі конструкторської документації та її реалізації у вигляді дослідного зразка розроблюваного виробу фізично не існує — він з'являється як об'єктивна реальність у результаті певної діяльності людини. Поки ОНР не прийме рішення відносно необхідності реалізації нового виробу, фізично не існує й конструкторської документації, необхідної для його виробництва та експлуатації. Звідси випливає, що на практиці є об'єкти практичної діяльності, які не підпадають під наведене вище поняття «об'єкт» як філософську категорією, тому його означення необхідно уточнити і розширити.

Варіант більш широкого тлумачення поняття «об'єкт» дає Дж. Клір [66]: «Об'єктом будемо називати частину світу, котру упродовж відчутного проміжку часу виділяють як єдине ціле». Однак це означення не відображає ролі людини у дослідженні, виборі, виробництві чи на інших етапах життєвого циклу об'єкта. Тому вважаємо за доцільне ввести деяке доповнення і дати таке означення: *об'єктом дослідження* будемо називати частину світу, яку людина (експерт) впродовж скінченного проміжку часу як єдине ціле вибирає, досліджує, створює, використовує або виконує з ним інші дії, причому все це робиться задля досягнення поставлених цілей.

Розглянемо розроблену на основі запропонованого Дж. Кліром [66] підходу класифікацію об'єктів, згідно з якою вони є або матеріальними, або абстрактними.

Матеріальні об'єкти можна поділити на об'єкти *природні*, існуючі незалежно від людини, і *штучні*, створені самою людиною. Природні об'єкти — це Всесвіт; Сонячна система; флора і фауна конкретної місцевості, континенту або планети загалом; гірські масиви, печери, ущелини, каньйони та інші геологічні об'єкти; табуни диких тварин, клітини різних організмів тощо. До штучних об'єктів належить техносфера планети — міста, аеропорти, лікарні, інші створені людиною інфраструктури життя і діяльності людини.

Абстрактні об'єкти створюються людиною. Однак вони не є матеріальними об'єктами. У даному контексті мова може йти про ідеї, сказання, билини, пісні, танці та інші творіння людини. Вони можуть передаватися усно, образно, від покоління до покоління, але можуть і гинути разом зі своїми авторами чи виконавцями. Абстрактні об'єкти нерідко втілюються у формі матеріальних об'єктів — книг, магнітних та оптичних носіїв інформації тощо. У такому разі матеріальні засоби є лише формою втілення абстрактних об'єктів, сутністю яких вважається зміст наукової, художньої, правової та будь-якої іншої інформації.

Найважливішими ознаками об'єкта є його властивості. У більшості випадків об'єкти мають практично незліченну кількість властивостей, кожна з яких можна осмислити та вивчити і таким чином дослідити й оцінити об'єкт за певним набором властивостей. Однак жоден об'єкт неможливо вивчити повністю, неможливо дослідити всю множину його властивостей та особливостей, включаючи властивості механізмів старіння і руйнування. Це твердження впливає безпосередньо з першої теореми Геделя. Отже, немає сенсу ставити за мету дослідження всіх властивостей і особливостей матеріального об'єкта. Виділяти і вивчати можна лише ті з них, котрі стосуються заданої мети або досліджуваної проблеми. Це означає, що необхідно відбирати лише певну, як правило, порівняно невелику кількість властивостей, які з достатньою для дослідника повнотою описують об'єкт із урахуванням заданих цілей. Після цього слід визначити скінченну множину показників кожної властивості, яка, у свою чергу, задає вектор абстрактних змінних.

2.1.2. Складна система як об'єкт дослідження

Складна система є цілісним середовищем системного дослідження, яку з погляду досягнення поставлених цілей вибирає, формує або створює людина. Складна система може бути матеріальним об'єктом або моделлю матеріального чи абстрактного об'єкта дослідження. У першому випадку система — це реальний матеріальний об'єкт, технологічна або організаційна структура якого є ієрархічною, багаторівневою системою залежних один від одного різнотипних функціональних елементів чи однотипних функціональних елементів, що можуть бути зосереджені в деякому просторі або віддалені на значні відстані. Прикладом реальної складної системи, що має ієрархічну багаторівневу організаційну структуру, може служити система державного управління будь-якої країни світу. Аналогічні складні системи широко розповсюджені у виробничій, економічній, соціальній та інших сферах. Реальними складними системами є: багатопрофільний промисловий комбінат, залізнична мережа, телекомунікаційна мережа та аналогічні їм матеріальні об'єкти.

Моделі таких об'єктів будують шляхом вивчення, опису і формалізації процесів, що лежать у їхній основі, з урахуванням поставлених цілей і задач, встановлених показників і параметрів, які визначають властивості досліджуваних об'єктів.

Необхідно підкреслити, що одним із найуніверсальніших способів вивчення різних процесів і явищ вважається *моделювання*. Чисельні методи та прийоми моделювання широко використовуються у наукових дослідженнях й інженерній практиці. При цьому розрізняють фізичне і математичне моделювання [16].

У *фізичному моделюванні* модель відтворює поведінку досліджуваного об'єкта за умови збереження його фізичної природи. Між досліджуваним об'єктом і моделлю повинні бути збережені деякі відношення подібності, що впливають із закономірностей фізичної природи явищ і забезпечують можливість використання відомостей, одержаних за допомогою моделювання, для оцінки властивостей і характеристик досліджуваного об'єкта.

Фізичне моделювання має обмежену сферу застосування. Безперечно, набагато ширші можливості у *математичного моделювання*. Мова йде про спосіб дослідження об'єктів на основі вивчення явищ, які мають різний фізичний зміст, але описуються однаковими математичними співвідношеннями. Між змінними математичної моделі

і найважливішими властивостями та характеристиками досліджуваного об'єкта повинні зберігатися відношення подібності.

На практиці використовуються різні типи математичних моделей, базовані на об'єднанні можливостей сучасної математики та обчислювальної техніки, зокрема, графічні або імітаційні моделі. Так, *графічна модель* оперує системою взаємозалежних креслень і зображень, що дають змогу відображати реальні взаємозалежності, характерні для досліджуваного об'єкта. *Імітаційна модель* — це система взаємозалежних комп'ютерних програм, призначених для імітації поведінки об'єкта.

Під час розв'язання реальних системних проблем одним із найважливіших і найскладніших етапів дослідження є вибір та побудова моделей. У найпростішому випадку модель задають за допомогою набору відповідних властивостей об'єкта та шляхом призначення для кожного з них певної змінної. Під «змінною» прийнято розуміти деякий показник як числову характеристику або абстрактний образ властивості. У разі одичного спостереження властивість має один конкретний прояв, тобто певне кількісне значення показника або якісний прояв властивості. Якісний прояв може полягати у зміні кольору, яскравості, тональності звуку або в появі сторонніх звуків, збої ритму процесу тощо. Щоб визначити можливі зміни цих проявів, потрібно проводити велику кількість спостережень властивості.

Будь-яка суттєва властивість, яку можна реально застосувати на практиці для визначення відмінностей у разі спостереження однієї й тієї ж властивості, називають *базисом* [66]. Типовим базисом, придатним практично для вивчення будь-якої властивості, є *час*.

У деяких випадках різні результати спостереження тієї самої ознаки в часі нерозрізненні, проте вони відрізняються положенням у *просторі*, де проводяться спостереження. Наприклад, неоднакові властивості, що характеризують якість акустики, можна спостерігати одночасно у різних місцях концертного залу. Простір як базис відіграє дуже важливу роль у багатьох дисциплінах, у тому числі в космонавтиці, астрономії, будівництві, оптиці, образотворчому мистецтві, анатомії і т. д.

Численні результати спостереження тієї ж самої властивості можуть різнитися один від одного за індивідами деякої групи, на якій визначено цю властивість. Це може бути соціальна група, набір товарів певного типу, множина слів у якомусь творі або розповіді, сукупність країн тощо.

Базиси трьох основних типів — час, простір, група — можна комбінувати. Найпоширенішими є комбінації час–простір і час–група.

- ♦ **Час–простір.** Прикладом цієї комбінації може бути кінофільм, зокрема такий, що використовується для дослідження певного явища (з метою вивчення складної дорожньої ситуації на перевантаженому перехресті тощо).
- ♦ **Час–група.** Властивість, що характеризує становище, наприклад, в економіці, політиці, у соціальних процесах різних країн.

Проте простір, час і група можуть використовуватися не лише як базиси, але і як властивості. Наприклад, у разі щодобового спостереження за сходом та заходом Сонця з різних точок земної поверхні властивістю є час, а його базисом — простір–час.

Отже, відповідно до підходу Дж. Кліра [66], система як об'єкт дослідження є, з одного боку, множиною властивостей, із кожною з яких пов'язана множина його проявів, а з іншого боку — множиною базисів, із кожним з яких пов'язана множина її елементів.

У такому разі система досліджуваного об'єкта формально може бути представлена у вигляді математичної моделі

$$O = \{(a_i, A_i) | i \in N_n\}, (b_j, B_j) | j \in N_m\},$$

де $N_n = 1, 2, \dots, n$; $N_m = 1, 2, \dots, m$; a_i і A_i — властивість і множина її проявів відповідно; b_j і B_j — базис і множина елементів; O — система досліджуваного об'єкта.

Слід зазначити, що запропоноване Дж. Кліром [66] визначення системи як моделі реального об'єкта і прийнятий підхід до її опису з використанням множини властивостей досліджуваного об'єкта і множини базисів становить практичний інтерес, оскільки відкриває можливість розв'язання досить широкого класу реальних системних задач. У той же час проблеми управління складними організаційними та технічними об'єктами не завжди вписуються в структуру такого подання моделі. Зокрема, багаторівнева ієрархічна система управління потребує раціонального розподілу функцій між рівнями ієрархії, внаслідок чого на кожному рівні з'являється ієрархічна структура цілей і задач управління. Звідси випливає необхідність побудови такої ієрархічної системи моделей, на основі якої можливо створити раціональну структуру управління та забезпечити досягнення поставлених цілей. Отже, модель повинна відображати не лише властивості об'єкта, але і його структуру.

Введемо кілька означень системи, розглядаючи її, по-перше, як модель об'єкта системного дослідження, а по-друге, як реальний матеріальний об'єкт певного призначення. Систему у формі моделі об'єкта системного дослідження будемо характеризувати такою низкою багаторазових вкладень, характеристики кожного з яких визначають цілі системного дослідження [124].

- ♦ *Система* — впорядкована множина структурно взаємопов'язаних і функціонально взаємозалежних елементів.
- ♦ *Складна система* — впорядкована множина структурно взаємопов'язаних і функціонально взаємозалежних систем.
- ♦ *Велика система* — впорядкована множина структурно взаємопов'язаних і функціонально взаємозалежних складних систем.
- ♦ *Надвелика система* — впорядкована множина структурно взаємопов'язаних і функціонально взаємозалежних великих систем.
- ♦ *Глобальна система* — впорядкована множина структурно взаємопов'язаних і функціонально взаємозалежних надвеликих систем.
- ♦ *Глобальна суперсистема* — впорядкована множина структурно взаємопов'язаних і функціонально взаємозалежних глобальних систем.

Систему як матеріальний об'єкт певного призначення також можна охарактеризувати низкою багаторазових вкладень.

- ♦ *Технічна система* — матеріальний цілісний об'єкт, призначений для виконання певної функції в заданих умовах, технічно реалізований на основі впорядкованої за номенклатурою, скінченної множини функціонально взаємозалежних, структурно взаємопов'язаних функціональних елементів, які технологічно взаємодіють.
- ♦ *Складна технічна система* — матеріальний цілісний об'єкт, призначений для виконання скінченної множини функцій у заданих умовах, технічно реалізований на основі впорядкованої за номенклатурою, скінченної множини функціонально взаємозалежних, структурно взаємопов'язаних функціональних технічних систем, які технологічно взаємодіють.

- ♦ *Велика технічна система* — матеріальний просторово обмежений об'єкт, призначений для виконання певної множини функцій у заданих умовах, технічно реалізований на основі впорядкованої за номенклатурою, скінченної множини просторово віддалених або зосереджених, функціонально взаємозалежних, структурно та організаційно взаємозалежних складних технічних систем, які технологічно й ресурсно взаємодіють.
- ♦ *Надвелика технічна система* — матеріальний, просторово обмежений об'єкт, призначений для виконання певної множини функцій у заданих умовах, технічно реалізований на основі впорядкованого за цілями і (або) номенклатурою, обмежений множиною просторово віддалених і (або) зосереджених у межах регіону, функціонально і (або) ресурсно взаємозалежних великих і (або) складних технічних систем, які технологічно та організаційно взаємодіють.
- ♦ *Глобальна технічна система* — матеріальний об'єкт, призначений для виконання необхідних функцій у певній галузі діяльності за мінливих умов, технічно реалізований на основі нескінченної множини віддалених у межах глобального простору, погоджених за цілями, можливостями та іншими показниками діяльності, функціонально і (або) ресурсно взаємозалежних надвеликих, великих і (або) складних технічних систем, які технологічно та організаційно взаємодіють.
- ♦ *Глобальна технічна суперсистема* — матеріальний об'єкт, призначений для виконання необхідних функцій діяльності людини за мінливих умов, технічно реалізований на основі нескінченної множини функціонально і (або) ресурсно взаємозалежних глобальних технічних систем, які технологічно та організаційно взаємодіють.
- ♦ *Глобальна суперсистема* — матеріальний об'єкт, призначений для виконання необхідних функцій у діяльності людини за мінливих умов, технічно реалізований на основі нескінченної множини функціонально й ресурсно взаємозалежних глобальних технічних, організаційних, інформаційних та інших суперсистем, які технологічно та організаційно взаємодіють.

2.1.3. Складні ієрархічні системи

Безмежна різноманітність складних багаторівневих ієрархічних технічних та організаційних систем і незліченна кількість виконуваних ними функцій зумовлюють складність формального подання задач системного аналізу. Тому основні поняття необхідно формалізувати, а припущення та обмеження описати в термінах задач системного аналізу. Насамперед на основі раніше розкритого поняття складної системи введемо означення складної ієрархічної системи.

Складна ієрархічна система — це цілісний об'єкт, утворений із функціонально різнотипних систем, структурно взаємопов'язаних ієрархічною підпорядкованістю і функціонально об'єднаних для досягнення заданих цілей за певних умов.

Прикладами складних ієрархічних систем можуть служити сучасні виробничі об'єкти, космічні системи зв'язку, навігації, дистанційного зондування, сучасні системи управління регіонами, корпораціями, багатопрофільними фірмами тощо. Аналіз таких систем не зводиться лише до встановлення типів елементів чи типів відношень. Суттєве значення у даному випадку має ієрархічність структури не лише топології цих систем, а й систем управління.

Такі системи, по-перше, відрізняються як різноманіттям типів елементів (різні класи фізичних, хімічних, механічних типів елементів), так і різноманіттям типів відношень (від технологічного, продукційного взаємозв'язку до інформаційного обміну і взаємодії).

По-друге, для цих класів об'єктів багаторівнева ієрархічна структура складних і великих систем характеризується такими властивостями:

- ♦ відмінність значимості і можливостей функціональних елементів (ФЕ) для різних ієрархічних рівнів;
- ♦ вільна поведінка ФЕ кожного рівня ієрархії у певних межах, встановлених заздалегідь або у процесі функціонування об'єкта;
- ♦ пріоритет дій або право на втручання ФЕ верхнього рівня у «справи» ФЕ нижнього рівня залежно від функцій, які вони виконують.

Завдяки цим властивостям складна ієрархічна система має кілька принципових особливостей, які визначають як загальні проблеми дослідження, так і конкретні цілі проведення аналізу її структури і функцій, або *структурно-функціонального аналізу (СФА)*.

Розглянемо ці особливості в обсязі, необхідному для розуміння основних цілей і задач СФА складних ієрархічних систем. Насамперед зазначимо, що можливе різне трактування поняття ієрархії, і тому можливі різні види ієрархій. Найсуттєвішу розбіжність ієрархій визначає розбіжність понять *рівня* в ієрархії. Необхідність введення кількох понять рівня зумовлено складністю і різноманіттям цілей, задач, функцій, властивостей та можливостей реальних багаторівневих ієрархічних систем, а також різноманіттям властивостей, особливостей і наслідків штатних, позаштатних, критичних та надзвичайних ситуацій їхнього функціонування. Так, у роботі [104] введено три поняття рівня.

- ♦ *Ешелон* — термін, що визначає рівень організаційної ієрархії. Ієрархічна структура об'єкта, який відповідає поняттю «ешелон», передбачає, що реальний об'єкт можна зобразити у вигляді багаторівневої організаційної ієрархічної системи, яка має такі властивості:
 - ♦ складається із множини точно виділених і розподілених за рівнями підсистем;
 - ♦ має повноваження, чітко розподілені між рівнями і підсистемами одного рівня, виходячи з формування, вибору і прийняття рішень у визначеній сфері відповідальності;
 - ♦ забезпечує прямий і зворотний зв'язок з управління між підсистемами різних рівнів, а між підсистемами одного рівня — прямий і зворотний зв'язок із взаємодії. Такі системи прийнято називати багаторівневими і багатоцільовими.
- ♦ *Страта* — термін, який характеризує рівень опису або абстрагування. Ієрархічна структура об'єкта, що відповідає поняттю «страта», припускає, що властивості реального складного об'єкта описано у вигляді деякої сукупності, у якій окремі описи наведено з різних позицій та упорядковано з урахуванням рівня їхньої значимості. Такі ієрархічні системи прийнято називати стратифікованими.
- ♦ *Шар* — термін, що визначає рівень складності прийняття рішення. Ієрархічна структура об'єкта, що відповідає поняттю «шар», передбачає, що загальну процедуру ухвалення рішення реалізують у вигляді певної послідовності часткових процедур, кожна з яких забезпечує можливість одержання розв'язку з певним ступенем обґрунтованості та вірогідності за різних рівнів неповноти, невизначеності, нечіткості і суперечливості вхідної інформації. Таку ієрархічну структуру прийнято називати багат шаровою, багаторівневою або ієрархічною системою прийняття рішень.

Найважливіша особливість розглянутих об'єктів полягає в тому, що багато процедур формування та аналізу ієрархічної структури є принципово неформалізованими, а їхня реалізація носить суб'єктивний характер. Ця особливість стосується насамперед загальної структури ієрархії. Такі процедури, як вибір кількості рівнів (страт, ешелонів, шарів) в ієрархії, виділення елементів на кожному рівні, вибір опису елементів кожного рівня, вибір апарату опису взаємозв'язків в ієрархічній структурі, цілком залежать від ОПР. У практиці проектування таких реальних складних об'єктів, як космічні системи різного призначення, загальну організаційну ієрархію об'єкта (розподіл об'єкта в цілому на підсистеми 1-го рівня або виділення двох верхніх ешелонів, у відповідності до наведеної раніше термінології — об'єкта і підсистеми) визначає генеральний конструктор об'єкта. Розподіл підсистем 1-го рівня на підсистеми 2-го рівня виконує головний конструктор відповідної підсистеми 1-го рівня тощо. Такий підхід дає змогу здійснювати системну інтеграцію організаційних задач проектування — планування робіт, формування колективів розробників, координування робіт різних колективів тощо.

Важливими системними поняттями є також поняття цілі системи і характеристики системи щодо цілі.

Ціль — це кількісна або якісна міра первинних чи вторинних властивостей системи, яку дослідник за певних обставин вважає найкращою. Отже, складну систему можна розглядати з позиції різних цілей. У цьому розумінні система задовольняє багато цілей. Ця особливість, яку ще називають *характеристикою системи щодо цілі*, може бути виміряна близькістю справжніх та бажаних проявів тих властивостей системи, які передбачені ціллю. Зазвичай її визначають у термінах відповідної функції, яку називають *характеристичною функцією*.

Позначимо множину систем, що різняться властивостями, які у цьому випадку визначають поняття цілі (інші властивості збігаються), через X . У такому разі характеристична функція (позначимо її через w) має вигляд $w(x, x^*) : X \times Y \rightarrow [0, 1]$, де $w(x, x^*)$ — ступінь відповідності системи цільовій системі $x^* \in X$. Характеристичну функцію зручно визначати через функцію відстані $\delta : X \times X \rightarrow R$. Наприклад, функцію відстані доцільно визначати за допомогою співвідношення

$$w(x, x^*) = \frac{\delta_m(x, y) - \delta(x, x^*)}{\delta_m(x, y)} = 1 - \frac{\delta(x, x^*)}{\delta_m(x, y)},$$

де $\delta_m(x, y) = \max_{x, y \in X} \delta(x, y)$.

Зазначимо, що можливі й інші визначення відстаней, а отже, й інші формули для розрахунку.

Припустимо, що для деякої множини систем визначено тип цілі і відповідна характеристична функція. З кожною системою такої множини пов'язано значення характеристичної функції, яке показує ступінь відповідності системи заданій цілі. Це дає змогу визначити поняття *ціленаправленої системи*, для якої характеристика щодо заданої цілі більша від деякого заданого порогового значення.

Формально для двох заданих систем x і y того самого типу, заданої цілі x^* і відповідної характеристичної функції w система x є ціленаправленою відносно системи y і цілі x^* з урахуванням характеристичної функції w тоді і лише тоді, коли

$$w(x, x^*) > w(y, x^*).$$

Далі різницю

$$w(y, x|x^*) = w(x, x^*) - w(y, x^*)$$

будемо називати ступенем ціленаправленості x відносно y при заданій цілі x^* .

Отже, ціль системи можна визначити різними способами, і це дає змогу вважати, що ціль знаходиться «в руках користувача». Поняття цілі і характеристики є базовими для визначення поняття ціленаправлених систем. Система з позитивним ступенем ціленаправленості відносно іншої системи повинна мати деякі властивості, відмінні від властивостей останньої, тобто властивості, які пов'язані з ціллю і визначають можливість поліпшення характеристики цієї системи. Будемо називати їх *властивостями вибору цілі*. Такими властивостями, зокрема, є деякі додаткові змінні або стани в породжувальних системах, додаткові елементи або з'єднання у структурованих системах, додаткові елементи або процедури в метасистемах тощо.

Отже, для систем, що володіють властивостями ціленаправленості, необхідно відділяти змінні вибору цілі від інших змінних із вимогою, щоб змінні вибору цілі сприяли її досягненню. Дослідження способів породження станів змінних вибору цілі надзвичайно важливе для розуміння природи такого класу систем і, зокрема, для розвитку методів їхнього проектування. Таким системам завжди притаманні принципи (схема, форма) їх створення у термінах породжуваних станів змінних пошуку цілі. Виходячи з викладеного, можна сформулювати поняття ціленаправлених систем.

Ціленаправлені системи — це системи, орієнтовані розробником на виконання суворо визначених цілей. Вони мають чітко обумовлене цільове призначення для заданих умов, а також характеризуються набором обмежень за номенклатурою цілей і заданим діапазоном допустимих змін умов функціонування. Прикладами таких систем є найпростіші автомати і напіваавтомати з жорсткою програмою керування або найпростіші механізми. До них можна, зокрема, віднести верстат-автомати для виробництва лише конкретних механічних деталей, побутові і промислові холодильники, автономні системи опалення будинків із напіваавтоматичною підтримкою температури у певному діапазоні, автомобілі різного цільового призначення.

Принципово іншим є клас цілеспрямованих систем.

Цілеспрямовані системи — це системи, які мають властивості сприймати вимоги середовища, зовнішнього по відношенню до неї, та формувати цілі для досягнення цих вимог за умови суттєво мінливих ситуацій, а також визначати альтернативи всіх дій зовнішнього середовища і здійснювати доцільний вибір альтернативи власних дій для досягнення цілей за наявних умов.

Найважливішою властивістю цілеспрямованих систем є здатність динамічно змінювати цілі і способи їхнього досягнення у разі зміни ситуації. Цілеспрямовані системи принципово відрізняються від ціленаправлених високою гнучкістю, динамічністю і здатністю реагувати на зміну зовнішнього середовища шляхом адаптації потреб, цілей і дій у ситуаціях, що складаються. Системи даного класу можуть змінювати функції, властивості і навіть структуру як функціональних елементів, так і системи загалом.

Характерною особливістю цілеспрямованих систем є те, що вони мають інтелект — природний, штучний чи створений у результаті поєднання обох його видів. Більшість відомих цілеспрямованих систем належить до класу організаційно-технічних або експертних. Головними елементами є оператори, а також різного роду технічні засоби підтримки рішень, що мають інтелектуальну складову. Як приклади таких систем можна

навести гнучкі комп'ютеризовані виробництва, здатні у процесі функціонування змінювати номенклатуру та обсяг продукції, диспетчерські служби великих аеропортів, морських портів, здатні одночасно обслуговувати від кількох десятків до кількох сотень повітряних або морських суден за мінливих погодних умов, тощо. Ілюстрацією здатності цілеспрямованих систем до адаптації до умов зовнішнього середовища є дії персоналу електростанцій, великих металургійних, гірничодобувних, хімічних та інших виробництв у критичних і аварійних режимах.

Структурована система — об'єкт дослідження, відображений у вигляді певної ієрархічної структури функціональних елементів з урахуванням взаємозв'язків, взаємозалежностей і взаємодій між ними.

Структурована вихідна система — це набір вихідних систем даних, даних систем або породжувальних систем, що мають спільну параметричну множину. Системи, які утворюють структуровану систему, зазвичай називають її елементами. Деякі змінні в них можуть бути спільними. Їх звичайно називають єднальними змінними. Вони є взаємодією між елементами структурованої системи.

Спільні змінні використовують як під час дослідження, так і під час проектування складних систем. У дослідженнях реальних об'єктів за елементи приймають їхні технологічні і конструктивні складові, котрі реалізують певні технологічні процеси або функції керування. Наприклад, у разі дослідження діючої АЕС як елементи системи можна виділити атомний реактор, турбомашину, електрогенератор, кожен з яких є конструктивно і технологічно цілісним об'єктом і реалізує відповідно такі технологічні процеси: перетворення атомної енергії в теплову, теплової в механічну та електричну. Слід особливо наголосити, що кожен із перелічених елементів АЕС є складною механічною системою. Тому у разі проектування нового об'єкта, наприклад, чергової АЕС, можна паралельно вирішувати кілька системних задач. Серед них необхідно виділити такі: проектування АЕС загалом, проектування кожного із зазначених раніше функціональних елементів, а також проектування системи інфраструктури, яка забезпечує житлові, торговельні та інші будівлі, сховища, підсобні приміщення тощо. У загальному випадку такі задачі містять системні формулювання різних вимог і умов, пов'язаних із взаємовідносинами між різними частинами і між частинами та об'єктом загалом. Проблеми на кшталт *частина-ціле* і *частина-частина*, що виникають під час дослідження і проектування складних систем, суттєво відрізняються одна від одної. Так, у разі *проектування* головні труднощі полягають у тому, щоб вибором структури та елементів системи забезпечити досягнення заданих цілей на основі раціонального компромісу суперечливих вимог до об'єкта загалом. У дослідженні така проблема: як на основі раціонального керування функціонуванням реального об'єкта певної структури, що складається з конкретних елементів, забезпечити виконання заданих вимог у реальних умовах експлуатації.

Першим етапом проектування є визначення так званої *породжувальної системи*. Це — задум завдання, яке повинна виконати система. У загальному випадку цим завданням є перетворення станів відповідних вхідних змінних у стан вихідних змінних. Отже, отримана породжувальна система завжди є ціленаправленою.

Під час збирання вихідної інформації про об'єкт аналізу необхідно враховувати, що на практиці більшість об'єктів є *відкритими системами*.

Під відкритими будемо розуміти такі системи, для яких властивий обмін різними ресурсами, зокрема енергією та інформацією, із зовнішнім середовищем. Тому завжди важливо визначити межі відкритої системи або, простіше кажучи, встановити, де закінчується досліджуваний об'єкт і починається навколишнє середовище. При цьому

визначальним фактором завжди є мета аналізу. Наприклад, якщо метою системного аналізу є визначення джерела втрат електроенергії у деякій системі, то необхідно аналізувати всю електроенергетичну мережу цієї системи. Якщо ж метою системного аналізу є, скажімо, створення економного електрогенератора, то всі функціональні елементи за його межами можна вважати зовнішнім середовищем.

Однак ці приклади скоріше виняток, ніж правило. У переважній більшості практичних задач системного аналізу визначити фізичні межі об'єкта дослідження з відомої сукупності цілей досить складно. Суперечливі цілі вказують на різні межі, а орієнтація на супремум цих меж веде не лише до надмірного їх розширення, але й, що суттєво важливіше, — до значного ускладнення розглянутої задачі. Крім того, у багатьох випадках, наприклад, на ранніх стадіях розробки унікального об'єкта, практично невідомі кількісні дані щодо ступеня впливу різних функціональних елементів на рівень досягнення цілей і фізичні межі об'єкта дослідження. Більш того, найчастіше не можна стверджувати, що об'єкт дослідження визначений цілком, оскільки кожен функціональний елемент описує, зазвичай, певна сукупність показників, які характеризують деяку множину властивостей. Але ступінь впливу різних властивостей на різні цілі системної задачі може бути суттєво різним. Тому природне прагнення аналітика виключити з розгляду властивості тих функціональних елементів, ступінь впливу яких достатньо малий. Однак у таких випадках виникає запитання: що прийняти за критерій малості впливу? Відповідь на нього неоднозначна, причому вона ускладнюється у випадку, коли аналіз необхідно виконати для цілеспрямованих систем.

Для заданої структурованої системи існує інша, пов'язана з нею система, визначена всіма змінними елементів, що входять у неї. Цю систему розглядають як деяку *повну систему*, тобто систему, подану у вигляді певного об'єднання усіх вхідних змінних. Із цього погляду елементи будь-якої структурованої системи можна інтерпретувати як підсистеми відповідної повної системи, а повну систему — як суперсистему стосовно цих елементів. Отже, структуровані системи стають по суті відображеннями повних систем у вигляді різних підсистем.

Поняття повної системи або підсистеми, зрозуміло, не є однозначним. Наприклад, якусь систему в одному контексті можна розглядати як елемент структурованої системи, а в іншому — як повну систему, підсистеми якої утворюють структуровану систему. Аналогічна неоднозначність характерна для вихідних систем, систем даних або породжувальних систем. Це дає можливість зобразити будь-яку повну систему як багаторазове вкладення структурованих систем. Наприклад, структурована складна система може містити елементи, що, в свою чергу, є структурованими складними системами, елементи яких також являють собою структуровані складні системи, і так до елементів, що складаються з простих змінних.

Необхідність відображення повної складної системи у вигляді сукупності її підсистем може бути обумовлена багатьма причинами. Однією з головних є її складність, пов'язана з доступністю для огляду такої системи, інша — стосується спостережень і вимірів. Якщо параметри і характеристики складної системи залежать від часу, то буває технічно неможливо або недоцільно одночасно спостерігати за всіма змінними, що мають відношення до мети дослідження. У цьому випадку дані можна збирати лише частково, для найбільшої можливої підмножини змінних. В інших випадках дослідник змушений використовувати непрямі дані, які зібрано різними опосередкованими способами і покривають лише частину змінних, необхідних для роботи.

2.2. Властивості і принципи системної методології

Досвід свідчить, що спосіб реалізації нових ідей і технічних рішень залежить від багатьох факторів та умов. Серед них слід у першу чергу виділити спроможність фахівця та можливість науки формалізувати й розв'язувати системні задачі, наприклад, із проектування; тобто за допомогою промислових технологій реалізувати проект і створити виріб із необхідними показниками якості.

2.2.1. Поняття системної задачі

Особливу увагу слід звернути на значимість процедури формалізації задач у справі реалізації інноваційних ідей та технічних рішень, а також для проектування виробів нової техніки, що не мають аналогів і прототипів. Такі задачі відрізняються багатьма протиріччями і невизначеностями. Найважливішими серед них є:

- ♦ неоднозначність і суперечливість вимог до виробу;
- ♦ суперечливість цілей і неоднозначність умов застосування виробу;
- ♦ невизначеність і непередбачуваність можливих дій конкурентів;
- ♦ нескінченність і непрогнозованість ситуацій ризику на різних стадіях життєвого циклу виробу.

За цих умов, користуючись різномірною, зазвичай неповною, емпіричною, експериментальною, казуальною та іншою вихідною інформацією, розробник повинен формалізувати і розв'язати задачу проектування виробу, зокрема сформулювати й обґрунтувати цілі його створення. Результати розв'язання цієї задачі повинні довести практичну необхідність, технологічну можливість та економічну доцільність виробництва виробу, що проектується. За умов ринкової економіки слід також оцінювати ступені та рівні ризику на кожній стадії життєвого циклу виробу і з урахуванням усіх факторів приймати такі рішення, щоб ризик був прийнятним. Зрозуміло, що за умов невизначеності доводиться виконувати процедури формалізації й розв'язання багатьох інших практично важливих системних задач. Зокрема, задачі аналізу й керування розв'язують у динаміці позаштатних режимів складної техніки, у процесі різних критичних і надзвичайних ситуацій. Практичну значимість процедури формалізації під час розв'язання реальних задач обґрунтував К. Норберг-Шульц фразою, яку Дж. Клір узяв як епіграф до розділу своєї книги [66, с. 19]: «Тільки у разі повного розуміння задач можна знайти відповідні способи їхнього розв'язання. Для отримання результатів важливіше поставити правильне запитання, аніж правильно відповісти на помилкове».

Очевидно, що для кращого розуміння системних задач потрібно насамперед погодити між собою базові поняття. Введемо наступне означення.

Системна задача — це задача аналізу певної сукупності властивостей об'єкта дослідження з єдиної позиції цілісного підходу для досягнення заданих цілей за наявних умов.

Цілком очевидно, що системні задачі нескінченно різноманітні через відмінність кількості і виду цілей, складність та унікальність об'єктів дослідження, враховуючи різноманітність структури складових його елементів і зв'язків між ними (проектованого виробу, споруди, прогнозованої ситуації, технології тощо), обсягу та якості вихідної інформації, обсягу і рівня вимог до якості розв'язку задачі та інших факторів. Разом із тим у цих

задачах можна виділити низку спільних властивостей, що дає змогу об'єднати системні задачі в особливий клас. У ньому, в свою чергу, можна виділити певну кількість типів задач, а їхню відмінність визначити набором факторів, зокрема таких:

- ♦ структурою впорядкованості і взаємозалежності зв'язків між множинами вихідних даних задачі і множинами остаточних результатів її розв'язання;
- ♦ погодженістю і впорядкованістю вимог до цих множин;
- ♦ рівнем обчислювальної складності задачі;
- ♦ ступенем структурованості і рівнем потенційної формалізованості задачі.

Два перші фактори характерні як для системних задач, так і для задач інших класів, досліджуваних у різних аксіоматичних теоріях (керування, ігор, прийняття рішень тощо).

Згідно з підходом Дж. Кліра [66], необхідно звернути увагу на роль і місце двох останніх факторів у системних дослідженнях. Вони є специфічними ознаками системних задач і багато в чому визначають їхні основні властивості та особливості. Зокрема, вірогідність формалізації реальної системної задачі практично цілком залежить від останнього з наведених вище факторів, а вірогідність обчислень і результатів розв'язання задачі визначаються як вірогідністю формалізації задачі, так і обсягом та точністю вихідної інформації, а також рівнем обчислювальної складності формалізованої задачі.

Процедуру розв'язання формалізованих задач здійснюють за два етапи:

- ♦ на першому етапі людина виконує формалізацію задачі і підготовку відповідних матеріалів до обчислень;
- ♦ на другому етапі обчислення проводяться на комп'ютері або в комп'ютерній мережі.

Ця обставина зумовлює необхідність раціонального використання як можливо-стей людини, так і можливостей сучасних обчислювальних методів і засобів.

Із системними задачами доводиться стикатися під час дослідження та проектування складних систем. Завданням етапу дослідження систем є нагромадження знань про стан їхніх внутрішніх елементів і зв'язків між ними, а також про характер взаємодії цих систем із зовнішнім середовищем з урахуванням конкретних цілей дослідження. Завданням етапу проектування складних систем є їхнє створення шляхом використання накопичених знань, які б дозволили досягти нових властивостей цих систем і реалізації нових цілей під час їхньої взаємодії із зовнішнім середовищем.

Найважливішою рисою проектування систем є те, що параметричні інваріантні обмеження на деякі конкретні змінні визначає користувач. Зовсім інша ситуація складається у разі дослідження систем, для яких подібні обмеження невідомі, і завдання полягає в тому, щоб адекватно охарактеризувати їх з урахуванням конкретної мети дослідження.

Обмеження у проектуванні систем визначають або явно мовою конкретної породжувальної, звичайно цілеспрямованої системи, або явно мовою системи даних. У першому випадку задача проектування зводиться до визначення наборів структурованих систем, які задовольняють задані вимоги. У другому випадку необхідно визначити деякі породжувальні системи, які адекватно описують обмеження, що містяться в даних.

У задачах системного аналізу зазвичай відомі лише деякі вимоги до тих чи інших властивостей і певні фактори, які необхідно враховувати для досягнення цих властивостей (максимальна швидкість, вантажопідйомність автомобіля, час розгону до певної швидкості, максимальна витрата бензину, кліматичні умови тощо). Критерії, за якими слід оцінювати якість функціонування системи, зазвичай невідомі і неформалізовані.

Так, конструктор під час проектування нового літального апарата, не знаючи його форми, прагне, щоб він мав найбільшу міцність, надійність, довговічність, дальність польоту, якнайменше споживав пального і був досить дешевим. Ясно, що одночасно всі ці умови у принципі неможливо задовольнити.

Під час розв'язування задач системного аналізу найважливіше значення має рівень та якість математичного й інформаційного забезпечення. Обсяг корисної інформації визначається з урахуванням необхідності ухвалення рішення у процесі керування на кожному етапі життєвого циклу системи. Проблеми для дослідника виникають як у разі нестачі інформації, так і у разі її надлишку. Тому завдання інформаційного забезпечення в широкому розумінні має визначальне значення на ранніх стадіях життєвого циклу системи, зокрема на стадії розробки, випробування та доробки дослідного зразка виробу. Стадії зазвичай поділяються на етапи. Так, перша стадія розробки виробу нової техніки складається з таких етапів:

- ♦ науково-дослідна робота (НДР) або, якщо мова йде про унікальні вироби, які не мають прототипів і аналогів, науково-дослідна і дослідно-конструкторська робота (НДДКР);
- ♦ розробка технічної пропозиції;
- ♦ розробка технічного завдання;
- ♦ ескізне проектування та розробка ескізного проекту;
- ♦ технічне проектування і розробка технічного проекту;
- ♦ макетування й доведення виробу (цей етап може включати процедури розробки та випробування макета, експериментального зразка виробу);
- ♦ випробування й доведення дослідного зразка.

Особливість задач системного аналізу у разі розробки складної технічної системи полягає в тому, що на ранніх етапах, особливо на етапах НДДКР або НДР чи трьох перших, існує максимальна невизначеність інформації про структуру та принцип реалізації виробу. Але прийняті на цих етапах рішення є найвідповідальнішими, оскільки вони визначають концепцію та технологію розробки, виробництва й експлуатації складної технічної системи. На цих ранніх етапах велика частка задач є неформалізованою, а отже, найскладнішою та найвідповідальнішою. Говорячи про відповідальність масмо на увазі той факт, що на усунення помилок, допущених на ранніх етапах, доведеться витратити на кілька порядків більші кошти, ніж на усунення помилок, допущених на останніх етапах.

Дослідження американських фахівців показали, що для усунення помилки у технічному рішенні вартістю 1 долар, яка була допущена на етапі НДДКР або НДР, на другому етапі доведеться витратити десятки доларів; на третьому — сотні, на четвертому — тисячі, на п'ятому — десятки тисяч, на шостому — сотні тисяч, а на останньому — мільйони доларів. Звідси випливає, що прийняття рішень на ранніх етапах є найважливішим та найвідповідальнішим, а допущені помилки і прорахунки — найдорожчими.

2.2.2. Властивості та особливості системних задач

Розглянемо специфіку задач системного аналізу на прикладі розробки нового технічного виробу. Для спрощення розуміння системних задач введемо ряд обмежень і при-

пущень, які не завжди виконуються на практиці і які надалі будуть виключені. Вважатимемо, що апіорі про задачу відомо таке:

- ♦ задача формалізовна на основі вихідних даних у вигляді або технічної пропозиції, сформульованої Розробником і поданої на конкурс, або у вигляді технічного завдання, оформленого і затвердженого Замовником;
- ♦ метою розв'язання задачі є створення матеріального об'єкта у вигляді складної ієрархічної системи, що відповідає вимогам Замовника.

У наведених відомостях відображаються два основних принципи створення та експлуатації складної техніки: поділ праці та поділ функцій. Поділ праці полягає в тому, що Замовник розробляє Технічне завдання, а Розробник створює Проект виробу. У деяких випадках функції Розробника чи Замовника можуть бути суттєво ширші за обсягом і триваліші за часом. Зокрема, Розробник може виконувати всі виробничі функції на всіх стадіях життєвого циклу виробу: розробку Проекту виробу; розробку, виробництво та експлуатацію виробу; утилізацію виробу, що відпрацював встановлений час. У такому разі Замовник може здійснювати і всі контрольні функції: перевіряти якість матеріалів, процес виробництва та експлуатації виробу на відповідних стадіях його життєвого циклу. Поділ функцій між компонентами виробу полягає в тому, що він є складною ієрархічною системою, кожен рівень якої виконує тільки заздалегідь визначені функції. Така реалізація виробу дає змогу під час його експлуатації спростити керування, підвищити працездатність та ефективність. (Відзначимо, що під термінами «Розробник» і «Замовник» розуміються організації, які виконують зазначені вище функції.)

Змістовне формулювання системної задачі

Припустимо, що *відомо*: вихідні дані для розробки виробу нової техніки, оформлені у вигляді Технічного завдання, що визначає:

- ♦ призначення, умови експлуатації та габарити виробу;
- ♦ вимоги до технічних, технологічних, конструктивних, експлуатаційних, економічних та інших показників якості виробу.

Потрібно: розробити виріб, що цілком відповідатиме умовам та обмеженням Технічного завдання.

Аналіз дій Розробника

Розглянемо коротко послідовність і особливості дій Розробника виробу під час виконання Технічного завдання. Послідовність дій Розробника зумовлено заданими вимогами та обмеженнями, серед яких найважливіше значення має структура виробу, що подана у вигляді складної ієрархічної системи. Така структура характерна для багатьох видів сучасної техніки та свідчить про складність виробу. Тому основною, можливо, найважчою, є процедура формування складної ієрархічної структури виробу. Складність формування такої структури зумовлена тим, що для забезпечення рівномірного навантаження на функціональні елементи виробу необхідно якнайкраще розподілити вимоги між ієрархічними рівнями структури та між функціональними елементами кожного рівня. Однак вимоги ставлять лише до виробу загалом, оскільки Замовника цікавить тільки кінцевий результат реалізації Технічного завдання, тобто можливість створення такого виробу, який цілком відповідав би необхідним показникам.

Тому Розробникові апіорі невідомо ні кількість функціональних елементів, ні їхні типи, ні кількість ієрархічних рівнів структури. Отже, Розробник повинен виконувати вимоги Технічного завдання за умов неповноти, невизначеності, нечіткості вихідної інформації. Ці умови принципово відрізняють задачу системного аналізу від типових детермінованих задач, у яких вихідну інформацію чітко визначено.

Основні процедури розв'язання задачі

Розглянемо докладніше зміст основних процедур, які необхідно виконати для розв'язання поставленої задачі. Нижче всі ці процедури для наочності наводяться як послідовність вимог до виробу.

1. Визначити раціональну кількість ієрархічних рівнів складної системи.
2. Визначити раціональну кількість функціональних елементів для кожного ієрархічного рівня системи.
3. Сформулювати вимоги до кожного ієрархічного рівня складної системи на основі обмежень і вимог Технічного завдання.
4. Сформулювати вимоги до всіх функціональних елементів кожного ієрархічного рівня, враховуючи обмеження і вимоги до відповідного рівня.
5. Вибрати типи функціональних елементів кожного ієрархічного рівня з урахуванням обмежень і вимог, які висувуються до кожного такого елемента.
6. Забезпечити для кожного ієрархічного рівня системну погодженість усіх функціональних елементів щодо цілей, задач, очікуваних результатів.
7. Виконати експертне оцінювання можливості практичної реалізації заданих обмежень і вимог до виробу на основі результатів, отриманих під час виконання дій, перелічених у пунктах 1–5.
8. Виконати експертне оцінювання практичної необхідності, технологічної можливості та техніко-економічної ефективності виробництва певного виробу з огляду на обмеження та вимоги Технічного завдання, стан і динаміку ринку конкурентних виробів, використовуючи при цьому отримані раніше результати (див. пункти 1–7).
9. Обробити результати експертного оцінювання, сформулювати узагальнені оцінки переваг і недоліків розробленого виробу.
10. Розробити й обґрунтувати висновки щодо подальших дій із розробленим проектом виробу та щодо їхньої доцільності.
11. Розробити й обґрунтувати рекомендації для Замовника щодо можливих варіантів подальших дій із розробленим виробом.
12. Реалізувати прийняте Замовником рішення про цілі та функції виробу.

Аналіз особливостей системної задачі

Склад основних процедур дає змогу визначити низку важливих особливостей системної задачі. Головна її особливість полягає в тому, що різні процедури, необхідні для розв'язання задачі, реалізують різні виконавці, цілі яких суттєво відрізняються. Звідси випливає, що їх результати повинні відображати основні цілі діяльності виконавців. Найважливіше значення мають результати діяльності Розробника, які визначають

властивості та можливості майбутнього виробу. Для досягнення основної мети, визначеної вище процедурою 6, Розробник повинен виконати процедури 1–5. Їхня складність полягає в тому, що це робиться за умов неповноти і невизначеності вихідної інформації, оскільки в Технічному завданні задаються вимоги лише до виробу загалом. За таких умов задачі характеризуються концептуальною невизначеністю, а тому не можуть бути формалізовані [123].

Вибір кількості ієрархічних рівнів, кількості та типів кожного функціонального елемента всіх ієрархічних рівнів залежить від уміння, досвіду, знань, інтуїції, передбачення Розробника. Звідси випливає, що навіть у разі розробки однотипного виробу різні Розробники можуть створити продукти, які різнитимуться багатьма властивостями. Типовим прикладом подібної ситуації можуть бути літаки генеральних конструкторів О. К. Антонова, А. М. Туполева, О. С. Яковлева.

Зазначені властивості та особливості принципово відрізняють процедури розв'язання системної задачі від процедур для типових детермінованих задач, у яких апіорі відомі кількісні значення всіх вихідних даних. Тому методологічні підходи й математичні методи оцінювання точності та вірогідності розв'язків типових детермінованих задач безпосередньо не можна застосовувати до системних задач, що характеризуються неповнотою та невизначеністю вихідної інформації. До таких системних задач доцільно застосовувати методи експертного оцінювання [59]. Експертне оцінювання переваг і недоліків розробленого виробу в цій задачі виконують за допомогою процедур 7 і 8. Слід звернути увагу, що вірогідність експертного оцінювання за умов неповноти і невизначеності вихідної інформації залежить від багатьох факторів, докладно розглянутих у розділі 11. Тому поряд із виконанням експертного оцінювання переваг і недоліків виробу потрібно розробити рекомендації щодо можливих варіантів дій Замовника, на підставі яких він формуватиме та прийматиме рішення про подальші заходи і дії з розробленим виробом.

Проведений аналіз свідчить, що Розробнику нового технічного виробу доводиться для кожного функціонального елемента кожного ієрархічного рівня формувати складну ієрархічну систему за умов неповноти та недостовірності вихідної інформації. У цьому випадку доцільно процедури 1–6 подавати у вигляді функціонально взаємозалежних і структурно взаємопов'язаних системних задач, перелік яких наведений нижче.

1. Задача системно погодженої декомпозиції заданого виробу у складну ієрархічну систему на основі раціонального вибору кількості ієрархічних рівнів та кількості функціональних елементів на кожному рівні.
2. Задача системно погодженої декомпозиції заданих загальних вимог до виробу на раціональні вимоги до кожного ієрархічного рівня розроблюваної системи.
3. Задача системно погодженої декомпозиції заданих загальних вимог до кожного ієрархічного рівня розроблюваної системи на раціональні вимоги до кожного функціонального елемента кожного ієрархічного рівня.
4. Задача раціонального агрегування обраних типів функціональних елементів для кожного ієрархічного рівня в єдину системно погоджену структуру кожного ієрархічного рівня.
5. Задача раціонального агрегування сформованих системно погоджених структур кожного ієрархічного рівня в єдину складну багаторівневу ієрархічну систему, що відповідає заданим обмеженням і вимогам до виробу.

У практиці розробки, випробування та доведення реальних складних технічних систем (СТС) вимоги, критерії, основні умови дослідження й експлуатації визначають у процесі виконання відповідних етапів на кожній стадії життєвого циклу системи. Життєві цикли різних типів складних систем можуть відрізнятися варіантами стадій. Зокрема, життєвий цикл складного унікального технічного виробу включає такі стадії: проектування, розробки дослідного зразка, серії його випробувань, дослідної експлуатації зразка, серійного виробництва та експлуатації виробу. Завершується життєвий цикл будь-якого виробу, що відпрацював встановлений ресурс, зазвичай стадією утилізації.

Слід звернути увагу на деякі вихідні умови та ситуації. Наприклад, у процесі розробки нових СТС різного призначення виникають ситуації, коли ціла низка факторів, умов і обмежень є не повністю заданими або цілковито невизначеними. Тому задача пошуку оптимального варіанта побудови структури СТС не зводиться безпосередньо до рішення типової математичної задачі оптимізації. Зазвичай розв'язання подібних задач неможливе без залучення досвіду, знань, уміння, інтуїції та передбачення людини.

При цьому не існує точного методу або алгоритму пошуку раціональної структури системи, її поділу на ієрархічні рівні. Задачі такого класу прийнято називати *слабко структурованими*. Гранічним варіантом слабко структурованих задач є неформалізовані задачі.

Отже, більшість задач системного аналізу можна трактувати як такі, що включають неформалізовані та формалізовані складові. Крім того, до особливостей таких задач належать слабка структурованість, алгоритмічна нерозв'язність, неповнота, невизначеність, неточність, нечіткість, суперечливість вихідної інформації. Неформалізовані та формалізовані частини таких задач є нероздільними, і на кожному етапі аналізу існують неформалізовані та формалізовані частини, які так само нероздільні (рис. 2.1).

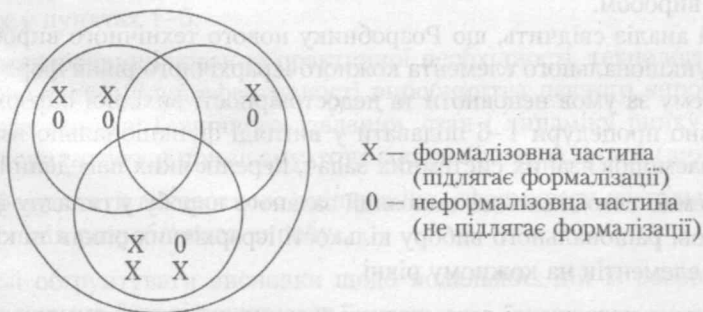


Рис. 2.1. Формалізовані та неформалізовані складові задач системного аналізу

Зазвичай можливість розв'язання формалізованої складової задачі зумовлено повнотою та якістю основних характеристик неформалізованої частини. Неформалізовані складові задачі формуються на основі досвіду, інтуїції людини за умови використання принципів і методів експертного оцінювання (ЕО), а також методів комп'ютерної математики та імітаційного моделювання. Ці методи можна також застосовувати для перевірки вірогідності та можливості реалізації нових ідей, гіпотез, припущень і передбачень у різних сферах, наприклад, в інноваційній діяльності.

Отже, для розв'язання багатьох задач системного аналізу використовують принцип декомпозиції вихідної задачі на послідовність більш простих із подальшим агре-

гуванням результатів розв'язання окремих задач у підсумковий розв'язок вихідної загальної задачі системного аналізу. Кожну часткову задачу системного аналізу, у свою чергу, можна декомпонувати на послідовність ще простіших задач. Процес декомпозиції триває до такого рівня, коли одержана часткова задача має формалізовну частину, яку можна розв'язати за допомогою відомих або спеціально розроблених точних чи наближених методів та алгоритмів. Аналогічно здійснюється агрегування отриманих результатів.

Задачам системного аналізу властиві багатокритеріальність, багатofакторність і багатопараметричність. Будемо вважати, що ці властивості описуються такими характеристиками.

- ♦ *Критерій* — це показник або функціонал, який дає змогу кількісно або якісно оцінювати ту чи іншу властивість системи.
- ♦ *Фактор* — зовнішній або внутрішній вплив, що діє на певні властивості та поведінку складних систем.
- ♦ *Параметр* — кількісний показник, який визначає деяку властивість системи або ступінь впливу фактора на її властивість.

Слід також зазначити, що в багатьох реальних задачах системного аналізу зазвичай відомі лише окремі вимоги відносно тих чи інших властивостей і деякі фактори, які необхідно враховувати для забезпечення цих властивостей. Зокрема можуть бути задані максимальна швидкість, максимальна чи мінімальна витрата пального, максимальна вантажопідйомність, числові значення інших показників транспортних засобів; граничні значення показників вологості, температури, інших природних і кліматичних умов, показники різних зовнішніх умов і факторів. Критерії, за якими необхідно оцінювати якісні характеристики системи, найчастіше є неформалізовними, і тому їх формують на основі знань, умінь, досвіду, інтуїції й передбачення ОПР або групи експертів.

2.2.3. Методи дослідження систем

Згідно з підходом Дж. Кліра [66], порівнюючи процедуру дослідження систем і процедуру їхнього проектування на рівні систем даних та породжувальних систем, необхідно розрізняти два класи систем даних, з якими доводиться стикатися у такому разі. До першого класу належать системи даних, у яких змінні не мають змістовного значення поза параметричною множиною, де вони визначені. Прикладами таких систем є:

- ♦ музичний твір, розглядуваний як система даних, змінні якої, мабуть, не мають змісту поза часовою множиною, що відповідає усьому твору;
- ♦ будь-яка система даних, визначена на всій групі певного типу, наприклад, усі твори якого-небудь композитора, всі службовці певного підприємства тощо.

Системи даних такого типу містять повну інформацію про обмеження на їхні змінні. Цим вони методологічно подібні до систем даних, котрі визначають під час проектування систем. Такі системи називаються *повними системами даних*.

Другий клас систем складають системи, у яких змінні не обмежені тією параметричною множиною, для якої є дані. Можна стверджувати, що практично всі системи, параметром яких є час, належать до цього класу.

Існують два основних методи дослідження систем. Перший ґрунтується на тому, що породжувальні системи (або системи вищих рівнів), які базуються на певних вимогах, виводять із заданої системи даних. Цей метод зазвичай називають *методом відкриття* (наприклад, проект місяцехода).

Згідно з іншим методом гіпотетичну породжувальну систему (або систему вищого рівня) постулюють, а потім її правильність перевіряють порівнянням породжених нею (за відповідних початкових умов) даних з емпіричними даними. Якщо система не витримує перевірки, що здійснюється із застосуванням деякого конкретного критерію правильності, то її відкидають і постулюють нову систему. Цей підхід зазвичай називають *методом постулювання*.

У разі використання методу відкриття будь-яка породжувальна система, отримана безпосередньо із системи даних, є певним «економним» відображенням деяких аспектів системи даних. Якщо породжувальна система детермінована, то цей «економний» опис усієї системи даних є своєрідним «стенографічним» описом.

Якщо система даних повна, то метод відкриття зводиться до відшукування її моделей. Виявлені моделі згодом можна використовувати для різних цілей. Якщо система неповна, то слід пам'ятати про дві обставини, пов'язані з одержаними моделями, а саме про необхідність інтерпретації даних у рамках заданої параметричної множини та їхнього виведення за межі параметричної множини, тобто про необхідність передбачення, відновлення та узагальнення даних.

Отже, дослідження систем здійснюють із використанням таких прийомів:

- ♦ підйому по рівнях ієрархії методом виявлення систем вищих рівнів, для яких системи нижчих рівнів мають певні властивості, і, якщо система даних неповна, виконують відповідні індуктивні висновки (метод відкриття);
- ♦ постулювання породжувальних систем або систем вищого рівня і відкидання тих із них, які не витримують перевірки на відповідність між емпіричними й породжуваними даними (метод постулювання);
- ♦ застосування будь-якої комбінації методу постулювання та методу відкриття (наприклад, підйом по ієрархії до певного рівня й постулювання систем на вищому рівні).

Проектування ж систем завжди є процесом підйому по епістемологічній ієрархії систем. Він починається з визначення або породжувальної системи, або системи даних і набору вимог щодо структури систем.

Дослідження та проектування складних систем здійснюють із використанням методології системного аналізу як цілісного інструментарію системного аналітика. Очевидно, що методологія як системний інструментарій має відзначатися функціональною повнотою, логічною завершеністю й системно-погодженим взаємозв'язком прийомів, принципів і методів. А для цього вона повинна відповідати певним принципам, мати певні властивості, використовувати можливості системного підходу. Крім того, системний підхід необхідно пристосовувати до розв'язання реальних системних задач. У цьому контексті доцільним є спільне застосування дедуктивного та індуктивного методів: першого — для розуміння того, на який імовірний результат можна розраховувати або якого результату вже досягнуто в ситуації, що аналізується, а другого — для виконання доцільних дій таким чином, щоб імовірність досягнення бажаного результату була найбільшою.

2.2.4. Фундаментальні властивості та принципи системної методології

Розглянемо властивості і принципи системної методології. Фундаментальними властивостями системної методології є результативність, ефективність і масштабність.

Результативність — це здатність методології як робочого інструментарію користувача забезпечити можливість одержати практично прийнятний розв'язок прикладних системних задач, що характеризуються неповнотою, неточністю, суперечливістю, невизначеністю вихідної інформації. Практично прийнятним розв'язком називають результат, що задовольняє дослідника з погляду необхідної точності, вірогідності та обґрунтованості.

Ефективність — здатність методології забезпечувати кінцевий результат у формі розв'язків реальних системних задач за прийнятний час із допустимими витратами обчислювальних, фінансових чи будь-яких інших ресурсів. Зміст цієї властивості зумовлений необхідністю зіставлення ефекту від використання отриманого результату і витрат на його досягнення. Воно полягає в тому, що економічний, соціальний, екологічний, оборонний чи інший очікуваний ефект від розв'язання системної задачі має бути порівняним із витратами. При цьому необхідно забезпечити виконання умов: песимістичної — отриманий ефект повинен компенсувати витрати, або оптимістичної — отриманий ефект значно перевищує витрати.

Масштабність — властивість застосовності методології для розв'язання широкого кола прикладних задач, що суттєво відрізняються за багатьма факторами, зокрема за природою об'єктів, областю застосування, рівнем інформованості дослідника, змістом задач тощо. Значення і значимість цієї властивості очевидні з поданого вище її визначення.

Не будемо зупинятися на інших важливих властивостях методології, які доцільно розглядати у процесі її практичного застосування для певних класів системних задач. Звернемо лише увагу на ті фундаментальні принципи, яких необхідно дотримуватися під час формування системної методології та її практичної реалізації у вигляді сукупності конкретних підходів, методів, методик, алгоритмів, пакетів прикладних програм тощо.

- **Принцип системної погодженості.** Методи, підходи, методики, алгоритми, пакети прикладних програм мають бути функціонально та структурно взаємопов'язаними й взаємозалежними, тобто становити єдину системну методологію.
- **Принцип процедурної повноти.** Системна методологія повинна забезпечити виконання всіх процедур — від формалізації формулювання системної задачі до верифікації отриманих результатів її розв'язання.
- **Принцип функціональної ортогональності.** Кожна процедура в системній методології має бути реалізована у вигляді сукупності функцій, які незалежні від функцій інших процедур.
- **Принцип інформаційної взаємозалежності.** Вихідна інформація та результати виконання кожної процедури повинні бути інформаційно взаємопогодженими з іншими взаємозалежними процедурами цієї методології.
- **Принцип цілеспрямованої відповідності.** Процедури та прийоми методології мають бути взаємно погодженими та спрямованими на досягнення єдиної мети — забезпечення необхідної вірогідності й обґрунтованості результатів розв'язання задачі.
- **Принцип функціональної раціональності.** Взаємне дублювання виконуваних функцій у системній методології недопустиме.

- ♦ **Принцип багатоцільової загальності.** Методи та прийоми методології повинні мати достатній рівень загальності й забезпечувати розв'язання різнотипних класів системних задач, що різняться призначенням, цілями, областю застосування, природою об'єктів та деякими іншими факторами.
- ♦ **Принцип багатофакторної адаптивності.** Процедури та прийоми методології повинні адаптуватися як до особливостей і властивостей системних задач, що різняться рівнем складності, ступенем повноти вихідної інформації та рядом інших факторів, так і до вимог ОНР, в інтересах якої розв'язують системну задачу.
- ♦ **Принцип процедурної відкритості.** Методи та прийоми, що застосовуються, повинні зберігати структурний взаємозв'язок та функціональну взаємодію й забезпечувати загальну результативність методології як у разі заміни певних процедур іншими, так і у разі їхнього структурного або функціонального агрегування.
- ♦ **Принцип раціональної доповнюваності.** Методологія повинна забезпечувати можливість розширення сфери своєї застосовності шляхом використання додаткових методів, прийомів, принципів за умови їхньої несуперечності між собою та з вихідною методологією.

2.2.5. Евристичні гіпотези системної методології

Втілення зазначених принципів може бути забезпечено лише в результаті раціонального поєднання можливостей людини-експерта та сучасних обчислювальних засобів і методів. Тому в системній методології важливу роль відіграють евристичні підходи, що ґрунтуються на використанні інтуїції та досвіду людини.

Значимість евристичних методів і прийомів у системному аналізі впливає з кількох принципово важливих факторів. *По-перше*, задачам системного аналізу властиві такі особливості, як суперечливість і нечіткість цілей, невизначеність, неповнота, неточність вхідної інформації. *По-друге*, людина у змозі, керуючись власною інтуїцією, досвідом і знаннями, доповнювати відсутню інформацію шляхом побудови певних евристичних гіпотез, що необхідно для розв'язання широкого класу системних задач. Потреба у вирішенні таких задач виникає, скажімо, під час дослідження критичних і надзвичайних ситуацій у технологічних, екологічних, соціально-економічних процесах, у яких найважливішими факторами є дія граничних і біфуркаційних механізмів їхнього розвитку. Так, дія порогового механізму полягає в тому, що після переходу через певне значення (порог) критичних показників властивості процесу принципово змінюються. Сутність біфуркаційного механізму полягає в можливості появи й реалізації різних альтернатив розвитку ситуації у разі переходу через поріг. Це зумовлює особливу актуальність задач системного прогнозування й передбачення критичних та надзвичайних технологічних, екологічних, соціально-економічних ситуацій, критичних режимів технічних систем і технологічних процесів.

Розв'язання подібних системних задач неможливо без залучення знань і досвіду експертів. У цьому випадку використовується здатність людини сприймати й розрізняти альтернативи дій, встановлювати пріоритети, формувати переваги, передбачати динаміку розвитку подій. Тому в методології системного аналізу у разі розв'язання складних прикладних задач важливе місце займають евристичні методи та прийоми, принципи й методи експертних процедур, а також методи і засоби штучного інтелекту. Крім того, евристичні підходи є складовою частиною загальної системної методології в задачах

оцінювання і прогнозування поведінки різних небезпечних у техногенному та екологічному відношенні процесів, а також у задачах, пов'язаних з аналізом ризиків.

Необхідно розглянути й інші фактори, що відіграють важливу роль у забезпеченні вірогідності та обґрунтованості розв'язків задач системного аналізу. Проте спершу слід зазначити: загальна методологія системного аналізу є відкритою в тому розумінні, що у разі її застосування є можливість обмінюватись інформацією з зовнішнім середовищем щодо простору розв'язків задачі. Отже, системна методологія повинна забезпечувати можливість використовувати інформацію, що надходить із зовнішнього середовища, для перевірки правильності прийнятих рішень на різних етапах системного аналізу об'єкта або ситуації. У цьому сенсі можна вважати, що методологія має механізм зворотного зв'язку, який є важливою складовою методології, оскільки відкриває можливість зіставляти розрахункові і реальні результати. Порівняння результатів дає змогу, зокрема, коригувати процеси управління, що має особливе значення в умовах управління складними, небезпечними з техногенної та екологічної точки зору об'єктами у разі розвитку позаштатних, критичних або аварійних ситуацій. Однак слід враховувати, що механізм зворотного зв'язку має властивості інерційності. Тому для перевірки правильності розв'язків системних задач потрібен певний час. За умов виникнення критичних і надзвичайних ситуацій ОПР може не мати часу на виконання перевірки правильності прийнятих рішень. У таких випадках досить корисним є метод багатфакторного імітаційного моделювання, що застосовується для визначення реакції системи на різні альтернативні варіанти прийнятих рішень.

Слід зазначити, що в межах системного аналізу поняття «імітаційне моделювання» має більш широке тлумачення, ніж це прийнято традиційно. Головна принципова відмінність полягає в тому, що імітаційне моделювання під час розв'язування системних задач необхідно виконувати з позиції *принципу цілісності*. Його суть полягає в системному узгодженні цілей, задач, умов, властивостей досліджуваного об'єкта у процесі розв'язання задачі. Причому принцип цілісності необхідно реалізовувати з позиції теорії ризиків, тобто потрібно враховувати ступінь і рівень ризику прийнятого рішення в реальних умовах, для яких характерні як неповнота, невизначеність, неточність вихідної інформації, так і суперечливість цілей дослідження. Тому традиційний метод імітаційного моделювання під час розв'язання задач системного аналізу повинен бути доповнений принципами й методами ситуаційного моделювання та теорії ризиків. Це дасть змогу сформувати цілісний раціональний інструментарій, придатний для застосування в інтерактивному режимі за умов раціонального використання потенційних можливостей обчислювальної техніки, програмного забезпечення, а також знань, уміння, досвіду, інтуїції й можливостей передбачення людини.

Отже, до найважливіших властивостей, якими повинна володіти загальна методологія системного аналізу, слід віднести:

- ♦ цілісність методології з позиції можливості досягнення заданих цілей дослідження;
- ♦ системність врахування факторів, що впливають на реальні вихідні умови функціонування об'єкта, — неповноти, невизначеності, неточності вихідної інформації, суперечливості та неоднозначності цілей;
- ♦ можливість пояснення, обґрунтування та реалізації раціонального компромісу під час розв'язання системної задачі з точки зору одержання найкращих результатів, досягнення цілей і зниження ризиків;

- ♦ можливість попереднього прогнозування ефективності різних альтернативних рішень і подальшої верифікації прийнятого рішення в реальній ситуації.

До наведених властивостей необхідно додатково сформулювати кілька евристичних гіпотез, вірогідність яких інтуїтивно очевидна і впливає з досвіду практичних досліджень.

- ♦ **Гіпотеза 1.** Об'єкт системного аналізу характеризується своїм загальним призначенням, що залежить від позиції ОПР, її розумінням цілей і задач дослідження об'єкта.
- ♦ **Гіпотеза 2.** Об'єкт системного аналізу вивчають тільки у процесі його взаємодії з навколишнім середовищем.
- ♦ **Гіпотеза 3.** Цілі та задачі системного аналізу стосовно об'єкта визначають із позиції суб'єктивного розуміння ОПР раціонального компромісу між цими суперечливими цілями (або вимогами), ступенем і рівнем прийнятного ризику.
- ♦ **Гіпотеза 4.** Покладають, що штатним режимом для об'єкта є режим стійкого функціонування.
- ♦ **Гіпотеза 5.** Непередбачений вихід із режиму стійкого функціонування потребує застосування спеціальних методів системного аналізу.

Необхідність таких гіпотез обумовлена кількома факторами, серед яких насамперед слід виділити можливість різного суб'єктивного підходу до вибору різних методів і процедур системного аналізу для тих самих об'єктів різними експертами.

Так, інженерам у галузі радіоелектроніки та електротехніки зручно аналізувати складні системи мовою теорії ланцюгів. Фахівці в галузі управління процесами і системами виділяють ланцюжки прямих і зворотних зв'язків для формалізації та синтезу управління. Фахівці з теорії дослідження операцій аналізують властивості соціальних, екологічних, економічних та інших складних систем шляхом зведення до оптимізаційних задач або їх багатоцільової послідовності. Цей перелік можна продовжити.

Головною метою формалізації задачі системного дослідження конкретного об'єкта часто є лише зведення до тієї чи іншої формальної математичної постановки. При цьому низка найважливіших факторів і характеристик об'єкта (наприклад, фактори ризику виходу об'єкта з режиму стійкого функціонування) може залишатися поза полем зору дослідника. Цей недолік є досить вагомим у випадку виконання системного аналізу організаційних та організаційно-технічних систем, ефективність та стійкість функціонування яких у значній мірі залежить від уподобань, суджень і помилок людини.

Крім того, для деяких складних систем характерні принципово неподоланні фактори ризику. Зокрема, за умов ринкової економіки для суб'єктів підприємницької діяльності неподоланими є ризики, зумовлені конкурентною боротьбою. Такого типу ризики особливо небезпечні у разі використання сучасних транспортних засобів, на хімічних виробництвах й атомних електростанціях у різних критичних і надзвичайних ситуаціях. Врахування ризиків під час проведення системних досліджень також найчастіше має суб'єктивний характер.

Визначимо суб'єктивний підхід дослідника до розв'язання реальних системних задач у вигляді методологічної парадигми. *Методологічна парадигма* — це системно погоджена множина ідей, підходів, методів, припущень і обмежень, обраних дослідником для розв'язання конкретної системної задачі.

Якщо задачу розв'язують із використанням деякої методологічної парадигми, то знайдений розв'язок не повинен містити особливостей, несумісних із цією парадигмою.

Доцільно розглянути парадигму, що є підмножиною іншої парадигми, як окремий випадок останньої.

Визначимо також термін *змістовна парадигма*, під якою будемо розуміти множину ідей, підходів, методів і припущень, яка гарантує можливість розв'язання всіх конкретних задач певного типу.

Останніми роками спостерігають тенденцію до узагальнення парадигм, стимульовану новими досягненнями в розвитку системної математики та обчислювальної техніки. Будь-яке узагальнення парадигм розширює клас розв'язуваних задач і в багатьох випадках дає змогу одержати кращий розв'язок.

Вивчення зв'язків між можливими методологічними парадигмами і класами системних задач є предметом *метаметодології систем* — нової галузі досліджень, у якій поки ще мало що зроблено.

Важливим аспектом метаметодології систем є розробка таких парадигм, які б для різних класів задач і сучасного стану системної математики та обчислювальної техніки забезпечували б найкращий компроміс між якістю і складністю розв'язків системних задач. Основні труднощі виконуваного за таких умов дослідження пов'язані з тим, що для заданої задачі з використанням однієї й тієї ж методологічної парадигми може бути розроблено багато альтернативних процедур розв'язання.

У той же час усяка математична теорія, що має схему розв'язання системних задач, по суті є методологічною парадигмою. Вона пов'язана з певним типом задач і є локальною системою, із використанням якої можна розробляти методи розв'язання конкретних задач такого типу. Одна із задач методології систем — це компіляція (складання) математичних підходів і визначення їхнього місця під час розв'язання всіх можливих задач певного класу. Іншою задачею є побудова нових змістовних парадигм для розв'язання кожного типу задач. Оскільки виявлення нової парадигми є поштовхом до створення нового математичного підходу або сукупності методів, усебічні дослідження метаметодології систем стануть потужним стимулом для одержання фундаментальних і прикладних математичних результатів у галузі системної математики, теорії складних систем та інших розділів системних знань.

2.3. Класифікація задач і процедур системного аналізу

Перейдемо до аналізу цілей, властивостей, особливостей і можливостей апарату системних досліджень. Слід відзначити, що глобальні світові процеси спричинили необхідність розробки нових концепцій, підходів, прийомів розв'язання сучасних складних системних задач, що обумовило необхідність принципово по-новому переглянути їх постановки та розв'язання. Під час формалізації і розв'язання реальних системних задач доцільно використовувати конструктивний і зручний спосіб зображення вихідної інформації про об'єкт у вигляді концептуальних просторів умов та властивостей об'єкта. У сучасних умовах ці простори повинні забезпечити нове бачення взаємодії елементів у структурі системний аналітик $\Leftrightarrow$ людина $\Leftrightarrow$ об'єкт $\Leftrightarrow$ середовище. Такий спосіб повинен забезпечити наочність узгодження основних факторів — властивостей об'єкта дослідження, вхідної інформації та умов функціонування об'єкта з урахуванням невизначеностей різної природи та багатофакторних ризиків. Узгодження повинно бути системним і враховувати цілі, задачі, очікувані результати функціонування об'єкта, складність ситуацій, у яких він функціонує, а також рівень дефіциту інформації про складності, пов'язані з цілями й умовами його функціонування (рис. 2.2).

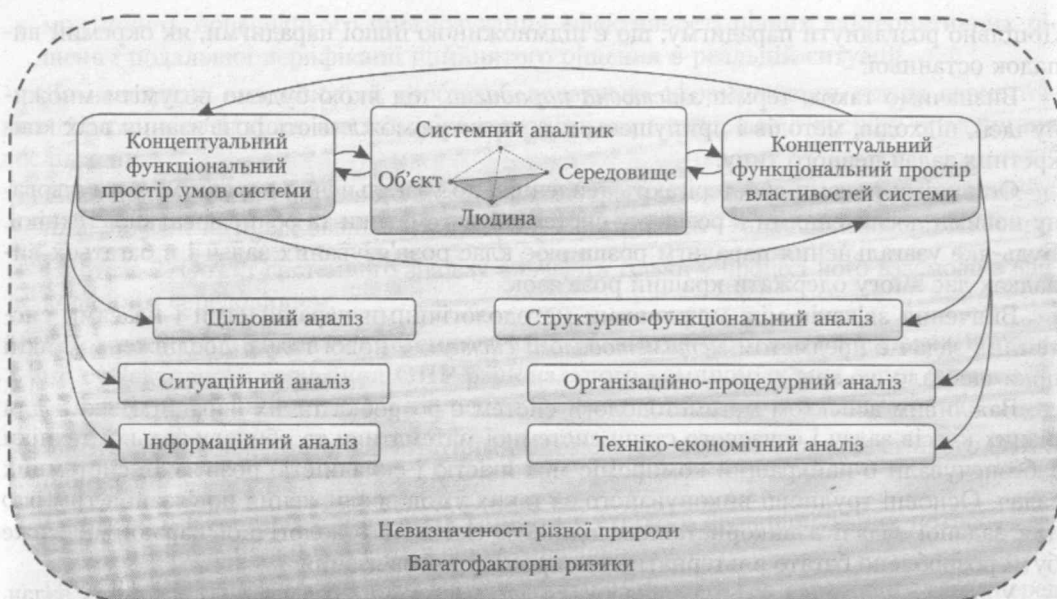


Рис. 2.2. Структурна схема формалізації задач системного аналізу

Факторами обмеження у цьому випадку є ресурси, що витрачаються на проведення обчислювальних процесів та емпіричних процедур системних досліджень.

2.3.1. Концептуальні функціональні простори умов та властивостей складних систем

Умови функціонування об'єкта доцільно зобразити у вигляді концептуального функціонального простору умов із використанням системи координат $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$, де:

- ♦ вісь α_1 — визначає рівень складності цілей функціонування об'єкта (зі збільшенням α_1 складність цілей зростає);
- ♦ вісь β_1 — визначає рівень складності ситуацій, у яких функціонує об'єкт (зі збільшенням β_1 складність ситуації зростає);
- ♦ вісь γ_1 — визначає ентропію інформації як рівень дефіциту інформації про складності цілей та умов функціонування об'єкта, який характеризують точки функціонального простору над поверхнею $O\alpha_1\beta_1$.

Концептуальний функціональний простір умов функціонування системи (рис. 2.3) формується в результаті виконання обчислювальних процедур трьох видів аналізу.

- ♦ *Цільовий аналіз* — дає змогу визначити множину точок на осі α_1 , які кількісно характеризують усю різноманітність властивостей і особливостей цілей.
- ♦ *Ситуаційний аналіз* — проводиться з метою визначити множину точок на осі β_1 , які кількісно характеризують властивості та особливості всієї різноманітності штатних і прогнозованих позаштатних ситуацій.
- ♦ *Інформаційний аналіз* — дає змогу визначити множину точок на осі γ_1 , які кількісно характеризують рівень дефіциту інформації про ситуації та цілі функціонування об'єкта досліджень.

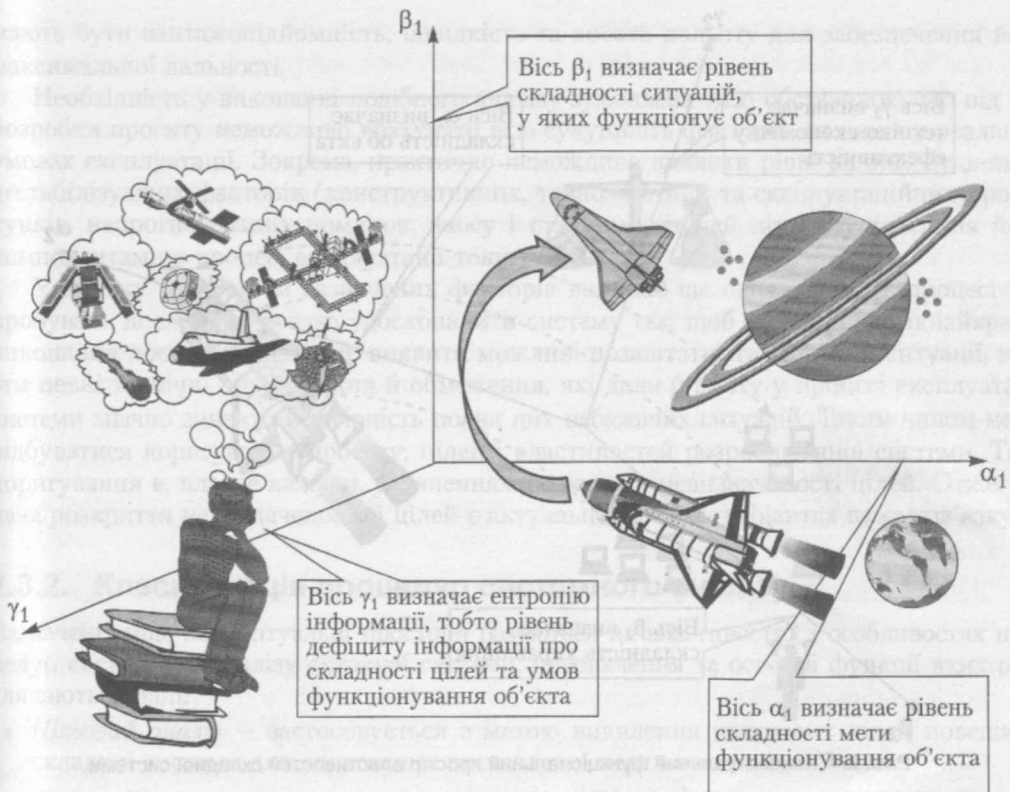


Рис. 2.3. Концептуальний функціональний простір умов складної системи

На основі цих множин точок будують функціональний простір умов об'єкта.

Очевидно, що зі зростанням складності умов функціонування зростає складність створення й функціонування відповідної складної системи. І дійсно, чим складніші цілі й ситуації та чим більший дефіцит інформації, тим складніше створити відповідну до цих умов систему і тим складніше керувати нею за цих умов. Залежно від рівня складності умов можна ввести деякий класифікаційний ряд, у якому зі збільшенням номера елемента ряду певним чином зростатиме складність умов функціонування системи.

Аналогічним чином можна зобразити багатовимірний концептуальний функціональний простір властивостей складної системи (рис. 2.4). Цей простір формується в результаті виконання обчислювальних процедур трьох таких видів аналізу.

- ♦ **Структурно-функціональний аналіз** — дає змогу визначити множину точок на осі α_2 , які кількісно характеризують допустимі значення показників структури і функції об'єкта, необхідні для досягнення поставлених цілей у ситуаціях, зумовлених функціональним простором умов.
- ♦ **Організаційно-процедурний аналіз** — виконується з метою визначення множини точок на осі β_2 , які кількісно характеризують властивості, структуру і функції системи управління для заданих умов.
- ♦ **Техніко-економічний аналіз** — визначає множину точок на осі γ_2 , які характеризують одержаний ефект і витрати на його досягнення в заданих умовах, а також техніко-економічну ефективність об'єкта.

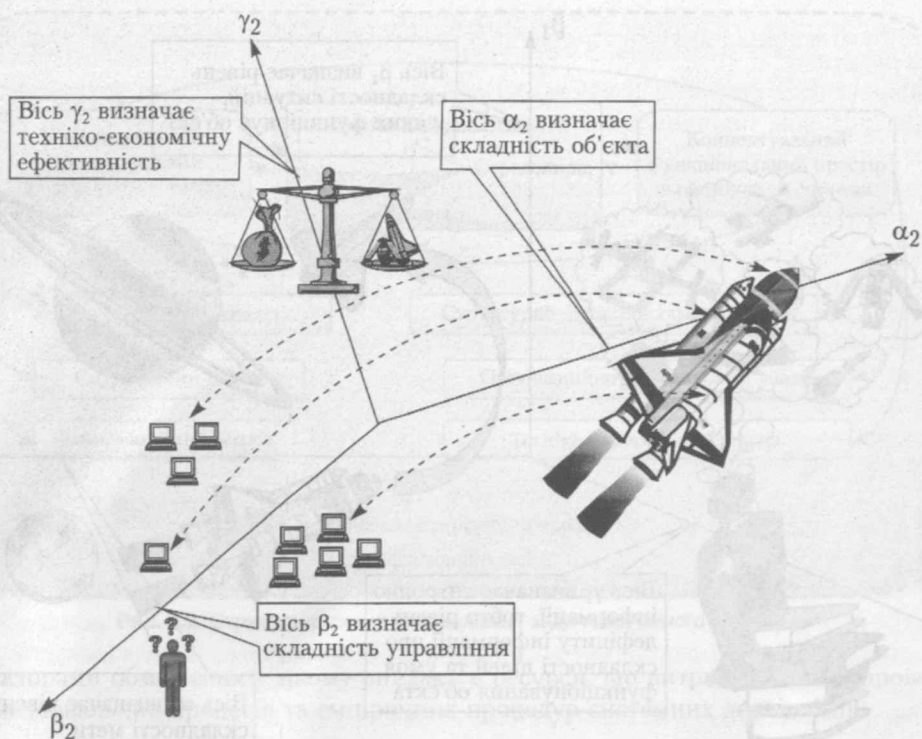


Рис. 2.4. Концептуальний функціональний простір властивостей складної системи

Взаємозв'язок концептуальних функціональних просторів. Описані вище два концептуальних функціональних простори (КФП) є взаємозалежними. Їм властиві два варіанти взаємозв'язку.

Перший варіант: вихідним є функціональний простір умов, на базі інформації якого формують функціональний простір властивостей і характеристик об'єкта.

Другий варіант: вихідним є функціональний простір властивостей і характеристик об'єкта, для якого знаходять функціональний простір умов.

Перший варіант застосовують у разі проектування складних систем апіорі відомого призначення. При цьому за заданим функціональним простором умов визначають структуру, властивості й характеристики розроблюваної системи з урахуванням невизначеності і суперечливості цілей. Наприклад, для авіаконструктора суперечливість цілей виявляється у природному прагненні мати найбільш економічний та надійний вантажопідіймний літак із максимальною дальністю польоту. Але очевидно, що досягти одночасно всіх трьох цілей неможливо. Звідси випливає задача: знайти їхнє раціональне поєднання. Однак конструктор заздалегідь не знає, які варіанти поєднання є найбільш доцільними, економічно і технологічно прийнятними. У зв'язку з цим одна з основних задач системного аналізу полягає в розкритті невизначеності цілей.

Потреба у застосуванні другого варіанту виникає у разі випробування систем, умови функціонування яких змінюються в досить широких діапазонах. Так, випробування в різних умовах проходить щойно створений літак — це дає змогу виявити найдоцільніші режими та сфери його застосування. При цьому необхідно встановити, на якій висоті та при якій швидкості вантажопідіймність літака буде максимальною або якими

мають бути вантажопідйомність, швидкість та висота польоту для забезпечення його максимальної дальності.

Необхідність у виконанні подібного аналізу зумовлена тією обставиною, що під час розробки проекту неможливо врахувати всю сукупність факторів, наявних у реальних умовах експлуатації. Зокрема, практично неможливо виявити рівні впливу будь-яких дестабілізуючих факторів (конструктивних, технологічних та експлуатаційних прорахунків, непрогнозованих помилок, зносу і старіння деталей літака, управління його компонентами у процесі експлуатації тощо).

У зв'язку із впливом зазначених факторів виникає ще одна задача: в процесі випробувань дослідного зразка удосконалити систему так, щоб забезпечити якнайкраще виконання поставлених цілей, виявити можливі позаштатні та критичні ситуації, ввести певні технічні виправлення й обмеження, які дали б змогу у процесі експлуатації системи значно знизити ймовірність появи цих небажаних ситуацій. Таким чином може відбуватися коригування проекту, цілей і властивостей розроблюваної системи. Таке коригування є, власне кажучи, уточненням розкриття невизначеності цілей. Отже, задача розкриття невизначеностей цілей є актуальною в обох варіантах взаємозв'язку.

2.3.2. Класифікація процедур системного аналізу

Зазначені вище концептуальні простори базуються на властивостях і особливостях процедур системного аналізу складної системи, призначення та основні функції яких розглядаються далі.

- ♦ *Цільовий аналіз* — застосовується з метою виявлення часткових цілей поведінки складної системи для досягнення поставленої перед нею головної мети.
- ♦ *Ситуаційний аналіз* — використовується для виявлення ситуацій та їхніх характеристик, які визначають основні умови функціонування складної системи.
- ♦ *Інформаційний аналіз* — застосовується для визначення обсягу, повноти та інших показників інформації про складну систему і середовище (без наявності такої інформації неможливо визначити ступінь досягнення системою заданої мети у наявній ситуації).
- ♦ *Структурно-функціональний аналіз* — дає змогу визначити необхідний рівень потенційних можливостей функціональних елементів складної системи і ступінь взаємозв'язків і взаємозалежностей її функціональних елементів для досягнення заданих цілей функціонування системи в ситуації, що складається априорі.
- ♦ *Організаційно-процедурний аналіз* — застосовується у разі необхідності виявити оптимальні способи організації процесів управління та раціонального вибору процедур, що забезпечують досягнення заданих цілей у певній ситуації.
- ♦ *Техніко-економічний аналіз* — дає змогу визначити ресурси, необхідні для досягнення поставленої перед складною системою цілі з урахуванням заданих показників якості.

Розглянемо взаємозв'язки введених процедур цілеспрямованого аналізу для першого варіанта взаємозв'язку концептуальних просторів. У цьому випадку процедури доцільно виконувати у такій послідовності: цільовий аналіз (визначення цілей функціональних елементів на основі заданих цілей системи) $\Rightarrow$ ситуаційний аналіз (вибір раціональних умов функціонування) $\Rightarrow$ інформаційний аналіз (формування основних відомостей про систему, які забезпечили б досягнення заданих цілей) $\Rightarrow$ структурно-

функціональний аналіз (визначення структури і функцій елементів системи, необхідних для досягнення заданих цілей) $\Rightarrow$ організаційно-процедурний аналіз (організація та реалізація процедур управління за умов зміни зовнішнього середовища) $\Rightarrow$ техніко-економічний аналіз (визначення ресурсів, потрібних для досягнення заданих цілей і забезпечення певних показників якості).

Взаємозв'язок цих процедур визначається цілями та особливостями функціонування досліджуваної складної системи й особливостями розв'язуваної задачі (задачі проектування системи, оптимізації та експлуатації, прогнозування потенційних можливостей створеної системи в нових позаштатних ситуаціях, задачі технічного діагностування працездатності системи тощо). Залежно від особливостей і постановки задачі взаємозв'язок і послідовність застосування цих процедур можуть змінюватися.

Розглянемо властивості процедур системного аналізу докладніше, вважаючи послідовність основних процесів заданою.

Процедура цільового аналізу

1. Послідовна багаторівнева декомпозиція певної множини цілей на цілі елементів кожного із заданих ієрархічних рівнів.
2. Формування кількісних показників, що визначають ступінь і рівень досягнення загальної цілі системи та локальних цілей елементів.
3. Встановлення функціонального взаємозв'язку цільових показників елементів різних ієрархічних рівнів із показниками загальної цілі об'єкта (системи).
4. Встановлення допустимих інтервалів, у яких змінюються цільові показники функціональних елементів ієрархічних рівнів, з урахуванням допустимих інтервалів змін показників цільової функції об'єкта (системи).

У разі розробки складних технічних систем процедура цільового аналізу полягає у визначенні коректності ТЗ таким чином, щоб різні його показники достатньо повно відображували цілі розроблюваної системи, допустимі інтервали їхніх змін. Значення та допустимі інтервали змін повинні бути взаємно погодженими і технічно реалізованими. На цьому етапі виконують декомпозицію вимог створюваної системи згідно з вимогами до основних функціональних елементів (ФЕ), з яких складається проектувана складна система.

Наприклад, у разі проектування теплоелектростанції вимоги до системи загалом поширюються на вимоги до потужності, на кількість електрогенераторів та інші основні і допоміжні підсистеми.

Процедура ситуаційного аналізу

1. Формування множини керованих штатних ситуацій складної системи та прогнозування найімовірніших позаштатних і критичних ситуацій у процесі її функціонування.

Під поняттям «ситуація» у цьому разі припускається певний стан розглянутої системи та середовища її функціонування, що характеризуються апіорі встановленими інтервалами значень показників системи й функціональних характеристик середовища.

Штатні ситуації — це ситуації, в яких показники системи й функціональні характеристики середовища відповідають апіорі заданим інтервалам (наприклад, робота автомашин у певних кліматичних умовах, скажімо, в умовах Крайньої Півночі).

Позаштатні ситуації — це ситуації, в яких окремі показники системи або функціональні характеристики середовища виходять за межі допустимих інтервалів, але не призводять до порушення функціонування чи до руйнування об'єкта.

Критичні ситуації — це ситуації, в яких низка показників системи або функціональних характеристик середовища виходять за межі допустимих інтервалів і можуть призвести до такого порушення процесів функціонування об'єкта, яке викличе часткове або повне його руйнування, створить небезпечні умови для обслуговуючого персоналу або призведе до екологічно небезпечних наслідків.

2. Визначення кількісних характеристик штатних ситуацій та інтервалів їхніх змін.
3. Прогнозування можливої множини позаштатних ситуацій і виділення найімовірніших із них.
4. Виявлення особливостей і визначення характеристик найімовірніших позаштатних ситуацій.
5. Визначення множини критичних ситуацій, умов їхньої появи та їхніх характеристик.
6. Виявлення умов можливого переходу штатної ситуації в позаштатну або критичну.
7. Виявлення умов можливого переходу з позаштатної ситуації у штатну.
8. Визначення умов запобігання критичним ситуаціям.

Процедура інформаційного аналізу

1. Визначення повноти, вірогідності та своєчасності одержання інформації, необхідної для управління системою з метою досягнення заданих цілей у штатних і позаштатних ситуаціях.
2. Визначення характеристик інформаційних систем, які б відповідали заданому рівню інформаційного забезпечення (повнота, вірогідність, своєчасність інформації), необхідного для управління у штатних і позаштатних ситуаціях.
3. Вибір та аналіз процедур одержання, збереження, обробки інформації для забезпечення керованості системи у штатних і позаштатних ситуаціях.
4. Вибір та аналіз процедур формування, обґрунтування й ухвалення рішення під час управління системою у штатних ситуаціях і в процесі переходу з позаштатної ситуації у штатну.
5. Визначення показників інформаційного забезпечення процедур прогнозування позаштатних і критичних ситуацій та їхніх наслідків.

Процедура структурно-функціонального аналізу

1. Визначення повного набору функцій, що забезпечують досягнення заданих цілей у певних умовах функціонування (наприклад, перелік усіх функцій управління, необхідних для одержання електроенергії).
2. Визначення раціональної ієрархічної структури системи, що забезпечує досягнення заданої цілі при заданих обмеженнях на ресурси.
3. Визначення функціонально повного набору елементів для кожного ієрархічного рівня.

4. Визначення раціональних характеристик функціональних елементів для кожного ієрархічного рівня.
5. Визначення умов досягнення заданих характеристик функціональних елементів для кожного ієрархічного рівня.

Процедура організаційно-процедурного аналізу

1. Визначення функціонально повного набору процедур управління у штатних і позаштатних ситуаціях.
2. Раціональний розподіл процедур управління між людиною (ОПР) і комплексом технічних засобів.
3. Визначення раціональної організаційної структури системи управління об'єктом у штатних і позаштатних ситуаціях.
4. Визначення раціональної структури технічної системи управління об'єктом у штатних і позаштатних ситуаціях.
5. Визначення функціонально повного набору елементів технічної системи управління.
6. Визначення характеристик функціональних елементів технічних систем управління у штатних і позаштатних ситуаціях.
7. Обґрунтування ступеня та рівня інтелектуалізації технічних засобів підтримки рішень у штатних і позаштатних ситуаціях.
8. Визначення раціональної структури управління у критичних ситуаціях.
9. Визначення інтелектуального рівня технічних засобів підтримки рішень у системі управління в критичних ситуаціях.

Процедура техніко-економічного аналізу

1. Визначення витрат усіх видів ресурсів на технічні засоби, що реалізують основні функції об'єкта.
2. Визначення витрат усіх видів ресурсів на реалізацію процедур управління об'єктом.
3. Визначення витрат усіх видів ресурсів на запобігання позаштатним і критичним ситуаціям.
4. Визначення соціально-економічної і техніко-економічної ефективності функціонування системи.

Як приклад застосування зазначених процедур розглянемо технологію розв'язання практичної системної задачі розробки, виробництва й запуску космічного апарата (КА), у якій вибір і реалізація оптимальної траєкторії космічного апарата є однією з часткових задач. Вибір саме цієї системної задачі було здійснено з таких міркувань.

По-перше, задача має безпосереднє відношення до однієї з найперспективніших наукомістких технологій — космонавтики. По-друге, задача запуску космічного апарата належить до класу задач управління складними динамічними системами.

Сьогодні космічні технології розвиваються за такими основними напрямками.

♦ Транспортування.

- ♦ Транспортна задача Земля–Космос. Основне призначення — виведення штучних супутників зв'язку, метеосупутників, навігаційних супутників, супутників

дистанційного зондування Землі, супутників-розвідників тощо. Запуск супутників різного призначення здійснюється в Росії, США, Китаї, Індії, Україні та деяких інших країнах. Україна, зокрема, бере участь у створенні й використанні міжнародної платформи «Морський старт», яка поставляє ракети-носії для виведення на орбіту супутників країн, що не мають власних систем виведення.

- ♦ Транспортна задача Земля–Земля. Це перспективний напрям забезпечення доставки великих вантажів на міжконтинентальну відстань (замість застосування повільного морського транспорту). Перспектива використання як пасажирського транспорту (космічні апарати типу «Шаттл», «Буран»).
- ♦ Спостереження за Землею.
 - ♦ Дистанційне зондування Землі з метою розвідування корисних копалин (нафти, газу, золота, алмазів тощо), оцінки стану природних ресурсів (лісів, водних середовищ), прогнозування стихійних лих (посух, пожеж, повеней тощо).
 - ♦ Виявлення морських суден і людей, які потрапили у скрутне становище (після корабельних аварій, сходження гірських лавин тощо), з огляду на те, що у світі щороку гине більш ніж 100 морських суден.
 - ♦ Космічні зйомки для картографії та інших застосувань (фото, лазерні зйомки, радіолокаційні зйомки).
 - ♦ Використання у стратегічних цілях, зокрема для виявлення факту запуску ракет (інфрачервоні системи космічного спостереження), а також для розв'язання задач, пов'язаних із навігацією та бойовим управлінням.
- ♦ Використання космічних апаратів для створення нових технологій.
 - ♦ Космічні технології є унікальними, оскільки їх реалізують за умов мікрогравітації та мікровакууму, одночасне забезпечення яких на Землі в принципі неможливе. Ці технології дають змогу отримати принципово нові органічні та неорганічні речовини, а також сплави, зокрема кермети (кераміко-металеві матеріали). Вже одержано нові види ліків, матеріалів для мікроелектроніки.

Наведений короткий огляд практичних можливостей космонавтики дає змогу зробити висновок: різноманітність цього типу задач неминуче веде до суттєвої розбіжності цілей, пов'язаних із використанням космічних апаратів різного призначення і необхідністю розв'язання подібних задач на системній основі.

Унікальність проблем розробки та запуску на орбіту космічних апаратів певного призначення дає змогу наочно розкрити суть різних процедур системного аналізу. Розглянемо основні з них на прикладі.

Процедура цільового аналізу

Розглянемо процедуру цільового аналізу на прикладі тільки одного елемента, що входить у комплекс об'єктів (КБ, заводи, космодром, космічний апарат, ракета-носіє, центр управління польотами, система телеметричного контролю, система зв'язку, система спостереження тощо). За такий елемент візьмемо ракету-носіє. Під час її розробки необхідно досягти кількох суперечливих цілей, забезпечивши:

- ♦ максимальний об'єм пального за умови, що його загальна вага буде мінімальною;
- ♦ максимальну потужність за умови мінімальних витрат пального;
- ♦ високу міцність конструкції, максимальну надійність і мінімальну вартість.

Цей список цілей можна продовжити. Але вже з наведеного переліку видно, що одночасно досягти настільки протилежних цілей принципово неможливо. Отже, необхідно забезпечити певний компроміс. Але яке поєднання перерахованих властивостей є найвигіднішим, конструктор заздалегідь не знає. Така особливість багатокритеріальних задач оптимізації пов'язана з невизначеністю цілей. Для подолання цієї невизначеності застосовують процедуру цільового аналізу. Методи розв'язання розглянутої задачі багато в чому є евристичними і такими, що базуються на використанні досвіду розробників. Нагромадження й систематизація такого досвіду є найважливішою практичною задачею, розв'язання якої сьогодні належить до сфери штучного інтелекту, насамперед до сфери методології експертних систем (ЕС).

Невизначеність цілей у разі складної ієрархічної системи свідчить про необхідність пошуку раціонального компромісу в розкритті загальної цілі (загальних вимог) для елементів різних рівнів. Стосовно багаступінчастої ракети-носія подібний раціональний розподіл зводиться до розподілу основних технічних вимог між ступіннями ракети (зокрема — раціонального розподілу потужності між ступіннями ракети). Аналогічним чином формулюють й інші процедури системного аналізу.

Процедура ситуаційного аналізу

Головними цілями застосування цієї процедури є:

- ♦ визначення основних характеристик штатних ситуацій під час запуску і виходу на орбіту ракети-носія;
- ♦ прогнозування найімовірніших позаштатних ситуацій на різних етапах запуску і визначення їхніх кількісних характеристик;
- ♦ прогнозування критичних ситуацій і визначення їхніх основних характеристик.

Процедура інформаційного аналізу

Головною метою цієї процедури є визначення кількісних та якісних характеристик інформаційного забезпечення системи управління у штатних та позаштатних ситуаціях на етапі запуску ракети-носія й її виходу на орбіту. Слід вказати на різницю між проведенням інформаційного аналізу та визначенням кількісних характеристик інформації (із використанням показників Кульбаха, Колмогорова тощо). По-перше, тут інформаційні показники визначають із позиції розв'язання задач управління, а не з позиції передачі найбільшого обсягу інформації. Для задач управління повинен бути повністю визначений обсяг інформації. Нестача інформації, так само як і її надлишок, може призвести до зниження якості управління. До того ж потрібен час, аби з надлишкової інформації виділити практично необхідну. По-друге, у розглянутій задачі визначають не лише кількісні, але і якісні показники. До основних кількісних показників інформаційного забезпечення належать вірогідність і своєчасність подання інформації особі, що приймає рішення.

Отже, стан інформаційного забезпечення мають визначати три показники: повнота, вірогідність і своєчасність подання інформації.

Інші задачі зі створення інформаційного забезпечення відповідають традиційним, які розв'язують під час розробки АСУ та інформаційно-обчислювальних систем. Виконання процедур цільового, ситуаційного та інформаційного аналізу дає змогу одержати базу для створення ракети-носія й системи управління даним об'єктом. Ці задачі

розв'язуються з використанням результатів, отриманих внаслідок виконання трьох процедур.

- ♦ *Структурно-функціональний аналіз* дає змогу сформулювати загальний задум формування структури системи і вибір основних функціональних елементів.
- ♦ У результаті проведення *організаційно-процедурного аналізу* формується загальна структура системи управління та основні її функції.
- ♦ *Техніко-економічний аналіз* дає можливість зіставити одержуваний від системи ефект із витратами, необхідними для його досягнення.

Зазначимо, що принципова відмінність розглянутих процедур аналізу від традиційних методів функціонально-вартісного аналізу полягає в тому, що зіставляються ефект і витрати не лише у штатних, але й у позаштатних ситуаціях. Остання обставина є особливо важливою, зокрема, для космонавтики, оскільки в цій сфері виникнення позаштатних ситуацій досить імовірно з огляду на дуже складні умови функціонування. Мова йде про велику швидкість руху, надвисокий вакуум, надмалу гравітацію, неабияку ймовірність зустрічі в космосі з природними та штучними тілами (наприклад, у кінці 2005 року в навколоземному космічному просторі перебувало понад 30 тис. сторонніх предметів — деталей відпрацьованих космічних апаратів та інших предметів діяльності людини).

Не менш важливо зіставити витрати й очікуваний збиток від виникнення позаштатних ситуацій на складних наземних системах, коли позаштатні ситуації можуть призвести до значних техногенних та екологічних наслідків. До таких систем належать у першу чергу АЕС, хімкомбінати, склади боєприпасів, гідроелектростанції.

2.4. Поняття складності системної задачі, спектри складності, трансобчислювальна складність

Характерною рисою навколишнього світу є наростаючі складність і взаємозалежність його окремих частин, на що неодноразово ще у другій половині минулого століття звертали увагу А. Печчеї [145], Т. Сааті [153], Дж. Клір [65] та інші вчені, багато суспільних діячів і політиків. Встановлено, що проблеми — соціальні, політичні та економічні — не існують ізольовано. Вони не можуть бути виділені з якогось цілісного середовища, розв'язані та пояснені окремо, а потім знову інтегровані для пояснення цього цілісного середовища. Середовище, в якому виникають такі проблеми, саме по собі не має постійних властивостей цілісності. Воно динамічне, тому що завжди змінюється, піддане як зовнішнім, так і внутрішнім впливам. Середовище змінюється разом із своїми проблемами та методами їхнього розв'язування у фізичному й концептуальному просторах. Середовище також змінюється в часі, оскільки на нього помітно впливають різні події та зміни умов.

2.4.1. Поняття складності з погляду системної методології

Введемо означення складності по відношенню до системної методології. Така потреба зумовлена кількома обставинами. Як зазначає Дж. Клір [66, с. 345], складність багатогранна і з неї випливає низка означень. Цю думку підтверджує й Р. Ешбі [195]:

«Термін «складність» у застосуванні до систем має багато значень». З погляду ж системного аналізу поняття складності доцільно розглянути, виходячи з оцінки витрат на розв'язання й дослідження системних задач і ситуацій. Будемо використовувати концепцію складності, прийняту в загальній теорії систем. Відповідно до неї, складність — це загальна властивість деякої множини різних об'єктів, що структурно взаємопов'язані та функціонально взаємодіють. У разі задач системного аналізу це означення доцільно доповнити й подати в такому виді. *Складність* — це загальна властивість єдиної множини різних об'єктів, які структурно взаємопов'язані, функціонально взаємозалежні й взаємодіють між собою, за наявних параметрів і характеристик навколишнього середовища за присутності неконтрольованих зовнішніх впливів, факторів ризику та інших умов, характерних для системних задач.

Відповідно до підходу Дж. Кліра [66], будемо розрізняти поняття складності й важкості. Багато задач є важкими, але простими, вони мають єдину або скінченну множинну розв'язків. Наприклад, задача «розв'язати вузол мотузки» може бути важкою, але вона має один розв'язок. Складна проблема зазвичай має багато можливих рішень, які відповідають різним цілям. Наприклад, проектування або модифікацію складної технічної системи здійснюють, виходячи з технічних, економічних, організаційних та деяких інших цілей, і у кожному випадку існують свої розв'язки.

Складність — це характеристика, пов'язана із проявом взаємодії, взаємозалежності процесів у взаємозалежних системах, яку оцінюють ступенем впливу одного або кількох елементів системи на поведінку інших.

Наприклад, можна навести послідовність таких відношень: економіка залежить від енергетики й інших галузей промисловості, наявність чи відсутність енергоресурсів — від політики, політика — від потужності держави, потужність держави — від військового потенціалу та економічної стабільності. Зазначимо, що ці залежності симетричні: політика залежить від економіки, а економіка — від політики.

Інтерпретація й розуміння поняття складності залежить від багатьох факторів, найчастіше суб'єктивних, які системний аналітик застосовує під час об'єднання розглянутих частин в єдине ціле.

Ця суб'єктивність становить дилему вищого порядку, яка розвіює будь-яку латентну підозру, що існує об'єктивна інтерпретація реальності, котра непідвладна нашому розуму і пізнанню. Люди, що вирішують, які дії виконувати по відношенню до складних проблем, і ті особи, на яких впливають ці рішення, зазвичай мають різні інтереси і суперечливі цілі. У рамках цих двох груп людей або між ними не завжди існує консенсус щодо бажаних цілей та стратегій, розроблених для їхнього досягнення.

Інші труднощі, що виникають під час визначення поняття складності, пов'язані з тим, що розв'язки багатьох задач або їхнього набору як цілого не можуть бути одержані розчленовуванням на часткові проблеми з подальшим їх розв'язанням і синтезом загального розв'язку вихідної проблеми.

У системних задачах виникає потреба розглядати поняття «складність» у різних аспектах, що залежать від властивостей систем і особливостей самих задач. Власне кажучи, поняття складності «є настільки ж фундаментальним поняттям науки про системи, як поняття енергії у природничих науках» [66].

Поняття складності є багатогранним: складність — мати багато різних взаємозалежних частин, структур або елементів, а отже, бути важко зрозумілим, або складність — включати багато частин, аспектів, деталей, понять, що потребують для розуміння чи оволодіння серйозного дослідження або розгляду, або складність — мати складну вла-

стивість або стан. Будь-яке з цих визначень застосовне до всіх типів систем — матеріальних і абстрактних, природних і штучних, до творів науки та мистецтва, а також до задач, методів, теорій, законів, ігор, мов, машин, організмів до інших систем. Незалежно від того, що саме розглядають як складне чи просте, у загальному випадку ступінь складності пов'язаний із кількістю розрізняваних частин і мірою їхньої взаємодії та взаємозв'язку. Крім того, поняття складності має суб'єктивну обумовленість, оскільки воно залежить від здатності розуміти або використовувати розглянуту систему. Отже, те, що є складним для одного, може виявитися простим для іншого.

Поняття складності відображує взаємодію дослідника з об'єктом дослідження, результатом чого є вивчення вихідної системи з тим чи іншим ступенем глибини або деталізації. У такому розумінні складність не є невід'ємною властивістю досліджуваної системи, її, швидше, визначає спосіб, за допомогою якого дослідник взаємодіє з нею з урахуванням поставлених цілей.

На рівні вихідних систем за певних умов системну складність висловлюють [66] тільки через потужності розглянутих множин — множин змінних, параметрів, станів і параметричних множин, оскільки між ними не існує взаємозв'язків. На вищих епістемологічних рівнях поняття системної складності стає змістовнішим. Воно є різним для систем різних типів. Та сама вихідна система на різних вищих епістемологічних рівнях може бути описана найрізноманітнішими способами.

У деяких випадках певний ступінь складності є необхідною умовою для одержання певних системних властивостей, які зазвичай називаються *виявляльними властивостями* (самовідтворення, навчання, розвиток).

В інших, більш поширених випадках, під час розв'язання системних задач або будують просту систему, або роблять спробу спростити вже наявну.

Складні проблеми ніколи не існують ізольовано і рідко характеризуються однобічними причинними відношеннями. Складність пов'язує різні проблеми разом і формує картину взаємовідношень і множинної причинності. Точну природу причинності важко описати до кінця — дуже часто взаємозв'язок проблем виявляють лише після прийняття рішень, що породжують вторинні проблеми.

Як характерні приклади складності можна навести проблеми, пов'язані із запобіганням поширенню зброї масового ураження, а також із протистоянням міжнародному тероризму. Ці складні проблеми породжують багато інших, не менш складних. Так, проблема скорочення озброєнь призводить до кардинальних зрушень у структурі військових витрат і впливає на будь-яку економічну систему, невід'ємною частиною якої вона є. Зниження військових витрат обмежує дослідницьку діяльність, яка нерідко має на меті одержання результатів, що використовуються як у військових цілях, так і у мирних [64, с.14]. Цей висновок було логічно обґрунтовано такими міркуваннями. Скорочення озброєнь потребує розв'язання протиріччя: скорочення витрат на озброєння і забезпечення необхідного рівня національної безпеки. Крім того, потрібно враховувати, що оборонні витрати значною мірою впливають на інфраструктуру промисловості, транспорту, енергетики — основу будь-якої економічної системи.

Зазначимо, що для окресленої проблеми важливе значення має складність і взаємозалежність різних компонентів соціально-економічної системи. Звертання до таких проблем потребує застосування підходу, який би дав змогу використовувати інформацію різного виду, включаючи точні дані, кількісну інформацію і «розмиті» відомості, отримані інтуїтивно, з досвіду, з урахуванням цінностей суджень і образних здогадів. Очевидно, що крім інформації, необхідної для одержання розв'язків розглянутих

задач, потрібно використовувати певні прийоми, принципи, підходи, які дають змогу знаходити розв'язки з необхідною точністю, обґрунтованістю і вірогідністю. Разом із цим формальні методи не завжди можна пристосувати для розв'язання практичних задач. Наприклад, у дослідженні операцій і в науці про управління розроблено багато моделей і методів, які часто механістично застосовують для розв'язання проблеми складності. Тому вихідні дані, що використовуються в моделі, генеруються раніше, ніж реально виникає сама проблема. Однак жодна проблема не зустрічається точно в такому вигляді, в якому люди намагаються її передбачити та усвідомити. Різноманітні її особливості виявляються під час вивчення конфліктів. Можна намагатися запобігти конфліктам, але коли вони виникають, потрібна інша процедура для їхньої нейтралізації дослідження й запобігання.

2.4.2. Спектри складності системних задач

Історія науки і техніки свідчить про те, що до початку XX століття здебільшого розглядалися відносно прості системи. Перелік основних подій, які відбулися в науці у період із XXVII по XX століття переважно складається з варіацій однієї й тієї ж теми: виявлення прихованої простоти в ситуації, що видається складною. Подібні ситуації характеризуються тим, що виділяють кілька найважливіших факторів, а всі інші вважають несуттєвими. Це дає змогу досліднику вводити значні експериментально виправдані спрощення і таким чином розглядати досліджувані характеристики «ізолювано» від усіх інших.

Численні ситуації, коли з великої кількості факторів вдається виділити кілька найсуттєвіших, характерні в першу чергу для фізики, що пояснює значні успіхи цієї науки у збагаченні інших розділів знань. Початок такому підходу дав Ньютон, показавши, що у фізиці можливі суттєві спрощення. Відкриття ним закону всесвітнього тяжіння є наслідком дуже значних спрощень. Проте за умови проведення коректних обчислень цей закон дає змогу дуже точно обчислювати, скажімо, орбіти руху планет.

Наука майже до початку XX століття року розвивалася під впливом досягнень Ньютона. Його потужні спрощення застосовували у найрізноманітніших галузях, що під час дослідження деяких фізичних явищ, у тому числі електрики, магнетизму, гідромеханіки, давало гарні результати, проте в інших науках, перш за все в біології та медицині, не спрацювало. Задачі, якими займалася наука і які вона навчилася розв'язувати, стосувалися дослідження детермінованих систем із двома або трьома змінними. Їх формували аналітично, як правило, у вигляді систем диференціальних рівнянь. Подібні задачі з малою кількістю змінних та високим ступенем детермінізму, розв'язки яких шукають в аналітичній формі, прийнято називати *задачами організованої простоти*.

Наприкінці XIX століття деякі фізики зайнялися дослідженням систем руху молекул газу в замкнутому об'ємі. Подібні системи зазвичай містять близько 10^{23} молекул. Молекули рухаються з величезною швидкістю, а їхні траєкторії через постійні зіткнення мають хаотичний характер. Очевидно, що до таких складних систем неможливо застосувати закон Ньютона з його значними спрощеннями досліджуваних процесів. Тому намагатися розв'язати задачу аналізу рухів молекул газу в замкнутому середовищі (тобто задачу винятково складної та неорганізованої системи) за допомогою засобів і методів, що використовуються для розв'язання задач організованої простоти, безглуздо. У цьому випадку потрібен зовсім інший підхід. Потужні статистичні методи розв'язання задач для систем із великою кількістю змінних, що проявляються досить

випадковим чином, були запропоновані різними вченими, і зокрема Л. Больцманом та Дж. Гіббсом. Подібні задачі отримали назву *задач неорганізованої складності*.

Статистичні методи не описують окремі змінні (наприклад, поведінку окремої молекули). Вони дають змогу визначати загальні характеристики досліджуваних процесів. Розроблені на початку цього століття статистичні методи успішно застосовували для розв'язання багатьох задач неорганізованої складності, що виникають як у науці, так і в багатьох її застосуваннях. Добре відомі приклади використання зазначених методів у статистичній механіці, термодинаміці, статистичній фізиці, статистичній генетиці. У техніці такі методи мають важливе значення у разі створення великих телефонних мереж і комп'ютерних систем із розподілом часу, розв'язання задач, що стосуються забезпечення технічної надійності. У діловій сфері ці методи широко використовують для розв'язання задач, пов'язаних із маркетингом, страхуванням тощо.

На відміну від аналітичних методів, які застосовуються для розв'язання класу задач організованої простоти і виявляються непридатними вже за умови використання відносно невеликої кількості змінних (наприклад, п'ятьох), ефективність і доцільність застосування статистичних методів зростає зі збільшенням кількості змінних. Таким чином, ці два класи методів є взаємодоповнювальними. Вони відповідають двом протилежним областям спектра складностей, проте, незважаючи на взаємодоповнюваність, покривають досить невелику частину цього спектра. Отже, спектр складності, за винятком двох зазначених ділянок, залишається методологічно незабезпеченим у тому розумінні, що для широкого класу задач не придатні ані аналітичні, ані статистичні методи. Задачі, пов'язані з середньою частиною спектра складності, називають *задачами організованої складності*.

Прикладів задач із властивостями організованої складності багато, особливо в науках, що вивчають різні форми життя на Землі, навколишнє середовище, соціальну сферу, а також високотехнологічні наукові застосування.

Системи з організованою складністю мають багато властивостей, якими неможливо нехтувати. Проте уникнути спрощень у більшості випадків дуже важко. А оскільки ні ньютонівська, ні статистична стратегії спрощення незастосовні до таких задач, необхідно знайти нові шляхи їхнього розв'язання. Один із них ґрунтується на припущенні про неточності в описі досліджуваних систем. У цьому випадку неточність має не статистичну, а більш загальну природу, хоча б тому, що вона включає можливість статистичних описів. Математичний апарат, покладений в основу цього підходу, розроблений у середині 60-х років і відомий як «теорія нечітких множин». Суть та значення цієї проблеми досить вдало описані її творцем Л. А. Заде.

Зазначимо, що традиційні кількісні методи системного аналізу зовсім не використовуються для вивчення, наприклад, гуманітарних проблем і взагалі будь-яких систем, складність яких перевищує складність простих механічних чи фізичних систем, які описуються аналітично за допомогою диференціальних, інтегральних, алгебраїчних та інших рівнянь. Це твердження ґрунтується на принципі, який можна назвати *принципом несумісності*. Його суть полягає в тому, що зі зростанням складності систем експоненціально зменшується здатність людини оперативно виконувати з достатньою обґрунтованістю й вірогідністю багатофакторний системний аналіз, робити досить точні та змістовні висновки про стан і поведінку об'єкта досліджень. Не виключена можливість зменшення здатності людини виконувати ці дії нижче критичної межі. У такому випадку стають взаємовиключними деякі характеристики результатів аналізу (наприклад, точність і змістовність, вірогідність і оперативність). Звідси випливає висновок:

чим детальніше розглядають реальну задачу, тим менш оперативним й обґрунтованим може виявитися її розв'язок [63].

Отже, кількісний підхід до розв'язання реальних системних задач шляхом детального опису властивостей і поведінки складних систем не завжди може забезпечити потрібні рівні обґрунтованості та оперативності розв'язків, що необхідні для реальних умов управління і прийняття рішень. Разом із тим на практиці досить часто виникає потреба в оперативному формуванні й достовірному обґрунтуванні рішень. Найчастіше так буває у разі управління системами за умов підвищеного ризику, зокрема в таких випадках:

- ♦ під час вивчення режимів функціонування складних технічних систем, машин і механізмів;
- ♦ у критичних або аварійних ситуаціях, що виникають у взаємозалежних технологічних процесах і на промислових комплексах;
- ♦ у критичних або аварійних техногенних, екологічних та інших позаштатних режимах функціонування систем.

Найважливішою характеристикою перелічених ситуацій є неповнота, невизначеність, неточність вихідної інформації. У подібних умовах необхідний нетрадиційний і певною мірою альтернативний підхід до формування розв'язків досліджуваних проблем. Ідея такого підходу базується на раціональному використанні особливостей мислення людини. До них належить можливість оперування не числами, а образами різних об'єктів спостереження, дослідження чи управління, для елементів яких перехід від належності до певного класу до неналежності є не різким, а розмитим і поступовим. Справді «всюдисуща» нечіткість людського мислення наводить на думку, що логіка міркування людини не є однозначною або навіть багатозначною, вона є логікою з нечіткими істинами, нечіткими відношеннями і нечіткими правилами виведення. Така нечітка логіка є найважливішою рисою однієї з головних особливостей людського мислення, а саме здатності узагальнювати інформацію — виділяти з величезних масивів даних, що поступають у мозок, лише ті, які потрібні для розв'язання конкретної задачі.

Розглянутий фактор складності є найважливішою, але не єдиною ознакою, що дає змогу виділити системні задачі в особливий клас. Другим дуже важливим фактором є потенційна формалізованість вихідної практичної задачі.

З наведеного короткого огляду складності випливає, що формалізація задач організованої простоти не повинна викликати труднощів. Цю задачу під час її формулювання спрощують до такої міри, щоб формалізація стала можливою. Аналогічна ситуація спостерігається в тому разі, коли мова йде про задачі неорганізованої складності, де визначальними є закони великих чисел.

Принципово інший стан справ складається із задачами організованої простоти. Наприклад, для сучасних технічних систем і технологій характерним є не лише велика кількість взаємодіючих і взаємозалежних функціональних елементів, але насамперед складність їхньої взаємодії, складність впливу зовнішнього середовища на внутрішні процеси досліджуваного об'єкта і низка інших факторів. Тому задача аналізу майже будь-якої практичної сфери діяльності людини полягає не в тому, щоб визначити її «входи» і «виходи», а одночасно відслідковувати усі взаємодії функціональних елементів об'єкта з такою точністю і вірогідністю, які дадуть змогу одержати практично прийнятні розв'язки і рекомендації.

Складність цієї задачі добре ілюструє відомий системний математик Т. Сааті [154] на прикладі функціонування економіки. Часті невдачі у прогнозуванні флуктуацій

в економіці підтверджують, що складність, властива соціально-економічній поведінці людини, може перевищувати межі її інтелектуальних можливостей. Навіть у разі використання складних економічних теорій і моделей не завжди можливо охопити складну мережу взаємозалежності всіх складових економіки. Ми стикаємося з труднощами, пов'язаними з передбаченням короткострокових, щорічних або навіть щомісячних станів економіки. Те, що в одному секторі економіки з'являється як симптом, в іншому є результатом певної події. Наприклад, продуктивність залежить від капіталовкладень, на які, в свою чергу, впливають процентні ставки, наявність кредиту й податкові обкладання. Стан економіки залежить також від мобільності трудових ресурсів, а ті, як відомо, — від багатьох місцевих і регіональних аспектів, зокрема від можливості найнятися на роботу, від вартості життя та загальних життєвих умов. Крім того, на стан економіки впливає довіра до політики державних лідерів.

З огляду на цей приклад цілком очевидним стає той факт, що повна формалізація практичних системних задач є не просто складною, а навіть нерозв'язною в деяких випадках задачею. Принципова неформалізованість низки задач системного аналізу зумовлена не лише їхньою складністю. На неї впливають й інші фактори, серед яких в першу чергу слід виділити такі, як суб'єктивне розуміння ОПР цілей конкретних видів діяльності, міри їхньої важливості, індивідуальна здатність ОПР виявляти обережність або готовність йти на ризик тощо. Аналогічним чином у разі розробки складної технічної системи або технології багато проблем може бути розв'язано лише людиною, тобто конструктором. Наприклад, тільки людина формує структуру об'єкта, можливу кількість альтернативних технічних рішень (завдань). Тільки вона може запропонувати новий спосіб, нове технічне рішення, які стануть основою нового об'єкта або нової технології.

Отже, клас системних задач відрізняється від інших двома основними властивостями:

- ♦ організованою складністю задачі;
- ♦ принциповою неможливістю повної однозначної формалізації задачі.

Слід пояснити, що саме зазвичай розуміють під властивістю «принципова неможливість повної однозначної формалізації задачі». Ця властивість задачі не означає, що вона взагалі нерозв'язна. Методологічні підходи, принципи та методи розв'язання системних задач дають змогу зобразити будь-яку вихідну системну задачу у вигляді деякої послідовності неформалізованих і формалізованих задач. При цьому розв'язання неформалізованих задач виконує людина на підставі знань, досвіду, уміння, інтуїції та властивих їй можливостей передбачення. Через суб'єктивність такого підходу формалізація однієї й тієї ж системної задачі декількома фахівцями однієї професії зазвичай відрізняється. Відмінність нерідко виявляється принциповою, оскільки за умов невідзначеності один експерт схильний до ризику, інший, навпаки, вкрай обережний.

Ця обставина зумовлює необхідність раціонального використання як можливостей людини — для емпіричного розв'язання неформалізованих задач, так і можливостей сучасних обчислювальних методів і засобів — для розв'язання формалізованих задач.

2.4.3. Поняття трансобчислювальної складності

Під час розв'язання системних задач складність розуміють і як властивість досліджуваних систем, і як властивість розв'язуваних системних задач. Будемо називати ці два види складності відповідно *складністю систем* і *складністю задач*. Проблеми, пов'язані зі складністю задач, прийнято називати обчислювальною складністю.

Незалежно від типу досліджуваних систем існує два основних принципи оцінки їхньої складності, що можуть стати основою для порівняльного вивчення складності цих систем.

Перший принцип полягає у тому, що складність системи зростає пропорційно обсягу інформації, необхідної для її опису.

Одним зі способів опису такої дескриптивної складності є оцінка кількості елементів, що входять до системи (змінних, станів, компонентів), і різноманітних взаємозалежностей між ними. Справді, зі зростанням кількості елементів або різноманітних взаємозв'язків між ними зростають і труднощі роботи з системою.

Другий принцип оцінки ґрунтується на тому, що складність має бути пропорційною обсягу інформації, необхідної для усунення будь-якої нечіткості, характерної для досліджуваної системи.

Складність систем вивчають насамперед із метою пошуку методів, за допомогою яких вона може бути знижена до прийняттого рівня. Спрощення системи здійснюють у двох аспектах: спрощення складності, що ґрунтується на дескриптивній інформації, і спрощення складності, обумовленої нечіткою інформацією.

Оцінка обчислювальної розв'язності системної задачі

Успіх або невдача у розв'язанні практичної системної задачі залежать насамперед від обсягу інформації, яку необхідно обробити під час її розв'язання. Виявлення умов досягнення успіху пов'язано із проблемою подолання *трансчислювальної складності*. Суть її впливає з головного висновку статті Ганса Бреммермана [202], що постулює таке твердження: «Немає системи обробки даних, штучної або природної, котра могла б обробляти більш ніж 2×10^{47} бітів за секунду на грам своєї маси». Тут під «обробкою N бітів» розуміють пересилання N бітів одним або декількома каналами обчислювальної системи. Бреммерман дійшов цього висновку на підставі таких міркувань [66]. Оброблювана інформація повинна бути яким-небудь чином закодована. Нехай вона закодована у вигляді енергетичних рівнів певного типу енергії в інтервалі $[0; E]$, де E – кількість енергії, яку ми можемо використати для цієї мети. Припустимо, що енергетичні рівні вимірюються з точністю до ΔE . У такому разі весь інтервал можна поділити максимум на $N = E/\Delta E$ рівних підінтервалів, причому кожному з них відповідатиме енергія, яка дорівнює ΔE . Якщо завжди буде зайнято не більше одного рівня, заданого маркером підінтервалу, то максимальна кількість бітів, відображених із використанням енергії E , дорівнюватиме $\log_2(N + 1)$ (у формулі використано $N + 1$ тому, що слід врахувати випадок, коли не зайнято жодного рівня). Якщо замість одного маркера з енергетичними рівнями з інтервалу $[0; E]$ використовувати одночасно K маркерів ($2 \leq K \leq N$), то можна відобразити $K \log_2(1 + N/K)$ бітів. Наявна енергія E буде використана оптимально у разі застосування N маркерів. У цьому випадку, який також можна вважати оптимальним, вдається відобразити N бітів інформації.

Для того щоб відобразити більший обсяг інформації з використанням тієї ж кількості енергії, ΔE необхідно зменшити. Проте це можна робити лише до певної межі, оскільки отримані рівні потрібно розрізняти за допомогою якоїсь вимірювальної процедури, що завжди, незалежно від своєї суті, має обмежену точність. Максимальну точність визначають, керуючись принципом невизначеності Гейзенберга: енергія може бути виміряна з точністю до ΔE , якщо виконується нерівність $\Delta E \Delta t \geq h$, де Δt – тривалість вимірювання, $h = 6,625 \times 10^{-27}$ ерг/с (постійна Планка), а ΔE – середнє відхилення від очікуваного значення енергії. Це означає, що $N \leq E \Delta t / h$.

Відобразимо тепер наявну енергію E відповідною кількістю маси, розрахованою за формулою Ейнштейна $E = mc^2$, де $c = 3 \times 10^{10}$ см/с — швидкість світла у вакуумі. Отже, верхню, найоптимістичнішу, межу для N визначає співвідношення:

$$N = mc^2 \Delta t / h, \quad N = 1,36 m \Delta t \times 10^{47}.$$

За умови, що маса становить 1 г ($m = 1$), а час — 1 с ($\Delta t = 1$), одержимо згадане значення $N = 1,36 \times 10^{47}$. Використовуючи отриману межу для обробки інформації грамом маси за одну секунду процесорного часу, Бреммерман потім обчислив кількість бітів, яку могла б обробити гіпотетична комп'ютерна система, що має масу, рівну масі Землі, за період, рівний її віку. З урахуванням того, що масу Землі оцінюють приблизно як 6×10^{27} грамів, а її вік — як 10^{10} років, причому рік складається десь із 14×10^7 секунд, можна зробити висновок, що цей уявний комп'ютер зміг би обробити біля 10^{93} бітів інформації. Це число зазвичай називають межею Бреммермана, а задачі, що потребують обробки понад 10^{93} бітів інформації, — трансобчислювальними.

Дійсно, розв'язування багатьох задач навіть для відносно нескладних систем потребує інформації, обсяг якої дещо перевищує зазначений.

Як приклад розглянемо систему з n змінних, кожна з яких має k різних станів. Зрозуміло, що ця система має k^n станів. Множина узагальнених станів конкретної системи є підмножиною цієї множини. Усього таких підмножин 2^{k^n} .

Припустимо, що нам потрібно відібрати, виділити або класифікувати систему з множини всіх систем цього типу. Тоді, за умови, що буде використано найефективніший метод пошуку, згідно з яким кожен біт інформації дає змогу розбити залишок множини варіантів навпіл, необхідно обробити $\log_2 2^{k^n} = k^n$ бітів інформації. Задача є трансобчислювальною, якщо $k^n > 10^{93}$. Це можливо, зокрема, при таких наближених значеннях k та n :

k	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n	308	194	154	133	119	110	102	97	93

Із проблемою трансобчислювальної складності доводиться стикатися досить часто, наприклад, під час розв'язування задач, що потребують розпізнавання образів. Подібна проблема виникає й у такій сфері, як тестування великих інтегральних мікросхем — складних електронних схем із великою кількістю входів та виходів.

Щоб розв'язати задачу, яка належить до типу задач трансобчислювальної складності, її необхідно спершу переформулювати. Найприродніший спосіб такого переформулювання полягає в ослабленні умов. Це дозволяє застосовувати як евристичні методи, що дають змогу відкидати багато безперспективних варіантів, так і наближені (нечіткі), що дозволяють розв'язувати ці задачі з урахуванням сукупності варіантів.

Урахування межі Бреммермана призводить до занадто простого поділу системних задач за складністю. Реальних, практичних обчислювальних обмежень вона не відображає, проте є характеристикою, корисною для попередньої оцінки ситуації.

Один із найочевидніших наслідків, яким зараз нерідко нехтують, полягає в тому, що перш ніж розпочати дослідження будь-якої складної системи, потрібно хоча б приблизно оцінити необхідні для цього інформаційні ресурси.

Оцінка алгоритмічної розв'язності системної задачі

Наскільки успішно можна подолати трансобчислювальну складність практичної задачі СА, залежить не лише від обсягу інформації, яку необхідно обробити під час її розв'язання, але й від обчислювальних характеристик задачі. Іншими словами, необхідно враховувати, що складність задачі визначається не тільки обсягом інформації та її співвідношенням із межею Бреммермана. Нерідко трапляються задачі, які з достатнім запасом «вкладаються» у межу Бреммермана, проте виявляються нерозв'язними. Тому необхідно оцінити алгоритмічну розв'язність задачі, оскільки на практиці вона суттєво залежить не лише від продуктивності обчислювальної техніки, але й від алгоритму, який застосовується. При цьому найважливішою характеристикою стає час розв'язання задачі.

Якщо алгоритм розв'язання задачі обрано, необхідний для цього час зручно зображувати змінною, залежною від розмірності складних систем. Ця змінна, яку часто називають розмірністю варіанта задачі, визначає обсяг вихідної інформації, необхідної для опису досліджуваної системи. Нехай n — розмірність конкретної системи для деякого варіанта задачі. Тоді час виконання алгоритму розв'язання цієї задачі визначається за формулою

$$f: R \rightarrow R,$$

де $f(n)$ — найбільша кількість часу, необхідна для виконання алгоритму обраного варіанта задачі, розмірність якої дорівнює n . Функцію f зазвичай називають *часовою функцією складності*.

Вважається, що можна виділити два класи алгоритмів, які різняться швидкістю зростання часових функцій складності. До першого класу належать алгоритми з поліноміальними часовими функціями складності. Їх називають *поліноміально-часовими алгоритмами*. Оскільки степінь полінома має суттєво більше значення, особливо при великих n , ніж його коефіцієнти та члени менших порядків, то поліноміальні часові функції складності можна характеризувати їхнім порядком. Функція f має складність $O(n^k)$, де k — додатне ціле число, тоді і тільки тоді, коли існує така константа $c > 0$, що $f(n) \leq cn^k$ для всіх $n \geq n_0$, де n_0 — найменша розмірність розглянутої задачі. Наприклад, функція $f(n) = 25n^2 + 18n + 31$ має складність $O(n^2)$, оскільки $f(n) \leq 74n^2$, коли $n_0 = 1$, або $f(n) \leq 42n^2$, коли $n_0 = 2$, і т. д.

До другого класу належать алгоритми, часові функції складності яких перевищують складність $O(n^k)$ при кожному k . Їх зазвичай називають *експоненціально-часовими алгоритмами*. Різниця між поліноміальними та експонентними часовими алгоритмами, особливо у разі задач великої розмірності, досить значна. Якщо для деякої часової функції складності порівняти часи обчислення, наприклад, для 1 млн операцій за секунду, то з табл. 2.1 видно, що практична застосовність алгоритмів суттєво залежить від ступеня поліноміально-часової функції складності.

Таблиця 2.1. Час розв'язання задачі з використанням поліноміально-часових та експоненціально-часових алгоритмів

$n \backslash k$	10	20	30
n^2	0,0001 с	0,0004 с	0,0009 с
n^{10}	2,8 год	118,5 днів	18,7 років
2^n	0,001 с	1 с	17,9 хв
3^n	0,059 с	58 хв	6,5 років

Однак поліноміально-часові алгоритми суттєво краще «реагують» на збільшення потужності обчислювальних засобів. Цю відмінність добре видно під час складання графіків деяких поліноміальних і експонентних функцій (рис. 2.5). Оскільки поліноміально- та експоненціально-часові функції складності суттєво різняться, поліноміально-часові алгоритми вважають більш ефективними порівняно з експоненціально-часовими.

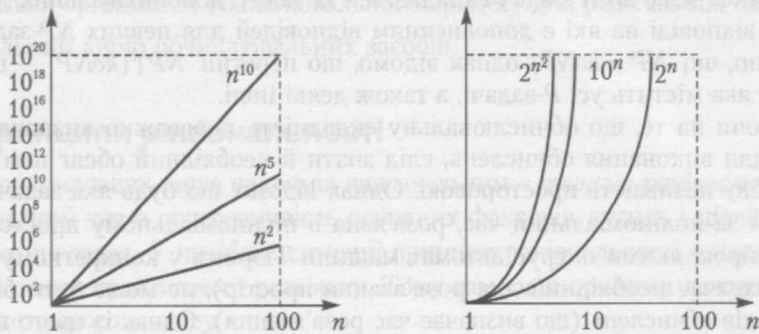


Рис. 2.5. Зміна поліноміально-часової (а) та експоненціально-часової (б) функцій складності у залежності від n

Тому задачі, до яких не можна застосувати поліноміально-часові алгоритми, вважають такими, що не підлягають розв'язанню, а задачі, для яких поліноміальні алгоритми існують, належать до класу задач, які підлягають розв'язанню. Останніх зазвичай називають P -задачами, тобто задачами, розв'язуваними за поліноміальний час. Множину таких задач називають класом P -задач. Для більшості практичних задач невідомо, чи існує поліноміально-часовий алгоритм їхнього розв'язання, і не доведено, що вони не підлягають розв'язанню. Спільним для них є те, що вони можуть бути розв'язані за поліноміальний час на недетермінованих комп'ютерах, наприклад, на машинах Тюрінга. Такі задачі називаються NP -задачами (недетермінованими поліноміально-часовими задачами); вони утворюють клас NP -задач.

Ось що розуміється під поняттям «розв'язання». Машина може перевірити правильність запропонованого розв'язку за поліноміальний час. Отже, у цьому випадку поняття «недетермінований поліноміально-часовий алгоритм» служить лише для позначення того, що запропонований розв'язок реальної задачі може бути перевірений за поліноміальний час. Відомо, що будь-яку NP -задачу можна розв'язати за допомогою детермінованого алгоритму складності $O(2^{p(n)})$, де p — поліноміальна функція. Клас NP -задач містить клас P , тому що будь-яку задачу, розв'язувану за поліноміальний час на детермінованій машині Тюрінга, розв'язують (тобто перевіряють) за поліноміальний час на недетермінованій машині Тюрінга. Для значної кількості NP -задач доведено, що будь-яка інша NP -задача може бути зведена до такої задачі за поліноміальний час. Такі задачі називають NP -повними задачами.

Оскільки до класу NP -задач належить багато практичних задач, надзвичайно важливо визначити його статус. Питання про те, чи підлягають NP -задачі розв'язанню, є одним із ключових у математиці, інформатиці та науці про системи. Відповідь на нього має величезне значення для розв'язання системних задач. Запитання звичайно формулюють так: «чи вірно, що $NP = P$?». Відповісти на нього можна, довівши, що будь-яка NP -задача або є P -задачею (тобто вона розв'язна за поліноміальний час), або взагалі не підлягає розв'язанню (тобто розв'язна за експонентний час). Якщо можна довести,

що якась NP -задача не підлягає розв'язанню, то $NP \neq P$. З іншого боку, якщо буде доведено, що така задача розв'язна, то $NP = P$. Оскільки є вагомі докази на користь того, що $NP \neq P$ у випадку звичайних правил виведення, проблема насамперед полягає в тому, щоб знайти нетрадиційні правила виведення, які дозволили б довести, що якась повна NP -задача підлягає розв'язанню.

Якщо якийсь клас $koNP$ -задач складається із задач, доповнювальних до NP -задач, тобто задач, відповіді на які є доповненням відповідей для певних NP -задач, то невідомо, чи вірно, що $NP = koNP$, однак відомо, що перетин $NP \cap koNP$ — це непорожня множина, яка містить усі P -задачі, а також деякі інші.

Незважаючи на те, що обчислювальну складність переважно визначають як час необхідний для виконання обчислень, слід знати й необхідний обсяг пам'яті комп'ютера. Цю умову називають просторовою. Однак відомо, що будь-яка задача, яку можна розв'язати за поліноміальний час, розв'язна в поліноміальному просторі. Справді, кількість комірок, якими оперує автомат машини Тюрінга у конкретному обчисленні (це число визначає необхідний для розв'язання простір), не може бути більшою, ніж кількість кроків обчислень (що визначає час розв'язання). Однак із цього не випливає, що всі задачі, нерозв'язні в поліноміальному просторі, можна розв'язати за поліноміальний час. Саме тому для поділу задач на такі, що підлягають розв'язанню, і такі, що йому не підлягають, використовують поняття часової складності. Однак на практиці важливе значення мають обидві ці умови.

2.5. Принципи подолання трансобчислювальної складності системних задач

Мета цього підрозділу — аналіз відомих і розробка нових підходів, прийомів і принципів розв'язання задач трансобчислювальної складності для реальних систем. Будемо вважати, що складність процесу розв'язання реальних задач визначають три основних фактори:

- складність формалізації системної задачі за умов невизначеності, неповноти, неточності вихідної інформації та суперечливості цілей дослідження;
- складність формування системи, яка описує об'єкт системних досліджень;
- обчислювальна складність задач системного дослідження.

Відповідно до межі Бреммермана задачами з трансобчислювальною складністю є такі, для розв'язання яких потрібно обробити інформацію обсягом понад 10^{93} бітів. Встановлено, що при розв'язанні задачі для системи, яка містить n елементів із k різними станами, значення зазначеної межі досягається, якщо $n \geq 308$ і $k \geq 2$. Враховуючи ту обставину, що в реальних системах, наприклад у процесорах комп'ютерів, маємо $n \geq 10^6$ при $k \geq 2$, то стає очевидним, що обчислювальна складність прикладних задач СА на кілька порядків перевищує зазначену межу Бреммермана.

Звідси випливає нова методологічна задача: визначити, які прийоми, принципи та методи необхідні для обґрунтування можливості розв'язання задач СА для реальних об'єктів із необхідною точністю і за технічно й економічно прийнятний час.

Насамперед необхідно врахувати, що межа Бреммермана дає лише загальну оцінку гранично допустимої складності задачі, але не відображає реальних, чинних обчислювальних обмежень. Проте вона є корисною характеристикою для попередньої оцінки

інформаційної ресурсоемності прикладної задачі. Оскільки реальні задачі СА потребують величезної обчислювальної продуктивності, яка суттєво перевищує можливості сучасних ЕОМ, така оцінка є дуже важливою. Розглянемо деякі прийоми подолання трансобчислювальної складності задач СА, виділивши такі основні напрями:

- ♦ раціональне формулювання задачі;
- ♦ раціональна організація обчислювального процесу для розв'язання задачі;
- ♦ раціональний вибір обчислювальних засобів.

2.5.1. Принципи раціональності

Для кожного з вказаних вище напрямів визначальним є *принцип раціональності*. Він цілком виправданий через суперечливість основних факторів, зусиль і цілей, характерних для прикладних задач. У подібній ситуації принцип раціональності є єдиною реальною базою досягнення прийнятного розв'язку. Тому саме цей принцип лежить в основі методології системного аналізу.

Згадаємо, що *раціональність* — це властивість процедури вибору альтернатив, які дають змогу без зайвих витрат ресурсів досягти компромісу цілей.

Введемо такі типи раціональності.

- ♦ *Технічна раціональність* — використовується у разі пошуку компромісу між суперечливими вимогами до технічних характеристик об'єкта, а також в інших випадках під час вибору технічних показників, характеристик і властивостей. При цьому визначальними факторами у реалізації вибору є технічні характеристики об'єкта аналізу.
- ♦ *Соціальна раціональність* — використовується у разі пошуку компромісу між суперечливими вимогами до соціальних властивостей об'єкта, а також в інших випадках, пов'язаних із соціальними показниками, характеристиками, властивостями об'єкта аналізу. Визначальним фактором у такому виборі є властивості об'єкта, що визначають його соціальну значимість.
- ♦ *Економічна раціональність* — визначальними є економічні характеристики й показники об'єкта, зокрема економічна ефективність.
- ♦ *Технологічна раціональність* — визначальними є показники, характеристики й властивості, що визначають технологічність об'єкта.
- ♦ *Експлуатаційна раціональність* — визначальними є показники, що характеризують експлуатаційні властивості об'єкта.
- ♦ *Ергономічна раціональність* — визначальними факторами є показники, характеристики і властивості, що визначають якість взаємодії об'єкта й людини як користувача або учасника процесу управління об'єктом.

ПРИМІТКА

На перший погляд може здатися, ніби поняття ергономічної та соціальної раціональності дублюють одне одного. Але це не так. Соціальна раціональність визначає опосередкований внесок об'єкта в соціальну сферу загалом (забезпечення зайнятості, поліпшення екологічних умов у певному регіоні завдяки заміні застарілих методів виробництва досконалішими технологіями тощо). Ергономічна раціональність визначає принципово інші властивості об'єкта, а саме здатність створювати для окремого індивіда необхідні умови безпосередньої взаємодії з об'єктом.

- ♦ *Естетична раціональність* — визначальними факторами є етичні та естетичні властивості об'єкта. Враховується у разі пошуку компромісу в експертній груповій процедурі формування етичних і естетичних вимог до об'єкта й оцінювання його властивостей.
- ♦ *Юридична раціональність* — визначальними факторами є ступені відповідності властивостей, характеристик і показників об'єкта СА чинним законам, держстандартам, нормативним актам та іншим нормам і правилам, що діють у суспільстві, в тому числі звичаям, традиціям тощо. Використовують у разі експертного оцінювання патентної чистоти конкурентоздатності на певному зовнішньому ринку, характеристик і параметрів конкуренції, а також під час розробки законодавчої бази та механізму підтримки національних виробників, розв'язання різних системних задач у соціально-економічній сфері. Зокрема, цей тип раціональності необхідно враховувати під час розробки та впровадження нових законів, а також експертного оцінювання ступеня сумісності нових законів із чинними та несуперечності їм, ступеня відповідності цілям і задачам, задля яких ці закони приймаються.
- ♦ *Інформаційна раціональність* — пошук раціонального компромісу між рівнями повноти, вірогідності та своєчасності інформації про об'єкт аналізу і витрати ресурсів, зокрема часових, на їхнє узгодження в процесі створення інформаційного забезпечення задач СА.
- ♦ *Методична раціональність* — використовується під час оперативного вибору інструментарію системного аналізу в конкретних умовах. Визначальними факторами є характеристики та властивості методів, алгоритмів, пакетів прикладних програм, які зазвичай аналізують із принципово різних позицій, враховуючи можливість досягнення необхідної точності обчислень, реалізований рівень швидкодії та прийнятність витрат пам'яті обчислювальних засобів, взаємної сумісності в єдиному обчислювальному процесі. Саме такого підходу вимагає та обставина, що під час формування й розв'язування прикладних задач СА, в першу чергу під час аналізу соціально-економічних і екологічних ситуацій, необхідно забезпечити багатофакторну сумісність як обчислювальних методів та алгоритмів, так і емпіричних підходів, евристичних прийомів, експертних процедур, що стосуються єдиного організованого процесу, у якому використано інтерактивні процедури.
- ♦ *Коаліційна раціональність* — використовується у разі формування єдиної стратегії дій низки суб'єктів, що мають одночасно загальні та індивідуальні цілі. Її визначальною рисою є пошук компромісу між суперечливими індивідуальними та загальними цілями, забезпечення певного їхнього співвідношення. Це поняття використовується під час пошуку погоджених розв'язків групової експертизи, формування багатосторонніх договорів, створення військових або економічних коаліцій.
- ♦ *Раціональність здорового глузду* — особливий тип раціональності, який зазвичай застосовують за умов крайнього дефіциту часу на формування розв'язку або для попереднього добору деякої множини розв'язків. Особливе значення при цьому мають інтуїція, досвід, можливість передбачення експертів-аналітиків або безпосередньо ОПР. Відмінна риса раціональності такого типу полягає у майже повній відсутності кількісного обґрунтування розв'язку. У СА вона застосовується досить часто і в інтерактивному режимі для швидкого прийняття рішення у процесі обчислювального експерименту, і для розв'язання задач попереднього добору. Зокрема, раціональність здорового глузду враховується у разі формування множини альтер-

нативних розв'язків структури та функцій проектного об'єкта, попереднього формування множини можливих ситуацій під час прогнозування позаштатних і критичних режимів проектного об'єкта та в інших випадках. Сформовані таким чином множини розв'язків у подальшому проходять відбір через експертне оцінювання або в інші способи — з використанням імітаційного моделювання чи, скажімо, обчислювальних алгоритмів. Крім того, цей тип раціональності в критичних і надзвичайних ситуаціях широко використовують на практиці ОПР, зокрема у разі виникнення великих пожеж, землетрусів, аварій кораблів та інших стихійних лих, а також у ході бойових дій.

- ♦ *Ігрова раціональність* — визначальними принципами вибору є принципи раціональної ігрової стратегії: покроковий баланс ризику та обережності, порівняння цінності альтернативних результатів, сумірність значимості для остаточного результату очікуваної вигоди та можливого збитку. Основою процедури формування альтернатив розв'язків, як і у разі раціональності здорового глузду, є досвід, інтуїція та передбачення, але вибір розв'язку здійснюється на підставі багатокритеріальної оцінки альтернатив, що базується на зазначених принципах ігрової стратегії. Цей тип раціональності широко використовують за умов високої невизначеності очікуваного результату, зокрема під час стратегічного планування великих венчурних та інноваційних проектів.

ПРИМІТКА

Венчурний проект — проект дослідження принципово нових ідей, що можуть із однаковою ймовірністю привести як до великого виграшу й отримання нового важливого результату, так і до повного провалу. Інвестор венчурного капіталу бере ризик на себе, усвідомлюючи, що витрати можуть бути не повернуті, і надає їх фактично як добродійний внесок для підтримки досліджень.

Інноваційний проект — проект реалізації нових ідей, весь ризик від впровадження яких приймає на себе виконавець, що бере кредит на цей проект. У процесі планування проводять ділову гру двох груп експертів, які дотримуються протилежних думок. У ході гри з'ясовують сильні та слабкі сторони проекту, щоб можна було зробити загальний об'єктивний висновок. Цей тип раціональності також використовують під час планування великих стратегій в економіці, промисловості, військовій справі, у разі розробок нових видів озброєння, нових технологій тощо.

- ♦ *Концептуальна раціональність* — це, власне кажучи, цілеспрямоване об'єднання усіх розглянутих типів раціональності. Вважається найважливішим показником у разі розв'язання складних прикладних задач глобального характеру, які торкаються, зокрема, національних інтересів держави, взаємин окремих держав або великих транснаціональних компаній тощо.

Розглянемо приклад концептуальної раціональності. У 1966 році США в односторонньому порядку прийняли закон, що вводив санкції стосовно закордонних компаній, які торгували з Кубою. Цей закон помітно торкнувся інтересів Європи. У Люксембурзі, де відбулося засідання країн-членів ЄС, було прийнято рішення опротестувати його і звернутися з цим у Всесвітню торговельну організацію.

Цей тип раціональності відіграє важливу роль у ринковій стратегії великих компаній. Наприклад, характерний прийом усунення конкурентів на комп'ютерному ринку полягає в тому, що фірми-гіганти скуповують найбільш успішні дрібні та середні фірми і усувають із ринку їхню продукцію, в першу чергу системні та мережеві програми. Внаслідок цього порушується баланс на ринку взаємодії в неформальних об'єднаннях фірм, що протистоять конкуруючим гігантам, і процвітаючи дрібні та середні фірми дуже швидко зазнають великих збитків.

Слід особливо підкреслити, що цей тип раціональності не є просто сукупністю розглянутих раніше концепцій. Концептуальна раціональність — це єдиний комплекс системно погоджених типів раціональності, спрямованих на досягнення єдиної мети.

Єдність концептуальної раціональності можлива за умови єдності задуму та механізму його реалізації, яку забезпечують узгодженням задач, термінів, ресурсів і очікуваних результатів «взаємодії» усіх видів раціональності. Із такої позиції концептуальну раціональність можна трактувати як *мультираціональність* або *метараціональність*. Цей тип раціональності використовують у разі розробки концепцій економічної допомоги під час кредитування інших держав, концепцій діяльності створюваної фірми, концепцій раціональної стратегії в конкурентній боротьбі під час розміщення вільного капіталу та в аналогічних випадках, пов'язаних із розв'язанням задач стратегічного масштабу.

2.5.2. Прийоми розв'язання трансобчислювальної складності

Розглянемо прийоми розв'язання трансобчислювальної складності із застосуванням раціональної декомпозиції загальної задачі СА. Наведений раніше перелік принципів усунення трансобчислювальної складності загальної задачі СА визначив потенційні можливості різних типів раціональності і показав доцільні області їхнього застосування. За всієї очевидності основних прийомів — раціонального обмеження множини аналізованих властивостей, факторів, станів і ситуацій, обмеження множини альтернативних варіантів розв'язків та вибору інструментарію СА — залишається відкритим головне питання, що стосується розв'язання трансобчислювальної складності, а саме: як і за допомогою яких підходів слід реалізувати зазначені прийоми та як при цьому використати потенційні можливості різних типів раціональності. Це питання досить складне з багатьох причин, серед яких найсуттєвішими вважаються такі:

- ♦ принципова неформалізованість загальної задачі СА через необхідність неформалізованого вибору її цілей та критеріїв досягнення цілей і внаслідок дії низки інших факторів;
- ♦ унікальність кожної практичної задачі СА, що є наслідком унікальності цілей задач, структури кожної складної системи, умов її розробки, виробництва, експлуатації, а також унікальності позаштатних, критичних і надзвичайних ситуацій.

Тому для різних практичних задач СА підходи до подолання трансобчислювальної складності різняться умовами і прийомами реалізації, властивостями і можливістю різних типів раціональності.

Розглянемо деякі ідеї і методи реалізації зазначених прийомів, що є спільними для різних задач СА.

Основна ідея полягає у виконанні певної послідовності процедур цілеспрямованого скорочення потужності множини аналізованих варіантів через відбір за різними критеріями або обмеженні для подальшого аналізу тільки підмножини раціональних варіантів і виключення з подальшого аналізу безперспективних і нераціональних.

Реалізація цієї ідеї зводиться до виконання таких трьох основних етапів:

- ♦ раціональна формалізація задачі СА;
- ♦ раціональний вибір обчислювального процесу СА;
- ♦ раціональний вибір обчислювальних засобів СА.

Необхідність раціонального підходу на кожному з цих етапів зумовлена наявністю протиріч на всіх етапах СА, а також під час розв'язання кожної задачі, що входить у функціональний простір умов СА і безпосередньо у функціональний простір властивостей об'єктів.

Наприклад, під час формалізації загальної задачі СА необхідно розв'язати протиріччя між рівнем вірогідності та обґрунтованості отриманого розв'язку і рівнем складності задачі СА. Тут, з одного боку, для підвищення рівня вірогідності та обґрунтованості розв'язку слід підвищувати рівень повноти і вірогідності вхідної інформації для СА, зокрема збільшувати кількість враховуваних факторів та кількість параметрів, що характеризують кожен із таких факторів. Але, з іншого боку, зі зростанням кількості факторів і показників зростає розмірність конкретного варіанта формулювання задачі СА і, як наслідок, обчислювальна складність останньої; до того ж, згідно з поліноміальним або експонентним законом, зростає складність алгоритму, що реалізує прийнятий варіант задачі СА. Відповідно збільшується і час, необхідний для виконання алгоритму. Тому для зниження складності задачі необхідно зменшувати кількість факторів і показників. Отже, раціональна формалізація задачі повинна забезпечити раціональне розв'язання зазначеного протиріччя. При цьому відразу виникає неформалізована задача оцінки якості розв'язання цього протиріччя або, іншими словами, оцінки ефективності прийнятого варіанта раціональності формулювання задачі.

У цій задачі виникає суттєва неформалізована складова, пов'язана з невизначеністю типу: за якими параметрами оцінювати рівень раціональності прийнятого варіанта формулювання задачі і за якими критеріями оптимізувати рівень його ефективності? Ця задача є одним із прикладів неформалізованих задач.

Відзначимо, що поняття «параметр» і «критерій» не є синонімами. *Параметр* — це показник, за яким оцінюють рівень складності розв'язання задачі (наприклад, час обчислення). *Критерій* — це формалізоване вираження якості або ефективності досягнення поставленої мети (наприклад, чебишевський, середньоквадратичний чи інший критерій мінімізації часу обчислення для конкретної задачі або для певного класу задач СА).

Вибір типу раціональності для кожного з етапів, визначених під час практичної реалізації основної ідеї розв'язання трансобчислювальної складності, має свою специфіку та особливості і багато в чому залежить від цілей та характерних рис конкретної задачі СА. Тому далі наводяться лише загальні рекомендації. Докладніше ці питання будуть розглянуті під час вивчення конкретних класів задач СА.

- ♦ На першому етапі доцільно використовувати практично всі перелічені вище типи раціональності, і насамперед концептуальну, технічну, економічну, експлуатаційну. Крім того, у деяких застосуваннях важливе значення мають такі типи раціональності, як соціальна та юридична. На цьому етапі зменшення розмірності задачі досягають завдяки виключенню з аналізу таких факторів, впливом яких можна знехтувати або вплив яких апіорі відомий, а також таких, вплив яких можна врахувати на завершальному етапі аналізу, ввівши виправлення, уточнення чи за допомогою інших прийомів. Задача може бути розв'язана з використанням різних критеріїв, що характеризують ефективність досягнення заданих цілей, зокрема можливість мінімізувати вплив факторів ризику.
- ♦ На другому етапі доцільно використовувати такі типи раціональності, як концептуальна, технологічна, методична, інформаційна. У цьому разі розмірність задачі скорочується завдяки застосуванню специфічних прийомів, в основі яких лежить

принцип системної декомпозиції вихідної задачі СА на послідовність простіших часткових задач і принцип агрегування розв'язків часткових задач у розв'язок вихідної задачі СА.

- ♦ Третій етап у деякій мірі є таким, що забезпечує можливість зазначених першого і другого напрямів. Принципи раціональності на цьому етапі застосовуються з метою вибору таких обчислювальних засобів, які є раціональними для досягнення цілей СА за наявних можливостей. Тому на цьому етапі доцільно використовувати такі типи раціональності, як економічна, технологічна, ергономічна тощо.

Зупинимося трохи докладніше на прийомах і можливостях другого етапу, оскільки він є визначальним як для математичної постановки задачі, так і для вибору обчислювальних засобів. Справді, відомо, що вибір методу розв'язання прикладної задачі певним чином залежить від її математичного формулювання, а вибір алгоритму і програмної реалізації методу визначає вимоги до обчислювальних засобів. Для алгоритмізації основної ідеї розв'язання трансобчислювальної складності задачі СА базовим типом раціональності є концептуальна, на підставі якої реалізують принцип системної декомпозиції загальної задачі СА. Системну декомпозицію здійснюють у двох аспектах — концептуально-функціональному і структурно-функціональному. Їхня реалізація має свої особливості в залежності від класів задач СА. Але суть усіх прийомів є спільною. Тому в цьому розділі ми зупинимося лише на загальній схемі системної декомпозиції, розглянувши на прикладі класу задач розробки складної технічної системи (СТС).

Первинною є концептуально-функціональна декомпозиція загальної задачі СА на задачі функціонального концептуального простору умов функціонування СТС і концептуального простору властивостей структури СТС. Кожен із просторів складається з трьох часткових задач СА, які базуються відповідно на:

- ♦ цільовому, ситуаційному, інформаційному аналізі;
- ♦ структурно-функціональному, організаційно-процедурному і техніко-економічному аналізі;

У подальшому процедура декомпозиції виконується окремо для кожного з функціональних просторів.

Суть структурно-функціональної декомпозиції можна пояснити на прикладі концептуального простору структури СТС. У цьому випадку задачу системного аналізу СТС можна звести до такої послідовності часткових задач:

- ♦ формування та аналіз допустимої множини принципів дії СТС, вибір принципу функціонування на основі концептуальної раціональності;
- ♦ формування та аналіз допустимої множини структур СТС для прийнятого принципу функціонування;
- ♦ вибір раціональної структури.

Розглянуто далі часткові задачі, які з точки зору їхньої реалізації є однотипними. Тому сформулюємо їх в узагальненому вигляді як задачу для функціонального елемента (ФЕ) структури, а потім вкажемо конкретне значення ФЕ на двох ієрархічних рівнях системи:

- ♦ 1-й рівень — формування та аналіз допустимої множини ФЕ;
- ♦ 2-й рівень — вибір раціонального ФЕ.

У міру переходу до більш низького рівня ієрархічної структури СТС в якості ФЕ приймають послідовно такі елементи: функціональна система $\Rightarrow$ функціональний при-

стрій $\Rightarrow$ функціональний блок $\Rightarrow$ функціональний модуль. При цьому СТС є найвищим рівнем ієрархічної структури і цілісним об'єктом, цілеспрямовано організованим зі структурно взаємопов'язаних і функціонально взаємодіючих функціональних систем.

У свою чергу функціональна система є ФЕ, що цілеспрямовано організований зі структурно взаємопов'язаних і функціонально взаємодіючих функціональних пристроїв. Аналогічно функціональний пристрій організований із функціональних блоків, а функціональний блок — із функціональних модулів. Із переходом до нижчого рівня збільшується кількість ФЕ, що входять до складу ФЕ вищого рівня, але водночас зменшується кількість функцій, виконуваних одним ФЕ. Наприклад, СТС може складатися з 3–10 функціональних систем, кожна з яких виконує до кількох десятків функцій. Функціональний модуль зазвичай виконує 1–2 функції.

Зверніть увагу на одну важливу тенденцію розвитку сучасної техніки. Завдяки широкому впровадженню наукомістких технологій на основі сучасної обчислювальної техніки, що базується на мікроелектронній технології, ФЕ кількох рівнів конструктивно можуть виконуватися у вигляді єдиної НВІС (надвеликої інтегральної схеми). Наприклад, значну частину функцій ПК здатен виконувати один НВІС-процесор. Сучасні НВІС можуть містити понад 10^7 активних і пасивних елементів (транзисторів, діодів, індуктивних елементів). Звідси випливає: якщо кожний елемент характеризувати лише одним параметром і якщо кожен параметр буде мати два значення, то для аналізу НВІС як єдиного ФЕ (без декомпозиції) необхідно обробити такий обсяг інформації (у бітах):

$$k^n = 2^{10^7}.$$

Тут n — кількість параметрів, а k — кількість значень (станів) кожного параметра. Нагадаємо, що коли $k = 2$ і $n = 308$, маємо $k^n \geq 10^{93}$, тобто обсяг оброблюваної інформації перевищує межу Бреммермана.

Застосування структурно-функціональної декомпозиції дає змогу виконати СА послідовно для кожного ієрархічного рівня та забезпечує можливість розв'язання задачі на кожному рівні й загалом для СТС. Досягти цього можна, по-перше, суттєво спрощуючи процедуру відбраковування безперспективних альтернативних розв'язків для ФЕ кожного рівня завдяки використанню експертних оцінок фахівців. Керуючись власною інтуїцією, досвідом, певними знаннями, експерти можуть досить швидко і без детальних розрахунків сформувати невелику множину можливих альтернативних розв'язків на етапі вибору принципу функціонування СТС.

По-друге, відкривається можливість виконати порівняльний аналіз альтернативних розв'язків шляхом кількісного розрахунку з використанням обчислювальних процедур. Це стає можливим завдяки різкому скороченню необхідного обсягу інформації, що підлягає обробці. Якщо, наприклад, кожну альтернативу охарактеризувати 10 параметрами і обмежити кожен такий параметр двома значеннями (мінімальним і максимальним), які може забезпечити кожна альтернатива, то одержимо

$$k^n = 2^{10} = 1024 \text{ (бітів)}.$$

Враховуючи, що на практиці кількість аналізованих альтернатив не перевищує 10 і кожна з них можна аналізувати окремо, робимо висновок, що потрібно обробити до 10^4 бітів інформації:

$$10k^n = 10 \cdot 2^{10} = 10^4.$$

Звичайно, ця оцінка є наближеною. Реально на практиці для розглянутого прикладу потрібно буде обробити до 10^4 – 10^5 байтів, або 10–100 кілобайтів інформації (1 байт = 8 бітів). Таке збільшення цього показника зумовлено необхідністю описати й ідентифікувати кожну альтернативу, кожний параметр, інтервал зміни кожного параметра тощо. Проте ця задача загалом розв'язна. Для кожної згаданої раніше множини можна ранжувати альтернативи за ступенем їхньої корисності з урахуванням узагальнених параметрів СТС, ступеня виконання заданих вимог або інших критеріїв. На сьогодні окремі пакети прикладних програм дають змогу за деякими узагальненими показниками (обсягом опрацьованої інформації й обсягом баз даних, кількістю робочих місць, іншими показниками) визначати структуру та всі функціональні елементи корпоративної обчислювальної мережі.

Вибір альтернатив на ієрархічних рівнях типу «функціональний пристрій», «функціональний блок», «функціональний модуль» здійснюють на підставі точніших оцінок. На цих рівнях результати вибору та ескізного проектування альтернатив практично збігаються, оскільки для порівняльної оцінки і вибору альтернативи необхідно знати основні технічні характеристики відповідних ФЕ. Для цього широко застосовують методи і засоби штучного інтелекту, насамперед експертні системи як інтелектуальні засоби підтримки рішень розробника. Як свідчить досвід, на практиці, кожна СТС є унікальною або за призначенням, або за умовами експлуатації і застосування, або за використовуваною елементною базою. Тому для виконання СА на різних ієрархічних рівнях типу функціональна система $\Rightarrow$ функціональний пристрій найчастіше використовують обчислювальні експерименти, а на рівнях функціональний блок $\Rightarrow$ функціональний модуль — як обчислювальні, так і натурні експерименти. Загальна ідея методичних прийомів СА у разі використання обчислювальних і натурних експериментів полягає в побудові такої послідовності ітерацій, яка дає змогу раціонально розподілити вимоги до об'єкта загалом як систему вимог до ФЕ всіх рівнів за принципом «зверху — вниз», а потім агрегувати результати СА за принципом «знизу — вгору». Виконавши ескізне проектування на нижчому рівні функціональних модулів для всіх ФЕ, на підставі результатів обчислювального експерименту, зокрема з використанням імітаційного моделювання, можна визначити характеристики ФЕ на вищих рівнях і СТС загалом, оцінити ступінь виконання заданих вимог і обмежень, а також визначити такий узагальнений показник, як техніко-економічна ефективність. Якщо одержаний розв'язок задовольняє ОПР, то можна послідовно, розпочинаючи з нижчого рівня, переходити до технічного проектування. У протилежному випадку виконують чергову ітерацію вибору, починаючи з ієрархічного рівня, для якого нездійсненні ці вимоги, обмеження чи будь-які умови. Загалом, такий підхід відкриває можливість різко скоротити кількість аналізованих альтернатив та обсяг оброблюваної інформації.

Отже, головним методологічним прийомом подолання трансобчислювальної складності задачі СА є системна декомпозиція вихідної задачі на послідовність простіших задач. До таких задач, зокрема, належать:

- ♦ раціональне використання можливостей системи «людина-експерт» і обчислювальних процедур (зокрема, базованих на інтелектуальних системах підтримки рішень);
- ♦ раціональна організація ітераційного процесу СА, яка ґрунтується на раціональній декомпозиції вимог «зверху — вниз» і агрегування результатів СА «знизу — вгору».

Найважливішою особливістю розглянутого процесу системної декомпозиції є відмінність точності, вірогідності й обґрунтованості розв'язку на різних рівнях структурно-функціональної декомпозиції. На рівнях типу функціональні системи зазначені

показники суттєво менші, ніж на нижчих рівнях, таких, як функціональний пристрій або функціональний модуль. Такий підхід цілком закономірний і практично доцільний, оскільки вибір структури (наприклад, для рівня «функціональні системи»), здійснюють за умов невизначеності цілей і, що особливо важливо, за умов неповноти, неточності, невизначеності вихідної інформації. Тому на цих етапах вибору оптимальним прийомом слід вважати раціональне поєднання здогаду, інтуїції, досвіду експертів і наявної інформації. Це дає можливість здійснити початкове обґрунтування структури та функціональних систем СТС і перейти до наступних етапів виконання СА, заключним з яких є ескізне проектування функціональних блоків і функціональних модулів. Реалізація останніх етапів СА дає змогу суттєво розширити знання про можливості СТС у цілому шляхом агрегування цих результатів методами обчислювального експерименту або імітаційного моделювання. У підсумку це дає змогу отримати остаточне обґрунтування прийнятих розв'язків, наприклад, на рівні функціональних систем, або обґрунтування непридатності цих розв'язків і необхідності повторення ітераційного процесу, починаючи з вищих рівнів.

Висновки

- У цьому розділі наведені означення таких основних понять, як об'єкта дослідження, системи, складної, великої, надвеликої, глобальної систем, а також різних типів технічних систем. На підставі поняття складної системи дається означення складної багаторівневої ієрархічної системи, вводиться поняття ціленаправленої, цілеспрямованої, структурованої, породжувальної, відкритої та повної системи.
- Розкрито поняття системності і дано змістовне формулювання системної задачі; описано властивості та особливості системних задач, основні процедури їхнього розв'язання. Викладено методи відкриття і постулювання складних систем. Розглянуто такі фундаментальні властивості системної методології, як результативність, ефективність і масштабність. Описуються фундаментальні принципи, яких необхідно дотримуватися під час формування системи.
- Вводяться такі поняття складності системної задачі, як фундаментальної властивості системної методології, а також поняття спектра складності, згідно з яким дві протилежні ділянки спектра складності покривають задачі організованої простоти і неорганізованої складності, що, незважаючи на взаємодоповнюваність, покривають лише невелику частину цього спектра. За винятком двох зазначених ділянок спектр складності залишається незабезпеченим методологічно в тому розумінні, що для широкого класу задач не підходять ані аналітичні, ані статистичні методи. Задачі, пов'язані з середньою частиною спектра складності, називаються задачами організованої складності, які внаслідок своєї міждисциплінарності належать до задач системного аналізу. Описується трансобчислювальна складність, яка пов'язана з оцінкою обчислювальної можливості розв'язання системної задачі.
- Показано, що складність розв'язання реальних задач зумовлена трьома основними факторами: складністю формалізації системної задачі за умов невизначеності, неповноти, неточності вихідної інформації та суперечливістю цілей дослідження; складністю формування системи, що описує об'єкт системних досліджень; обчислювальною складністю задачі системного дослідження.

- ♦ Наведено прийоми подолання трансобчислювальної складності системних задач, реалізацію яких виконують за такими напрямками:
 - ♦ раціональне формулювання задачі;
 - ♦ раціональна організація обчислювального процесу розв'язання задачі;
 - ♦ раціональний вибір обчислювальних засобів.

При цьому обумовлено, що визначальним для кожного з цих напрямів є принцип раціональності. Розглянуто прийоми усунення трансобчислювальної складності на основі раціональної декомпозиції загальної задачі СА, а саме: раціональне обмеження множини аналізованих властивостей, факторів, станів і ситуацій; раціональне обмеження множини альтернативних варіантів розв'язку; раціональний вибір інструментарію СА. Головним методологічним прийомом подолання трансобчислювальної складності задачі СА є системна декомпозиція вихідної задачі на послідовність простіших задач. До таких задач належать: раціональне використання можливостей системи людина—експерт і обчислювальних процедур (зокрема, базованих на інтелектуальних системах підтримки рішень); раціональна організація ітераційного процесу СА на основі раціональної декомпозиції вимог «зверху—вниз» і агрегування результатів СА «знизу—вгору».

Розділ 3

Формалізованість задач системного аналізу

- ◆ Формалізованість практичних задач, формалізованість і розв'язна задачі
- ◆ Формалізованість задач як предмет дослідження системного аналізу
- ◆ Характеристика рівнів задач, розв'язуваних під час системного дослідження складних формалізованих систем
- ◆ Якісний і кількісний аналіз формалізованих задач
- ◆ Формування стратегії прийняття рішень, яка забезпечує цілеспрямовану поведінку складних формалізованих систем

У цьому розділі розглянемо загальні принципи та прийоми розв'язання формалізованих задач системного аналізу. Розглянуті тут методи та підходи дають можливість виконати комплекс досліджень СФС, пов'язаних із моделюванням, прогнозуванням та прийняттям рішень стосовно контролю та цілеспрямованої зміни їх стану.

3.1. Характеристика формалізованих задач системного аналізу

Формалізація складних практичних задач або їхніх частин (елементів), з одного боку, дає змогу досліднику використовувати для розв'язання деякий раніше створений інструментарій у вигляді математичних методів, обчислювальних алгоритмів і процедур. З іншого боку, формалізація завжди спричиняє введення певних обмежень і припущень щодо розглянутої задачі, що, безумовно, призводить до втрати її певних властивостей і характеристик, якими з погляду дослідника можна знехтувати. Отже, формалізація завжди є процесом суб'єктивним, виконуваним дослідником на основі компромісу між втратою певних властивостей вихідної задачі і можливістю використання формальних інструментів для її розв'язання.

3.1.1. Відмінний принцип, покладений в основу задач системного аналізу

Розглянемо загальні принципи розв'язання певних класів задач, що належать до аксіоматичних наукових дисциплін та системного аналізу. Насамперед розглянемо клас задач системного аналізу, що формалізуються. Математичний апарат цього класу досить добре розроблений, але з певними припущеннями та обмеженнями. Зумовлено це тим, що багато методів розв'язання задач цього класу прийшли у системний аналіз з інших дисциплін — теорії дослідження операцій, теорії оптимізації, теорії прийняття рішень, теорії екстремальних задач тощо. Оскільки вони належать до класу аксіоматичних

наукових дисциплін, то їх методологічний і математичний апарат розроблено за принципом, який коротко можна сформулювати так: від методу — до практичної задачі. *Суть принципу:* на базі аксіом потрібно сформулювати математичну задачу, ввести припущення та обмеження до задачі, запропонувати метод її розв'язання, далі шукати практичні задачі та прикладні дисципліни, де цей метод можна ефективно використати.

Системний аналіз як прикладна наукова методологія реалізує інший принцип: від практичної задачі — до методу її розв'язання. *Суть принципу:* є реальна задача системного аналізу із практичними фізичними, економічними або іншими цілями, критеріями, обмеженнями і припущеннями; необхідно знайти, вибрати або запропонувати метод її розв'язання. Звідси очевидно, що практичні обмеження рідко збігаються з теоретичними, введеними для спрощення задачі. Тому з'являється необхідність насамперед адаптувати, удосконалити і пристосувати відомі методи до прикладних задач системного аналізу, вказати область їхнього доцільного застосування, дати порівняльний аналіз їхніх переваг і недоліків, вказати можливі напрями «послаблення» виявлених недоліків у розв'язанні конкретних класів прикладних задач системного аналізу.

Типові задачі системного аналізу, що формалізуються — це задачі параметричної оптимізації (пошук оптимальних параметрів системи або функціональних елементів), задачі розкриття невизначеностей, зокрема невизначеностей цілей у багатокритерійних задачах оптимізації, задачі класифікації, багатofакторного аналізу та інші задачі. Їх буде розглянуто надалі.

3.1.2. Основні означення

Насамперед наведемо означення *формалізованих задач системного аналізу*. Це клас задач, для яких потенційно можна побудувати математичні моделі, обчислювальні алгоритми або логічні процедури обробки інформації, що дають змогу за вихідними даними визначити кількісні або якісні характеристики, одержання яких є метою розв'язання задачі.

Слід звернути увагу на те, що для задачі системного аналізу, що формалізується не обов'язково наявність математичної моделі, що пов'яже вихідну інформацію, вихідні дані з шуканими результатами. Здебільшого досить певного алгоритму, послідовне виконання якого дає змогу одержати шуканий результат за вихідною інформацією. Як приклад такого класу задач системного аналізу можна назвати деякі задачі, розв'язувані методом імітаційного моделювання. Наприклад, цей метод часто використовують для визначення часу напрацювання на відмову щодо певного виду об'єкта.

Отже, у розглянутому означенні поняття «формалізованість» виражена головна властивість різних класів задач, що формалізуються — потенційна можливість встановлення математичного або алгоритмічного взаємозв'язку і взаємозалежності вихідних даних та кінцевого шуканого результату задачі. Звідси випливає, що встановлення факту формалізованості практичної задачі — окрема проблема.

Надалі вважатимемо, що розглянуті задачі є такі, що формалізуються. Їх ми будемо називати формалізованими задачами. Зазначимо, що поняття «формалізована задача» і «формалізована задача» не є синонімами. Формалізована задача потенційно може бути формалізованою у тому сенсі, що для неї доведено тільки можливість формалізації і подальшого розв'язання. Формалізовану задачу подано як змістовним формулюванням, так і математичною постановкою, для дослідження якої наявний математичний апарат у вигляді математичних методу, моделі або алгоритму. Поняття «формалізована задача» не є синонімом поняття «розв'язна задача». Задача може бути формалізованою, але нерозв'язною. Наприклад, транспортна задача, що полягає у знаходженні оптимального маршруту для послідовного відвідання n пунктів, за певних значень n буде

нерозв'язною. Ця задача не тільки формалізується, а ще й має різні варіанти математичної постановки і точний алгоритм розв'язання — послідовний перебір варіантів маршрутів. І водночас задача нерозв'язна. Відомо [66], що вона має трансобчислювальну складність уже при $n \geq 20$. Формалізовані задачі (ФЗ) покладено в основу створення і дослідження складних формалізованих систем (СФС).

Прикладом СФС може слугувати сучасний технологічний комплекс, який поєднує велику кількість взаємозалежних технологічних процесів різної природи та організаційних підсистем, а також канали зв'язку між ними, що надають інформацію як якісного, так і кількісного характеру.

Характерною особливістю СФС є те, що вони містять підсистеми двох принципово різних типів: *технологічні* та *організаційні*.

Функціонування *технологічних підсистем* або таких, котрі можна звести до технологічних, визначає відомий алгоритм функціонування. Математичну модель технологічної підсистеми можна подати як сукупність правил, відношень, рівнянь, що повністю визначають її властивості. Такі підсистеми не мають власних цілей, їх поведінкою можна керувати для досягнення заданих ззовні цілей. Слід зазначити, що вигляд математичних описів технологічних підсистем може бути як детермінованим, так і стохастичним або будь-яким іншим, який дає змогу враховувати фактор невизначеності.

Функціонування *організаційних підсистем* не можна подати як строгий опис або однозначно визначену сукупність описів. Такі системи мають здатність до формулювання на базі як власних, так і зовнішніх цілей.

3.1.3. Властивості та особливості СФС

Складні системи, що формалізуються мають низку важливих особливостей [169].

1. Можливість функціонування не лише на основі зовнішніх стосовно системи цілей та критеріїв, але й системи загальних цінностей. Для формалізованих систем технологічного типу у певних випадках цю систему загальних цінностей можна звести до узагальненого принципу мінімуму дисипації енергії М. М. Мойсєєва [110]. Для урахування такого роду критеріїв використовують логіко-лінгвістичні підходи, що ґрунтуються, наприклад, на теорії нечітких множин.
2. Існування важливого класу складних систем, у якому підсистеми мають компетенцію, яка порівнянна з компетенцією всієї системи або її переважає. Такими системами є, наприклад, екосистеми, що складаються з різномірних підсистем. Через це адекватно описати такі системи за допомогою однієї мови не можливо. Для цього потрібна багатомовність.
3. Складні системи, що формалізуються часто можуть бути унікальними, неповторними, як, наприклад, екосистеми. Водночас технологічні підсистеми, що входять до їх складу здебільшого для тих самих типів задач можна розглядати як типові. Унікальними є кількість і види взаємодії цих підсистем.
4. Відсутність строго формалізованих і єдиних глобальних цілей функціонування. Ця властивість зумовлює потребу оперування лінгвістичними формулюваннями, що, у свою чергу, потребує використання певного математичного апарату — теорії нечітких множин, теорії логічного висновку тощо. Водночас для технологічних підсистем можна формувати чіткі цілі.
5. Багатокритерійність функціонування.
6. Відкритість і динамічність.

7. Невизначеність, яка зумовлена: стохастичністю через неідеальність, анізотропність і гетерогенність; недосконалістю технічних засобів вимірювання і управління; неповнотою знань про природу процесів, які лежать в основі СФС (біологічних, економічних, фізико-хімічних тощо); недосконалістю математичних описів та обмеженими можливостями обчислювальних засобів; суб'єктивними факторами; цілепокладанням.
- Основні властивості СФС наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Основні властивості СФС

Складні формалізовані системи	
Технологічні підсистеми	Організаційні підсистеми
Типовість структур і видів математичного опису	Унікальність структури, інформаційна унікальність
Відсутність цілепокладання, можливість задоволення заданих ззовні критеріїв	Принципова багатокритерійність або навіть відсутність критеріїв оптимальності
Наявність стохастичної невизначеності через неідеальність властивостей і приладів вимірювання цих властивостей, анізотропність середовищ	Наявність складних видів невизначеності, включаючи структурні, ймовірнісні тощо, через суб'єктивність, нестачу інформації, можливість виникнення критичних та інших унікальних ситуацій

3.1.4. Еколого-економічна система промислового регіону як приклад СФС

Розглянемо СФС на прикладі деякого промислового регіону, в якому природне середовище співіснує з розвиненим сільським господарством, промисловістю, транспортом, житловим сектором. Комплекс таких взаємозалежних підсистем називають *еколого-економічною системою (ЕЕС)*, що є прикладом СФС (рис. 3.1).

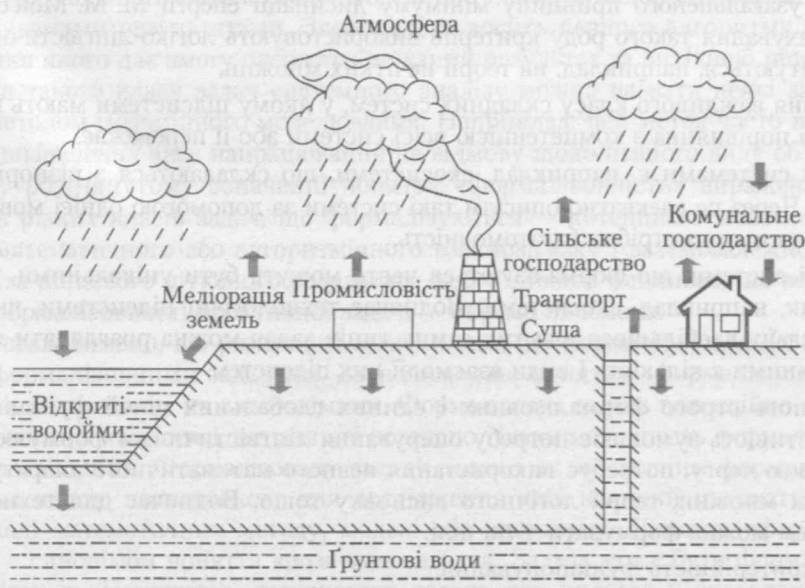


Рис. 3.1. Еколого-економічна система

Наведена ЕЕС складається з кількох підсистем природного походження, таких як атмосфера, суша, відкриті водойми, ґрунтові води, а також підсистем штучного походження: підприємства промисловості, сільського господарства, транспорту тощо. Зазначені підсистеми взаємодіють між собою в межах єдиної ЕЕС. При цьому екологічний стан навколишнього середовища розглядають як стан ЕЕС, антропогенне навантаження (вплив підсистем штучного походження) — як незалежну змінну, що потребує визначення (рис. 3.2).

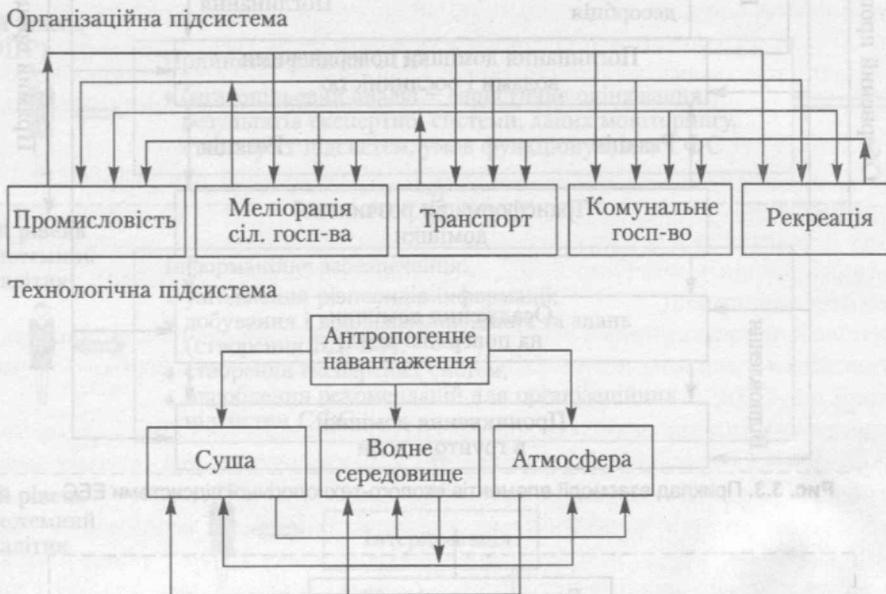


Рис. 3.2. Приклад взаємодії підсистем природного і штучного походження ЕЕС

Така ЕЕС, як впливає з означення СФС, складається з *еколого-технологічної* та *еколого-організаційної підсистем*.

Коротко охарактеризуємо підсистеми ЕЕС.

Еколого-технологічна підсистема ЕЕС. Це така підсистема, стани якої можна подати у вигляді розподілених числових полів, вимірюваних або обчислюваних значень певних параметрів, які характеризують перебіг у різних середовищах фізичних, фізико-хімічних, біологічних та інших процесів та зміну пов'язаних із цими процесами ресурсів. Приклад такої підсистеми — повітряне середовище промислового регіону, ставки-охолоджувачі потужних електростанцій, водні шари тощо у їх взаємодії (рис. 3.3). Поведінку цієї підсистеми повністю визначає адекватний математичний опис у вигляді, наприклад, систем диференціальних або алгебричних рівнянь.

Еколого-організаційна підсистема ЕЕС. Це така підсистема, опис якої у вигляді деяких числових полів недостатній (через наявність характеристик, які неможливо виміряти або обчислити). При цьому потрібні додаткові знання для семантичного аналізу наявної інформації (зокрема якісної, вербальної), отриманої від людини. Прикладами таких систем є адміністративні системи управління у сільському господарстві, на транспорті у промисловості тощо. Приклад взаємодії елементів еколого-організаційної підсистеми ЕЕС наведено на рис. 3.4.



Рис. 3.3. Приклад взаємодії елементів еколого-технологічної підсистеми ЕЕС



Рис. 3.4. Приклад взаємодії елементів еколого-організаційної підсистеми ЕЕС

До складу еколого-організаційної підсистеми ЕЕС входять органи координації та управління зрощувальними системами ЕЕС, електроенергетичними комплексами, промисловими джерелами забруднень тощо. Для такої підсистеми характерна наявність різномірної інформації, яка циркулює всередині їх.

3.2. Характеристика рівнів задач, які розв'язуються під час системного дослідження складних формалізованих систем

Розглянемо комплекс задач аналізу СФС і прийняття рішень, що визначають їх поведінку. У результаті систематизації цих взаємозалежних задач можна одержати чотирирівневу ієрархічну структуру (рис. 3.5) [169].

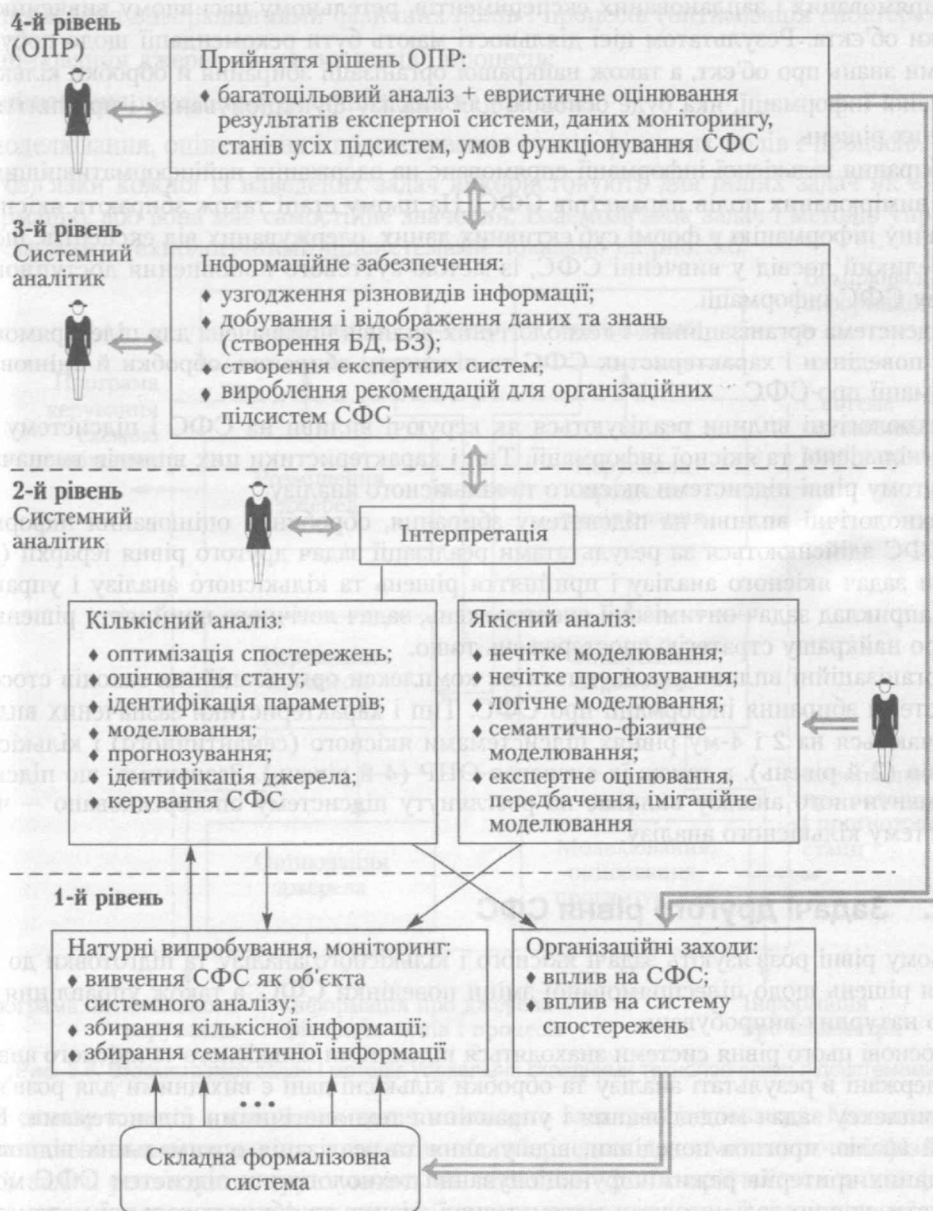


Рис. 3.5. Системний аналіз СФС та прийняття рішень щодо їх функціонування

3.2.1. Задачі першого рівня СФС

На цьому рівні вивчають СФС як об'єкт системного аналізу, на підставі чого розв'язують задачі збирання, обробки та оцінювання інформації про СФС, а також задачі оперативного і технологічного впливу на процеси одержання інформації та впливи на СФС.

Вивчення СФС як об'єкта системного аналізу має на меті одержати основні теоретичні знання про об'єкт. Їх можна одержати, вивчивши фізико-хімічні, економічні, соціальні та інші процеси, що лежать в основі функціонування СФС, завдяки проведенню цілеспрямованих і запланованих експериментів, ретельному пасивному вивченню поведінки об'єкта. Результатом цієї діяльності мають бути рекомендації щодо побудови системи знань про об'єкт, а також найкращої організації збирання й обробки кількісної та якісної інформації, яка буде основою для аналізу функціонування і прийняття необхідних рішень.

Збирання кількісної інформації спрямоване на одержання найінформативніших вибірок вимірюваних полів параметрів СФС. На цьому етапі також збирають якісну семантичну інформацію у формі суб'єктивних даних, одержуваних від експертів, що мають великий досвід у вивченні СФС, із метою суттєвого поповнення доступної для аналізу СФС інформації.

Підсистема організаційних і технологічних впливів призначена для цілеспрямованої зміни поведінки і характеристик СФС та підсистем збирання, обробки й оцінювання інформації про СФС.

Технологічні впливи реалізуються як керуючі впливи на СФС і підсистему збирання кількісної та якісної інформації. Тип і характеристики цих впливів визначають на другому рівні підсистеми якісного та кількісного аналізу.

Технологічні впливи на підсистему збирання, обробки й оцінювання інформації про СФС здійснюються за результатами реалізації задач другого рівня ієрархії (комплекси задач якісного аналізу і прийняття рішень та кількісного аналізу і управління), наприклад задач оптимізації спостережень, задач логічного прийняття рішень, задач про найкращу стратегію спостережень тощо.

Організаційні впливи реалізуються як комплекси організаційних заходів стосовно підсистеми збирання інформації про СФС. Тип і характеристики зазначених впливів визначаються на 2 і 4-му рівнях підсистемами якісного (семантичного) і кількісного аналізів (2-й рівень), а також їх визначає ОПР (4-й рівень). Зазначимо, що підсистема семантичного аналізу впливає на розглянуту підсистему опосередковано – через підсистему кількісного аналізу.

3.2.2. Задачі другого рівня СФС

На цьому рівні розв'язують задачі якісного і кількісного аналізу та підготовки до прийняття рішень щодо цілеспрямованої зміни поведінки СФС, а також управління системою натурних випробувань.

В основі цього рівня системи знаходяться підсистеми кількісного та якісного аналізу.

Одержані в результаті аналізу та обробки кількісні дані є вихідними для розв'язання комплексу задач моделювання і управління технологічними підсистемами. Кількісний аналіз, прогноз поведінки, відшукання та реалізація оптимальних відповідно до заданих критеріїв режимів функціонування технологічних підсистем СФС можна виконати, наприклад методами математичної фізики та обчислювальної математики з урахуванням стохастичних факторів.

Підсистема кількісного аналізу призначена для проведення повномасштабного експерименту над СФС із метою підготовки до прийняття рішень щодо цілеспрямованої зміни її поведінки.

Приклади основних задач, що розв'язуються цією підсистемою для фізичних полів і процесів, такі [7, 8, 52–55, 68, 148, 150, 169, 177, 207]:

- ◆ розміщення (проектування) джерел фізичних полів і процесів;
- ◆ управління фізичними полями і процесами;
- ◆ управління вимірюваннями фізичних полів і процесів (оптимізація спостережень);
- ◆ оцінювання джерел фізичних полів і процесів;
- ◆ оцінювання параметрів фізичних полів і процесів;
- ◆ моделювання, оцінювання і прогнозування станів фізичних полів і процесів.

Розв'язки кожної із наведених задач використовують для інших задач як вихідну інформацію, або вона має самостійне значення. Взаємозв'язок задач і методів управління складними технологічними підсистемами показано на рис. 3.6.



Рис. 3.6. Взаємозв'язок задач і методів управління складними технологічними підсистемами

В основу кожної з наведених задач покладено задачу моделювання. Методологічно всі зазначені задачі зводяться до прямих або обернених задач математичної фізики.

Ці задачі розв'язують, ґрунтуючись на таких методах: теорії математичної фізики; теорії оптимального управління розподіленими системами; теорії розподіленої калманівської фільтрації; методах групового врахування аргументів; розподілу і дуальності;

різних скінченнорізницевих та скінченноелементних методах обчислювальної математики тощо.

Очевидно, що наведені задачі кількісного аналізу дуже складні. Для контролю коректності їх розв'язків зазвичай не можна використовувати точні математичні методи, скажімо, теореми існування та єдиності розв'язків для задач, що описуються диференціальними рівняннями, або апарат статистичного аналізу для статистичних моделей. Тому для «осмислювання» результатів розв'язання задач кількісного аналізу створюють підсистему якісного (семантичного) аналізу, яка дає змогу одержати результати на основі одночасного використання відповідного математичного апарату й експертного оцінювання.

У межах якісного аналізу розглядають такі основні групи задач:

- ◆ експертне оцінювання, передбачення, імітаційне моделювання;
- ◆ нечітке моделювання, оцінювання, прогнозування;
- ◆ логічне моделювання, логічне оцінювання;
- ◆ якісно-фізичне моделювання, оцінювання, вироблення рекомендацій щодо прийняття рішень.

Підсистема якісного аналізу «підживлюється» інформацією з БД першого рівня і передає інформацію на третій рівень — підсистемі інформаційного забезпечення прийняття рішень. Вироблені керуючі впливи передають на перший рівень через підсистему кількісного аналізу і управління. Крім того, наявна кількісна інформація, якій надано семантичний вигляд шляхом «розмивання» або зведення до предикатного вигляду, поряд із неформалізованою семантичною інформацією та інформацією про стан технологічних складових слугує основою для розв'язання задач моделювання організаційної підсистеми СФС і управління ними.

3.2.3. Задачі третього рівня СФС

На цьому рівні, який є програмно-технологічним інструментарієм для ОПР, виконують узгодження різномірної інформації кількісного і якісного характеру, добування і відображення знань і даних за допомогою відповідних БД і БЗ, створення експертних систем і вироблення рекомендацій для організаційних підсистем СФС. Слід зазначити, що принциповий недолік кількісних методів дослідження щодо організаційних підсистем СФС — це нездатність оперувати семантичними поняттями. Це означає, що інформація в організаційних підсистемах може мати як кількісне відображення, так і відображення у вигляді семантичних оцінок числових параметрів за допомогою значень лінгвістичних змінних, висловлювань тощо. При цьому відбувається узгодження зазначеної різномірної інформації і зведення її до одного вигляду.

Для розв'язання задачі узгодження і зведення інформації до одного вигляду її відображають у деякій універсальній формі за допомогою так званих *лінгвістичних змінних* (ЛЗ) або предикатів [68–70, 188, 189, 192]. Отриману в такому вигляді інформацію обробляють за допомогою спеціальних математичних методів моделювання, прогнозування, передбачення або управління, сформульованих у нечіткій постановці. Обробляючи інформацію, подану в універсальному вигляді, за допомогою зазначених методів, створюють БД і БЗ, що є основою експертних систем, які використовує людина для формування рішень на четвертому рівні ієрархічної структури (див. рис. 3.5).

3.2.4. Задачі четвертого рівня СФС

Стан СФС, відображений через відомі стани всіх технологічних та організаційних підсистем, є вихідним для прийняття рішень щодо функціонування СФС. При цьому власне рішення приймає ОПР, використовуючи:

- ♦ результати роботи експертної системи (третій рівень);
- ♦ результати роботи групи експертів, якій відомі рекомендації експертної системи (четвертий рівень);
- ♦ дані моніторингу, а також інформацію про стан усіх технологічних та організаційних підсистем;
- ♦ відомі ОПР або сформульовані ним цілі та умови функціонування СФС.

Рішення, прийняте ОПР, реалізують у СФС. При цьому можна оцінювати правильність прийнятого рішення.

3.3. Методи і засоби системного аналізу в дослідженні складних формалізованих задач

Проведений аналіз властивостей СФС і розгляд комплексів задач під час їхнього вивчення дає змогу визначити такі особливості:

- ♦ СФС містять значну кількість різномірних підсистем із багатьма взаємозв'язками — носіями інформації різного характеру;
- ♦ для прийняття рішень щодо цілеспрямованої зміни поведінки СФС потрібно розв'язати велику кількість взаємозалежних задач, використовуючи різні методи як кількісного й якісного аналізу, так і знань та досвіду людини;
- ♦ у дослідженнях СФС має місце фактор невизначеності.

Ці особливості зумовлюють використання для дослідження СФС методів і засобів системного аналізу.

Під системним аналізом СФС слід розуміти процес застосування математичних, організаційних і методологічних засобів, призначених для прийняття рішень у СФС за наявності суттєвих ризиків різної природи, за існування багатьох різних і часто суперечливих критеріїв та цілей і з урахуванням суттєвої невизначеності на різних етапах вироблення рішень. Щодо методів розв'язання задач системного аналізу СФС, наведених на рис. 3.5, то їх можна звести в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Основні методи, які використовують для розв'язання задач системного аналізу СФС

Рівень аналізу	Проблема	Розв'язання задач	Метод розв'язання
1	Натурні випробування Моніторинг та обробка вимірних даних	Оцінювання параметрів випадкових процесів і полів Класифікація і зниження розмірності даних Статистичне прогнозування Імовірнісні моделі фізичних полів	Стійке (робастне) статистичне оцінювання Багатовимірний статистичний аналіз (факторний, кластерний, розщеплення сумішей імовірностей розподілів тощо) Адаптивне експоненціальне згладжування, аналіз трендів, ковзна медіана, ковзне візороване середнє

Таблиця 3.2 (продовження)

Рівень аналізу	Проблема	Розв'язання задачі	Метод розв'язання
2	Кількісний аналіз	Оптимізація спостережень Оцінювання станів Ідентифікація параметрів Математичне моделювання Прогнозування поведінки процесу або поля	Методи теорії аналізу статистичних величин Метод мінімізації матриці коваріації оптимального фільтра Калмана Метод мінімізації матриці коваріації субоптимального фільтра Калмана Модифікований фільтр Калмана Субоптимальний фільтр Калмана Метод градієнтної фільтрації Метод групового врахування аргументів Метод спряжених функцій Метод умовного розділення Метод спільного оцінювання параметрів і станів Модифікації методу групового врахування аргументів Прямі методи обчислювальної математики Ітераційні методи Методи скінчених елементів і скінчених різниць Метод спряжених функцій
	Якісний аналіз	Визначення характеристик джерела поля	
3	Інформаційне забезпечення прийняття рішень	Нечітке моделювання, прогнозування, прийняття рішень Логічні методи моделювання і прийняття рішень Якісно-фізичні методи моделювання і прийняття рішень Створення БД і БЗ Експертні системи Створення системного і прикладного програмного забезпечення	Теорія нечітких множин Нечітка логіка Нечіткі методи теорії управління Нечіткі методи теорії прийняття рішень Обчислення предикатів Автоматичне доведення теорем Методи подання знань Методи штучного інтелекту Спеціальні методи логічного виведення Спеціальні методи подання знань Обчислення предикатів Методи добування знань Методи подання знань і даних Логічне виведення
4	Прийняття рішень ОПР	Багатоцільовий аналіз Засоби штучного інтелекту Евристичні підходи Людино-машинні комплекси	Ігрові методи Методи прийняття рішень Мережні методи Методи штучного інтелекту Методи аналізу ризиків

Коротко розглянемо методи і засоби, які використовують для системного аналізу СФС на кожному рівні ієрархічної структури (див. рис. 3.5).

3.3.1. Методи і засоби обробки даних натурних спостережень для задач першого рівня

Кількісні дані, що визначають розміри, життєвий цикл і структуру всіх динамічних об'єктів, утворених зміною станів досліджуваних середовищ, можна одержати тільки завдяки натурним спостереженням.

Натурні спостереження здійснюють, організувавши систему заходів щодо контролю за станом досліджуваних середовищ — моніторинг. Ще 20 років тому моніторинг зазвичай проводили безпосереднім вимірюванням за допомогою різних датчиків. Однак поява і розвиток штучних супутників Землі (ШСЗ), Інтернету та сучасних швидкодійних обчислювальних машин сприяли розвитку методів і засобів моніторингу. Сьогодні дуже часто моніторинг реалізують тріадою ШСЗ — ЛІТАК — КОРАБЕЛЬ або ШСЗ — ЛІТАК — АВТОМОБІЛЬ. Значного розвитку також набули методи дистанційних спостережень (вимірювань).

Дані, одержані у процесі вимірювань, обробляють із використанням багатовимірного статистичного аналізу (факторного аналізу, методу головних компонент, класифікації та зниження розмірності даних, стійкого оцінювання і прогнозування) [179, 188, 189].

Технологічний ланцюжок проведення досліджень у цьому випадку має такий вигляд: визначення процесів і полів, їх класифікація, побудова прогностичної моделі. Перші дві ланки цього ланцюжка повинні фактично підготувати потрібну інформацію для встановлення прогностичних залежностей. Сама вихідна вимірювальна інформація не систематизована, має деяку надмірність, і її ще не можна розглядати як певну емпіричну модель середовища для побудови шуканих залежностей. Тому для алгоритмічного забезпечення досліджень потрібні *засоби стиснення вихідної інформації* і виділення вихідних ознак.

Одним із важливих класів методів обробки даних є *методи класифікації багатовимірних спостережень*, кінцева мета яких полягає у формуванні однорідних за своїми ознаками груп спостережень, що максимально різняться зовнішніми характеристиками. Це — *методи робастної статистики* і *бутстреп-методи*. Загальне призначення таких методів полягає у подоланні зміщеності оцінок імовірнісних характеристик досліджуваних вибірок даних, що відкриває перспективу їх використання для одержання стійких оцінок значень порогів класифікації.

Важливим класом методів обробки результатів спостережень є *алгоритми прогнозування*, які дають змогу передбачати поведінку досліджуваних даних. Зазвичай це методи короткострокового і середньострокового прогнозування. У цьому сенсі становить інтерес розроблення *адаптивних методів експоненціального згладжування*, які дають змогу певною мірою зняти проблему вибору трьох основних параметрів згладжування: константи згладжування, початкового рівня згладжування і початкового моменту згладжування (довжини бази згладжування). Перспективним методом прогнозування є також *синхронний кореляційний аналіз*, що дає змогу враховувати стохастичні взаємозв'язки всіх видів кореляційних показників: взаємних, часткових і множинних коефіцієнтів (функцій) кореляції.

Це пов'язано із тим, що у практиці аналізу натурних даних можлива поява невідзначеностей, а саме: якщо значення однієї сукупності даних корельовані зі значеннями

іншої сукупності, то це може лише відображати той факт, що вони обидва корельовані зі значеннями деякої третьої сукупності.

Зазначений метод аналізу дає змогу зняти таку невизначеність.

Розглянуті задачі і методи аналізу вимірювальних даних дають можливість сформувати структуру інформаційного забезпечення досліджень СФС. Можна виділити основні ланки такої структури.

1. Програмно-апаратні комплекси, базовані на рухомих носіях, які забезпечують автоматизоване збирання, збереження, оперативну обробку інформації та оптимальне управління її збиранням.
2. Бази вимірювальних даних для зберігання і колективного використання великих масивів різнорідної інформації.
3. Розвинене програмне забезпечення у вигляді пакетів прикладних програм, які дають змогу реалізувати статистичний і структурний аналіз даних із банку й знаходити залежності.
4. «Математичний полігон» (база моделей), що дає можливість на основі максимально повних динамічних моделей, описуваних, наприклад, рівняннями математичної фізики, здійснювати обчислювальний експеримент щодо розрахунку досліджуваних середовищ.
5. Експертні системи для проведення аналізу ситуацій і вироблення прогностичних рішень.

Зазначимо, що 3–5 блоки людино-машинної системи можна об'єднати у так звану моделюючу мережу.

3.3.2. Математичні методи кількісного аналізу СФС другого рівня

Взаємозв'язок задач кількісного аналізу технологічних підсистем СФС показано структурною схемою (див. рис. 3.6). Для розв'язання поданих задач передусім потрібно математично описати розглянуті підсистеми. Тому коротко охарактеризуємо основні підходи до математичної формалізації цих задач.

Розглянемо чотири підходи до опису технологічних підсистем (рис. 3.7), що ґрунтуються на таких підходах [169]:

- ♦ методах математичної фізики;
- ♦ статистичних методах;
- ♦ методах, які базуються на теорії подібності;
- ♦ прямих та експериментальних методах дослідження.

Класифікацію моделей, що ґрунтуються на фізико-математичному і статистичному підходах, наведено на рис. 3.8, 3.9. Так, на рис. 3.8 зображено класифікацію математичних моделей, що ґрунтуються на використанні рівнянь математичної фізики для широкого класу процесів нестационарної дифузії і тепломасоперенесення. На рис. 3.9 подано класифікацію моделей, що ґрунтуються на статистичному підході. Класифікацію моделей на основі просторово-часових характеристик подано на рис. 3.10.

Нарешті, класифікувати моделі можна відповідно до системи координат Ейлера або Лагранжа (рис. 3.11).



Рис. 3.7. Підходи до опису технологічних підсистем

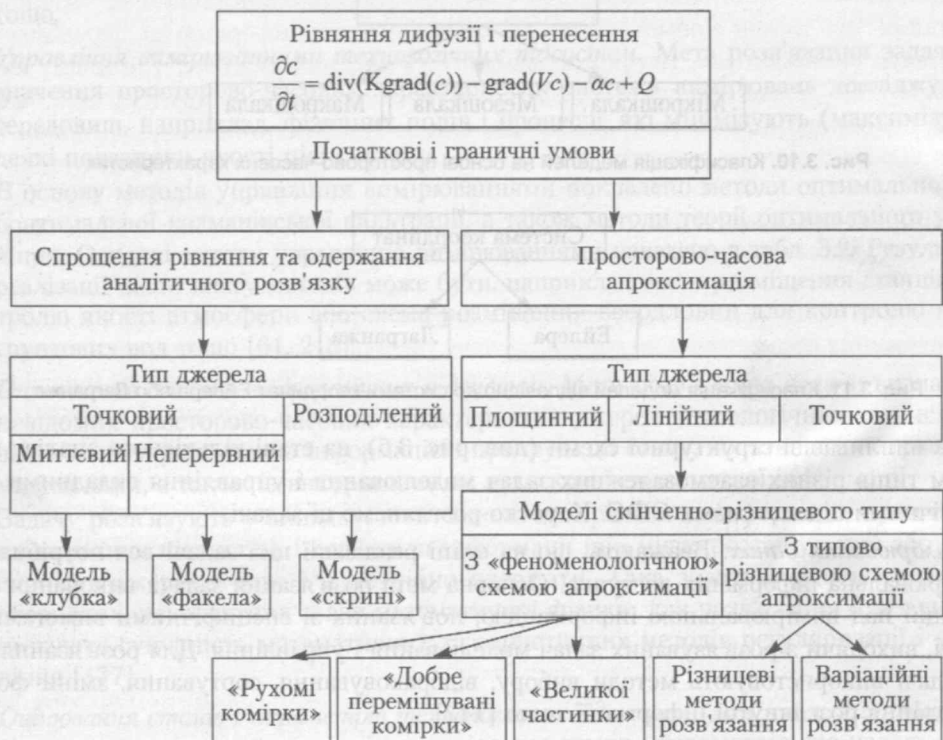


Рис. 3.8. Класифікація моделей, що ґрунтуються на фізико-математичному підході



Рис. 3.9. Класифікація моделей, що ґрунтуються на статистичному підході



Рис. 3.10. Класифікація моделей на основі просторово-часових характеристик

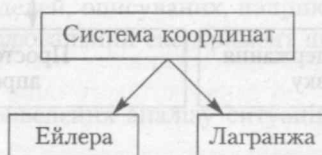


Рис. 3.11. Класифікація моделей відповідно до системи координат Ейлера або Лагранжа

Як впливає зі структурної схеми (див. рис. 3.5), на етапі кількісного аналізу маємо сім типів різних взаємозалежних задач моделювання і управління складними технологічними підсистемами СФС. Коротко розглянемо ці задачі.

1. *Вимірювання даних.* Вважають, що на етапі реалізації цієї задачі вся потрібна вимірювальна інформація доступна. Основна мета розв'язання задачі: виконання операцій над вимірювальною інформацією, пов'язаних зі специфічними вимогами до неї, виходячи з розв'язуваних задач моделювання і управління. Для розв'язання цієї задачі використовують методи вибору, відбраковування, сортування, зміни форми подання розглянутої інформації тощо [142].
2. *Розміщення (проектування) джерел середовищ (фізичних полів і процесів).* Мета розв'язання задачі: розміщення джерел фізичних полів і процесів із заданими характеристиками, які забезпечують мінімізацію (максимізацію) деяких критеріїв якості. Основні методи розв'язання цієї задачі наведено в табл. 3.2.

Суттєвий інтерес становить розв'язання задачі стосовно фізичних процесів і полів. Наприклад, для ЕЕС можна одержати оптимальний у сенсі мінімізації екологічних збитків проект розміщення нових підприємств, для нафтовидобувного комплексу — оптимальний щодо мінімізації виробничих витрат, графік зупинки продуктивних нафтових свердловин для планового ремонту тощо.

Інше практичне застосування цієї групи методів (див. табл. 3.2) — точкове управління фізичними процесами і полями, наприклад, розроблення програми оптимального нафтовидобутку завдяки відповідному впливу на нафтовий шар через увімкнення та вимкнення продуктивних свердловин.

3. *Управління технологічними підсистемами.* Мета розв'язання задачі: визначення керуючих впливів у заданих ділянках або точках просторової області, які забезпечують їх переведення з одного стану в інший та мінімізують (максимізують) деякі показники якості.

Ця задача найбільш розповсюджена та вивчена серед задач системного аналізу. Основні методи реалізації управління розглянутими підсистемами наведено в табл. 3.2. Підґрунтям цього класу методів є теорія оптимального управління для систем із розподіленими і зосередженими параметрами. Реалізуючи методи управління можна одержати, наприклад, для ЕЕС програми цілеспрямованої зміни інтенсивності шкідливих викидів в атмосферу і водойми з метою мінімізації екологічного збитку тощо.

4. *Управління вимірюваннями технологічних підсистем.* Мета розв'язання задачі: визначення просторово-часових характеристик системи вимірювань досліджуваних середовищ, наприклад, фізичних полів і процесів, які мінімізують (максимізують) деякі показники якості цієї системи.

В основу методів управління вимірюваннями покладено методи оптимальної і субоптимальної калманівської фільтрації, а також методи теорії оптимального управління. Основні методи управління вимірюваннями наведено в табл. 3.2. Результатом реалізації цього класу методів може бути, наприклад, план розміщення станцій контролю якості атмосфери або схема розміщення свердловин для контролю якості ґрунтових вод тощо [61, 218].

5. *Оцінювання джерел технологічних підсистем.* Мета розв'язання задачі: визначення невідомих просторово-часових характеристик джерел технологічних підсистем за відомою вимірювальною інформацією про функції стану, початковими і граничними умовами, а також із використанням додаткової евристичної інформації.

Задачу розв'язують у випадку, коли відома вимірювальна інформація про стан досліджуваних підсистем, і тоді, коли інформації про місце розташування або інтенсивність джерел немає і її потрібно одержати. Така задача зводиться до класу обернених, некоректних задач математичної фізики, для розв'язання яких використовують сукупність математичних та евристичних методів регуляризації і управління [177].

6. *Оцінювання станів і параметрів технологічних підсистем* (див. табл. 3.2). Мета розв'язання задачі: одержання оцінок невідомих станів і параметрів, що надають мінімуму (максимуму) деяким показникам якості оцінювання, за відомими способами управління, початковими і граничними умовами, а також на підставі вимірювальної інформації.

Задача належить до обернених задач математичної фізики. Методи її вирішення ґрунтуються на теорії ідентифікації та оптимальної фільтрації в загальному випадку просторово розподілених фізичних (детермінованих і стохастичних) процесів та полів. Для розв'язання такої задачі потрібна задана структура моделі і вимірювальної інформації [100, 150, 161, 162]. Для стохастичних обернених задач використовують методи нестроого розділення і дуальності [3, 142, 179, 188, 189, 218].

7. *Моделювання і прогнозування станів технологічних підсистем* (див. табл. 3.2). Мета розв'язання задач: одержання інформації про стан досліджуваних середовищ у наперед заданому інтервалі часу за відомими способами управління, початковими і граничними умовами, а також іншою інформацією.

Задачі належать до класу прямих задач математичної фізики. Підходи до їх розв'язання ґрунтуються на широкому арсеналі методів обчислювальної математики для диференціальних рівнянь з частинними похідними і алгебричних регресійних моделях [2, 52, 218, 267].

Розв'язок кожної з наведених задач використовують інші задачі як вихідну інформацію або він має самостійне значення.

3.3.3. Методи якісного аналізу СФС другого і третього рівнів

Цілісний математичний опис поведінки СФС, що містять організаційні та технологічні підсистеми, між якими є обмін різною за своєю природою інформацією, передбачає використання різноманітних методів кількісного та якісного аналізу. При цьому багато елементів СФС можна успішно описати кількісними методами, що ґрунтуються, наприклад, на рівняннях математичної фізики або алгебричних регресійних співвідношеннях. Однак кількісні методи, які добре себе зарекомендували для опису технологічних підсистем, через низку недоліків не можна використати для опису організаційних підсистем СФС. Це пов'язано з тим, що інформація в організаційних підсистемах може мати не лише кількісне відображення, але й відображення у вигляді знань — правил, евристик, наборів ранжованих альтернатив, семантичних оцінок числових параметрів та інших, які описують за допомогою значень лінгвістичних змінних, висловлювань тощо.

Узгодження або зведення до одного вигляду такої різномірної інформації — одна з основних задач системного аналізу насамперед щодо організаційних підсистем (рис. 3.12).

Найчастіше використовують універсальне відображення інформації у вигляді значень лінгвістичних змінних (ЛЗ) або предикатне відображення [206, 207, 214–216, 222, 223, 229, 230].

Лінгвістичні змінні в цьому разі — не лише апарат для оперування невизначеностями, вони дають можливість описати сукупність якісно однорідних станів системи (у цьому сенсі ЛЗ близькі до поняття «вузлових точок міри» як таких, що характеризують момент нагромадження кількісних змін в об'єкті і переводять цей об'єкт з одного якісного стану в інший). Кількісні оцінки стають «розмитими», їм у відповідність ставлять деякі нечіткі підмножини. При цьому «фільтрують» невизначеності. Слід зазначити, що статистичну невизначеність можна розглядати як окремий випадок нечіткості, а отже, функції розподілу ймовірностей — як функції належності.

Інформацію, одержувану від експертів, слід подати у лінгвістичній формі, а імена ЛЗ уніфікувати для всіх видів інформації. У цьому разі кожний лінгвістичний оцінці експерта можна зіставити певну нечітку підмножину [230].

У предикатному відображенні всі види інформації розглядають як такі, що роблять істинним певний набір предикатів.

Узгоджену, уніфіковану інформацію використовують для розв'язання задач моделювання, прогнозування або управління організаційними підсистемами. При цьому зазвичай використовують логічні методи, що ґрунтуються на звичайному обчисленні предикатів, нечіткому обчисленні висловлювань і предикатів, логічних основах фізичних процесів, причинно-наслідковій логіці [215, 216, 223].

Якщо продукційні, семантичні, фреймові моделі знань, що базуються на звичайному обчисленні предикатів, а моделі знань — на нечіткому (*modus ponens*) або таблицях розв'язків, досить добре вивчено з теоретичної точки зору і потребують технічних удосконалень як щодо методологічного і програмного забезпечення, так і щодо збільшення

потужностей обчислювальної техніки, то методи якісної фізики, які ґрунтуються на логіці фізичних процесів і причинно-наслідкових зв'язків, є предметом теоретичних досліджень [210, 214, 215, 222].

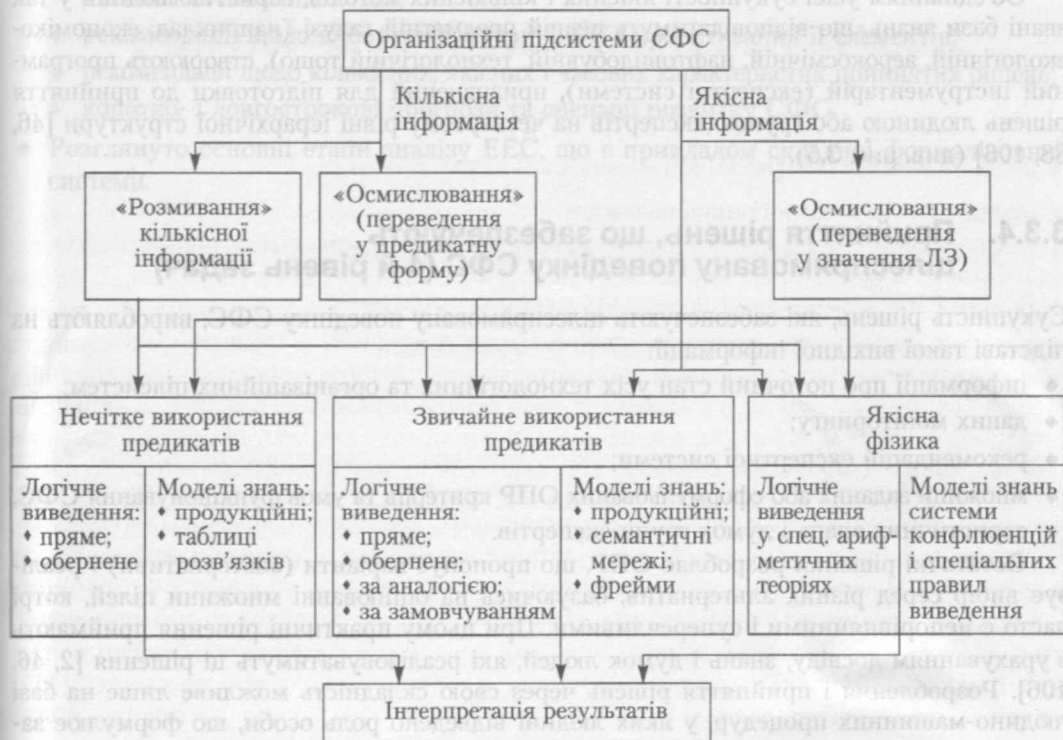


Рис. 3.12. Задачі системного аналізу для організаційних підсистем СФС і методи їх розв'язання

Для організаційних підсистем СФС, в основі яких лежать фундаментальні фізико-хімічні закони або такі процеси виробництва, споживання і передачі ресурсів, які можна звести до цих законів хоча б формально, використовують методи якісної фізики.

У цьому разі для відображення знань застосовують систему так званих *якісних диференціальних рівнянь* (конфлюєнцій). *Конфлюєнція* — це відношення, що пов'язує між собою подані в семантичному вигляді такі параметри формалізованих систем, які безпосередньо впливають один на одного, тобто відображають ознаки безпосередніх причин і наслідків. Для опису характеру цих впливів вводять спеціальні арифметики над семантичними змінними, котрі, у свою чергу, описують деякі якісно різні стани системи. Моделювання поведінки системи здійснюють збудженням усіх причинно-наслідкових ланцюжків. Математично це реалізують логічним виведенням у формальних арифметиках якісних змінних за допомогою деяких несуперечливих правил виведення.

Є й інші підходи, пов'язані з напівкількісним моделюванням, де у процесі логічного висновку визначають порядки шуканих числових значень [206, 222, 229, 230] або в дослідженні поведінки систем штучним зведенням збурювальних факторів до їхніх граничних значень. В останньому випадку в основу системного аналізу СФС покладено нестандартний аналіз, що оперує інфінітними числами, тобто поняттями нескінченно малих і нескінченно великих величин [206]. Правила виведення в такій системі відображають властивості цих інфінітних чисел.

Спільним для всіх зазначених підходів є логіка здорового глузду і певний практичний досвід людини (евристики людини), що дають змогу відкидати синтаксично неправильні розв'язки, які суперечать умовам фізичної задачі.

Об'єднанням усієї сукупності якісних і кількісних методів, евристик людини у так звані бази знань, що відповідатимуть певній предметній галузі (наприклад, економіко-екологічній, аерокосмічній, нафтовидобувній, технологічній тощо), створюють програмний інструментарій (експертні системи), призначений для підготовки до прийняття рішень людиною або групою експертів на четвертому рівні ієрархічної структури [46, 88, 106] (див. рис. 3.5).

3.3.4. Прийняття рішень, що забезпечують цілеспрямовану поведінку СФС (4-й рівень задач)

Сукупність рішень, які забезпечують цілеспрямовану поведінку СФС, виробляють на підставі такої вихідної інформації:

- ♦ інформації про поточний стан усіх технологічних та організаційних підсистем;
- ♦ даних моніторингу;
- ♦ рекомендацій експертної системи;
- ♦ множини заданих або сформульованих ОПР критеріїв та умов функціонування СФС;
- ♦ евристичних знань і думок групи експертів.

Остаточні рішення розробляє ОПР, що пропонує варіанти (альтернативи) і реалізує вибір серед різних альтернатив, базуючись на оцінюванні множини цілей, котрі часто є непорівнянними і суперечливими. При цьому практичні рішення приймають з урахуванням досвіду, знань і думок людей, які реалізовуватимуть ці рішення [2, 46, 106]. Розроблення і прийняття рішень через свою складність можливе лише на базі людино-машинних процедур, у яких людині відведено роль особи, що формулює задачу, аналізує результати і приймає остаточне рішення, а ЕОМ — роль складного інструмента, який реалізує всю сукупність описаних раніше методів і алгоритмів.

В основу методології розв'язання задач цього рівня ієрархії покладено системний підхід, за яким СФС розглядають як деяку множину взаємозалежних підсистем, що є неподільним цілим.

Висновки

- ♦ Розглянуто методи і підходи щодо дослідження СФС, які дозволяють розв'язувати весь комплекс задач, пов'язаних із моделюванням, прогнозуванням і виробленням рішень, які дають змогу цілеспрямовано змінювати і контролювати їх поведінку.
- ♦ На основі відображення СФС як об'єктів дослідження теорії системного аналізу наведено основні особливості і властивості цих систем. Подано характеристики рівнів задач, розв'язуваних під час дослідження СФС, основні методи і засоби системного аналізу, які використовують для розв'язання цього класу задач.
- ♦ Із застосуванням теорії системного аналізу для дослідження СФС одержано:
 - ♦ знання про СФС, що є підґрунтям усіх математичних методів системного аналізу, мають самостійне безпосереднє застосування в експертних системах і є базою для вивчення і цілеспрямованої зміни поведінки складних процесів різної природи, зокрема фізико-хімічних, соціальних, економічних та інших;

- ♦ рекомендації щодо застосування різних методів для різних ситуацій і умов функціонування СФС;
 - ♦ можливість планування комплексу робіт зі створення складних організаційних і технологічних підсистем;
 - ♦ рекомендації щодо вибору структури СФС і проектування її елементів;
 - ♦ рекомендації щодо кількісних, якісних і часових характеристик прийнятих рішень;
 - ♦ коротко- і довгострокові прогнози та сценарії розвитку СФС.
- ♦ Розглянуто основні етапи аналізу ЕЕС, що є прикладом складної формалізованої системи.

Розділ 4

Розкриття невизначеностей у задачах системного аналізу

- ♦ Задачі і методи розкриття невизначеності цілей
- ♦ Розкриття ситуаційної невизначеності
- ♦ Розкриття невизначеності в задачах взаємодії стратегій
- ♦ Розкриття невизначеності в задачах конфлікту стратегій
- ♦ Задачі й методи розкриття системної невизначеності

Для класу формалізованих задач системного аналізу важливою проблемою є розкриття невизначеностей. Насамперед зазначимо, що невизначеність — типова властивість практичних задач системного аналізу. Це зумовлено різноманітністю цілей, властивостей і особливостей об'єктів системного аналізу. Прикладні задачі, які не містять невизначеностей, є скоріше винятком, ніж правилом. Адекватний опис проблеми зазвичай містить різного типу невизначеності, що відображає той природний стан, у якому перебуває дослідник. Будь-яке його знання завжди є відносно неповним і неточним. Це безпосередньо впливає з теореми Геделя про неповноту [112] та еволюцію розвитку людського пізнання. Якби все було відомо достовірно, повно і точно про процеси, фактори та еволюцію Всесвіту, то припинився б розвиток цивілізації.

Формально задачі розкриття невизначеностей у системному аналізі та теорії дослідження операцій багато в чому схожі. Проте є й принципові відмінності у підходах до формалізації, розв'язання і реалізації на практиці. Вони полягають насамперед у тому, що задачі в теорії дослідження операцій мають більший ступінь формалізації, оскільки в них зазвичай апріорі задано всі обмеження, припущення, вихідні дані та математичні моделі. У задачах системного аналізу частину обмежень, припущень і вихідних даних наперед не вивчено. Інформацію про них уточнюють у процесі формалізації та розв'язання задачі.

Найпоширенішими на практиці є невизначеності цілей, ситуацій, конфліктів. У короткому змістовному формулюванні суть цих невизначеностей зводиться до такого.

- ♦ *Невизначеність цілей* — це невизначеність вибору і досягнення цілей у багатокритерійних задачах прийняття рішень.
- ♦ *Невизначеність знань про можливі ситуації* — це невизначеність впливу неконтрольованих факторів на процеси практичної діяльності (ситуаційна невизначеність).
- ♦ *Невизначеність конфліктів* — це невизначеність вибору цілей задумів і планів у процесі взаємодії партнерів або протидії конкурентів чи супротивників (інформаційна невизначеність конфліктів).

4.1. Задачі та методи розкриття невизначеності цілей

Насамперед розглянемо задачі розкриття невизначеності цілей. У загальному випадку під час дослідження об'єкта в цілому виникає потреба в узгодженні його цілей. При цьому для одних цілей оптимальні розв'язки відповідають мініимальному значенню відповідного критерію, а для інших — максимальному. Але деякою заміною змінних ці задачі легко звести до єдиного типу критеріїв й одного типу задач оптимізації. Їх можна розглядати як задачу багатокритерійної оптимізації [109]:

$$f_1(\bar{x}) \rightarrow \max_{\bar{x} \in D}, f_2(\bar{x}) \rightarrow \max_{\bar{x} \in D}, \dots, f_m(\bar{x}) \rightarrow \max_{\bar{x} \in D}. \quad (4.1)$$

Очевидно, що найкращим розв'язком задачі розкриття невизначеності буде таке значення $\bar{x}$, за якого умови (4.1) виконуються одночасно для всіх цільових функцій. Однак на практиці це нездійсненно, оскільки функції $f_k(\bar{x})$, $k = 1, 2, \dots, m$ різні за природою (у загальному випадку їх визначають критерії різної природи — фізичного, технічного, економічного чи іншого змісту). Тому екстремуму кожна функція досягає для свого значення $\bar{x}$, і майже неможливо знайти таке значення $\bar{x}^0$, за якого умови (4.1) виконуються одночасно для всіх цільових функцій. Звідси випливає висновок, що задача зводиться до знаходження такого значення $\bar{x}^0$, за якого забезпечуватиметься *раціональний компроміс заданих цілей*. Для знаходження раціонального компромісу застосовують два основні підходи. Суть першого підходу — виключити з аналізу заздалегідь неприйнятні варіанти розв'язків. Суть другого — використати прийоми й методи зведення багатоцільової задачі до типової задачі оптимізації з одним критерієм та розв'язати її.

4.1.1. Розкриття невизначеності цілей на підставі принципу Парето

Розглянемо спочатку перший підхід, у підґрунті якого лежить ідея, запропонована Парето: спробувати скоротити множину вихідних варіантів розв'язків виключенням з аналізу заздалегідь непридатних варіантів [109]. Цю ідею можна реалізувати так.

Припустимо, що вибрано вектор x , позначимо його як x^* . Робимо тепер інший вибір $\hat{x}$, що для всіх цільових функцій

$$f_i(\hat{x}) \geq f_i(x^*), \quad i = \overline{1, m}, \quad (4.2)$$

причому хоча б одна з нерівностей є строгою. Очевидно, що вибір $\hat{x}$ переважає x^* . Тому всі вектори x^* , для яких виконується умова (4.2), слід виключити з цього аналізу. Піддавати неформальному аналізу, зіставляти між собою треба ті вектори x^* , для яких не існує такого значення $\hat{x}$, що для всіх критеріїв задовольнятимуться нерівності (4.2). Множину всіх таких значень x^* називають *множиною Парето*, а вектор x^* — *неполіпшуваним вектором результатів (вектором Парето)*.

Розглянемо докладніше підхід до знаходження множини Парето.

Нехай відомий вектор $\bar{f}$ цільових функцій $f_i(x)$, заданих на множині D , у вигляді

$$\bar{f} = \{f_i(x) | i = \overline{1, m}; x \in D\};$$

$$D = \{x | x^- \leq x \leq x^+\}.$$

Існує така множина Γ граничних значень $\tilde{x} \in D$, що поділяє вихідну множину D на дві множини: Π і $\bar{D}$. Ця множина повинна задовольняти умови

$$\Pi \cup \bar{D} = D; \quad \Pi \cap \bar{D} = \emptyset. \quad (4.3)$$

Множина Π складається з таких значень $x_{k_1} \in D$, для яких для всіх $i = \overline{1, m}$ виконується умова $f_i(x_{k_1}) \geq f_i(x^*)$. Множину Π визначає співвідношення

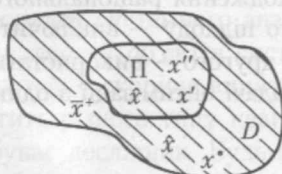
$$\Pi = \{x | x = x_{k_1}; x_{k_1} \in D; f_i(x_{k_1}) \geq f_i(x^*); i = \overline{1, m}\}. \quad (4.4)$$

Множина $\bar{D}$ складається з таких $x_{k_2} \in D$, для яких хоча б для однієї функції $f_i(x_{k_2})$ виконується умова $f_i(x_{k_2}) < f_i(x^*)$. Множину $\bar{D}$ описує таке співвідношення:

$$\bar{D} = \{x | x = x_{k_2}; x_{k_2} \in D; f_i(x_{k_2}) < f_i(x^*); i \in [1, m]\}.$$

Отже, вектор $x^* \in D$ — *неполіпшуваний вектор результатів*, а множина Π , що задовольняє умову (4.4) — *множина Парето*.

Завдяки умові (4.4) множина Γ — межа, що виділяє множину Парето з множини D . Відповідно до формули (4.3) множина $\bar{D}$ є підмножиною вихідної множини D , із якої виділено множину Парето Π : $\bar{D} = D \setminus \Pi$ (рис. 4.1). Тому всі варіанти розв'язків, що належать $\bar{D}$, виключають із розгляду.



D — вихідна множина
 Π — множина Парето

Рис. 4.1. Ілюстрація підходу до знаходження множини Парето

Приклад 1. Нехай потрібно виділити множину Парето в області $D \in [x^-, x^+]$ (рис. 4.2). Поділимо задану множину D на три області. Область D_1 — область x від x^- до x_1^0 , де x_1^0 — значення x , за якого $f_1(x)$ досягає максимуму

$$f_1(x_1^0) = \max_{x \in D} f_1(x), \quad x \in [x^-, x_1^0].$$

Область D_2 — область x від x_1^0 до x_2^0 , де x_2^0 — значення x , за якого $f_2(x)$ досягає максимуму

$$f_2(x_2^0) = \max_{x \in D} f_2(x), \quad x \in [x_1^0, x_2^0].$$

Область D_3 — область x від x_2^0 до x^+ .

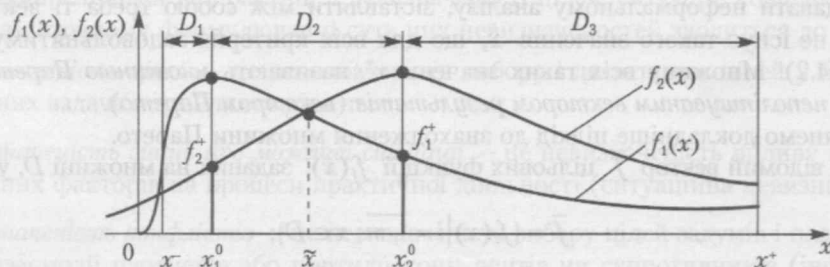


Рис. 4.2. Виділення множини Парето

Порівняємо області D_1 і D_2 . Для них маємо $f_2(x)|_{x \in D_1} < f_2(x)|_{x \in D_2}$, тобто значення функції $f_2(x)$ для будь-якого $x \in D_1$ менше, ніж значення $f_2(x)$ для будь-якого $x \in D_2$. Для $f_1(x)$ маємо $f_1(x)|_{x \in D_1} \leq f_1(x)|_{x \in D_2}$, тобто у деякому інтервалі області D_1 значення $f_1(x)$ порівнянні з її значеннями у деякому інтервалі області D_2 . Отже, область D_1 заздалегідь поступається області D_2 в сенсі цільової функції $f_2(x)$. Аналогічно для області D_3 маємо значення функції $f_1(x)$ для будь-якого $x \in D_3$ менше, ніж значення $f_1(x)$ для будь-якого $x \in D_2$ $f_1(x)|_{x \in D_3} < f_1(x)|_{x \in D_2}$. Однак для $f_2(x)$ маємо $f_2(x)|_{x \in D_3} \leq f_2(x)|_{x \in D_2}$, тобто значення $f_2(x)$ порівнянні у деякому інтервалі області D_3 з її значеннями у деякому інтервалі області D_2 , а отже, область D_3 заздалегідь поступається області D_2 в значенні цільової функції $f_1(x)$. Отже, з області D потрібно виключити області D_1 і D_3 , оскільки в них не виконується умова (4.2). Область D_2 відповідно до умови (4.2) є множиною Парето. Для неї виконуються обмеження:

$$f_1(x)|_{x \in D_2} \geq f_1^+; \quad f_2(x)|_{x \in D_2} \geq f_2^+.$$

У теорії прийняття рішень є принцип Парето, який стверджує, що раціональний розв'язок багатокритерійної задачі або раціональний компроміс у багатоцільовій задачі лежить серед x , що належать множині Парето. Однак принцип Парето не дає змогу виділити єдиний розв'язок. Він дозволяє лише звузити множину можливих альтернативних розв'язків. У розглянутому прикладі раціональний розв'язок потрібно шукати в області D_2 .

Слід зазначити, що питання про те, який розв'язок (або яке значення $x \in D_2$) раціональний, — залишається відкритим. Справді, задача знаходження раціонального компромісу має неформальний характер через вплив кількох факторів. *По-перше*, важливість різних цільових функцій може залежати від низки об'єктивних факторів. Наприклад, літак, призначений для робіт в умовах Арктики, буде за багатьма властивостями принципово відрізнятися від літака, зорієнтованого на функціонування за умов спекотного клімату. *По-друге*, важливість цільових функцій може залежати також від суб'єктивних факторів. Наприклад, в одному конструкторському бюро через сформовані традиції важливішою є швидкість літака, а в іншому — його вантажопідйомність. *По-третє*, вибір пріоритету цілей можуть визначати додаткові умови або обмеження. Наприклад, можна задати обмеження на вартість виробництва літака чи на сумарну вартість виробництва та експлуатації.

В усіх розглянутих випадках побудова множини Парето дозволяє одержати додаткову інформацію, що дає якісну оцінку під час зіставлення різних варіантів. Особа, яка приймає рішення, на підставі аналізу множини Парето може оцінити, як збільшення однієї цільової функції позначається на інших.

Із розглянутого прикладу випливає, що в точці x_1^0 має максимум $f_1(x)$, але мінімум — $f_2(x)$, у точці x_2^0 досягає максимуму $f_2(x)$ і мінімуму $f_1(x)$, у точці $\tilde{x}$ справедлива рівність $f_1(\tilde{x}) = f_2(\tilde{x})$. Який із цих варіантів кращий, визначає ОПР. Якщо ОПР вважає, що критерії рівнозначні, то раціональним буде варіант $\tilde{x}$, коли $f_1(\tilde{x}) = f_2(\tilde{x})$. Якщо важливіша $f_1(x)$, то, мабуть, раціональний розв'язок лежить в інтервалі $[x_1^0, \tilde{x}]$. Якщо важливіша $f_2(x)$, то раціональний розв'язок лежить в інтервалі $[\tilde{x}, x_2^0]$. Однак у двох останніх випадках певна міра переваги однієї функції над іншою залишається суб'єктивною мірою ОПР.

Кількісно міру переваги цілей прийнято характеризувати *коефіцієнтом важливості* кожної із розглянутих цілей. Введення таких коефіцієнтів дає змогу здійснити другий підхід до розкриття невизначеності цілей, який ґрунтується на зведенні багатоцільової

задачі до звичайних задач із одним критерієм. У цьому разі раціональний компроміс цілей визначає вибір ОПР коефіцієнтів важливості.

Розглянемо деякі найуживаніші методи зведення багатоцільової задачі до одноцільової.

4.1.2. Метод лінійної згортки

Суть цього методу полягає в тому, що замість m заданих цілей, описуваних функціями $f_i(x)$, $i = \overline{1, m}$, вводять одну узагальнену ціль, описувану функцією вигляду

$$F(x) = \sum_{i=1}^m c_i f_i(x), \quad (4.5)$$

де c_i , $i = \overline{1, m}$ — коефіцієнти важливості вихідних цілей, що відображають міру надової переваги ОПР. Покладають, що коефіцієнти c_i нормовані тим чи іншим способом. Зазвичай застосовують нормування у формі

$$\sum_{i=1}^m c_i = 1. \quad (4.6)$$

Зазначимо, що для позитивно визначених функцій $f_i(x) > 0$, $i = \overline{1, m}$, що відповідає практичним задачам, замість адитивної функції $F(x)$ можна використовувати мультиплікативну функцію $F_M(x)$ вигляду

$$F_M(x) = \prod_{i=1}^m (f_i(x))^{c_i}. \quad (4.7)$$

Прологарифмувавши ліву і праву частини рівності (4.7) і ввівши позначення

$$\begin{aligned} \lg F_M(x) &= \hat{F}(x); \\ \lg f_i(x) &= \hat{f}_i(x), \end{aligned}$$

одержуємо вираз адитивного типу $\hat{F}(x) = \sum_{i=1}^m c_i \hat{f}_i(x)$. Унаслідок згортки (4.5), (4.7) задачу розкриття невизначеності цілей, подану у вигляді багатоцільової задачі оптимізації $f_i(x) \rightarrow \max$, $i = \overline{1, m}$, зводимо до одноцільової стандартної задачі математичного програмування $F(x) \rightarrow \max$ за наявності обмежень, зумовлених вихідними даними або ТЗ.

Цей метод досить широко застосовують на практиці. Однак він має такі принципові недоліки.

- ♦ Вибір коефіцієнтів важливості c_i значною мірою суб'єктивний, а отже, не виключені принципові помилки і прорахунки у їх виборі.
- ♦ Розв'язання оптимізаційної задачі для $F(x)$ не означає, що досягнуто раціональних значень для всіх заданих цілей. У згортках (4.5) і (4.7) недостатнє значення однієї цільової функції може бути компенсоване збільшенням значень іншої цільової функції. Більше того, змінюючи значення коефіцієнтів важливості, можна одержати серію різних значень x , для яких функція $F(x)$ має те саме значення.

Отже, фактично невизначеність цілей у такій постановці задачі не буде розв'язана необхідною для практики мірою, оскільки згортка не дає однозначного раціонального варіанта значень x . Власне кажучи, неоднорідність цілей зводиться до неоднорідності коефіцієнтів важливості, оскільки розв'язок одержаної одноцільової задачі багатозначний, який визначає, у кращому випадку, множина Парето.

4.1.3. Метод технічних обмежень

Деякі методи розкриття невизначеностей цілей ґрунтуються на використанні апріорної інформації про задані цілі. Наприклад, у задачах проектування і планування часто задають певні нормативні обмеження зверху (загальна вартість, допустимі габарити, вага тощо) або обмеження знизу деяких технічних характеристик і показників (наприклад, показників надійності, міцності, довговічності тощо). Як обмеження зверху, так і обмеження знизу можна звести до однієї з форм.

Нехай задано обмеження:

$$\begin{cases} f_i(x) \geq f_i^*(x), & i = \overline{1, m_0}, \\ f_i(x) \leq f_i^*(x), & i = \overline{(m_0 + 1), m}. \end{cases} \quad (4.8)$$

Для спрощення розв'язання задачі (4.8) можна записати, виходячи тільки з одного виду обмежень: обмеження зверху або обмеження знизу. Наприклад, обмеження зверху:

$$\begin{cases} -f_i(x) \leq -f_i^*, & i = \overline{1, m_0}, \\ f_i(x) \leq f_i^*, & i = \overline{(m_0 + 1), m} \end{cases}$$

або обмеження знизу:

$$\begin{cases} f_i(x) \geq f_i^*, & i = \overline{1, m_0}, \\ -f_i(x) \geq -f_i^*, & i = \overline{(m_0 + 1), m}. \end{cases}$$

Припустимо, що апріорно (наприклад, у ТЗ) введено на цільові функції обмеження вигляду

$$f_i(x) \leq f_i^*, \quad i = \overline{1, m} \quad (4.9)$$

або

$$f_i(x) \geq f_i^*, \quad i = \overline{1, m}. \quad (4.10)$$

За цих обмежень потрібно забезпечити

$$f_i(x) \rightarrow \max, \quad i = \overline{1, m}. \quad (4.11)$$

Для такої постановки можливі різні варіанти розкриття невизначеностей цілей завдяки зведенню багаточільової задачі до стандартної одноцільової.

Варіант 1. Уведемо для кожного значення x функцію

$$F_l(x) = \min_{i \in [1, m]} \frac{f_i(x)}{f_i^*} \quad (4.12)$$

і будемо шукати такі значення x^0 , що відповідають умові $F_1(x^0) = \max_{x \in D} F_1(x)$. Тут D – допустима багатовимірна область зміни вектора x , задана, наприклад, за допомогою конструктивних або технологічних обмежень. За такого формулювання задачі гарантовано, що у найгіршому випадку, який відповідає $\min_{i \in [1, m]} f_i(x)/f_i^*$, буде забезпечено максимальне значення $F_1(x)$. Така задача забезпечення є *максимінною задачею оптимізації*.

Варіант 2. Уведемо для кожного значення x функцію

$$F_2(x) = \max_{i \in [1, m]} \frac{f_i(x)}{f_i^*} \quad (4.13)$$

і будемо шукати такі значення x^0 , за яких функція $F_2(x)$ матиме мінімальне значення

$$F_2(x^0) = \min_{x \in D} F_2(x). \quad (4.14)$$

За такого формулювання задачі гарантовано, що її розв'язок у найгіршому випадку, який відповідає максимально можливому відхилю $f_i(x)/f_i^*$, забезпечить мінімальне значення $F_2(x)$. Ця задача забезпечення є *мінімаксною задачею оптимізації*.

Відмінність варіантів 1 і 2 полягає в тому, що вони стосуються різних умов оптимальності. Варіант 1 забезпечує максимально можливий відхил серед усіх $f_i(x)$ від їх заданих значень f_i^* , оскільки воно забезпечене для найгіршого випадку, що характеризується співвідношенням

$$F_1(x^0) = \max_{x \in D} \min_{i \in [1, m]} \frac{f_i(x)}{f_i^*}. \quad (4.15)$$

Варіант 2 є оберненою задачею – задачею забезпечення мінімально можливого відхилю всіх $f_i(x)$ від заданих значень f_i^* . Такого відхилю досягають для найгіршого випадку за умови

$$F_2(x^0) = \min_{x \in D} \max_{i \in [1, m]} \frac{f_i(x)}{f_i^*}. \quad (4.16)$$

Розглянемо на конкретному прикладі особливості реалізації наведених варіантів. Припустимо, що потрібно розв'язати задачу оптимізації з обмеженнями (4.9). У цьому разі зручно використати згортку у формі (4.11) і розв'язати задачу розкриття невизначеності як задачу оптимізації у формі (4.12). Розв'яжемо задачу у два етапи. На *першому етапі* потрібно визначити множину Парето на підставі зображених графічно вихідних даних (рис. 4.3). Область I, яка відповідає $x \in [x^-, x_2^0)$, містить неприйнятні значення x , оскільки порушено задані умови для $f_2(x)$, бо тут $f_2(x) > f_2^*$. Область III, яка відповідає $x \in (x_1^0, x^+]$, містить неприйнятні значення x , оскільки порушено умову для $f_1(x)$, бо тут $f_1(x) > f_1^*$. Звідси випливає, що множина Парето (область II) розташована між областями I та III і її межі визначає умова $x \in [x_2^0, x_1^0]$. На межі цієї множини справедливі умови

$$f_2(x_2^0) = f_2^*, f_1(x_2^0) < f_1^*; \quad f_1(x_1^0) = f_1^*, f_2(x_1^0) < f_2^*,$$

а при $x_2^0 < x < x_1^0$, $x \in (x_2^0, x_1^0)$, $f_1(x) \leq f_1^*$, $f_2(x) \leq f_2^*$.

Отже, перший етап розв'язання завершено.

На *другому етапі* визначають умови раціонального компромісу на множині Парето. У заданій області потрібно знайти таке значення x^0 , щоб виконувалася умова (4.9) і було забезпечено значення (4.15). Виберімо деякі значення x' й x'' і порівняємо відношення $f_i(x)/f_i^*$ для різних значень $i = 1; 2$. Як видно з графіка (див. рис. 4.3), у точці $x = x'$ маємо

$$\frac{f_2(x')}{f_2^*} > \frac{f_1(x')}{f_1^*},$$

а в точці x''

$$\frac{f_2(x'')}{f_2^*} < \frac{f_1(x'')}{f_1^*}.$$

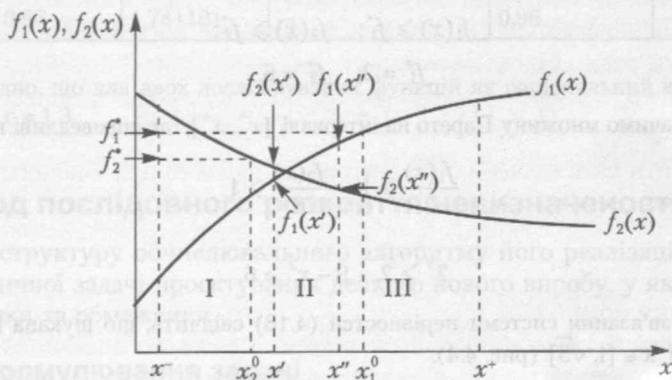


Рис. 4.3. Вихідні дані до задачі розкриття невизначеності цілей

З цих нерівностей випливає, що раціональний компроміс слід шукати між двома точками — x' і x'' .

За однакової переваги цілей такого компромісу досягають у точці $x = x''$, де

$$\frac{f_2(x'')}{f_2^*} = \frac{f_1(x'')}{f_1^*}.$$

У випадку різних переваг цілей, що характеризуються коефіцієнтами важливості k_1 і k_2 , компроміс визначає співвідношення

$$k_2 \frac{f_2(x^{(4)})}{f_2^*} = k_1 \frac{f_1(x^{(4)})}{f_1^*},$$

де значення в точці $x^{(4)}$ є точкою компромісу.

Слід звернути увагу на те, що розв'язок задачі (4.15) за обмежень (4.10) не існує, оскільки умова $f_2(x) > f_2^*$ справедлива в області I, а умова $f_1(x) > f_1^*$ — в області III, але ці області не перетинаються, тобто виконати обидві умови одночасно неможливо.

Цей приклад дає змогу з'ясувати певні недоліки розглянутого підходу до розкриття невизначеності цілей. *По-перше*, як варіант 1, так і варіант 2 дають відповідь лише на одне запитання: що буде забезпечено в найгіршому випадку, але залишають без відповіді низку інших запитань. Зокрема, невідомо, як реалізувати умови раціонального

компромісу, якщо для одних значень $i_1 \in [1, m_1]$ умови (4.15) справедливі, а для інших $i_2 \in [1, m_2]$ ($m = m_1 + m_2$) — ні.

По-друге, розглянутий підхід не дозволяє кількісно зіставити різні варіанти допустимих розв'язків із множини Парето, наприклад, не можна сказати, який із варіантів найкращий у точках x' і x'' .

Якщо у процесі розв'язання системи нерівностей одержують кілька інтервалів множини Парето, то звуження інтервалів виконується для кожного з них окремо.

Приклад 2. Потрібно знайти множину Парето і визначити умови раціонального компромісу для заданих цільових функцій

$$f_1 = 2^x, \quad f_2(x) = 9 - x^2, \quad x \in [0; 4] \quad (4.17)$$

за обмежень

$$f_1(x) \geq f_1^*; \quad f_2(x) \geq f_2^*;$$

$$f_1^* = 2; \quad f_2^* = 6.$$

Спочатку визначимо множину Парето на інтервалі $[x^-, x^+]$, де справедливі нерівності

$$\frac{f_1(x)}{2} \geq 1; \quad \frac{f_2(x)}{6} \geq 1$$

або

$$2^x \geq 2, \quad 9 - x^2 \geq 6. \quad (4.18)$$

Аналітичне розв'язання системи нерівностей (4.18) свідчить, що шукана множина Парето лежить в інтервалі $x \in [1, \sqrt{3}]$ (рис. 4.4).

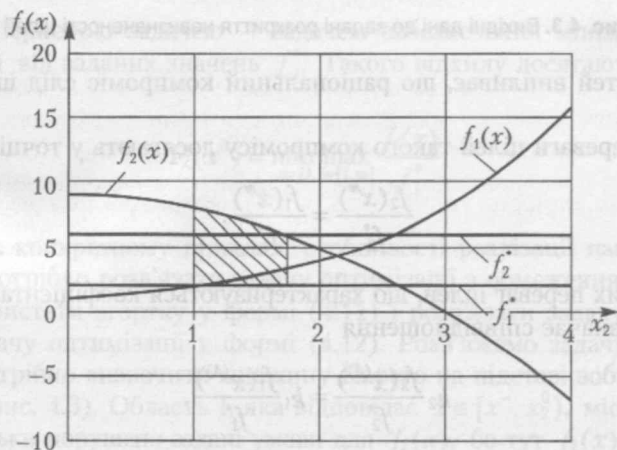


Рис. 4.4. Визначення множини Парето для системи (4.17)

Для звуження множини Парето і зведення вихідної двокритерійної задачі до однокритерійної скористаємося технічними обмеженнями, що ґрунтуються на принципах мінімаксу $\min_x \max_i f_i(x)/f_i^*$ та максиміну $\max_x \min_i f_i(x)/f_i^*$. Значення відношень $f_1(x)/f_1^*$ і $f_2(x)/f_2^*$, $\min_x \max_i f_i(x)/f_i^*$ і $\max_x \min_i f_i(x)/f_i^*$ на інтервалі $x \in [1, \sqrt{3}]$, що обчислені з кроком сітки 0,01, подано у табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Значення $f_1(x)/f_1^*$ і $f_2(x)/f_2^*$, $\min_x \max_i f_i(x)/f_i^*$ і $\max_x \min_i f_i(x)/f_i^*$

x	f_1/f_1^*	f_2/f_2^*	$\max f_i/f_i^*$	$\min \max(f_i/f_i^*)$	$\min(f_i/f_i^*)$	$\max \min(f_i/f_i^*)$
1	1	1,333333	1,333333	—	1	—
1,1	1,071773	1,298333	1,298333	—	1,071773	—
1,2	1,148698	1,26	1,26	—	1,148698	—
1,3	1,231144	1,218333	1,231144	1,231144	1,218333	1,218333
1,4	1,319508	1,173333	1,319508	—	1,173333	—
1,5	1,414214	1,125	1,414214	—	1,125	—
1,6	1,515717	1,073333	1,515717	—	1,073333	—
1,7	1,624505	1,018333	1,624505	—	1,018333	—
1,8	1,741101	0,96	1,741101	—	0,96	—

З таблиці видно, що для двох досліджуваних функцій як раціональний компроміс слід вибрати стратегію $x = 1,3$.

4.1.4. Метод послідовного розкриття невизначеності цілей

Суть методу і структуру обчислювального алгоритму його реалізації розглянемо на прикладі практичної задачі проектування деякого нового виробу, у якій задано основні цілі, показники та обмеження.

Змістовне формулювання задачі

Нехай визначено цілі розробки, виробництва і використання виробу. Для нового виробу задано: бажані показники якості; допустимі витрати для різних стадій життєвого циклу; конструктивні, технологічні, економічні, експлуатаційні та інші обмеження.

Потрібно створити новий високоякісний виріб за заданих обмежень і ресурсів.

Звідси випливає, що стратегічна мета розробки нового виробу — досягнення максимально можливої його якості на основі оптимального використання заданих ресурсів за встановлених обмежень. Для досягнення цієї системної цілі потрібно забезпечити оптимальну реалізацію багатьох окремих цілей, які розв'язують окремі завдання і є суперечливими. Наприклад, одна з найважливіших цілей — досягнення високої якості виробу. Але для цього зазвичай потрібні високоякісні матеріали, наукомісткі технології, висококваліфіковані фахівці. Ці фактори призводять до збільшення витрат на стадіях розробки і виробництва, а отже, до підвищення вартості виробу і зменшення контингенту користувачів.

Не менш важливим є забезпечення конкурентоспроможності і високого попиту виробу на внутрішньому і зовнішньому ринках. Такі фактори зумовлюють потребу зниження вартості виробу і збільшення контингенту користувачів. Очевидно, що для досягнення зазначених цілей потрібні протилежні дії та їх рішення, що й свідчить про суперечливість цілей. Причому їх перелік не обмежується наведеними окремими цілями.

Для таких задач розкриття невизначеності цілей полягає у досягненні раціонального компромісу між ними, за якого забезпечуватиметься найкраще досягнення стратегічної цілі для заданих обмежень. Це зумовлює таке *математичне формулювання задачі*.

Математична постановка задачі

Відомі вимоги та обмеження до проєктованого виробу. Вимоги визначають бажані значення показників якості виробу, поданих у формі допустимих інтервалів змін для кожного показника, і утворюють множину

$$Q_0 = \{Q_i \mid Q_i^- \leq Q_i \leq Q_i^+, i = \overline{1, m}\},$$

де Q_i кількісно характеризує певний показник якості, наприклад, продуктивність виробу.

Задано обмеження для конструктивних, технологічних, економічних, експлуатаційних та інших показників виробу, які подано у вигляді

$$x_j^- \leq x_j \leq x_j^+, j = \overline{1, n} \quad (4.19)$$

й утворюють множину обмежень $X_0 = \{x_j \mid x_j^- \leq x_j \leq x_j^+, j = \overline{1, n}\}$, де x_j визначає одне із зазначених вище показників. Наприклад, x_1 визначає масу виробу, x_2 — його конструктивні габарити тощо. Відомі залежності

$$Q_i = f_i(x), i = \overline{1, m}; x = \{x_j \mid j = \overline{1, n}\}.$$

Потрібно знайти таке значення x^* вектора x , за якого для кожного показника якості Q_i виконується умова

$$Q_i^* \rightarrow \max_{x \in X_0} f_i(x), i = \overline{1, m}.$$

Для спрощення подальших процедур покладають, що для досягнення стратегічної цілі проєктування доцільно збільшувати значення кожного показника, а отже, кожен показник визначатиметься як Q_i^+ . Однак на практиці, як видно зі змістовного формулювання задачі, виявляється, що окремі цілі суперечливі. Тому всі значення $f_i(x)$ за певного x не можуть бути максимальними, оскільки функціональні залежності Q_i від x для різних $i \in \overline{1, m}$ суттєво різняться і мають максимальні значення за різних x . Водночас значення різних показників Q_i , $i = \overline{1, m}$ і x_j , $j = \overline{1, n}$ у разі досягнення стратегічної мети неоднакові. Тому їх доцільно ранжувати за важливістю. Ці фактори дають змогу запропонувати такий алгоритм розв'язання поставленої задачі.

Обчислювальний алгоритм

Суть алгоритму полягає у послідовній оптимізації показників якості виробу на базі раціонального вибору значень компонент вектора x із множини X_0 . Алгоритм реалізують у вигляді такої послідовності процедур.

1. Ранжування за важливістю показників $Q_i \in Q_0$ так, щоб ступінь їх важливості зменшувався у послідовності показників, які задаються наступним співвідношенням $\hat{Q}_0 = \{\hat{Q}_q \mid \hat{Q}_q \in Q_0; \hat{Q}_q > \hat{Q}_{q+1}, q = \overline{1, m}\}$.
2. Ранжування за важливістю заданих обмежень $x_j \in X_0$ так, щоб ступінь їх важливості зменшувався у послідовності, яка задається наступним співвідношенням $\hat{X}_0 = \{\hat{x}_p \mid \hat{x}_p \in X_0; \hat{x}_p > \hat{x}_{p+1}; p = \overline{1, n}\}$.
3. Визначення таких значень показників x_j , $j = \overline{1, n}$, які впорядковані на множині X_0 і забезпечують оптимізацію показників Q_i , $i = \overline{1, m}$, упорядкованих на множині $\hat{Q}_0$. Цілі цієї процедури такі:

- ♦ виявлення можливості реалізації заданих значень показників $Q_i \in Q_0$, $i = \overline{1, m}$ за заданих обмежень $x_j \in X_0$, $j = \overline{1, n}$;

- ♦ визначення значень $x_{gp} \in X_0$, $p = \overline{1, n}$ за умови оптимізації кожного показника $\hat{Q}_g \in Q_0$, яка визначається співвідношенням

$$Q_q^0 = f_q(x_q^0); \quad f_q(x_q^0) = \max_{x \in X_0} f_q(x),$$

де

$$x_q^0 = \{x_{q1}^0, \dots, x_{qp}^0, \dots, x_{qn}^0\},$$

x_{qp}^0 ; $p = \overline{1, n}$ — шукані оптимальні значення за заданих обмежень $x_j \in X$ для показника Q_q .

4. Визначення раціональних значень $x_q^* \in X_0$ за умови досягнення раціонального компромісу вимог до показників якості виробу, що зумовлено відмінністю оптимальних значень x_q^0 , $q = \overline{1, m}$ внаслідок відмінності інтервалів для показників $\hat{Q}_q$ і властивостей функцій $f_q(x)$. Процедура виконують послідовно, починаючи з показника $\hat{Q}_1$ і значення показника $\hat{Q}_m$.

Шукані значення x_q для показників $\hat{Q}_q$ визначають, використовуючи принцип послідовних поступок. Величина поступки є різницею між оптимальним значенням $\hat{Q}_q$ і прийнятим раціональним значенням Q_q^* . Значення Q_q^* для кожного $q = \overline{1, m}$ вибирають в інтерактивному режимі з ОПР або після колективної експертизи. Величина поступки має мінімальне значення для $\hat{Q}_1$ і зростає зі збільшенням значення q .

4.1.5. Розкриття невизначеності цілей зведенням вихідної задачі до системи рівнянь

Розглянуті методи розкриття невизначеності цілей ґрунтуються на зведенні вихідної багатоцільової задачі до одноцільової оптимізаційної задачі того ж виду, зокрема до задачі мінімізації або максимізації одного функціонала.

Тепер розглянемо інший підхід, базований на зведенні задачі розкриття невизначеності цілей до оптимізаційної задачі, описуваної системою рівнянь. Спочатку розглянемо задачу, де задано обмеження вигляду (4.9) або (4.10). Припустимо, що для кожної цілі потрібно виконати умови

$$f_i(x) = f_i^*, \quad i = \overline{1, m}. \quad (4.20)$$

Однак, як випливає з рис. 4.5, ці умови для різних функцій $f_i(x)$ виконуються не за однакових, а за суттєво різних значень x . Внаслідок цього виникає потреба спільного аналізу всіх цілей щодо оцінювання відмінності реалізованих обмежень від заданих для кожної $f_i(x)$. Сукупність вихідних обмежень подамо у вигляді системи рівнянь

$$f_i(x) - f_i^* = 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (4.21)$$

У практичних задачах x — це вектор

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n\}, \quad j = \overline{1, n}.$$

Тому формулу (4.21) можна розглядати як систему з m рівнянь з n невідомими $x_1, x_2, \dots, x_n$. Очевидно, що спосіб розв'язання цієї системи залежить від співвідношення між m та n . Можливі такі випадки: $m = n$, $m < n$ та $m > n$.

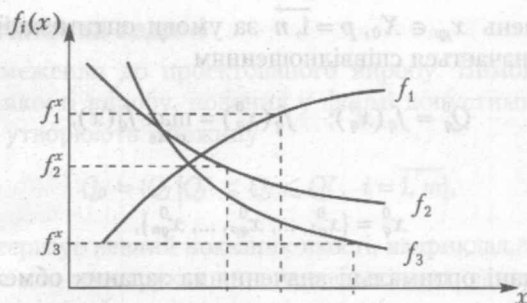
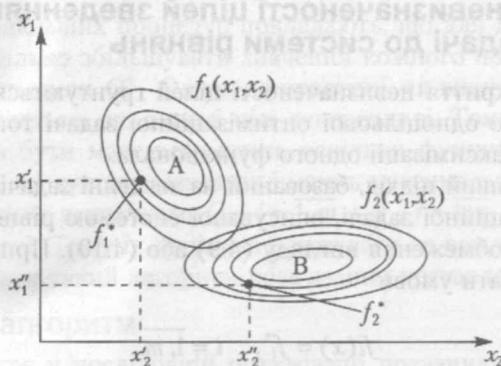


Рис. 4.5. Розкриття невизначеності цілей на основі системи рівнянь

Найпростіший варіант $m = n$, для якого у деяких випадках можна розкрити невизначеність цілі, розв'язавши систему (4.21) одним із відомих методів [33]. При цьому точно забезпечуватиметься умова (4.20) для кожної i -ї цілі. Однак така ситуація на практиці зазвичай виняткова. Більше того, навіть за $m = n$ не завжди можна розв'язати систему (4.21) через суперечливість цілей. Приклад, коли не можна знайти таке значення x , за якого одночасно виконується умова (4.20) для двох функцій від двох змінних, зображено на рис. 4.6. На рисунку множину A утворено сімейством кривих, для яких кожна крива відповідає певному числовому значенню функції $f_1(x_1, x_2) = c_1$, $c_1 = \text{const}$. Множину B утворено сімейством кривих, для якої кожна крива відповідає певному значенню $f_2(x_1, x_2) = c_2$, $c_2 = \text{const}$.

Рис. 4.6. Розв'язання системи рівнянь (4.21) для випадку $m = n$

Криві f_1^* і f_2^* визначають обмеження відповідно для $f_1(x_1, x_2)$ і $f_2(x_1, x_2)$. Як видно з рис. 4.6, не існує значень x_1 і x_2 , для яких одночасно виконуються умови $f_1(x_1, x_2) = f_1^*$, $f_2(x_1, x_2) = f_2^*$, оскільки криві f_1^* і f_2^* не перетинаються.

У випадку $m < n$ система (4.21) перевизначена, що дає змогу довільно варіювати деякі компоненти вектора x . У загальному випадку максимальна кількість таких компонент може дорівнювати $n - m$. Найпростішим прийомом розв'язання задачі для $m < n$ можна вважати апіорне задання значень деяких змінних на основі інтуїції і досвіду ОПР або на підставі аналізу відповідних показників відомих прототипів виробів і проєктів. У підсумку одержуємо, що система переходить до розглянутого варіанта $m = n$. Варіюючи компонентами вектора x , можна одержати різні умови розкриття невизначеності цілей. Далі з отриманих варіантів вибирають раціональні розв'язки. Однак

на практиці зазначений випадок трапляється вкрай рідко, оскільки кількість вимог (тобто цілей $f_i(x)$) перевищує кількість параметрів (тобто компонент вектора x).

Перейдімо до розгляду випадку $m > n$. Зазначимо, що система (4.21) несумісна, тобто не можна знайти такі значення $x_1, x_2, \dots, x_n$, щоб виконувалися умови (4.20) для всіх $i = \overline{1, m}$. Тому прийнято, що в алгебричному сенсі несумісна система рівнянь не має розв'язків. Слід також зазначити, що у загальному випадку функції $f_i(x)$, $i = \overline{1, m}$ нелінійні, і система (4.21) — несумісна система нелінійних рівнянь.

Методи розв'язання несумісних систем рівнянь вигляду (4.21) розроблено в теорії наближення функцій [86, 152]. Для такої системи через перевищення кількості рівнянь m порівняно з кількістю змінних n принципово неможливо одержати розв'язок, який забезпечить виконання умови (4.21). Тому розв'язання системи зводиться до мінімізації функцій

$$\tilde{f}_i(x) = f_i(x) - f_i^*, \quad i = \overline{1, m}. \quad (4.22)$$

Якість розв'язку цієї системи характеризується середньоквадратичним, чебишевським, середньостепеневим та іншими критеріями. Зазначимо, що найдоцільніший із практичного погляду — *чебишевський критерій наближення функцій*. Для цього критерію чебишевська задача наближення системи (4.21) полягає у знаходженні такого $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, для якого максимальна нев'язка

$$\Delta = \max_{i \in \overline{1, m}} |f_i(x) - f_i^*|, \quad (4.23)$$

взята за міру чебишевського наближення системи (4.21), інакше кажучи, за міру чебишевського наближення системи функцій $\tilde{f}_i(x)$, $i = \overline{1, m}$, була б мінімально можливою:

$$\Delta^0 = \min_x \Delta. \quad (4.24)$$

Виконання умов (4.24) означає, що при $x = x^0$ максимальний відхил від нульових значень системи функцій $\tilde{f}_i(x)$ буде мінімально можливим. Вибір будь-якого значення $x \neq x^0$ приведе до того, що $\Delta > \Delta^0$. Величина x^0 — це аргумент, який забезпечує мінімізацію максимальної нев'язки, тобто

$$x^0 = \arg \min_{x \in [x^-, x^+]} \max_{i \in \overline{1, m}} |f_i(x) - f_i^*|. \quad (4.25)$$

Перевага цього підходу до розкриття невизначеності цілей полягає в тому, що поряд зі знаходженням x^0 є можливість визначити абсолютні відхили всіх функцій $f_i(x)$ від їх заданих значень f_i^* , тобто визначити відхил не тільки для найгіршого випадку, за умови (4.23), але й для всіх інших цілей. Така можливість є, власне кажучи, проміжним результатом розв'язання чебишевської задачі наближення. Справді, якщо відоме значення x^0 , то значення абсолютного відхилу для всіх цілей знаходять безпосередньо з формули (4.23), де покладаємо, що $x = x^0$. Розв'язати задачі (4.23), (4.24) для системи (4.21) можна різними методами:

- ♦ безпосереднім розв'язанням чебишевської задачі наближення;
- ♦ зведенням чебишевської задачі наближення до задачі лінійного або нелінійного математичного програмування.

Щодо цього підходу потрібно зробити низку суттєвих зауважень.

1. У загальному випадку, коли $f_i(x)$ нелінійні, задачі (4.23), (4.24) для системи (4.21) можуть мати багато розв'язків, кожен з яких називають *локальним*. При цьому локальний розв'язок, що забезпечує мінімально можливе Δ^0 з усіх локальних розв'язків, називають *глобальним*. Глобальний розв'язок зазначеної системи можна записати у вигляді:

$$x_{\text{опт}}^0 = \arg \min_k \min_x \max_i |f_i(x) - f_i^*|, \quad (4.26)$$

де $\min$ означає, що визначають мінімум серед усіх $k = \overline{1, k_0}$ локальних розв'язків, тобто для будь-якого локального розв'язку $x_k^0 \neq x_{\text{опт}}^0$ маємо $\Delta_k^0 \geq \Delta_{\text{опт}}^0$; $\Delta_{\text{опт}}^0 = \min_k \Delta_k^0$.

2. Крім чебишевського, можна використовувати й інші критерії. Зокрема, найзагальнішим із них є середньостепеневий критерій. Позначимо

$$\Delta f_i = (f_i(x) - f_i^*). \quad (4.27)$$

Покладімо

$$\Delta f_{(q)} = \left[\sum_{i=1}^m (\Delta f_i)^q \right]^{1/q}, \quad (4.28)$$

де $\Delta f_i, \Delta f_{(q)}$ — відповідно міра нев'язки і середньостепеневий критерій наближення; q — степінь середньостепеневого критерію. На практиці найпоширеніше значення $q = 2$, а відповідний критерій називають середньоквадратичним

$$\Delta f_{(2)} = \left[\sum_{i=1}^m (\Delta f_i)^2 \right]^{1/2} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\Delta f_i)^2}. \quad (4.29)$$

У разі використання критеріїв (4.28), (4.29) задача наближення для системи (4.21) полягає у визначенні такого значення x^0 , для якого

$$\begin{aligned} \Delta f_{(q)}^0 &= \left\{ \sum_{i=1}^m [\Delta f_i(x^0)]^q \right\}^{1/q} = \min_{x \in [x^-, x^+]} \Delta f_q; \\ \Delta f_{(2)}^0 &= \left\{ \sum_{i=1}^m [\Delta f_i(x^0)]^2 \right\}^{1/2} = \min_{x \in [x^-, x^+]} \Delta f_2. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Слід звернути увагу на одну принципову відмінність чебишевського і середньостепеневого (при $q < \infty$) критеріїв. Чебишевський критерій гарантує, що абсолютний відхил будь-якої функції $f_i(x)$ від заданого значення f_i^* , якщо обрано $x = x^0$, не перевищуватиме значення Δ^0 . Середньостепеневий критерій гарантує, що в середньому (для відповідного степеня) відхил усіх функцій не перевищуватиме значення $\Delta_{(q)}^0$. Але він не гарантує, що окремі функції не відхилятимуться наперед задане значення Δ_i^0 . Тому середньостепеневий критерій незастосовний у задачах, де критичним є абсолютний відхил певних показників і характеристик. Такі задачі характерні, наприклад, для хімічних виробництв, де відхил за абсолютною величиною показників хімічних процесів може призвести до катастрофічних наслідків.

Нарешті зазначимо, що середньостепеневий критерій найзагальніший у тому сенсі, що при $q \rightarrow \infty$ він збігається за величиною з чебишевським критерієм, а при $q = 2$ є середньоквадратичним.

3. Наведені критерії у формі (4.24) для чебишевського наближення і у формі (4.27) або (4.28) для середньостепеневого критерію зорієнтовано на умову, за якої всі цілі є рівнозначними. На практиці ця умова рідко виконується, тобто найчастіше є перевага цілей.

Тому розглянемо випадок, коли цілі мають різні ступені важливості, які характеризуватимемо коефіцієнтами важливості k_i . Тоді для чебишевського критерію величину нев'язки (4.23) визначимо співвідношенням

$$\Delta^k = \max_{i \in [1, m]} \{k_i |f_i(x) - f_i^*|\}. \quad (4.31)$$

Задача полягатиме у знаходженні такого x^0 , щоб нев'язка Δ^k була мінімально можливою, тобто

$$\Delta^k \Big|_{x=x^0} = \Delta_{\text{опт}} = \min_x \Delta^k. \quad (4.32)$$

Для середньостепеневого критерію замість формул (4.27) і (4.28) відповідно одержимо

$$\Delta f_i^k = k_i (f_i(x) - f_i^*); \quad (4.33)$$

$$\Delta f_{(q)}^k = \left(\sum_{i=1}^m (\Delta f_i^k)^q \right)^{1/q}. \quad (4.34)$$

Коефіцієнти k_i вибирають з урахуванням такої умови нормування:

$$\sum_{i=1}^m k_i = 1. \quad (4.35)$$

На практиці коефіцієнти k_i визначають на підставі експертної оцінки або їх задає ОПР, керуючись власним досвідом та інтуїцією. Умова (4.35) ускладнює проведення експертизи. Тому для спрощення процедури введення коефіцієнтів важливості оцінювати ступінь важливості можна за бальною системою, беручи, наприклад, максимальне значення $k_{\max} = 10$. Тоді коефіцієнти важливості набуватимуть будь-яких значень в інтервалі $(0, 10]$. У цьому разі нормування вигляду (4.35) можна забезпечити, поклавши для всіх $i = \overline{1, m}$

$$k_i = \frac{k'_i}{\sum_{i=1}^m k'_i},$$

де k'_i — оцінка в балах i -го коефіцієнта важливості із заданого інтервалу.

Слід звернути увагу на принципову відмінність прийому введення коефіцієнтів важливості для лінійної згортки й у цьому випадку. У лінійній згортці коефіцієнти важливості взаємно пов'язують значення відповідних функцій, але при цьому залишається невирішеним питання: який відхил від заданого значення матиме відповідна функція? У цьому випадку коефіцієнт важливості безпосередньо враховує ступінь відхилення відповідної функції від заданого значення (4.21) і (4.27), оскільки, змінюючи значення одного або кількох коефіцієнтів k_i , можна заздалегідь знати, як це позначиться на відхилі відповідної функції від її заданого значення. Чим менше значення k_i , тим більший відхил за інших однакових умов має різниця

$|f_i(x) - f_i^*|$ для чебишевського критерію і різниця $(f_i(x) - f_i^*)$ для середньостепенного критерію.

Наприклад, у результаті розв'язання задачі з використанням чебишевського критерію визначено, що $\Delta_{\text{опт}} = 0,2$. Нехай задано дві функції $f_1(x)$ та $f_2(x)$, їх коефіцієнти важливості $k_1 = 0,25$, $k_2 = 0,75$. Тоді, відповідно до співвідношення (4.31), маємо:

$$k_1 |f_1(x) - f_1^*| = \Delta_{\text{опт}}, \quad k_2 |f_2(x) - f_2^*| = \Delta_{\text{опт}};$$

$$0,25 |f_1(x) - f_1^*| = 0,2; \quad 0,75 |f_2(x) - f_2^*| = 0,2.$$

Звідси

$$|f_1(x) - f_1^*| = \frac{0,2}{0,25} = 0,8; \quad |f_2(x) - f_2^*| = \frac{0,2}{0,75} = 0,267,$$

що й підтверджує зроблений раніше висновок.

З цього прикладу також випливає, що

$$\frac{|f_1(x) - f_1^*|}{|f_2(x) - f_2^*|} = \frac{k_2}{k_1}, \quad (4.37)$$

тобто відхил однієї функції від заданого значення відрізняється від відповідного значення відхилу іншої функції обернено пропорційно до їх коефіцієнтів важливості.

4. Розглянуті методи розкриття невизначеності цілей застосовуються у випадку, коли існують обмеження на функції, які описують відповідні цілі. До цього варіанту можна звести загальний випадок, коли потрібно визначити x^0 за умови: $f_1(x) \rightarrow \max, \dots, f_m(x) \rightarrow \max$. Для цього досить знайти для $i = \overline{1, m}$ максимальне значення $f_k(x)$ у заданому інтервалі й покласти $\max_{x \in D} f_i(x) = f_k(x)$.

4.2. Розкриття ситуаційної невизначеності

Насамперед введемо означення двох типів невизначеностей: ситуаційної і природної.

Ситуаційна невизначеність характеризується непередбаченим впливом неконтрольованих факторів різного походження (діяльністю людини, стихійними лихами, впливами ноосфери тощо), які зумовлюють непередбачену поведінку досліджуваної системи.

Природна невизначеність виникає внаслідок випадкового впливу важко прогнозованих і важко контрольованих факторів природи (опадів, повеней, посух тощо).

Розглянемо задачу розкриття ситуаційної невизначеності на прикладі певної прикладної задачі. Припустімо, що потрібно прокласти авіаційний маршрут від Києва до Парижа, який має бути раціональним щодо часу польоту; відповідати міжнародним коридорам польотів; забезпечувати прийнятну витрату пального; створювати необхідні умови для пасажирів та екіпажу; відповідати міжнародним, європейським, регіональним і національним вимогам та умовам.

Очевидно, що розв'язання цієї задачі потребує системного аналізу різних факторів та умов для визначення необхідності вибору раціональних варіантів дій на різних стадіях розробки, реалізації, експлуатації маршруту. Розглянемо тільки один із фак-

торів, що суттєво впливає на різні аспекти реалізації на практиці маршруту. Таким фактором є час польоту. Очевидно, що він залежить від багатьох апіорі відомих факторів, зокрема від льотно-технічних показників літака, стану і можливостей аеродромів тощо. Для зручності розуміння особливостей задачі вважатимемо, що всі ці фактори характеризуються апіорі відомим вектором x . Є також фактори, вплив яких апіорі невідомий або які можуть змінюватися у процесі польоту. До них, зокрема, належать метеоумови на трасі польоту, у районах аеродромів зльоту і посадки тощо. Такі фактори характеризуватимемо узагальненим параметром невизначеності α .

Беручи до уваги, що загальний час польоту лімітований, хоча час зльоту і посадки має певні допуски, дії екіпажу повинні бути спрямовані на мінімізацію різниці між заданим часом T_0 і допустимим часом T^* тривалості польоту в реальних умовах ситуаційної невизначеності. Цю різницю визначає співвідношення

$$\Delta T^* = |T_0 - T^*|; \quad T^* = f(x^*, \alpha). \quad (4.38)$$

Мета дій екіпажу в польоті полягає у прийнятті рішення x про вибір такої швидкості, яка за реальних метеоумов за час $T = f(x, \alpha)$ польоту забезпечить прибуття до місця призначення. При цьому відхил часу T від заданого значення T_0 має задовольняти умову

$$\Delta T = |T_0 - T| \leq \Delta T^*.$$

Для виконання цієї умови потрібно забезпечити

$$\begin{aligned} \Delta T = F(x, \alpha) = |T_0 - f(x, \alpha)| &\rightarrow \min_{\alpha}; \\ \min_{\alpha} F(x, \alpha) &= F(x^*, \tilde{\alpha}), \end{aligned} \quad (4.39)$$

де x^* — показник результативності дій екіпажу у процесі польоту за впливу факторів невизначеності, який визначає значення вектора x у разі виконання умови (4.39). Вектор x залежить від факторів невизначеності і тому є функцією узагальненого показника α :

$$x = \tilde{x}(\alpha). \quad (4.40)$$

Значення узагальненого показника α ситуаційної невизначеності на момент прийняття рішення x^* визначає величина $\tilde{\alpha} \in G_{\alpha}$, де G_{α} — деяка множина типових ситуаційних невизначеностей, зокрема типових метеоумов у різні пори року, поблизу розглянутого маршруту польоту. Найважливіша особливість таких ситуаційних невизначеностей — висока динамічність і, як наслідок, складність якісної зміни ситуації на маршруті протягом обмеженого часу. Тому в реальних ситуаціях інформації про показник α у вигляді відомостей $\tilde{\alpha} \in G_{\alpha}$ зазвичай недостатньо для прийняття однозначного рішення на тривалий період. У підсумку виникає потреба його коригування у процесі реалізації.

Отже, розкриття ситуаційної невизначеності в цій задачі реалізують як вибір дій, якщо цільова функція відома, але містить узагальнений параметр невизначеності α , що може суттєво змінюватися у часі.

Для розв'язання вихідної задачі можна використати підхід, який дозволяє одержати досить обґрунтовану, хоча й однобічну оцінку. Такий підхід базується на *принципі гарантованого результату*. Розглянемо його суть, вважаючи, що фактори ситуаційної невизначеності погіршують умови польоту.

Нехай для кожного x виконуватиметься умова

$$\min_{\alpha \in G_\alpha} F(x, \alpha) \leq F(x, \alpha^*), \quad (4.41)$$

а для будь-якого $\alpha > \alpha^*$, $\alpha \in G_\alpha$,

$$F^* = \max_x \min_{\alpha \in G_\alpha} F(x, \alpha) \leq \max_x F(x, \alpha^*), \quad (4.42)$$

де F^* — гарантована оцінка, а відповідне значення $x = x^*$ — гарантувальна стратегія в тому сенсі, що яке б не було значення параметра невизначеності α , вибір $x = x^*$ відповідно до формули (4.42) гарантує, що для кожного α значення цільової функції $F(x, \alpha)$ не буде меншим за F^* .

Для одержання гарантувальної стратегії $x = x^*$ потрібно розв'язати такі оптимізаційні задачі.

1. Обчислити для будь-якого x значення $\min_{\alpha \in G_\alpha} F(x, \alpha)$, у результаті чого одержимо:

$$\alpha = \alpha^*(x); F(x, \alpha) = F(x, \alpha^*(x)).$$

2. Обчислити $\max_x F(x, \alpha^*(x))$, у результаті чого визначимо:

$$x = x^*; F^*(x^*, \alpha^*) = F^*.$$

Зазначимо, що гарантовану оцінку можна поліпшити, якщо мати завчасно, до моменту прийняття рішення, деякі відомості про параметр α . Інформація про те, що в момент прийняття рішення відоме значення невизначеного фактора, наприклад метеоумови, дає змогу одержати нову, точнішу гарантовану оцінку. У цьому разі гарантувальною стратегією буде не вектор $x = x^*$, а деяка функція $\tilde{x} = x(\alpha(t), t)$, де t — поточний час.

Отже, вибір гарантувальної стратегії — це раціональний спосіб прийняття рішення. У результаті використання цієї стратегії маємо такий гарантований результат: за будь-яких неконтрольованих факторів забезпечене значення цільової функції не менше, ніж F^* . Використання принципу гарантованого результату вигляду (4.42) дозволяє знайти найкращий розв'язок для найгіршого випадку.

Яка ж ймовірність цього результату і як знайти розв'язок для найімовірнішого результату? Для цього треба прийняти рішення, пов'язане з певним ризиком. Ризик характеризуватимемо двома показниками: ступенем ризику як ймовірністю настання небажаних подій; рівнем ризику у вигляді кількісної оцінки можливого збитку.

Тут слід розрізняти два крайні випадки: вибір стратегії виконують багаторазово і вибір є однократною операцією. В обох випадках вважають, що α — випадкова величина, закон розподілу якої невідомий. Оскільки α — випадкова величина, то значення функції $F(x, \alpha)$ буде також випадковою величиною. Тому цільову функцію вихідної задачі у тих випадках, коли мова йде про багаторазово повторювані операції, доцільно відобразити деякою ймовірнісною характеристикою, наприклад, визначати як математичне сподівання $F_1 = \max F(x, \alpha)$ або в іншій формі позначення $F_1 = \max MF(x, \alpha)$.

Зрозуміло, можна вибрати й інші критерії. Позначимо $\tilde{\alpha}$ як середнє значення випадкової величини α ; йому відповідатиме деяка функція $F_3 = F(x, \tilde{\alpha})$, максимум якої можна використовувати для оцінки.

Припустимо, що параметр α набуває дискретних значень $\alpha_1, \alpha_2, \dots$. Тоді умова $F(x, \alpha) \rightarrow \max$ тотожна максимізації множини критеріїв

$$F_1(x, \alpha_1) \rightarrow \max, F_2(x, \alpha_2) \rightarrow \max, F_i(x, \alpha_i) \rightarrow \max, \dots, F_m(x, \alpha_n) \rightarrow \max. \quad (4.43)$$

Отже, задача прийняття рішення за ситуаційної невизначеності, коли параметр, що характеризує цю невизначеність, випадковий, має багато спільного із задачею прийняття рішення за умов невизначеності цілі.

Якщо розглянути розв'язання задачі розкриття ситуаційної невизначеності за допомогою чебишевського наближення, тобто на підставі зведення вихідної задачі до чебишевської задачі наближення для несумісної системи нелінійних рівнянь, то розв'язок можна характеризувати:

- ♦ значенням імовірності P_k настання k -ї ситуації, характеризованої α_k ;
- ♦ рівнем можливого збитку $\Delta F_\alpha = |F(x^0) - F(x^0, \alpha_k)|$.

Задача полягає у знаходженні $\tilde{x}^0$ для кожного $\Delta F_\alpha \rightarrow \min$. У загальному випадку значення $\tilde{x}^0 \neq x^0$. Внаслідок впливу ситуаційної невизначеності величина ΔF_α враховує, наскільки характеристики i -ї цілі $F_i(x)$, $i = \overline{1, m}$ відрізняються від рівня раціонального компромісу.

4.3. Розкриття невизначеності в задачах взаємодії

Третій тип невизначеності властивий для активної практичної діяльності людей у процесі вироблення і здійснення ними стратегій досягнення певних цілей. Його характеризує інформаційна невизначеність, що виникає в ході активних дій або протидій учасників і повністю не контролюється. До цього виду невизначеності приводять стратегії, у яких взаємодіють два чи більше партнерів у певній сфері діяльності або протидіють конкуренти чи супротивники. Прикладами таких задач є задачі виробничого планування й прогнозування діяльності фірм з урахуванням дії партнерів або протидії конкурентів; задачі національної безпеки за умов конфлікту різних цілей та інтересів; задачі планування заходів і дій щодо запобігання нелегальній міграції; задачі забезпечення військової та економічної безпеки тощо.

4.3.1. Задача взаємодії двох партнерів

Найпростішу задачу взаємодії двох партнерів можна сформулювати так: взаємодіють два партнери, кожний партнер має свою мету, але рівень досягнення кожної з двох цілей залежить від дій партнера.

Нехай $f_1(x_1, x_2)$ і $f_2(x_1, x_2)$ — відповідно цільові функції 1 і 2-го партнерів, а x_1, x_2 — вектори параметрів, значення яких можуть змінювати відповідно 1 і 2-й партнери. Партнери у процесі активної взаємодії можуть обмінюватися інформацією про свої дії. Можливі такі два варіанти обміну інформацією:

- ♦ варіант А — повний обмін інформацією про цілі, дії, показники діяльності тощо, що типово, наприклад, для виробничого об'єднання (основне підприємство та його філії);
- ♦ варіант В — частковий обмін інформацією, наприклад, тільки про обсяг виробництва певного виду продукції та інші показники, які характеризуються відповідно вектором x_1 або x_2 , але не надається інформація про цільові функції, що характерно для діяльності партнерів у разі чесної конкуренції.

У варіанті А невизначеність може бути зумовлена *неповнотою інформації* про наявну та прогнозовану ситуації на ринку збуту і попиту. За цих умов кожний із партнерів може діяти самостійно, а розкриття невизначеності цілей зводиться до розкриття ситуаційної невизначеності за відомих $f_1(x_1, x_2, \alpha_1)$, $f_2(x_1, x_2, \alpha_2)$, де α_1 і α_2 — показники ситуаційної невизначеності.

У варіанті В невизначеність може бути зумовлена двома факторами: *невизначеністю наявної ситуації і неузгодженими діями партнерів*.

Спочатку припустимо, що ситуаційної невизначеності немає. У цьому разі розкриття невизначеності цілей дій партнерів виконують послідовно виконанням таких кроків.

Нехай партнер 1 вважає за потрібне для досягнення власної цілі мати значення $x_1 = x'_1$ і сповіщає про це партнеру 2. Партнер 2 максимізує власну ціль з урахуванням інформації першого партнера, тобто, вважаючи відомим $x_1 = x'_1$, знаходить таке значення $x_2 = x'_2$, за якого

$$f_2(x'_2, x'_1) = \max_{x_2} f_2(x_2, x'_1). \quad (4.44)$$

Партнер 2 повідомляє бажане для нього значення $x_2 = x'_2$ партнеру 1. Партнер 1 розв'язує задачу оптимізації цілі для себе, шукаючи $\max f_1(x_1, x_2)$ за умови $x_2 = x'_2$, зберігаючи значення x'_1 або вибираючи таке x''_1 , щоб виконувалася умова

$$f_1(x''_1, x'_2) = \max_{x_1} f_1(x_1, x'_2). \quad (4.45)$$

Якщо ця умова задовольняє обох партнерів, то задачу розв'язано. Але зазвичай значення x''_1 , за якого виконується умова (4.45), не дорівнює вихідному значенню $x_1 \neq x'_1$. Тому партнер 1 повідомляє нове доцільне для нього значення $x_1 = x''_1$ партнеру 2. Партнер 2 розв'язує задачу (4.44) за нового значення x_1 . Розв'язання задачі припиняють у разі знаходження раціонального компромісу для обох партнерів.

Далі розглянемо випадок, коли одночасно впливають два фактори, а саме ситуаційна невизначеність та неузгодженість дій партнерів. Припустимо, що для партнера 1 ситуаційна невизначеність характеризує показник α_1 , а для партнера 2 — α_2 , де

$$\alpha_1 \in [\alpha_1^-, \alpha_1^+]; \quad \alpha_2 \in [\alpha_2^-, \alpha_2^+].$$

Нехай партнерам відомі значення x_1^0, x_2^0 , які забезпечують раціональний компроміс за відсутності ситуаційної невизначеності (попередній варіант). Тоді за умов ситуаційної невизначеності партнер 1 знаходить значення $\hat{x}'_1$ за умови максимізації математичного сподівання функції $f_1(x_1, x_2, \alpha_1)$ за відомих значень $x_2 = x_2^0$, тобто

$$\hat{x}'_1 \rightarrow \max_{x_1} Mf_1(x_1, x_2^0, \alpha_1), \quad (4.46)$$

а партнер 2 визначає значення $\hat{x}'_2$ за умови максимізації математичного сподівання функції $f_2(x_1, x_2, \alpha_2)$ за відомого значення $x_1 = x_1^0$, тобто

$$\hat{x}'_2 \rightarrow \max_{x_2} Mf_2(x_1^0, x_2, \alpha_2). \quad (4.47)$$

Потім порівнюють значення x_1^0 і $\hat{x}'_1$, x_2^0 і $\hat{x}'_2$, тобто знаходять

$$\Delta x'_1 = |x_1^0 - \hat{x}'_1|; \quad \Delta x'_2 = |x_2^0 - \hat{x}'_2|. \quad (4.48)$$

Якщо $\Delta x'_1$ і $\Delta x'_2$ не перевищують задані значення

$$\Delta x'_1 \leq \varepsilon_1; \quad \Delta x'_2 \leq \varepsilon_2, \quad (4.49)$$

то вважають, що за раціональний компроміс можна взяти значення x_1^0 і x_2^0 . Якщо умова (4.49) не виконується, то процедуру пошуку раціонального компромісу продовжують за розглянутим вище алгоритмом, але замість відповідних функцій беруть їхні математичні сподівання і при $x_2 = \hat{x}_2^*$ знаходять $\hat{x}_1^*$ за умови

$$\hat{x}_1^* \rightarrow \max_{x_1} Mf_1(x_1, \hat{x}_2^*, \alpha_1).$$

Потім при $x_1 = \hat{x}_1^*$ знаходять значення $\hat{x}_2^*$ за умови

$$\hat{x}_2^* \rightarrow \max_{x_2} Mf_2(\hat{x}_1^*, x_2, \alpha_2).$$

Якщо одержані значення $\hat{x}_1^*$ і $\hat{x}_2^*$ задовольняють партнерів, то процес обчислень припиняють і ці значення беруть за раціональний компроміс. Якщо не задовольняють — процес триває до виконання узгоджених умов компромісу. У кожному показнику компромісу можна вибирати величини

$$\Delta \hat{x}_1^* = |\hat{x}_1' - \hat{x}_1^*|, \quad \Delta \hat{x}_2^* = |\hat{x}_2' - \hat{x}_2^*|$$

або

$$\Delta f_1' = |Mf_1(\hat{x}_1', \hat{x}_2^*, \alpha_1) - Mf_1(\hat{x}_1^*, \hat{x}_2^*, \alpha_1)|;$$

$$\Delta f_2' = |Mf_2(\hat{x}_1^*, \hat{x}_2', \alpha_2) - Mf_2(\hat{x}_1^*, \hat{x}_2^*, \alpha_2)|.$$

Як критерії раціонального компромісу можна використовувати умови вигляду (4.49).

Розглянутий підхід зорієнтовано на усереднені показники. Він становить практичний інтерес у випадках, коли:

- ♦ різні ситуації майже рівноймовірні;
- ♦ значення цільової функції для різних ситуацій відрізняються несуттєво.

Ці умови рідко виконуються на практиці, тому загальнішим є підхід до розкриття невизначеностей із урахуванням факторів ризику.

Заданий інтервал $[\alpha_1^-, \alpha_1^+]$ зміни α_1 замінимо дискретною множиною $\alpha_1^{(1)}, \dots, \alpha_1^{(q)}, \dots, \alpha_1^{(q_{01})}$. Ймовірність появи різних значень $\alpha_1^{(q)}$ неоднакова і характеризується множиною $p_1^{(1)}, \dots, p_1^{(q)}, \dots, p_1^{(q_{01})}$. Аналогічно будують множини для α_2 і p_2 . Для кожного значення $q_1 = \overline{1, q_{01}}$ і $q_2 = \overline{1, q_{02}}$ визначимо значення цільових функцій кожного партнера, вважаючи відомими умови раціонального компромісу за відсутності факторів ситуаційної невизначеності, тобто покладаючи $x_1 = x_1^0$, $x_2 = x_2^0$.

Тоді для довільних $q_1 = \overline{1, q_{01}}$, $q_2 = \overline{1, q_{02}}$ маємо

$$f_1^{(q_1)} = f_1(x_1^0, x_2^0, \alpha_1^{(q_1)}); \quad f_2^{(q_2)} = f_2(x_1^0, x_2^0, \alpha_2^{(q_2)}).$$

У загальному випадку $q_{01} \neq q_{02}$.

Задачу розкриття невизначеності можна розв'язати, використовуючи різні критерії оптимальності. За наявності мети максимізації доходу або мінімізації збитку доцільно використовувати чебишевський критерій, що дає змогу безпосередньо оцінювати досягнення зазначених цілей. У цьому разі потрібно знайти такі значення $\hat{x}_1^0$, $\hat{x}_2^0$,

щоб максимальний відхил цільових функцій від раціонального компромісу був мінімально можливим з урахуванням ймовірностей відповідних ситуацій.

Для партнера 1 ця задача полягає у знаходженні такого $\hat{x}_1^0$ за відомого значення $x_2 = x_2^0$, щоб значення нев'язки

$$\Delta_1 = \max_{x_1} [p_1^{(q_1)} | f_1^{(q_1)} - f_1(x_1, x_2^0, \alpha_1^{(q_1)}) |] \quad (4.50)$$

було мінімальним

$$\Delta_1 |_{x=x_1^0} = \Delta_1^0 = \min_{x_1} \Delta_1. \quad (4.51)$$

Для партнера 2 за відомого $x_1 = x_1^0$ потрібно знайти таке $\hat{x}_2^0$, щоб значення нев'язки

$$\Delta_2 = \max_{x_2} [p_2^{(q_2)} | f_2^{(q_2)} - f_2(x_1^0, x_2, \alpha_2^{(q_2)}) |] \quad (4.52)$$

було мінімально можливим

$$\Delta_2 |_{x=x_2^0} = \Delta_2^0 = \min_{x_2} \Delta_2. \quad (4.53)$$

Значення $\hat{x}_1^0$ за умов (4.50), (4.51) визначають із системи рівнянь

$$f_1(x_1, x_2^0, \alpha_1^{(q_1)}) - f_1^{(q_1)} = 0, \quad q_1 = \overline{1, q_{01}}. \quad (4.54)$$

Значення $\hat{x}_2^0$ за умов (4.52), (4.53) знаходять із системи рівнянь

$$f_2(x_1^0, x_2, \alpha_2^{(q_2)}) - f_2^{(q_2)} = 0, \quad q_2 = \overline{1, q_{02}}. \quad (4.55)$$

Розв'язання кожної з цих задач у загальному випадку зводиться до чебишевської задачі наближення для несумісної системи нелінійних рівнянь (4.54) або (4.55), оскільки кількість рівнянь q_1 або q_2 зазвичай більша від кількості змінних (компонент вектора x_1 або x_2). Як показано вище, пошук раціонального компромісу партнерів зводять до послідовності ітерацій і завершують у разі виконання умов типу (4.49).

Розглянуті задачі належать до найпростіших задач розкриття невизначеності у разі взаємодії двох партнерів.

4.3.2. Задача взаємодії кількох партнерів

Складнішими є задачі взаємодії кількох партнерів. Розглянемо першу з них. Нехай взаємодіють k_0 партнерів, кожен з яких має власну мету, описувану відомою цільовою функцією вигляду

$$f_k(x_1, \dots, x_k, \dots, x_{k_0}), \quad k = \overline{1, k_0},$$

де x_k — вектор параметрів k -го партнера. Партнери обмінюються інформацією про значення параметрів $x_k = x'_k$. При цьому кожному партнеру відомі всі значення x'_k інших партнерів. Розв'язати задачу розкриття невизначеностей за цих умов можна з урахуванням двох варіантів.

1. Кожен k -й партнер розв'язує задачу окремо, але передає іншим партнерам інформацію про вибрані значення параметрів x_k і ступінь задоволення розв'язків, прийнятих іншими партнерами ($x'_1, \dots, x'_{k-1}, x'_{k+1}, \dots, x'_{k_0}$).

2. Рішення приймають колективно і знаходять раціональний компроміс щодо введення певних критеріїв або ступеня важливості цілі кожного партнера.

Перший варіант характерний для ситуацій, що трапляються під час переговорів між партнерами, наприклад, у разі введення квот на виробництво певних видів продукції для країн ЄС. Другий варіант — для розроблення стратегій поведінки на міжнародному ринку транснаціональних корпорацій, де кожний із партнерів (фірм) робить свій внесок у загальний дохід корпорації з урахуванням особливостей ринку певної країни, а критерієм ефективності стратегії є розмір доходу, зокрема величина відносного рівня доходу для різних рішень під час освоєння нового ринку.

Формалізацію і розв'язання наведених задач виконують за схемою для варіанта В (див. підрозд. 4.3.1) лише з такою відмінністю: замість двох оптимізують k_0 функцій. Тому розглянемо тільки варіант 2 для двох випадків.

1. Задано ступінь важливості для всіх цілей (наприклад, вказують важливість відносного внеску кожної фірми в сукупний дохід корпорації).
2. Задано додаткові умови на зразок: максимізувати деякий критерій (наприклад, сукупний дохід) за певних обмежень, наприклад, за умови, що дохід у певних регіонах або від виробництва певних видів продукції буде не нижчий наперед заданого рівня.

Розглянемо формалізацію цих задач, використовуючи прийом зведення задачі розкриття невизначеності до чебишевської задачі наближення для несумісної системи рівнянь [86, 152].

Для першого випадку задачу розкриття невизначеності формують так: потрібно знайти такі значення $x_1^0, \dots, x_k^0, \dots, x_{k_0}^0$, щоб значення нев'язки

$$\Delta = \max_k [V_k |f_k(x) - f_k^*|], \quad (4.56)$$

взятої за міру чебишевського наближення системи рівнянь

$$f_k(x) - f_k^* = 0, \quad k = \overline{1, k_0}, \quad (4.57)$$

було мінімально можливим:

$$\Delta|_{x=x^0} = \Delta^0 = \min_x \Delta, \quad (4.58)$$

де $x = \{x_1, \dots, x_k, \dots, x_{k_0}\}$; V_k — коефіцієнт важливості цілі k -го партнера; f_k^* — задане (бажане) значення цільової функції k -го партнера.

Формально ця задача збігається з розглянутою задачею розкриття невизначеності цілей, коли кожна ціль характеризує певний коефіцієнт важливості k_i .

Задачу розкриття невизначеності для другого випадку можна сформулювати так: потрібно знайти такі значення $x_1^0, \dots, x_k^0, \dots, x_{k_0}^0$, щоб забезпечити максимум заданого критерію

$$F(x_1, \dots, x_k, \dots, x_{k_0}) \rightarrow \max_{x_k} \quad (4.59)$$

за обмежень

$$f_k(x_1, \dots, x_k, \dots, x_{k_0}) \geq f_k^*. \quad (4.60)$$

Визначимо функцію $F(x_1, \dots, x_k, \dots, x_{k_0})$ як

$$F(x) = \sum_{k=1}^{k_0} f_k(x) \quad (4.61)$$

або

$$F(x) = \frac{\sum_{k=1}^{k_0} V_k f_k(x)}{\sum_{k=1}^{k_0} V_k}. \quad (4.62)$$

Тут прийнято, що у критерії (4.61) цільові функції $f_k(x)$ усіх партнерів мають однаковий ступінь важливості, а в критерії (4.62) ступінь важливості цілі кожного партнера враховано показником V_k при $k = \overline{1, k_0}$. У загальному випадку задачу максимізації функції (4.61) або (4.62) з обмеженнями (4.60) можна звести до типової задачі нелінійного програмування.

Із наведених прикладів випливає, що задачі розкриття невизначеностей для кількох партнерів можна звести до розглянутої у підрозділі 4.3.1 задачі взаємодії двох партнерів, але вони складніші в обчислювальному аспекті.

4.4. Розкриття невизначеності у задачах конфлікту стратегій

Розглянемо особливості розкриття інформаційної невизначеності для випадку, коли стратегії суб'єктів деякого загального процесу *протидіють* одна одній. До задач цього класу, наприклад, належать задачі вибору раціональної стратегії дій конкурентів на спільному ринку, якщо немає договорів між ними та обмежень у поведінці. Принципова відмінність *задач протидії стратегій* від розглянутих задач взаємодії партнерів полягає в такому.

1. Сторони не тільки не повідомляють одна одній які-небудь достовірні відомості про свої дії, але й свідомо дезінформують як щодо цілей, так і певних параметрів.
2. Ситуації, за яких розвиваються події, залежать не лише від зовнішніх умов, але й від стратегії дії сторін.
3. Дії сторін зумовлюють потребу зміни не тільки параметрів, але й цілей у процесі розвитку ситуацій.
4. Цілі сторін не тільки не збігаються, але зазвичай є протилежними і часто конфліктними.

Розбіжність інтересів або цілей суб'єктів, що діють у деякому загальному процесі, називатимемо *конфліктом стратегій*. Вивчення властивостей та особливостей конфліктних ситуацій — одне з головних завдань такої дисципліни, як теорія ігор. У нашому ж випадку розглянемо задачі розкриття невизначеності у процесі протидії супротивників за додаткових умов і припущень.

4.4.1. Задача розкриття невизначеності протидії двох супротивників

Спочатку розглянемо найпростішу задачу розкриття невизначеності протидії двох супротивників. Ця задача за своїм формулюванням багато в чому подібна до задачі взаємодії двох партнерів, але відрізняється характером і ступенем взаємної поінформованості. Задачу описують так: кожна сторона має свою цільову функцію: суб'єкт 1 — $f_1(x_1, x_2)$, суб'єкт 2 — $f_2(x_1, x_2)$. Суб'єкти діють незалежно — жодний не знає ні цільової функції, ні параметрів протилежної сторони.

Розв'язати задачу можна, застосовуючи такі два підходи.

1. Орієнтуватися на досягнення гарантованого результату в найгірших умовах.
2. Орієнтуватися на найімовірніший варіант поведінки протидіючої сторони та забезпечити найкращий для себе результат за цих умов.

У першому випадку кожний суб'єкт прагне забезпечити собі певні гарантовані результати за найгірших умов, створюваних активною протидією конкурента чи супротивника. Для досягнення гарантованого результату кожен суб'єкт виходить із таких умов:

- ♦ супротивник вибрав для себе такі параметри дії, що завдають протидіючій стороні найбільших збитків;
- ♦ з огляду на першу умову супротивник вибирає такі параметри власної діяльності, щоб у найгіршій ситуації мати максимально можливі для себе значення цільової функції.

У такому разі гарантований результат f_1^* для першого суб'єкта виражатиме співвідношення

$$f_1^* = \max_{x_1} \min_{x_2} f_1(x_1, x_2), \quad (4.63)$$

а для другого суб'єкта —

$$f_2^* = \max_{x_2} \min_{x_1} f_2(x_1, x_2). \quad (4.64)$$

Нехай умова (4.63) виконується за $x_1 = x_1^*$, а умова (4.64) — якщо $x_2 = x_2^*$, тобто

$$x_1^* = \arg \max_{x_1} \min_{x_2} f_1(x_1, x_2), \quad (4.65)$$

$$x_2^* = \arg \max_{x_2} \min_{x_1} f_2(x_1, x_2). \quad (4.66)$$

За такого вибору $x_1 = x_1^*$ для першого суб'єкта гарантовано, що за будь-якого значення x_2 виконується умова

$$f_1(x_1, x_2) \geq f_1^*. \quad (4.67)$$

Аналогічно для другого суб'єкта гарантовано, що за $x_2 = x_2^*$ і будь-якого значення x_1 виконується умова

$$f_2(x_1, x_2^*) \geq f_2^*. \quad (4.68)$$

Очевидно, що в загальному випадку значення x_2^* , вибране за умови (4.66), не збігається зі значенням $\hat{x}_2$, за якого забезпечене мінімальне значення цільової функції першого суб'єкта, тобто

$$x_2^* \neq \hat{x}_2, \quad \hat{x}_2 = \arg \min_{x_2} f_1(x_1, x_2). \quad (4.69)$$

Аналогічно для другого суб'єкта маємо

$$x_1^* \neq \hat{x}_1, \quad \hat{x}_1 = \arg \min_{x_1} f_2(x_1, x_2). \quad (4.70)$$

Звідси випливає, що в загальному випадку умови максимізації власних результатів та умови мінімізації результатів супротивника не збігаються. Ці обставини змушують кожного із суб'єктів йти на певний ризик. Наприклад, можна припустити, що супротивник вибере тактику досягнення найбільшого власного доходу, а не зменшення доходу супротивника. Такий вибір найефективніший у випадку, коли ринок попиту суттєво перевищує можливості ринку пропозицій, тому супротивник вибере такі значення параметрів, які забезпечать йому більший дохід, а не гарантований результат. Тоді перший суб'єкт може покласти $x_2 = x_2^*$ і визначити x_1^* за умови максимізації цільової функції $f_1(x_1, x_2)$ при $x_2 = x_2^*$. У цьому разі маємо

$$x_1^* = \arg \max_{x_1} f_1(x_1, x_2^*),$$

$$f_1^{**} = \max_{x_1} f_1(x_1, x_2^*).$$

Внаслідок нерівності (4.67) маємо

$$f_1^{**} > f_1^*. \quad (4.71)$$

Аналогічно для другого суб'єкта покладімо, що $x_1 = x_1^*$ й одержимо

$$x_2^* = \arg \max_{x_2} f_2(x_1^*, x_2),$$

$$f_2^{**} = \max_{x_2} f_2(x_1^*, x_2).$$

Тут внаслідок нерівності (4.68) маємо

$$f_2^{**} > f_2^*. \quad (4.72)$$

Нерівність (4.71) є строгою, оскільки нерівність (4.67) стає рівністю відповідно до (4.69) тільки тоді, якщо $x_2 = \hat{x}_2$, але f_2^{**} визначено, якщо $x_2 = x_2^*$, де $x_2^* \neq \hat{x}_2$.

Аналогічно з формул (4.68) і (4.70) випливає, що нерівність (4.72) також є строгою.

Слід зазначити, що співвідношення (4.71) і (4.72) слушні за певних обмежень на властивості функцій $f_1(x_1, x_2)$ і $f_2(x_1, x_2)$, а саме: ці функції повинні бути опуклими або увігнутими одночасно за кожною зі змінних. Якщо функція за однією змінною опукла, а за іншою — увігнута, то можлива інша ситуація, де нерівності (4.71) і (4.72) матимуть протилежне значення

$$f_1^{**} < f_1^*; \quad (4.73)$$

$$f_2^{**} < f_2^*. \quad (4.74)$$

У загальному випадку, коли функції $f_1(x_1, x_2)$ і $f_2(x_1, x_2)$ мають багато екстремумів за кожною або за однією змінною, може трапитися, що за одних значень x_1 і x_2 виконуються умови (4.71) і (4.72), а за інших — умови (4.73) і (4.74).

Отже, розглянуті умови вибору стратегій дій суб'єктів можуть бути неоптимальними, і в кожному виборі є певний ризик, а саме: якщо перший суб'єкт плануватиме свої дії за умови, що супротивник вибрав $x_2 = x_2^*$, а супротивник вибере $x_2 = x_2^{**}$, то може трапитися, що

$$\max_{x_1} f_1(x_1, x_2^{**}) < f_1^*.$$

Аналогічно для другого суб'єкта:

$$\max_{x_2} f_2(x_1^{**}, x_2) < f_2^*.$$

4.4.2. Оцінювання ступеня і рівня ризику під час розкриття невизначеності дій протидіючих сторін

Під час розкриття невизначеності дій протидіючих сторін постає *задача системного оцінювання ступеня і рівня ризику*. Розв'язуючи цю задачу, потрібно насамперед звернути увагу на те, що розглянутий підхід не враховує важливої обставини — ймовірності вибору супротивником тієї чи іншої стратегії дій, тобто ймовірності вибору $x_2 = x_2^*$, $x_2 = x_2^{**}$ чи будь-яких інших $x_2 = x_2^{***}$.

Більше того, у реальних умовах протидії сторін зазвичай наявна взаємна дезінформація: вибравши одну стратегію, кожна сторона удає, що прийнято зовсім іншу стратегію. Звідси випливає, що ступінь ризику у разі протидії сторін залежатиме як від ймовірності вибору супротивником певної стратегії, так і від ймовірності розпізнавання прийнятого рішення. Рівень ризику визначатиме *розмір збитку* кожного суб'єкта.

Припустимо, що другий суб'єкт прийняв рішення $x_2 = x_2^{**}$, а перший побудував свою стратегію за умови $x_2 = x_2^*$. Тоді рівень збитку U_1 першого суб'єкта можна визначити як

$$U_1 = \Delta f_1 = \max_{x_1} f_1(x_1, x_2^{**}) - \max_{x_1} f_1(x_1, x_2^*). \quad (4.75)$$

Аналогічно припустимо, що перший суб'єкт прийняв рішення $x_1 = x_1^{**}$, а другий — буде свою стратегію за умови, що $x_1 = x_1^*$. Тоді рівень збитку U_2 другого суб'єкта можна визначити як

$$U_2 = \Delta f_2 = \max_{x_2} f_2(x_1^{**}, x_2) - \max_{x_2} f_2(x_1^*, x_2). \quad (4.76)$$

Прийняті оцінки (4.75) і (4.76) показують, наскільки отриманий результат перевищує гарантований, тобто вони є оцінками знизу. Можна припустити інший підхід — порівнювати одержуваний результат із потенційно досяжним, тобто визначати, наскільки одержуваний результат наближається до максимально можливого.

Максимально можливе значення цільової функції першого суб'єкта дорівнюватиме

$$f_1^+ = \max_{x_1} \max_{x_2} f_1(x_1, x_2). \quad (4.77)$$

Тоді розмір збитку суб'єкта визначатиме ступінь відмінності одержуваного результату від потенційно досяжного.

Розмір збитку U_1^* для першого суб'єкта за умови, що він передбачає вибір x_2 другим суб'єктом у вигляді $x_2 = x_2^*$, визначатиме співвідношення

$$U_1^* = f_1^+ - \max_{x_1} f_1(x_1, x_2^*). \quad (4.78)$$

Аналогічно для другого суб'єкта маємо

$$U_2^* = f_2^+ - \max_{x_2} f_2(x_1^*, x_2), \quad (4.79)$$

де

$$f_2^+ = \max_{x_2} \max_{x_1} f_2(x_1, x_2). \quad (4.80)$$

Слід зазначити, що в деяких випадках становить інтерес порівняння одержуваного значення цільової функції з абсолютним мінімумом. Варіант порівняльної оцінки доцільний для аналізу критичних ситуацій, наприклад, у ситуації, коли супротивник завдає непоправних збитків протидіючій стороні. Тоді ця оцінка показуватиме, наскільки ситуація, що виникла, наближається до критичної, яка характеризується абсолютним мінімумом. Абсолютний мінімум для першого суб'єкта визначають у вигляді

$$f_1^- = \min_{x_1} \min_{x_2} f_1(x_1, x_2). \quad (4.81)$$

Тоді значення U_1^- визначатиме рівень відмінності цільових функцій ситуації, що виникла, і критичної ситуації:

$$U_1^- = f_1(x'_1, x'_2) - f_1^-,$$

де x'_1, x'_2 — числові значення x_1, x_2 , які відповідають ситуації, що виникла для першого суб'єкта.

Аналогічно для другого суб'єкта маємо

$$U_2^- = f_2(x''_1, x''_2) - f_2^-, \quad (4.82)$$

де

$$f_2^- = \min_{x_1} \min_{x_2} f_2(x_1, x_2),$$

x''_1, x''_2 — числові значення x_1, x_2 в ситуації, що виникла, для другого суб'єкта.

4.4.3. Розкриття невизначеності поведінки протидіючих сторін на базі інтервального принципу

На завершення розгляду способів розкриття невизначеності поведінки протидіючих сторін зазначимо, що наведені характеристики дають змогу одержати кількісні оцінки результатів власних рішень у наявних ситуаціях у разі передбачуваних дій супротивника. Водночас ці характеристики мають і певні недоліки: вони дають односторонню

оцінку — наскільки відрізняється можливий результат від того чи іншого відомого значення. Такі оцінки називають *точковими* в тому розумінні, що вони показують відстань між двома точками — попередньо заданою (або обчисленою) і точкою, яка визначає ситуацію. Наприклад, вони показують, наскільки результат наближається до максимально можливого значення, але не визначають, наскільки він перевищує мінімально можливе значення. Або навпаки, надають можливість порівняння з мінімальним можливим значенням, не даючи відповіді, наскільки результат відрізняється від максимально можливого значення.

Цього недоліку можна уникнути, якщо замість точкового принципу порівняння взяти інтервальний. Суть *інтервального порівняння* полягає в тому, що наявну ситуацію оцінюють значенням цільової функції в числовому інтервалі, мінімальне значення якого відповідає найгіршій ситуації, а максимальне — найкращій.

Як зазначено у попередньому підрозділі, найгіршу і найкращу ситуації для першого суб'єкта описують відповідно величини f_1^- і f_1^+ , визначені співвідношеннями (4.81) і (4.77).

Для першого суб'єкта інтервальну оцінку для довільних значень x_1 і x_2 подамо у вигляді

$$I_1(x_1, x_2) = \frac{f_1(x_1, x_2) - f_1^-}{f_1^+ - f_1^-}. \quad (4.83)$$

Беручи до уваги, що відповідно до означення f_1^+ і f_1^- функція $f_1(x_1, x_2)$ задовольняє умову

$$f_1^- \leq f_1(x_1, x_2) \leq f_1^+,$$

з формули (4.83) випливає, що виконується нерівність

$$0 \leq I_1(x_1, x_2) \leq 1.$$

Аналогічно для другого суб'єкта інтервальну оцінку для довільних значень x_1 і x_2 визначає співвідношення

$$I_2(x_1, x_2) = \frac{f_2(x_1, x_2) - f_2^-}{f_2^+ - f_2^-}, \quad (4.84)$$

де f_2^+ , f_2^- визначені відповідно за (4.80) і (4.82).

З огляду на те, що

$$f_2^- \leq f_2(x_1, x_2) \leq f_2^+,$$

з формули (4.84) випливає, що виконується нерівність

$$0 \leq I_2(x_1, x_2) \leq 1.$$

Оцінки (4.83) і (4.84) дозволяють визначити (у відносних одиницях) ступінь перевищення відповідними функціями $f_1(x_1, x_2)$ і $f_2(x_1, x_2)$ своїх мінімальних значень, оскільки при $f_1(x_1, x_2) = f_1^-$ і $f_2(x_1, x_2) = f_2^-$ відповідно маємо $I_1(x_1, x_2) = 0$; $I_2(x_1, x_2) = 0$.

Введемо оцінки, які визначатимуть відносний рівень відмінності цільових функцій від їх максимальних значень:

$$\begin{aligned} I_1^+(x_1, x_2) &= \frac{f_1^+ - f_1(x_1, x_2)}{f_1^+ - f_1^-}; \\ I_2^+(x_1, x_2) &= \frac{f_2^+ - f_2(x_1, x_2)}{f_2^+ - f_2^-}. \end{aligned} \quad (4.85)$$

Легко перевірити, що виконуються співвідношення

$$\begin{aligned} I_1^+(x_1, x_2) + I_1^-(x_1, x_2) &= 1; \\ I_2^+(x_1, x_2) + I_2^-(x_1, x_2) &= 1. \end{aligned}$$

Звідси випливає, що досить визначити лише одну оцінку для кожного суб'єкта. Наприклад, $I_1^-(x_1, x_2)$ чи $I_1^+(x_1, x_2)$ для першого суб'єкта або $I_2^-(x_1, x_2)$ чи $I_2^+(x_1, x_2)$ для другого.

Практична значущість цих оцінок полягає в тому, що можна заздалегідь визначити або задати нижню межу гранично допустимого збитку незалежно від абсолютного значення як f_1^+ , f_1^- , так і $f_1(x_1, x_2)$.

Таке оцінювання допустимого збитку застосовують у багатьох сферах практичної діяльності, зокрема під час виконання різноманітних ділових операцій, пов'язаних із ризиками конкуренцій, криз, форс-мажорних обставин тощо. Майже у всіх державах світу встановлено допустимі рівні ризику банківських операцій. Такий рівень, зокрема, може бути виражений у відсотках від вартості активів банку.

Приклад 3. Для двох протидіючих суб'єктів задано цільові функції

$$\begin{aligned} f_{12}(x_1, x_2) &= -x_1^2 + 2x_1 + x_2^2 - 4x_2 + 8; \\ f_{21}(x_1, x_2) &= x_1^2 - 6x_1 - x_2^2 + 2x_2 + 2 \end{aligned}$$

і області визначення їх стратегій

$$x_1 \in [0; 4]; \quad x_2 \in [0; 4].$$

Потрібно знайти оптимальні розв'язки для протидіючих суб'єктів з урахуванням обмежень

$$\begin{aligned} f_{12}(x_1, x_2) &\geq f_{12}^*; & (a) \\ f_{21}(x_2, x_1) &\geq f_{21}^*; & (б), \end{aligned} \quad (4.86)$$

де

$$\begin{aligned} f_{12}^* &= \max_{x_1} \min_{x_2} f_{12}(x_1, x_2); \\ f_{21}^* &= \max_{x_2} \min_{x_1} f_{21}(x_1, x_2). \end{aligned}$$

Щоб знайти оптимальні розв'язки для протидіючих суб'єктів, насамперед потрібно знайти їх раціональні розв'язки з множини Парето. Для цього треба попередньо знайти гарантовані результати f_{12}^* , f_{21}^* , використовуючи різні методи, зокрема класичний, що ґрунтується на дослідженні екстремальних властивостей функцій, табличний, графічний тощо. Розглянемо застосування деяких методів для знаходження гарантованого результату.

Спочатку знайдемо f_{12}^* , f_{21}^* , використовуючи табличний метод пошуку f_1^* , f_2^* на підставі співвідношень (4.63), (4.64). Результати наведено відповідно в табл. 4.2 і 4.3.

Таблиця 4.2. Знаходження гарантованого результату f_{12}^*

x_1	0					1					2					3					4				
x_2	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
f_{12}	8	5	4	5	8	9	6	5	6	9	8	5	4	5	8	5	2	1	2	5	0	-3	-4	-3	0

З табл. 4.2 видно, що $f_{12}^* = \max_{x_1} \min_{x_2} f_{12}(x_1, x_2) = f_{12}^*(1; 2) = 5$.

Таблиця 4.3. Знаходження гарантованого результату f_{21}^*

x_1	0					1					2					3					4				
x_2	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
f_{21}	2	-3	-6	-7	-6	3	-2	-5	-6	-5	2	-3	-6	-7	-6	-1	-6	-9	-10	-9	-6	-11	-14	-15	-14

З табл. 4.3 випливає, що $f_{21}^* = \max_{x_2} \min_{x_1} f_{21}(x_1, x_2) = f_{21}^*(3; 1) = -6$.

Далі знайдемо гарантовані результати f_{12}^* , f_{21}^* класичним методом, який ґрунтується на дослідженні екстремальних властивостей функцій.

Дослідимо функцію $f_{12}(x_1, x_2)$:

$$\frac{\partial f_{12}}{\partial x_2} = 2x_2 - 4 = 0.$$

Звідси одержуємо, що мінімуму функція досягає при $x_2 = 2$.

Потрібно відшукати значення x_1 , за якого функція досягатиме максимуму. У $f_{12}(x_1, x_2)$ підставимо одержане значення $x_2 = 2$, візьмімо похідну за x_1 і прирівняємо до нуля:

$$\frac{\partial f_{12}(x_1, 2)}{\partial x_1} = -2x_1 + 2 = 0,$$

звідки маємо $x_1 = 1$. З характеру поведінки функції випливає, що в точці $x_1 = 1$ буде максимум. Отже,

$$\max_{x_1} \min_{x_2} f_{12}(x_1, x_2) = f_{12}^*(1; 2) = 5.$$

Такі самі дії, але вже без пояснення, виконаємо для другого суб'єкта, тобто для функції $f_{21}(x_2, x_1)$

$$\frac{\partial f_{21}}{\partial x_1} = 2x_1 - 6 = 0.$$

Одержимо мінімум у точці $x_1 = 3$.

$$\frac{\partial f_{21}(3, x_2)}{\partial x_2} = -2x_2 + 2 = 0,$$

звідки випливає, що в точці $x_2 = 1$ функція досягає максимуму. Отже,

$$f_{21}^* = \max_{x_2} \min_{x_1} f_{21}(x_1, x_2) = f_{21}^*(3; 1) = -6.$$

І, нарешті, скористаємося для знаходження f_{12}^* , f_{21}^* графічним методом. Щоб знайти f_{12}^* , фіксуємо послідовність значень x_1 , будують графіки функції $f_{12}(x_1, x_2)$ за x_2 (рис. 4.7). З цього рисунка видно, що максимального мінімуму досягають при $x_2 = 2$ і $x_1 = 1$, а $f_{12}^* = 5$.

Для відшукування f_{21}^* аналогічно, фіксуємо послідовність значень x_2 , будують графіки функції $f_{21}(x_1, x_2)$ за x_1 (рис. 4.7). Як видно з рисунка, максимального мінімуму досягають при $x_1 = 3$ і $x_2 = 1$, а $f_{21}^* = -6$. Отже, гарантовані результати такі: $f_{12}^* = 5$ і $f_{21}^* = -6$.

Множину Парето знаходимо, виходячи з обмежень $f_{12}^*(x) \geq 5$; $f_{21}^*(x) \geq -6$. Систему нерівностей (4.86) доволі просто розв'язати графічно. Множини точок заданої області, які задовольняють ці нерівності, показано на рис. 4.8.

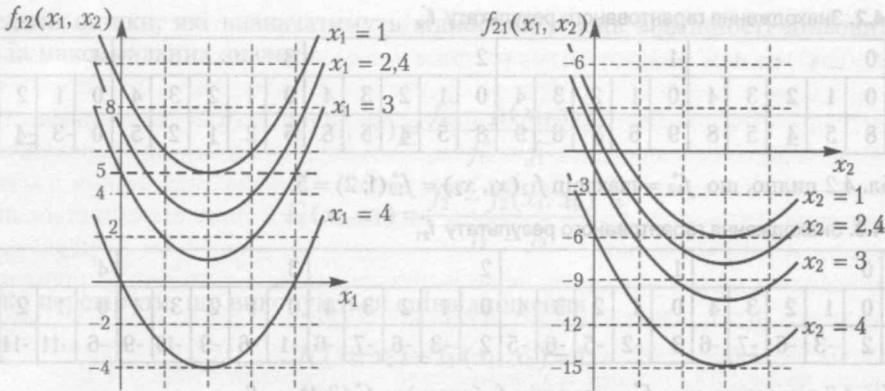


Рис. 4.7. Знаходження функцій f_{12}^* та f_{21}^* графічним методом

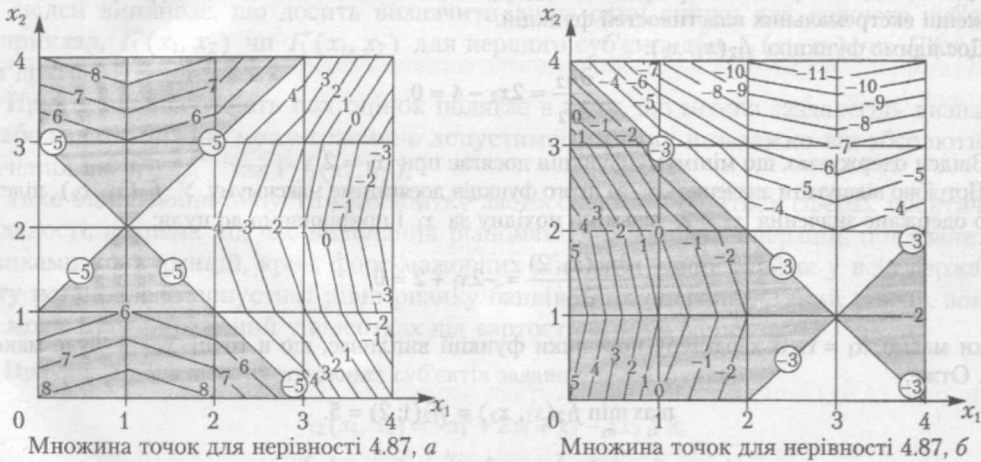


Рис. 4.8. Розв'язання системи нерівностей графічним методом

Множину Парето у вигляді перетину цих областей, де лежать раціональні розв'язки для протидіючих суб'єктів, зображено на рис. 4.9. Тут же показано оптимальні значення x_1^* і x_2^* , за яких $\Delta = \min_{x_1, x_2} \max_i \Delta_i = 0$, де $\Delta_i = |f_i(x_1, x_2) - f_i^*|$, $i = 1, 2$.

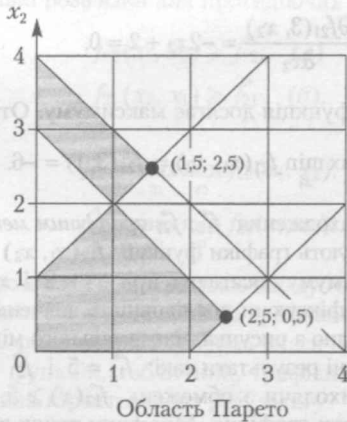


Рис. 4.9. Визначення множини Парето графічним методом

4.5. Задачі і методи розкриття системної невизначеності

У попередніх підрозділах розглянуто підходи, прийоми і методи до розкриття певних видів невизначеностей, а саме: невизначеності цілей, ситуаційної невизначеності, невизначеності взаємодії партнерів або протидії сторін. Це означало, що під час розгляду одного з видів невизначеностей апріорно покладали, що інших видів невизначеностей немає. Але в реальних системних задачах зазвичай різні види невизначеностей діють одночасно. Тому постає низка практичних запитань.

1. Чи доцільно окремо аналізувати різні види невизначеностей?
2. Чи можна агрегувати результати окремих аналізів у сумарний результат із достатнім ступенем вірогідності?
3. Чи існують ефективні методи і підходи до розкриття декількох видів невизначеностей одночасно в одній системній задачі?
4. За яких обмежень і припущень можна одночасно розкривати кілька видів невизначеностей?

Для одержання відповідей на ці запитання потрібно насамперед сформулювати *задачу розкриття системної невизначеності*.

4.5.1. Змістовне формулювання задачі

Нехай потрібно розкрити невизначеності цілей двох суб'єктів у двох можливих ситуаціях: взаємодії суб'єктів як партнерів і розв'язання суб'єктами суперечностей за умов протидії сторін.

Відомо, що цілі 1 і 2-го суб'єктів описують такі вектор-функції:

$$f_1(x_1, \hat{x}_2, \alpha_1) = \{f_{1i}(x_1, \hat{x}_2, \alpha_1) | i_1 = \overline{1, m_1}\}, \quad (4.87)$$

$$f_2(x_2, \hat{x}_1, \alpha_2) = \{f_{2i}(x_2, \hat{x}_1, \alpha_2) | i_2 = \overline{1, m_2}\}. \quad (4.88)$$

Вектор-функції цілей кожного суб'єкта складаються з компонент $f_{1i}(x_1, \hat{x}_2, \alpha_1)$, $i_1 = \overline{1, m_1}$ і $f_{2i}(x_2, \hat{x}_1, \alpha_2)$, $i_2 = \overline{1, m_2}$. Водночас кожна компонента залежить від параметрів та умов, що принципово відрізняються за властивостями і можливостями суб'єктів управляти ними. Так, по-перше, суб'єкти можуть самостійно змінювати певні параметри в допустимих межах на свій розсуд: суб'єкт 1 — параметри вектора x_1 у вектор-функції (4.87), суб'єкт 2 — параметри вектора x_2 у вектор-функції (4.88). По-друге, за невизначеності кожному суб'єкту апріорно невідомі дії іншого суб'єкта, тому кожен із них прогнозує можливі дії партнера або супротивника на підставі оцінювання можливих значень і меж інтервалів таких параметрів: суб'єкт 1 — параметрів вектора $\hat{x}_2$ вектор-функції (4.87), суб'єкт 2 — параметрів вектора $\hat{x}_1$ вектор-функції (4.88). По-третє, кожному суб'єкту апріорно відомо, що впливають зовнішні природні, екологічні та інші фактори, властивості яких не залежать від суб'єктів, і тому змінити їх показники не може жодна зі сторін. Кожний суб'єкт може незалежно тільки описувати і характеризувати можливі впливи різних факторів. Зокрема, суб'єкт 1 прогнозує впливи вибором кількості і значень показників вектора α_1 , а суб'єкт 2 — вибором кількості і значень показників вектора α_2 . При цьому суб'єкт 1 вважає, що основний зовнішній

вплив визначають кліматичні, екологічні та інші зовнішні умови і фактори, а також умови на ринку попиту або збуту певних видів продукції різного призначення. Вектор α_1 характеризує діапазон змін відповідних зовнішніх умов і факторів. Суб'єкт 2 може прогнозувати можливі впливи з огляду на інші зовнішні умови та фактори і відповідно має інші компоненти і значення вектора α_2 . Тому вектори α_1 і α_2 , які характеризують зовнішні впливи у розумінні відповідно суб'єкта 1 і суб'єкта 2, можуть відрізнятися як структурою, так і кількістю компонент.

Отже, апріорно відомо, що в загальному випадку суб'єкти формують свої цільові функції незалежно. Тому f_{1i_1} і f_{2i_2} — такі функції, у яких загальна кількість аргументів N_1 і N_2 різна:

$$N_1 = n'_1 + n'_2 + n'_a; \quad N_2 = n''_1 + n''_2 + n''_a,$$

де суб'єкти 1 і 2 визначають відповідно такі величини: n'_1 і n''_1 — кількість компонент векторів x_1 і $\hat{x}_1$; n'_2 і n''_2 — кількість компонент векторів $\hat{x}_2$ і x_2 ; n'_a і n''_a — кількість компонент векторів α_1 і α_2 .

Потрібно розкрити системну невизначеність з позиції її сприйняття кожним суб'єктом.

4.5.2. Математична постановка задачі

Загальна задача розкриття системної невизначеності зводиться в математичному формулюванні до спільного дослідження різних видів невизначеностей, що ґрунтуються на таких умовах, властивостях і обмеженнях:

- ♦ умовах розкриття невизначеності цілей кожного з двох суб'єктів у двох можливих ситуаціях: взаємодії суб'єктів як партнерів або за їх протидії;
- ♦ властивостях та обмеженнях цілей, які описані заданими вектор-функціями (4.87) і (4.88) і відрізняються складом параметрів, кількістю компонент, можливими впливами;
- ♦ умовах формування компонент вектор-функцій, які незалежно визначають суб'єкти;
- ♦ діапазонах можливих змін відповідних зовнішніх умов і факторів, які незалежно прогнозують суб'єкти.

Для розкриття невизначеності цілей потрібно виконати такі процедури:

- ♦ кожному суб'єктові розробити математичну модель умов, властивостей і можливостей зовнішніх впливів, враховуючи невизначеність, неповноту і недостовірність вихідної інформації про зовнішні впливи;
- ♦ кожному суб'єктові розробити математичну модель стратегії дій для двох варіантів: взаємодії суб'єктів як партнерів; розв'язання суб'єктами суперечностей за протидії сторін із урахуванням невизначеності, неповноти і недостовірності інформації про дії іншого суб'єкта як партнера або супротивника;
- ♦ суб'єктові 1 визначити раціональне співвідношення між компонентами $f_{1i_1}(x_1, \hat{x}_2, \alpha_1)$, $i_1 = \overline{1, m_1}$ цільової вектор-функції (4.87), раціональні значення компонент $x_{11}, \dots, x_{1j_1}, \dots, x_{1n'_1}$ вектора x_1 і компонент $\hat{x}_{21}, \dots, \hat{x}_{2j_2}, \dots, \hat{x}_{2n'_2}$ вектора $\hat{x}_2$;
- ♦ суб'єктові 2 визначити раціональне співвідношення між компонентами $f_{2i_2}(x_2, \hat{x}_1, \alpha_2)$, $i_2 = \overline{1, m_2}$ цільової вектор-функції (4.88), раціональні значення компонент $x_{21}, \dots, x_{2j_2}, \dots, x_{2n''_2}$ вектора x_2 і компонент $\hat{x}_{11}, \dots, \hat{x}_{1j_1}, \dots, \hat{x}_{1n''_1}$ вектора $\hat{x}_1$.

4.5.3. Розв'язання задачі розкриття системної невизначеності

Насамперед слід звернути увагу, що процедури розв'язання задачі мають кілька практично важливих особливостей. По-перше, математична модель зовнішніх впливів на суб'єкти і математична модель стратегії дій суб'єктів мають бути розроблені за невизначеностей різних видів, а саме: невизначеностей цілей, ситуацій, факторів та умов взаємодії або протидії суб'єктів. Тому такі моделі розробляють із використанням неформалізованих процедур, які реалізує для певної задачі колектив розробників на підставі досвіду, знань, інтуїції і передбачення. Тут лише зазначимо про необхідність створення таких моделей, а основні питання їхньої розробки і застосування розглянемо у наступних розділах.

По-друге, для суб'єктів усі наведені вище процедури однотипні за формальною постановкою, але різні за її структурною реалізацією. Зокрема, кожний суб'єкт формує вектор-функції на підставі власного трактування цілей і стратегії дій. Тому в загальному випадку кількість цільових функцій m_1 і m_2 суб'єктів, а також кількість компонент векторів x_1 , x_2 і α_1 , α_2 для кожного із суб'єктів — різні. Наприклад, суб'єкт 1 оцінює цілі і дії партнера 2 тільки на підставі макроекономічних показників, а суб'єкт 2 може характеризувати свої дії більш точно і повно, враховуючи додатково певні економічні показники виробництва та умови національного ринку попиту. Тому кількість n'_2 компонент вектора $\hat{x}_2$ в цільовій функції $f_1(x_1, \hat{x}_2, \alpha_1)$ може не збігатися з кількістю n''_2 компонент вектора x_2 в цільовій функції $f_2(\hat{x}_1, x_2, \alpha_2)$. Аналогічно суб'єкти можуть характеризувати прогнозовану ситуацію α різною кількістю компонент n'_α і n''_α . Більше того, вони можуть характеризувати ситуацію не лише різною кількістю компонент, але й різним вибором їх змісту. Тому вектори α_1 і α_2 , які характеризують ситуацію відповідно у розумінні суб'єкта 1 і суб'єкта 2, можуть бути різними як за структурою і кількістю, так і за смисловим значенням компонент показників.

По-третє, кожний суб'єкт має враховувати невизначеність, неповноту і недостовірність інформації про дії іншого суб'єкта. Зокрема, потрібно попередньо визначити свою роль стосовно іншого суб'єкта і спрогнозувати його роль як партнера або супротивника. Далі у процесі практичної діяльності кожному суб'єктові слід уточнювати інформацію, зокрема виявляти динаміку ринку й аналізувати тенденції дій іншого суб'єкта. Більше того, кожний суб'єкт повинен також враховувати вплив зовнішніх факторів, звертаючи особливу увагу на характер невизначеності, неповноти і недостовірності інформації про діапазони можливих змін прогнозованих і новоз'явлених зовнішніх умов і факторів. Проведений аналіз доводить практичну необхідність уточнювати інформацію і коригувати стратегію дій з урахуванням дій іншого суб'єкта, динаміки зовнішніх умов і факторів. Базуючись на цьому, кожний суб'єкт має вчасно коригувати свої цілі, задачі і дії.

Далі слід звернути увагу на особливості і можливості розкриття системної невизначеності. Спочатку з'ясуємо, за яких умов можна аналізувати незалежно різні види невизначеностей. Очевидно, що найсприятливішою умовою є незалежність впливу досліджуваних факторів, умов та обмежень. У такій ситуації кожен цільову функцію можна подати в адитивній формі:

$$f_{1i_1} = f_{11i_1}(x_1) + f_{12i_1}(\hat{x}_2) + f_{13i_1}(\alpha_1), \quad i_1 = \overline{1, m_1}, \quad (4.89)$$

$$f_{2i_2} = f_{21i_2}(\hat{x}_1) + f_{22i_2}(x_2) + f_{23i_2}(\alpha_2), \quad i_2 = \overline{1, m_2}, \quad (4.90)$$

де для функції f_{1i_1} доданки мають таку суть: $f_{11i_1}(x_1)$ — описує i_1 -ту компоненту цілі як функцію від вектора x_1 , змінюваного суб'єктом 1; $f_{12i_1}(\hat{x}_2)$ — i_1 -та компонента

цілі як прогнозована суб'єктом 1 функція від вектора $\hat{x}_2$ можливих дій суб'єкта 2; $f_{13i}(\alpha_1)$ — i_1 -та компонента, зумовлена наявною ситуацією для суб'єкта 1, яка залежить від значень вектора α_1 , що кількісно характеризує цю ситуацію. Аналогічне значення для функції f_{2i} мають відповідні доданки $f_{21i}(\hat{x}_1)$; $f_{22i}(x_2)$; $f_{23i}(\alpha_2)$.

Зазначимо, що функція $f_{1i} = f_{1i}(x_1; \hat{x}_2; \alpha_1)$ характеризує підсумкову залежність i_1 -ї компоненти від усіх векторів x_1 , $\hat{x}_2$, α_1 у розумінні суб'єкта 1. На основі цієї функції формують систему з $i_1 = \overline{1, m_1}$ рівнянь, розв'язок якої визначає для суб'єкта 1 результат розкриття системної невизначеності. Аналогічний результат визначає функція f_{2i} для суб'єкта 2. Слід звернути увагу, що для системи рівнянь (4.89) можливе визначення i_1 -ї компоненти окремо для кожного вектора x_1 , $\hat{x}_2$, α_1 , оскільки компоненти кожного вектора не залежать від інших векторів, і загальний результат для функції f_{1i} визначає підсумовування. Такий підхід цілком застосовний і для системи (4.90).

У цьому разі задачу розкриття невизначеності цілей розв'язують, використовуючи розглянуті раніше прийоми для функцій

$$f'_1 = \{f_{11i}(x_1) | i_1 = \overline{1, m_1}\}. \quad (4.91)$$

Задачу одночасного розкриття невизначеності для кількох векторів розв'язують, застосовуючи різні підходи і методи. Найпростішим є метод згортки [109]. Його реалізують перетворенням системи функцій

$$f''_1 = \{f_{11i}(x_1), f_{13i}(\alpha_1) | i_1 = \overline{1, m_1}\}, \quad (4.92)$$

на узагальнену функцію вигляду

$$F(x_1, \alpha_1) = \sum_{i_1=1}^{m_1} [c'_{i_1} f_{11i}(x_1) + c''_{i_1} f_{13i}(\alpha_1)] \quad (4.93)$$

і подальшим розкриттям невизначеності цілей для узагальненої функції $F(x_1, \alpha_1)$ з використанням розглянутих прийомів.

Інший метод — зведення задачі розкриття невизначеності цілей до системи рівнянь

$$f_{11i}(x_1) + f_{13i}(\alpha_1) = f^*_{11i}, \quad i_1 = \overline{1, m_1}, \quad (4.94)$$

де f^*_{11i} визначає значення функції $f_{11i}(x_1)$, що відповідає розв'язку чебишевської задачі наближення для системи рівнянь

$$f_{11i}(x_1) - b_{i_1} = 0, \quad i_1 = \overline{1, m_1}.$$

Систему формують під час розкриття невизначеності цілей, якщо немає або не враховано інші фактори невизначеності, зокрема $\hat{x}_2$ і α_1 . Такий підхід має дві важливі для практики особливості. По-перше, він дає змогу виявити в задачі окремо кількісний вплив кожного фактора невизначеності $\hat{x}_2$ і α_1 на загальний результат розкриття невизначеності цілей. По-друге, немає потреби згортати системи рівнянь (4.94) у форму узагальненої функції $F(x_1, \alpha_1)$. Це виключає потребу введення коефіцієнтів c'_{i_1} і c''_{i_1} , вибір яких принципово неформалізований і тому здійснюваний ОПР або експертами, що вносить елементи суб'єктивізму до структури (4.93) функції $F(x_1, \alpha_1)$.

Перейдімо до розгляду невизначеності дій партнерів або супротивників. Спочатку розглянемо задачу розкриття невизначеності протидії суб'єктів як двох конкурентів у разі чітко визначеної цілі кожного з них. Припустімо, що для кожного суб'єкта відома

функціональна залежність, яка визначає ступінь впливу на його цілі дій конкурента і впливи зовнішніх факторів наявної ситуації. Протидію аналізують у разі дії однієї з таких умов:

- ♦ властивості ситуації повністю визначені, і її впливом на досягнення цілі кожним учасником можна знехтувати;
- ♦ основні властивості ситуації визначено, ступінь її впливу на досягнення цілі кожним учасником визначає єдиний ймовірнісний показник.

Передусім розглянемо прийоми розкриття невизначеності протидії двох суб'єктів у чітко визначеній ситуації. Припустимо, що суб'єкт 1 має m_1 цілей, а суб'єкт 2 — m_2 цілей. У разі виконання умови 1 відповідно до (4.89) і (4.90) для всіх $i_1 = \overline{1, m_1}$ маємо $f_{13i_1}(\alpha_1) = 0$, а для всіх $i_2 = \overline{1, m_2}$ — $f_{23i_2}(\alpha_2) = 0$. Отже, цілі учасників описують такі співвідношення:

♦ для суб'єкта 1

$$f_{1i_1}(x_1, \hat{x}_2) = f_{11i_1}(x_1) + f_{12i_1}(\hat{x}_2), \quad i_1 = \overline{1, m_1}; \quad (4.95)$$

♦ для суб'єкта 2

$$f_{2i_2}(\hat{x}_1, x_2) = f_{21i_2}(\hat{x}_1) + f_{22i_2}(x_2), \quad i_2 = \overline{1, m_2}. \quad (4.96)$$

Задача полягає у знаходженні таких значень x_1 для суб'єкта 1, щоб забезпечити гарантований результат для кожної цільової функції. Значення гарантованого результату визначає співвідношення

$$f_{1i_1}^* = \max_{x_1} \min_{\hat{x}_2} f_{1i_1}(x_1, \hat{x}_2), \quad i_1 = \overline{1, m_1},$$

або, з огляду на (4.95),

$$f_{1i_1}^* = \max_{x_1} f_{11i_1}(x_1) + \min_{\hat{x}_2} f_{12i_1}(\hat{x}_2). \quad (4.97)$$

Шукане значення x_1^* визначає співвідношення

$$x_1^* = \arg \max_{x_1} \min_{\hat{x}_2} f_{1i_1}(x_1, \hat{x}_2), \quad (4.98)$$

де

$$f_{1i_1}(x_1, \hat{x}_2) = \{f_{11i_1}(x_1, \hat{x}_2) | i_1 = \overline{1, m_1}\}.$$

Слід зазначити, що співвідношення (4.98) тільки формально визначає шукане значення x_1^* вектора x_1 , оскільки в загальному випадку кількість m_1 компонент цільової функції $f_{1i_1}(x_1, \hat{x}_2)$ не дорівнює кількості n_1 компонент вектора x_1 і n_2 компонент вектора $\hat{x}_2$. У цьому разі задачу розкриття невизначеності протидії для системи цільових функцій (4.95) і (4.96) доцільно звести до таких двох задач чебишевського наближення.

Задача А1. Знайти такі значення x_2^* , за яких для всіх $i_1 = \overline{1, m_1}$ забезпечено виконання умов

$$f_{12i_1}^* = \min_{\hat{x}_2} f_{12i_1}(\hat{x}_2); \quad x_2^* = \arg \min_{\hat{x}_2} f_{12i_1}(\hat{x}_2).$$

Задача A2. Знайти такі значення x_1^* , за яких для всіх $i_1 = \overline{1, m_1}$ забезпечено виконання умов

$$f_{11i_1}^* = \max_{x_1} f_{11i_1}(x_1); \quad x_1^* = \arg \max_{x_1} f_{11i_1}(x_1).$$

Задача A1 полягає у знаходженні x_2^* з несумісної системи рівнянь

$$\begin{cases} f_{121}(\hat{x}_2) - b_{121} = 0, \\ \dots \dots \dots \\ f_{12i_h}(\hat{x}_2) - b_{12i_h} = 0, \\ \dots \dots \dots \\ f_{12m_1}(\hat{x}_2) - b_{12m_1} = 0, \end{cases}$$

за умови, що величина

$$\Delta_{12} = \max_{i_1} |f_{12i_1} - b_{12i_1}|, \quad (4.99)$$

взята за міру чебишевського наближення, повинна бути мінімально можливою:

$$\Delta_{12}(x_2^*) = \min_{x_2} \Delta_{12} = \Delta_{12}^0.$$

У цій задачі нерозв'язане питання про вибір b_{12i_h} для всіх $i_1 = \overline{1, m_1}$. Такий вибір можна здійснити на базі теорії корисності, відповідно до якої значення b_{12i_h} може бути будь-яким. З фізичного змісту задачі очевидно, що таким є значення $b_{12i_h} = 0$ для всіх $i_1 = \overline{1, m_1}$, що відповідає повній відсутності впливу конкурента (супротивника) на діяльність суб'єкта 1. Тоді задача A1 зводиться до чебишевського наближення для несумісної системи рівнянь

$$f_{12i_h}(\hat{x}_2) = 0; \quad i_1 = \overline{1, m_1}. \quad (4.100)$$

Розв'язавши систему (4.100), одержимо значення x_2^* і значення функцій

$$f_{12i_h}(x_2^*) = \Delta_{12i_h}^*, \quad (4.101)$$

де відповідно до (4.98) і (4.99)

$$\Delta_{12i_h}^* \leq \Delta_{12}^0.$$

Аналогічно, задача A2 полягає у знаходженні таких значень x_1^* з несумісної системи рівнянь

$$f_{11i_1}(x_1) - b_{11i_1} = 0, \quad i_1 = \overline{1, m_1}, \quad (4.102)$$

для яких величина

$$\Delta_{11} = \max_i |f_{11i_1} - b_{11i_1}|, \quad (4.103)$$

взята за міру чебишевського наближення, має бути мінімально можливою

$$\Delta_{11}(x_1^*) = \min_{x_1} \Delta_{11} = \Delta_{11}^0. \quad (4.104)$$

Величину b_{1i_h} для $i_1 = \overline{1, m_1}$ вибираємо аналогічно. Зокрема, можна покласти

$$b_{1i_h} = \max_{x_1 \in D} f_{1i_h}(x_1),$$

де D — задана з фізичних міркувань область визначення компонент вектора x_1 у формі

$$d_{1j_h}^- \leq x_{1j_h} \leq d_{1j_h}^+.$$

Після розв'язання цієї задачі одержимо значення x_1^* і значення функцій

$$f_{1i_h}^* = f_{1i_h}(x_1^*) = b_{1i_h} \pm \Delta_{1i_h}^*, \quad (4.105)$$

де внаслідок умов (4.103) і (4.104) справджується

$$\Delta_{1i_h}^* \leq \Delta_{11}^0.$$

Розв'язавши задачі A1 і A2, маємо шукані значення, відповідно x_2^* і x_1^* , а також значення гарантованого результату для кожної цільової функції, яке на підставі (4.97), (4.101) і (4.105) визначає співвідношення

$$f_{1i_h}^* = f_{11i_h}^* + f_{12i_h}^*.$$

Причому для будь-якого $i_1 = \overline{1, m_1}$ виконується нерівність

$$f_{1i_h}^- \leq f_{1i_h}^* \leq f_{1i_h}^+,$$

де $f_{1i_h}^-$, $f_{1i_h}^+$ — відповідно, точні нижня і верхня межі функції $f_{1i}(x_1, \hat{x}_2)$ в околах точок x_1^* , x_2^* у вигляді

$$\begin{aligned} f_{1i_h}^- &= (b_{1i_h} - |\Delta_{11i_h}^*|) - |\Delta_{12i_h}^*|; \\ f_{1i_h}^+ &= (b_{1i_h} + |\Delta_{11i_h}^*|) + |\Delta_{12i_h}^*|. \end{aligned} \quad (4.106)$$

Співвідношення (4.106) впливають із властивостей чебишевського наближення функцій [86, 152].

Далі розглянемо задачу розкриття невизначеності протидії конкурентів (супротивників), одночасно враховуючи дії конкурента і ситуаційну невизначеність. Цю задачу з огляду на (4.89) можна звести до задач B1 і B2.

Задача B1. Розкриття невизначеності цілей і ситуаційної невизначеності для суб'єкта 1.

Задача B2. Розкриття невизначеності протидії супротивників у повністю визначеній ситуації, впливом якої на досягнення цілі кожним учасником можна знехтувати (цю задачу докладно розглянуто вище).

Задача B1 відрізняється від розглянутої раніше задачі розкриття невизначеності цілей і ситуації тим, що тут накладено додаткову умову: ситуацію описує не один імовірнісний показник, а вектор α_1 . Таку задачу можна звести, використовуючи розглянуті вище прийоми, до такої чебишевської задачі наближення.

Знайти такі значення x_1^{**} для системи рівнянь

$$f_{11i}(x_1) + f_{13i}(\alpha_1) = b_{11i}, \quad i = \overline{1, m_1},$$

за яких величина

$$\Delta_{11\alpha} = \max_i |f_{11i}(x_1) + f_{13i}(\alpha_1) - b_{11i}|,$$

взята за міру чебишевського наближення, буде мінімально можливою

$$\Delta_{11\alpha}(x_1^{**}) = \min_{x_1} \Delta_{11\alpha} = \Delta_{11\alpha}^0.$$

У цьому формулюванні задача подібна до розглянутої задачі А2 щодо співвідношень (4.102)–(4.104), однак має певні особливості. Зокрема, таке формулювання задачі доцільне за умови, що відома певна ситуація, для якої визначено числові значення вектора α_1 і функцію $f_{13i}(\alpha_1)$.

На практиці можливий послідовний вплив декількох ситуацій. Припустимо, що відомо k_0 ситуацій, для кожної з яких прогнозують коефіцієнти ймовірності p_k , $k = \overline{1, k_0}$, функції $f_{13i}(\alpha_{1k})$, $k = \overline{1, k_0}$ і числові значення вектора α_{1k} , $k = \overline{1, k_0}$. Задачу розв'язують окремо для кожної $k = \overline{1, k_0}$ ситуації і зводять до такої задачі чебишевського наближення.

Знайти такі значення x_1^{**} для системи рівнянь

$$f_{11i}(x_1) + f_{13i}(\alpha_{1k}) = b_{11i}; \quad i = \overline{1, m_1}; \quad k \in \overline{1, k_0}, \quad (4.107)$$

для яких величина

$$\Delta_{11} = \max_i \max_k [p_k |f_{11i}(x_1) + f_{13i}(\alpha_{1k}) - b_{11i}|], \quad (4.108)$$

взята за міру чебишевського наближення, буде мінімально можливою

$$\Delta_{11\alpha}^k(x_1^{**}) = \min_{x_1} \Delta_{11\alpha}^k = \Delta_{11\alpha}^{0k}.$$

Тут потрібно наголосити на кількох особливостях цієї задачі. По-перше, система рівнянь (4.107) містить m_1^0 рівнянь, де $m_1^0 = m_1 k_0$, оскільки кожне i_1 -те рівняння записують для кожної k -ї ситуації. По-друге, співвідношення (4.108) враховує ймовірність настання k -ї ситуації, визначеної величиною p_k .

Розв'язання задачі В1 дає змогу розкрити невизначеність цілей і ситуації, а розв'язання задачі В2 — невизначеність взаємодії двох конкурентів (супротивників). Отже, ці задачі охоплюють усі три види невизначеностей. З огляду на припущення (4.89, 4.90) розв'язувати розглянуті задачі можна незалежно, але це дає два значення вектора x_1 : одне як розв'язок задачі В1, друге — як розв'язок задачі В2. Очевидно, що ці розв'язки можуть збігатися тільки у виняткових випадках. Тому залишається питання: як одержати розв'язок вихідної загальної задачі розкриття невизначеностей, якщо відомі розв'язки задач В1 і В2? Щоб відповісти на нього, слід звернути увагу на одну особливість розв'язання задачі В2: значення x_1 і x_2 шукають незалежно. Отже, можна незалежно від рівня невизначеності протидії суб'єктів розглядати інші види невизначеностей. Саме це й зроблено у задачі В1. Тому сукупність розв'язків — значення x_1 як розв'язку задачі В1 і значення x_2 як розв'язку задачі В2 — визначає розв'язок вихідної загальної задачі розкриття всіх розглянутих видів невизначеностей. Значення x_1 ,

отримане у результаті розв'язання задачі B2, розкриває тільки два види невизначеностей — невизначеність протидії (взаємодії) і невизначеність цілей, що є окремим випадком загальної задачі розкриття невизначеностей. Отже, за умови (4.89, 4.90) можна агрегувати розв'язки окремих задач у підсумковий розв'язок загальної задачі розкриття невизначеностей.

Задачу розкриття невизначеності дій партнерів за умови (4.89) і (4.90) розв'язати набагато простіше, оскільки немає розбіжності інтересів. Для цього досить у всіх розглянутих раніше співвідношеннях, що визначають умови взаємодії партнерів, вважати, що $f_1(x_1, \hat{x}_2)$ і $f_2(\hat{x}_1, x_2)$ є вектор-функціями, і розглядати задачу окремо для їх компонент, припускаючи, що останні визначають відповідно співвідношення (4.95) і (4.96). Відповідні задачі доцільно звести до чебишевської задачі, використовуючи наближення за аналогією із розглянутими вище прийомами.

Проведений аналіз показує, що системну задачу розкриття різних видів невизначеностей можна звести до окремого розв'язання задач розкриття кожного виду невизначеності, а потім одержані розв'язки агрегувати у підсумковий розв'язок вихідної задачі. Але зробити це можна за жорсткої умови, що цілі партнерів описують адитивні функції вигляду (4.89) і (4.90). Водночас очевидно, що на практиці таке зображення цільових функцій не завжди можливе.

Припустимо, що системну задачу розкриття невизначеностей можна розв'язати не лише для розглянутої адитивної функції (4.89). Така процедура допустима також за умови, що цілі суб'єктів взаємозалежні, і тому їх описують мультиплікативні функції, які мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} [1 + f_{1h}(x_1; \hat{x}_2; \alpha_1)] &= \\ &= [1 + f_{11h}(x_1)]^{\gamma_{11h}} [1 + f_{12h}(\hat{x}_2)]^{\gamma_{12h}} [1 + f_{13h}(\alpha_1)]^{\gamma_{13h}}, \quad i_1 = \overline{1, m_1}, \\ f_{1h}(x_1; \hat{x}_2; \alpha_1) &= \\ &= \{[1 + f_{11h}(x_1)]^{\gamma_{11h}} [1 + f_{12h}(\hat{x}_2)]^{\gamma_{12h}} [1 + f_{13h}(\alpha_1)]^{\gamma_{13h}} - 1\}, \quad i_1 = \overline{1, m_1}. \end{aligned} \quad (4.109)$$

Беручи до уваги, що за своїм фізичним змістом функції, аргументи і параметри, що входять до співвідношення (4.109), задовольняють умови

$$\begin{aligned} f_{1h}(x_1; \hat{x}_2; \alpha_1) &\geq 0; \quad f_{11h}(x_1) \geq 0; \quad x_1 = (x_{1j_1} \mid x_{1j_1} \geq 0; \quad j_1 = \overline{1, n_{1j_1}}); \\ \hat{x}_2 &= (x_{2j_2} \mid \hat{x}_{2j_2} \geq 0; \quad j_2 = \overline{1, n_{2j_2}}); \quad \alpha_1 = (\alpha_{1k_1} \mid \alpha_{1k_1} \geq 0; \quad k_1 = \overline{1, k_{01}}), \\ \gamma_{11} &= (\gamma_{11h} \mid \gamma_{11h} \geq 0; \quad i_1 = \overline{1, m_1}); \quad \gamma_{12} = (\gamma_{12h} \mid \gamma_{12h} \geq 0; \quad i_1 = \overline{1, m_1}), \\ \gamma_{13} &= (\gamma_{13h} \mid \gamma_{13h} \geq 0; \quad i_1 = \overline{1, m_1}); \quad \gamma_{11h} \in \gamma_{11}; \quad \gamma_{12h} \in \gamma_{12}; \quad \gamma_{13h} \in \gamma_{13}, \end{aligned} \quad (4.110)$$

вирази (4.109) можна перетворити на адитивну форму

$$\begin{aligned} f_{1h}(x_1; \hat{x}_2; \alpha_1) &= \\ &= \exp\{\gamma_{11h} \ln[1 + f_{11h}(x_1)] + \gamma_{12h} \ln[1 + f_{12h}(\hat{x}_2)] + \gamma_{13h} \ln[1 + f_{13h}(\alpha_1)]\} - 1. \end{aligned} \quad (4.111)$$

Отже, мультиплікативні функції (4.109) за умови (4.110) можна звести до адитивної функції (4.111).

Інші види функцій можна зобразити в мультиплікативній формі і потім звести до адитивної форми. Наприклад, такі можливості мають функції вигляду

$$f_i(x_1, \hat{x}_2, \alpha_1) = a^{f_{11i}(x_1)} b^{f_{12i}(\hat{x}_2)} c^{f_{13i}(\alpha_1)} \quad (4.112)$$

при $a > 0$; $b > 0$; $c > 0$. Функцію (4.112) можна звести до адитивної форми логарифмуванням за будь-якою основою.

Водночас запропонуємо низку складніших функцій, для яких вихідну задачу можна звести до послідовності задач розкриття невизначеностей різних видів. У загальному випадку такі функції подають у формі згорток

$$f_{1i}(x_1, \hat{x}_2, \alpha_1) = f_{13i}(\alpha_2, f_{12i}(\hat{x}_2, f_{11i}(x_1))).$$

Для цього виду функцій задачу розкриття невизначеностей доцільно звести до такої послідовності задач.

1. Задача розкриття невизначеності цілей, що зводиться до визначення x_1^* за заданими цільовими функціями та їх числовими значеннями із системи рівнянь

$$f_{11i}(x_1) - b_{11i} = 0.$$

2. Задача розкриття невизначеності взаємодії або протидії, що зводиться до знаходження значень x_2^* за відомого значення x_1 :

$$x_2^* = \arg \max_{\hat{x}_2} f_{12i}(\hat{x}_2, y_1^*), \quad (4.113)$$

де

$$y_1^* = \{y_{1i}^* \mid i = \overline{1, m_1}\}, \quad y_{1i}^* = f_{11i}(x_1^*).$$

3. Задача розкриття ситуативної невизначеності за відомих значень x_1^* і x_2^* із використанням аналізу функцій

$$y_{13i} = f_{13i}(\alpha_1, x_2^*),$$

де x_2^* визначене співвідношенням (4.113).

Розв'язувати розглянуті задачі можна, застосовуючи методи теорії чебишевського наближення функцій [86, 152].

Висновки

- Для класу ФЗ системного аналізу наведено прийоми і методи розкриття різних видів невизначеностей: цілей, ситуацій, конфліктів.
- Для розкриття невизначеності цілей і знаходження раціонального компромісу застосовують два основні підходи: використання принципу Парето і зведення багатоцільової задачі до типової задачі оптимізації з одним критерієм. Для випадку використання принципу Парето показано, що раціональний розв'язок багатокритерійної задачі або раціональний компроміс у багатоцільовій задачі лежить серед x , що належать множині Парето. Проте принцип Парето не дає змоги виділити єдиний розв'язок, а дозволяє лише звужити кількість можливих альтернативних розв'язків. Для розкриття невизначеності цілей, що ґрунтується на зведенні багатоцільової

задачі до звичайних задач із одним критерієм, використовують методи лінійної згортки і технічні обмеження. Показано, що вибір коефіцієнтів важливості c_i значною мірою суб'єктивний, а отже, не виключені принципові помилки і прорахунки під час їх вибору.

- Наведено метод послідовного розкриття невизначеності цілей і метод розкриття невизначеності цілей на основі зведення до системи рівнянь. Перевага другого методу полягає в тому, що поряд із відшукуванням x^0 є можливість визначити абсолютні відхилення всіх функцій $f_i(x)$ від їхніх заданих значень f_i^* , тобто визначити відхилення не лише для найгіршого випадку, спричиненого умовою (4.22), але й для всіх інших цілей.
- Показано, що під час розкриття ситуаційної невизначеності треба застосовувати підхід, який ґрунтується на принципі гарантованого результату. Розглянуто питання про доцільність врахування ступеня і рівня ризику під час розкриття ситуаційної невизначеності.
- Наведено прийоми і методи розкриття невизначеності дій партнерів або супротивників у задачах конфлікту стратегій. Розглянуто задачі взаємодії для двох і кількох партнерів. У цих задачах невизначеність може бути спричинена неповнотою інформації про наявну і прогнозовану ситуації та неузгодженими діями партнерів. У задачах протидії конкурентів (супротивників) ситуації, у яких розвиваються події, залежать не тільки від зовнішніх умов, але й від стратегій дії сторін, що зазвичай протилежні і часто конфліктні. Для розкриття невизначеності поведінки протидіючих сторін замість точкового принципу відліку запропоновано використовувати інтервальний, що дає змогу найбільш адекватно відображати досліджуваний процес.
- Розглядаючи один із видів невизначеностей (цілей, ситуацій, конфліктів) апріорно припускали, що інших видів невизначеностей немає. Однак у реальних системних задачах різні види невизначеностей зазвичай діють одночасно. Тому досліджено питання про можливість і доцільність проведення роздільного або спільного аналізу різних видів невизначеностей, а саме: цілей, ситуацій, взаємодії партнерів або протидії конкурентів. Сформульовано задачу розкриття системної невизначеності. Показано, що для задач системного аналізу важливе розкриття різних видів невизначеностей за умови, що апріорно невідомо, чи є різні компоненти функцій $f_{i1}(\hat{x}_1; \hat{x}_2; \alpha_1)$, $i_1 = \overline{1, m_1}$ і $f_{i2}(\hat{x}_1; \hat{x}_2; \alpha_2)$, $i_2 = \overline{1, m_2}$, різні компоненти $(x_{1j_1}; j_1 = \overline{1, n_{11}})$, $(\hat{x}_{2j_2}; j_2 = \overline{1, n_{12}})$, $(\hat{x}_{1j_2}; j_2 = \overline{1, n_{21}})$, $(x_{2j_2}; j_2 = \overline{1, n_{22}})$, $(\alpha_{1k_1}; k_1 = \overline{1, k_{01}})$, $(\alpha_{2k_2}; k_2 = \overline{1, k_{02}})$ векторів x_1, x_2, α взаємно незалежними або взаємозалежними. Введення мультиплікативних функцій дає змогу розв'язувати задачу розкриття невизначеності незалежно від наявності чи відсутності взаємозв'язків компонент.

Розділ 5

Пошук раціонального компромісу в задачах розкриття концептуальної невизначеності

- ◆ Поняття концептуальної невизначеності
- ◆ Вибір класу і структури функцій наближення
- ◆ Постановка задачі формування функцій наближення
- ◆ Формування функцій наближення у вигляді ієрархічної багаторівневої системи моделей
- ◆ Відтворення за дискретною вибіркою функціональних залежностей в адитивній і мультиплікативній формах
- ◆ Формування множини Парето на основі системного узгодження області визначення і множини значень цільових функцій

Складність задач прийняття рішень на різних стадіях життєвого циклу виробів нової техніки зумовлює необхідність розробки ефективних методологічних та математичних засобів аналізу, структуризації та формалізації суперечливих цілей, формування множини допустимих рішень і вибору із множини допустимих рішень раціональної альтернативи. Однією з найважливіших задач, що виникає під час розкриття концептуальної невизначеності, є задача відтворення функціональних залежностей за експериментально отриманою дискретною вибіркою.

5.1. Відтворення функціональних залежностей у задачах розкриття концептуальної невизначеності

У цьому розділі розглянемо підхід до відтворення функціональних залежностей за експериментально отриманою дискретною вибіркою для системних задач розкриття концептуальної невизначеності. Зазначена проблема, зокрема, виникає під час формування концепції створення виробів нової техніки [171], в автоматизованих системах випробування літальних апаратів [20], системах автоматизованого контролю функціонування складних динамічних об'єктів у реальному часі [62], системах технічного діагностування [176] і деяких інших застосуваннях.

Задачі відтворення функціональних залежностей і виявлення закономірностей за емпіричними даними поширені на практиці, і тому прийоми та методи їхнього розв'язання постійно вдосконалюють і адаптують до специфіки певної предметної області та особливостей реальних задач [18, 21, 25, 35, 45].

5.1.1. Поняття концептуальної невизначеності

Розглянемо деякі особливості названих задач. Їхня математична постановка відрізняється від класичних постановок задач інтерполяції і статистичної обробки обмеженої вибірки. Так, у класичній задачі інтерполяції потрібно знайти таку функцію, яка забезпечує відтворення її значень у заданих точках. У задачах виявлення закономірностей треба знайти таку функцію, що якнайточніше характеризує справжню залежність цієї функції від найважливіших факторів на всіх інтервалах задання вихідних даних. Ця відмінність зумовлює важливі особливості розглянутої задачі, а саме: визначення раціонального набору ознак і раціонального обсягу вибірки, побудову регуляризуючого функціонала у разі розв'язання некоректних задач інтерпретації непрямих експериментів, неформальний вибір структури відтворюваних функцій тощо [17, 18, 44, 45, 106, 147, 160].

Зазначені фактори визначили становлення і розвиток спеціального математичного апарату, в основі якого лежать евристичні процедури та алгоритми, індуктивні методи й евристичні інформаційні моделі, які багато в чому ґрунтуються на інтуїції, досвіді, гіпотезах і припущеннях. Особливої значущості ці задачі набули для деяких застосувань, які характеризуються умовами неповноти, невизначеності, неточності і суперечливості вихідної різномірної інформації, наприклад, для слабоструктурованих і слабоформалізованих прикладних галузей (медицина, соціологія, технічна діагностика позаштатних і критичних ситуацій складних об'єктів тощо).

Особливість задачі розкриття концептуальної невизначеності зумовлено потребою пошуку раціонального компромісу між суперечливими цілями, наприклад, між різними цілями, що виникають під час створення нового виробу, виявлення його переваг і недоліків стосовно пропозицій конкурентів, оцінювання і прогнозування можливих факторів ризику [236, 237, 246, 247]. У змістовному формулюванні задачі розкриття концептуальної невизначеності можна звести до задачі системно узгодженого розкриття множини різномірних невизначеностей на основі єдиних принципів, прийомів і критеріїв. Ця множина містить невизначеності цілей розробки, перспектив конкурентоспроможності виробу, зміни ринків попиту та збуту, активної протидії конкурентів, а також ситуаційну невизначеність ризиків у процесі розробки, виробництва, збуту й експлуатації виробу. Такий вид невизначеності належить до концептуального в тому сенсі, що, на відміну від інформаційної невизначеності, він відображає єдиний комплекс невідомості, неоднозначності і суперечливості взаємопов'язаних і взаємозалежних елементів зазначеної множини різномірних невизначеностей [120].

Задачу розкриття концептуальної невизначеності можна подати як деяку модифікацію задачі системної оптимізації у трактуванні В. М. Глушкова [27]. Однак поставлена задача має низку принципово важливих особливостей, які виключають безпосереднє використання відомих методів системної оптимізації і методів розкриття невизначеності, оскільки їхнє застосування можливе за умови, що задано відповідні цільові функції [27, 28]. Водночас під час розв'язання реальних задач, зокрема, на початковому етапі формування концепції і задуму складних виробів нової техніки, відома лише неповна, різномірна вихідна інформація, а саме: емпіричні дані, експертні оцінки, апріорна інформація про аналоги і прототипи, деякі відомості про призначення і якісні показники виробу, стандартні обмеження і дані, що характеризують умови виробництва та експлуатації тощо. На підставі такої інформації потрібно сформувати цільові функції створення нового виробу. За цих умов вибір кількості цільових функцій, їхніх аналітичних форм, обґрунтування їхнього змісту і призначення є неформалізованою процедурою,

яку повинен виконувати тільки дослідник. Результат залежить від компетенції, умінь, досвіду, інтуїції та інших індивідуальних якостей дослідника, що виконує цю процедуру.

5.1.2. Вибір класу і структури функцій наближення

Формування функціональних залежностей подамо у вигляді такої послідовності взаємозалежних задач [123]:

- ♦ зведення вихідної інформації до деякого стандартного вигляду, який забезпечує можливість формування функціональних залежностей;
- ♦ вибір класу і структури функцій наближення під час формування функціональних залежностей;
- ♦ вибір критеріїв, принципів, підходів і методів побудови функцій наближення;
- ♦ відшукування у прийнятому класі функцій наближення, які забезпечують найкраще наближення за прийнятим критерієм.

Задача вибору класу і структури функцій наближення є головною і визначає вимоги до інших задач. Зокрема, шукані функції мають бути не лише максимально наближеними до емпіричних даних за певним критерієм, але й мати екстремальні властивості [81]. Специфіка екстремальних властивостей зумовлена обмеженістю інтервалу задання вихідних даних і полягає в тому, що збурення на межах інтервалу суттєво позначаються на екстремальних властивостях функції. Ця особливість є принциповою і зумовлює складнішу структуру функцій наближення, ніж у задачах інтерполяції. Звідси випливає актуальність і практична значущість задачі раціонального вибору класу функцій наближення. Важлива особливість цієї задачі полягає в необхідності вибору раціонального компромісу між суперечливими вимогами: *максимізації рівня достовірності* процедури виявлення шуканої закономірності, що зумовлює потребу підвищення складності класу функцій наближення, і *мінімізації складності і трудомісткості* процедури формування шуканої функціональної залежності, що веде до спрощення функцій наближення. Через невдалий вибір функцій може трапитися так, що відтворена функція наближатиме певні вихідні дані на більшій частині заданого інтервалу, але загалом погано описуватиме справжню функціональну залежність.

З урахуванням наведених пояснень сформулюємо задачу формування функцій наближення за заданими емпіричними даними [123].

5.1.3. Задача формування функцій наближення

Нехай у загальному випадку вектор $y = (y_i | i = \overline{1, m})$ визначає необхідні або бажані значення шуканих функцій, що кількісно характеризують основні властивості об'єкта. Вектор x_1 має показники проектних рішень ОПР, зокрема для технічного виробу — його конструктивні, технічні, технологічні та інші показники. Вектор x_2 утворює контрольовані показники зовнішнього впливу, зокрема показники статичного і динамічного навантаження тощо. Вектор x_3 містить показники випадкових і некерованих факторів зовнішнього впливу (показники впливу зовнішнього середовища та умов експлуатації, показники різних факторів ризику, прогнозованих дій партнерів і конкурентів, прогнозовані показники ринку попиту і збуту, прогнозовані показники по-заштатних ситуацій).

Нехай також вихідну інформацію задано у вигляді дискретного масиву

$$\begin{aligned} M_0 &= \langle Y_0, X_1, X_2, X_3 \rangle; \\ Y_0 &= (Y_i | i = \overline{1, m}); \quad Y_i = (Y_i[q_0] | q_0 = \overline{1, k_0}); \\ X_1 &= (X_{1j_1} | j_1 = \overline{1, n_1}); \quad X_{1j_1} = (X_{1j_1}[q_1] | q_1 = \overline{1, k_1}); \\ X_2 &= (X_{2j_2} | j_2 = \overline{1, n_2}); \quad X_{2j_2} = (X_{2j_2}[q_2] | q_2 = \overline{1, k_2}); \\ X_3 &= (X_{3j_3} | j_3 = \overline{1, n_3}); \quad X_{3j_3} = (X_{3j_3}[q_3] | q_3 = \overline{1, k_3}), \end{aligned}$$

де множина Y_0 визначає числові значення $Y_i[q_0] \Rightarrow \langle X_{1j_1}[q_1], X_{2j_2}[q_2], X_{3j_3}[q_3] \rangle$ шуканих неперервних функцій $y_i = f_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, m}$; $x_1 = (x_{1j_1} | j_1 = \overline{1, n_1})$; $x_2 = (x_{2j_2} | j_2 = \overline{1, n_2})$; $x_3 = (x_{3j_3} | j_3 = \overline{1, n_3})$. Кожному значенню $q_0 \in [1, k_0]$ відповідає деякий набір $q_0 \Leftrightarrow \langle q_1, q_2, q_3 \rangle$ значень $q_1 \in [1, k_1]$, $q_2 \in [1, k_2]$, $q_3 \in [1, k_3]$. Множина Y_0 складається з k_0 різних значень $Y_i[q_0]$. У множинах X_1, X_2, X_3 деяка частина величин $X_{1j_1}[q_1], X_{2j_2}[q_2], X_{3j_3}[q_3]$ за деяких значеннях $q_1 = \hat{q}_1 \in \hat{Q}_1 \subset [1, k_1]$; $q_2 = \hat{q}_2 \in \hat{Q}_2 \subset [1, k_2]$; $q_3 = \hat{q}_3 \in \hat{Q}_3 \subset [1, k_3]$ роздільно повторюється, але для різних $q_0 \in [1, k_0]$ не існує наборів $\langle X_{1j_1}[q_1], X_{2j_2}[q_2], X_{3j_3}[q_3] \rangle$, що цілком збігаються. Тут $n_1 + n_2 + n_3 = n_0$, $n_0 \leq k_0$.

Відомо, що $x_1 \in D_1, x_2 \in D_2, x_3 \in D_3$; $X_1 \in \hat{D}_1, X_2 \in \hat{D}_2, X_3 \in \hat{D}_3$, де

$$\begin{aligned} D_s &= \langle x_{sj_s} | d_{sj_s}^- \leq x_{sj_s} \leq d_{sj_s}^+, j_s = \overline{1, n_s} \rangle, \quad s = \overline{1, 3}; \\ \hat{D}_s &= \langle X_{sj_s} | \hat{d}_{sj_s}^- \leq X_{sj_s} \leq \hat{d}_{sj_s}^+, j_s = \overline{1, n_s} \rangle, \quad s = \overline{1, 3}; \\ d_{sj_s}^- &\leq \hat{d}_{sj_s}^-, \quad d_{sj_s}^+ \geq \hat{d}_{sj_s}^+. \end{aligned}$$

Потрібно знайти такі функції наближення $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, m}$, які з практично прийнятною похибкою характеризують реальні функціональні залежності $y_i = f_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, m}$ на множині D_s .

У реальній задачі конкретизують суть змінних y, x_1, x_2, x_3 . Наприклад, у разі проектування і (або) випробування виробу вектор y визначає зовнішні параметри виробу, які характеризують технічні, експлуатаційні, економічні та інші показники якості. Компонентами вектора x_1 є внутрішні параметри виробу, які характеризують конструктивні, технологічні та інші його показники. Компонентами вектора x_2 є контрольовані параметри зовнішнього впливу, зокрема показники вантажопідйомності (максимальна вага, габарити, види вантажу), загальні показники допустимих кліматичних зон експлуатації (помірний, полярний або тропічний клімат). Компоненти вектора x_3 — неконтрольовані параметри зовнішнього впливу, зокрема показники зовнішнього середовища (допустимий діапазон зміни температури, вологості тощо).

5.1.4. Формування функцій наближення у вигляді ієрархічної багаторівневої системи моделей

Ця задача принципово складніша за типову задачу відтворення функціональної залежності, що зумовлено різномірністю не тільки вихідної інформації, але й властивостей груп факторів, які визначають відповідно вектори x_1, x_2, x_3 . Справді, значення компонент вектора x_1 задано розробником і тому їх можна змінити у процесі проектування виробу. Значення компонент вектора x_2 — це вимоги, зумовлені призначенням

виробу, які у разі його зміни можуть бути відкориговані замовником виробу. У будь-якому випадку розробник зобов'язаний виконати вимоги замовника. Значення компонент вектора x_3 — вимоги, визначені стандартами на умови експлуатації виробу, і тому розробник повинен їх виконувати.

Звідси випливає потреба оцінювати окремо ступінь впливу кожної групи факторів на властивості функцій наближення. Для цього функції наближення формують у вигляді ієрархічної багаторівневої системи моделей.

На першому, верхньому рівні реалізують модель, що визначає залежність функцій наближення від змінних x_1, x_2, x_3 . Шукані функції формують у класі адитивних функцій і подають у вигляді суперпозиції функцій від змінних x_1, x_2, x_3 . Можливість такого подання випливає з теореми А. Н. Колмогорова [74]. Отже, шукані функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$ формуватимемо в такому вигляді [120]:

$$\Phi_i(x_1, x_2, x_3) = c_{i1}\Phi_{i1}(x_1) + c_{i2}\Phi_{i2}(x_2) + c_{i3}\Phi_{i3}(x_3), \quad i = \overline{1, m}. \quad (5.1)$$

На другому рівні формують моделі, що визначають залежність функцій наближення нарізно від компонентів змінних x_1, x_2, x_3 . Для цього потрібно перейти від функцій векторів до суперпозицій функцій компонент цих векторів. З огляду на те, що компоненти кожного вектора x_1, x_2, x_3 різномірні за фізичним змістом, доцільно для доданків функцій (5.1) вибрати клас узагальнених поліномів і зобразити їх у вигляді

$$\begin{aligned} \Phi_{i1}(x_1) &= \sum_{j_1=1}^{n_1} a_{j_1}^{(1)} \Psi_{1j_1}(x_{1j_1}), & \Phi_{i2}(x_2) &= \sum_{j_2=1}^{n_2} a_{j_2}^{(2)} \Psi_{2j_2}(x_{2j_2}), \\ \Phi_{i3}(x_3) &= \sum_{j_3=1}^{n_3} a_{j_3}^{(3)} \Psi_{3j_3}(x_{3j_3}). \end{aligned} \quad (5.2)$$

Запропоновано для всіх $i = \overline{1, m}$ за кожною змінною $x_{1j_1}, x_{2j_2}, x_{3j_3}$ вибирати відповідно однотипні функції $\Psi_{1j_1}, \Psi_{2j_2}, \Psi_{3j_3}$, що дає змогу спростити подальше розв'язання задачі.

На третьому рівні формують моделі, які визначають функції $\Psi_{1j_1}, \Psi_{2j_2}, \Psi_{3j_3}$. Тут найважливішим є вибір структури і компонентів функцій $\Psi_{1j_1}, \Psi_{2j_2}, \Psi_{3j_3}$. Структури цих функцій вибираємо аналогічно до формул (5.2). Зобразимо функції у вигляді узагальнених поліномів

$$\Psi_{js}(x_{js}) = \sum_{p=0}^{p_{js}} \lambda_{j,p} \Phi_{j,p}(x_{js}), \quad s = 1, 2, 3. \quad (5.3)$$

Вибираючи функції $\Phi_{j,p}$, слід враховувати кілька вимог.

1. Ці функції є головними структуротвірними ФЕ всіх моделей, тому вони повинні мати такі екстремальні властивості на заданих відрізках для відповідних змінних $x_{js}, j_s = \overline{1, n_s}, s = \overline{1, 3}$, які нечітко визначає масив M_0 .
2. Вони мають забезпечувати можливість реалізації як рівномірного наближення реальних функціональних залежностей на множині D_s , так і відповідності екстремальних властивостей функцій $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$ і $f_i(x_1, x_2, x_3)$, $\forall i = \overline{1, m}$. Для більшості змінних фізично виконується умова $x_{js} \geq 0$ і змінні $x_{js}, \forall j_s = \overline{1, n_s}, s = \overline{1, 3}$

можна нормувати до відрізка $[0; 1]$. Тоді виконання цих вимог можливе завдяки зміщеним поліномам Чебишева [90]. Вибираємо їх як функції φ_{jsp} .

Надалі потрібно вибрати критерії і методи побудови функцій наближення. При цьому визначальною умовою зазвичай є зручність реалізації обчислювальних процесів. З цього боку найкращим є середньоквадратичний критерій, який широко використовують на практиці. Водночас під час розв'язання реальних задач важливішою може бути умова відповідності вибраного критерію особливостям досліджуваних об'єктів. Наприклад, здійснюючи контроль високодинамічних об'єктів у реальному часі, важливо вчасно знайти окремі, досить великі відхилення у вибірці технічного діагностування і на цій підставі виявити закономірності переходу до позаштатного режиму. Зокрема, в авіаційних газотурбінних двигунах застосування такого прийому дає змогу вчасно виявити тенденцію переходу до помпажу, який може спричинити руйнування двигуна.

Аналогічні умови характерні й для інших реальних задач. Наприклад, абсолютний відхил розмірів є визначальною умовою у задачах узгодження допусків з'єднаних конструктивних елементів у проектуванні, виробництві, експлуатації виробу. Однак середньоквадратичний критерій згладжує окремі досить великі викиди і тому не дає змоги виявити такі відхилення. *Чебишевський критерій* не має цього недоліку, тому виберемо його для всіх розглянутих у цьому підручнику задач.

Розв'язання задачі вибору критерію та інших задач дає змогу перейти до процедури пошуку функцій наближення у прийнятому класі функцій. Оскільки вихідною процедурою є вибір функцій φ_{jsp} , які є основними елементами всіх моделей, то починати формування системи моделей доцільно з нижчого рівня ієрархії. Тоді функції наближення будемо шукати на основі такої послідовності [133]:

$$\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3 \rightarrow \Phi_{i1}, \Phi_{i2}, \Phi_{i3} \rightarrow \Phi_i,$$

що дасть можливість одержати кінцевий результат агрегуванням відповідних розв'язків. Такий підхід дозволяє звести процедуру формування функцій наближення до послідовності чебишевських задач наближення для несумісних систем лінійних рівнянь, методи розв'язання яких добре відомі [86, 90, 152]. Зокрема, чебишевські задачі можна звести до задачі лінійного програмування [60].

Перейдемо до формалізації і розв'язання задач.

Задача формування функцій Ψ_s . Ця задача є найвідповідальнішою і найскладнішою. Найвідповідальнішою, оскільки недоліки, наприклад, невдалий вибір кількості і степеня поліномів Чебишева, не можна повною мірою усунути на наступних рівнях системи моделей і, більше того, їх кількість може зростати. Складною, бо до шуканих функцій висувають суперечливі вимоги. По-перше, функції повинні відображати з достатньою точністю екстремальні властивості, характерні для множини функцій наближення. По-друге, вони мають достатньою мірою враховувати екстремальні властивості кожної функції і забезпечувати можливість адаптації до них на наступних рівнях. Звідси випливає, що функції $\Psi_{1j_1}(x_{j_1})$, $\Psi_{2j_2}(x_{j_2})$, $\Psi_{3j_3}(x_{j_3})$ потрібно формувати відповідно до умов:

$$\Psi_1 \rightarrow \langle \Phi_{i1} | i = \overline{1, m} \rangle; \quad \Psi_2 \rightarrow \langle \Phi_{i2} | i = \overline{1, m} \rangle; \quad \Psi_3 \rightarrow \langle \Phi_{i3} | i = \overline{1, m} \rangle;$$

$$\Psi_s = \langle \Psi_{sj} | j_s = \overline{1, n_s} \rangle; \quad s = \overline{1, 3}.$$

Далі, під час формування системи рівнянь слід урахувувати властивості та особливості відтворюваних функціональних залежностей, визначених вихідними даними, а також структуру функцій $\Psi_{1j_1}(x_{j_1})$, $\Psi_{2j_2}(x_{j_2})$, $\Psi_{3j_3}(x_{j_3})$, описану співвідношенням (5.3).

Крім того, вважатимемо, що ступінь впливу функцій Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 на загальні властивості множини відтворюваних функцій однаковий. Таке припущення зумовлене, з одного боку, відсутністю апіорної інформації про взаємний вплив цих функцій, а з іншого — потребою врахування з достатньою точністю впливу цих функцій на екстремальні властивості, характерні для зазначеної множини. На інших рівнях системи моделей буде враховано екстремальні властивості кожної функції. Звідси випливає, що задача формування функцій Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 зводиться до *чебишевської задачі наближення* для системи рівнянь

$$\begin{aligned} F_{i1}(\hat{X}[q_0]) - b_{q_0} &= 0, \quad q_0 = \overline{1, k_0}; \\ F_{i1}(\hat{X}[q_0]) &= \sum_{j_1=1}^{n_1} \sum_{p_1=0}^{P_{j_1}} \lambda_{j_1 p_1} T_{p_1}^*(\hat{X}_{1j_1}[q_1]) + \sum_{j_2=1}^{n_2} \sum_{p_2=0}^{P_{j_2}} \lambda_{j_2 p_2} T_{p_2}^*(\hat{X}_{2j_2}[q_2]) + \\ &+ \sum_{j_3=1}^{n_3} \sum_{p_3=0}^{P_{j_3}} \lambda_{j_3 p_3} T_{p_3}^*(\hat{X}_{3j_3}[q_3]); \\ \hat{X}[q_0] &= (\hat{X}_{1j_1}[q_1], \hat{X}_{2j_2}[q_2], \hat{X}_{3j_3}[q_3])|_{q_0} \Leftrightarrow \langle q_1, q_2, q_3 \rangle, \end{aligned} \quad (5.4)$$

де $T_{p_1}^*, T_{p_2}^*, T_{p_3}^*$ — зміщені поліноми Чебишева; b_{q_0} — величина, визначена співвідношенням

$$b_{q_0} = \frac{\{\max_{i \in [1, m]} \hat{Y}_i[q_0] + \min_{i \in [1, m]} \hat{Y}_i[q_0]\}}{2}, \quad q_0 = \overline{1, k_0};$$

$\hat{X}_{1j_1}[q_1], \hat{X}_{2j_2}[q_2], \hat{X}_{3j_3}[q_3], \hat{Y}_i[q_0]$ — значення відповідно величин $X_{1j_1}[q_1], X_{2j_2}[q_2], X_{3j_3}[q_3], Y_i[q_0]$, нормованих до відрізка $[0; 1]$. Розв'язання системи полягає у відшуванні таких матриць $\|\lambda_{j_1 p_1}^0\|, \|\lambda_{j_2 p_2}^0\|, \|\lambda_{j_3 p_3}^0\|$, які з урахуванням максимальної нев'язки

$$\Delta_\lambda = \max_{q_0 \in [1, k_0]} |F_i(\hat{X}[q_0]) - b_{q_0}|, \quad (5.5)$$

взятої за міру чебишевського наближення системи (5.4), забезпечують найкраще наближення

$$\Delta_\lambda^0 = \min_{\|\lambda\|} \Delta_\lambda.$$

При цьому значення найкращого наближення Δ_λ^0 і шуканих матриць характеризуються співвідношеннями

$$\begin{aligned} \Delta_\lambda^0 &= \min_{\|\lambda\|} \max_{q_0 \in [1, k_0]} |F_i(\hat{X}[q_0]) - b_{q_0}|; \\ \lambda^0 &= \arg \min_{\|\lambda\|} \max_{q_0 \in [1, k_0]} |F_i(\hat{X}[q_0]) - b_{q_0}|, \end{aligned}$$

де

$$\|\lambda^0\| = \langle \|\lambda_{j_1 p_1}^0\|, \|\lambda_{j_2 p_2}^0\|, \|\lambda_{j_3 p_3}^0\| \rangle, \quad \|\lambda\| = \langle \|\lambda_{j_1 p_1}\|, \|\lambda_{j_2 p_2}\|, \|\lambda_{j_3 p_3}\| \rangle.$$

Задача формування функцій Φ_{is} . У цій задачі покладімо, що для всіх $i \in [1, m]$ ступінь впливу функцій $\Phi_{i1}(x_1), \Phi_{i2}(x_2), \Phi_{i3}(x_3)$ на властивості відповідної функції наближення $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$ однаковий. Таке припущення зумовлене відсутністю апіорної інформації. Водночас воно дає змогу окремо формувати функції $\Phi_{i1}(x_1), \Phi_{i2}(x_2), \Phi_{i3}(x_3)$,

а ступінь впливу кожної з них визначати на наступному вищому рівні ієрархії моделей. Отже, задача полягає у знаходженні матриць $\|a_{ji}^{(1)}\|, \|a_{ji}^{(2)}\|, \|a_{ji}^{(3)}\|, \forall i \in [1, m]$ і зводиться до чебишевської задачі наближення для таких трьох систем рівнянь:

$$\begin{aligned} F_{i21}(\hat{X}_1[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0] &= 0, & F_{i22}(\hat{X}_2[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0] &= 0, \\ F_{i23}(\hat{X}_3[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0] &= 0, & q_0 &= \overline{1, k_0}, \end{aligned} \quad (5.6)$$

де

$$F_{i21}(\hat{X}_1[q_0]) = \sum_{j_1=1}^{n_1} a_{ji}^{(1)} \Psi_{1j_1}(\hat{X}_{1j_1}[q_1]),$$

$$F_{i22}(\hat{X}_2[q_0]) = \sum_{j_2=1}^{n_2} a_{ji}^{(2)} \Psi_{2j_2}(\hat{X}_{2j_2}[q_2]),$$

$$F_{i23}(\hat{X}_3[q_0]) = \sum_{j_3=1}^{n_3} a_{ji}^{(3)} \Psi_{3j_3}(\hat{X}_{3j_3}[q_3]).$$

Розв'язання кожної системи полягає у знаходженні таких матриць $\|a_s^0\| = \|\hat{a}_{ji}^{(s)}\|$, $s = \overline{1, 3}$, які для максимальної нев'язки

$$\Delta_{a_s} = \max_{q_0 \in [1, k_0]} |F_{i2s}(\hat{X}_s[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0]|,$$

взятої за міру чебишевського наближення системи (5.6), забезпечують найкраще наближення

$$\Delta_s^0 = \min_{|a_s|} \Delta_{a_s}.$$

При цьому значення найкращого наближення і шуканих матриць характеризують-ся співвідношеннями

$$\Delta_1^0 = \min_{|a_1|} \max_{q_0 \in [1, k_0]} |F_{i21}(\hat{X}_1[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0]|, \quad \|a_1^0\| = \arg \min_{|a_1|} \max_{q_0 \in [1, k_0]} |F_{i21}(\hat{X}_1[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0]|,$$

$$\Delta_2^0 = \min_{|a_2|} \max_{q_0 \in [1, k_0]} |F_{i22}(\hat{X}_2[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0]|, \quad \|a_2^0\| = \arg \min_{|a_2|} \max_{q_0 \in [1, k_0]} |F_{i22}(\hat{X}_2[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0]|,$$

$$\Delta_3^0 = \min_{|a_3|} \max_{q_0 \in [1, k_0]} |F_{i23}(\hat{X}_3[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0]|, \quad \|a_3^0\| = \arg \min_{|a_3|} \max_{q_0 \in [1, k_0]} |F_{i23}(\hat{X}_3[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0]|,$$

де

$$\hat{X}_1[q_0] = \langle \hat{X}_{1j_1}[q_1] | j_1 = \overline{1, n_1}, q_1 \in [1, k_1] \rangle,$$

$$\hat{X}_2[q_0] = \langle \hat{X}_{2j_2}[q_2] | j_2 = \overline{1, n_2}, q_2 \in [1, k_2] \rangle,$$

$$\hat{X}_3[q_0] = \langle \hat{X}_{3j_3}[q_3] | j_3 = \overline{1, n_3}, q_3 \in [1, k_3] \rangle;$$

$$q_0 \Leftrightarrow \langle q_1, q_2, q_3 \rangle.$$

$$\|a_1\| = \|a_{ji}^{(1)}\|, \quad \|a_2\| = \|a_{ji}^{(2)}\|, \quad \|a_3\| = \|a_{ji}^{(3)}\|.$$

Задача формування функцій Φ_i . Задача полягає у знаходженні множини $\Phi = \langle \Phi_i(x_1, x_2, x_3) | i = \overline{1, m} \rangle$ шуканих функцій наближення. Її реалізують на заключному етапі формування системи моделей. Вихідними даними є результати попередніх етапів,

а також вихідні дискретні значення функцій $\hat{Y}_i[q_0]$. Формування кожної функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3) \in$ незалежним, і тому $\forall i \in [1, m]$ всі обчислення $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$ можна виконувати одночасно і паралельно. Розв'язання задачі для $\forall i \in [1, m]$ полягає у відшукуванні матриць $\|c_{i1}\|$, $\|c_{i2}\|$, $\|c_{i3}\|$ і зводиться до чебишевської задачі наближення для системи рівнянь

$$F_{i3}(\hat{X}[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0] = 0, \quad q_0 = \overline{1, k_0}, i \in [1, m],$$

де

$$F_{i3}(\hat{X}[q_0]) = c_{i1}\Phi_{i1}(\hat{X}_1[q_1]) + c_{i2}\Phi_{i2}(\hat{X}_2[q_2]) + c_{i3}\Phi_{i3}(\hat{X}_3[q_3]), \\ q_0 \Leftrightarrow (q_1, q_2, q_3).$$

Чебишевський критерій оцінювання якості розв'язання формалізують аналогічно до критеріїв попередніх задач. Результати розв'язання задачі характеризуються такими співвідношеннями:

$$\Delta_c^0 = \min_{\|c\|} \max_{i \in [1, m]} |F_{i3}(\hat{X}[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0]|, \quad \|c^0\| = \arg \min_{\|c\|} \max_{i \in [1, m]} |F_{i3}(\hat{X}[q_0]) - \hat{Y}_i[q_0]|, \\ \|c^0\| = \langle \|c_{i1}^0\|, \|c_{i2}^0\|, \|c_{i3}^0\| \rangle, \quad \|c\| = \langle \|c_{i1}\|, \|c_{i2}\|, \|c_{i3}\| \rangle.$$

Отже, послідовне розв'язання сформульованих чебишевських задач дає змогу знайти всі невідомі величини у структурі функцій наближення. У підсумку одержимо таку ієрархічну систему функцій:

$$\Phi_i(x_1, x_2, x_3) = c_{i1}^0\Phi_{i1}(x_1) + c_{i2}^0\Phi_{i2}(x_2) + c_{i3}^0\Phi_{i3}(x_3), \quad i = \overline{1, m}, \quad (5.7)$$

$$\Phi_{i1}(x_1) = \sum_{j_1=1}^{n_1} \hat{a}_{j_1}^{(1)} \Psi_{1j_1}(x_{1j_1}), \quad \Phi_{i2}(x_2) = \sum_{j_2=1}^{n_2} \hat{a}_{j_2}^{(2)} \Psi_{2j_2}(x_{2j_2}), \quad \Phi_{i3}(x_3) = \sum_{j_3=1}^{n_3} \hat{a}_{j_3}^{(3)} \Psi_{3j_3}(x_{3j_3}); \quad (5.8)$$

$$\Psi_{sj_s}(x_{j_s}) = \sum_{p_s=0}^{P_{j_s}} \lambda_{j_s p_s}^0 T_{p_s}^*(x_{sj_s}), \quad s = \overline{1, 3}. \quad (5.9)$$

Відповідно до постановки задачі потрібно оцінити похибки функцій $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, m}$ відносно реальної функціональної залежності $y_i = f_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, m}$. Якщо похибка виявиться практично неприйнятною, то треба цього уникнути. На практиці така задача найскладніша, оскільки реальну функціональну залежність визначають багато змінних $n = n_1 + n_2 + n_3$, $n \gg 10$ і характеризують багатовимірним дискретним масивом M_0 з нерегулярними відліками, але її аналітичного подання у вигляді $y_i = f_i(x_1, x_2, x_3)$ немає. Ці особливості виключають застосування типових методів аналізу та оцінювання похибки емпіричних даних. Пропонується застосувати прийом кількарязового використання вихідного масиву. Його суть полягає в тому, що на основі M_0 формують кілька (наприклад, від 3 до 6) вибірок, з яких одна є повною (тобто збігається з M_0), а інші мають пропуски даних, які не накладаються. На підставі кожної вибірки визначають функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$. Їхнє порівняння між собою та зі значеннями функцій із пропущеними даними дасть змогу одержати потрібну інформацію для оцінювання похибки і прийняття рішення про необхідні заходи щодо її зменшення.

Запропонований підхід до формування функціональних залежностей з урахуванням властивостей поліномів Чебишева дає можливість екстраполювати функції наближення, побудовані для відрізків $[\hat{d}_{j_s}^-, \hat{d}_{j_s}^+]$, на більш широкі відрізки $[d_{j_s}^-, d_{j_s}^+]$, що дозволяє прогнозувати властивості виробу за межами інтервалів випробувань.

5.2. Приклади відтворення функціональних закономірностей за дискретною вибіркою

5.2.1. Відтворення функціональних закономірностей в адитивній формі

Приклад 1. Нехай потрібно розв'язати задачу відтворення функцій $y_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, 4}$ за заданими дискретними значеннями X_s , $s = \overline{1, 3}$ і Y_i , $i = \overline{1, 4}$ вибірки, наведеної у табл. 5.1. Розмірності векторів X_1, X_2, X_3 відповідно $n_1 = 2, n_2 = 2, n_3 = 3$; обсяг вибірки $q_0 = 1,45$; кількість функцій $m = 4$. Вікно програми задання вихідних характеристик: обсягу вибірки; дискретних значень вибірки; кількості функцій наближення; кількості X_s векторів; значень степенів поліномів; можливості зміни структури обсягу вибірки (повна чи тільки за непарними значеннями); вибору умов оцінювання початкового наближення функцій; вибору способу розв'язання системи рівнянь (5.4) (єдина система або три системи окремо) наведено на рис. 5.1.

Таблиця 5.1. Вибірка вихідних даних $X_1[X_{11}, X_{12}], X_2[X_{21}, X_{22}], X_3[X_{31}, X_{32}, X_{33}]$ і $Y_i[X_1, X_2, X_3]$, $i = \overline{1, 4}$

q_0	X_{11}	X_{12}	X_{21}	X_{22}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	5,050	2,015	7,050	8,015	10,000	1,000	5,100	254,621	98,145	119,406	117,683
2	5,150	2,100	7,150	9,109	15,800	2,100	4,200	198,163	73,368	92,651	90,123
3	5,200	2,120	7,192	9,125	22,500	2,500	3,500	187,411	71,084	87,691	83,576
4	5,250	2,170	7,250	9,175	25,000	3,510	2,720	167,197	63,567	78,793	74,789
5	5,325	2,200	7,325	9,198	32,500	4,200	2,530	166,547	63,813	79,497	74,316
6	5,350	2,250	7,350	9,251	35,000	5,020	2,100	153,789	61,378	77,082	72,817
7	5,400	2,400	7,411	9,395	40,700	8,200	1,150	110,926	55,579	67,758	77,425
8	5,500	2,500	7,505	9,498	51,800	10,100	0,720	151,381	60,432	71,956	89,519
9	5,600	2,600	7,610	9,598	65,000	12,800	0,540	187,364	76,283	91,123	121,374
10	5,700	2,700	7,695	9,699	72,000	14,400	0,120	236,123	93,657	112,859	149,173
11	5,750	2,750	7,750	9,748	75,400	14,700	1,250	292,341	118,624	153,717	184,136
12	5,800	2,775	7,804	9,775	82,800	15,500	1,760	288,324	114,324	117,965	179,152
13	5,850	2,800	7,850	9,798	85,000	16,300	2,230	326,939	128,926	155,912	201,239
14	5,907	2,850	8,050	9,850	90,780	16,700	2,610	377,128	148,675	169,359	225,482
15	5,910	2,855	7,910	9,855	91,000	16,900	4,160	405,327	159,367	192,924	240,976
16	5,925	2,865	7,925	9,865	92,500	17,500	5,250	458,386	180,567	218,549	275,846
17	5,929	2,885	8,011	9,875	92,900	17,700	6,370	518,859	183,932	247,354	316,124
18	5,933	2,915	7,933	9,899	93,500	18,200	7,260	595,737	235,124	284,167	363,928
19	5,935	2,950	7,935	9,951	94,580	19,100	7,510	506,168	261,946	316,375	403,153
20	5,950	2,975	7,950	9,975	95,400	19,500	7,740	685,761	281,387	341,326	431,195
21	5,010	1,995	6,950	9,015	11,500	21,000	8,140	790,639	310,519	375,651	471,588
22	5,050	2,975	7,108	9,975	10,500	19,560	8,350	723,784	285,142	344,856	436,847
23	5,150	2,950	7,151	9,950	15,800	19,300	8,580	731,438	288,125	348,314	441,842
24	5,200	2,900	7,204	9,915	21,500	18,700	8,740	721,321	283,435	344,716	439,425
25	5,250	2,875	7,248	9,875	26,400	17,560	8,850	691,845	272,834	329,942	422,147
26	5,325	2,865	7,325	9,865	32,500	17,100	9,210	708,614	280,562	349,316	435,954
27	5,350	2,855	7,351	9,855	35,300	16,700	9,520	729,956	287,987	348,231	450,492

Таблиця 5.1 (продовження)

q_0	X_{11}	X_{12}	X_{21}	X_{22}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
28	5,400	2,850	7,408	9,850	41,700	16,200	9,750	730,129	288,951	347,987	454,897
29	5,500	2,775	7,495	9,775	50,200	15,700	10,100	717,152	285,494	342,967	458,289
30	5,600	2,750	7,607	9,750	62,700	15,360	0,100	278,654	111,209	132,856	172,164
31	5,700	2,710	7,697	9,697	69,800	14,700	1,150	242,145	96,197	115,632	153,356
32	5,750	2,603	7,750	9,605	75,100	13,340	1,360	186,243	77,325	93,135	127,168
33	5,800	2,495	7,798	9,495	80,520	11,720	1,750	162,345	64,615	77,824	106,123
34	5,850	2,394	7,850	9,415	85,200	8,900	2,130	132,879	52,534	63,453	82,659
35	5,907	2,245	7,913	9,255	90,760	7,740	2,570	167,156	65,178	79,167	93,834
36	5,910	2,192	7,910	9,205	91,100	6,360	2,750	170,531	66,176	80,836	91,345
37	5,925	2,175	7,925	9,175	92,500	5,700	3,260	184,243	70,364	87,192	96,841
38	5,929	2,125	7,929	9,125	92,900	3,750	3,790	181,956	70,428	85,834	93,952
39	6,010	2,105	7,933	9,091	93,300	3,650	4,120	216,829	83,475	101,985	109,463
40	5,935	2,010	7,935	8,985	94,500	3,520	4,360	273,329	104,924	128,591	133,415
41	5,950	2,110	7,950	9,115	98,600	2,720	3,850	219,421	84,183	102,861	108,613
42	5,020	2,115	6,995	9,115	110,00	2,340	2,340	225,356	86,324	105,817	107,319
43	6,050	2,128	7,950	9,120	95,260	2,560	1,680	176,578	66,457	78,473	82,263
44	5,935	2,131	7,935	9,130	93,520	2,760	1,320	170,948	65,814	81,417	84,132
45	5,925	2,135	7,925	9,135	92,800	2,980	1,160	168,334	64,549	78,653	81,953

Відтворення функціональних залежностей в адитивній формі

Розмір вибірки: 45
Введіть к-сть параметрів: 3
Вигляд полінома: Чебишова
Вибір файлу вхідних даних: D:\in.txt
Вибір файлу значень цільових функцій: D:\out.txt
К-сть значень цільових функцій: 4

Вектор X:

	Введіть розмірність	Введіть ступінь полінома
x1	2	2
x2	2	2
x3	3	2

Важливі функції:
☐ Середнє арифметичне
☐ Ураховувати мінімальні і максимальні значення
☒ Використати Lambda з трьох систем рівнянь

Вибірка X:

	x11	x12	x21	x22	x31	x32
1	5,05	2,015	7,05	8,015	10	1
2	5,15	2,1	7,15	9,109	15,8	2,1
3	5,2	2,125	7,192	9,125	22,5	2,5
4	5,25	2,175	7,25	9,175	25	3,51
5	5,325	2,2	7,325	9,198	32,5	4,2

Вибірка Y:

	y1	y2	y3	y4
1	254,621	98,145	119,406	117,683
2	198,163	73,368	92,651	90,123
3	187,411	71,084	87,691	83,576
4	167,197	63,567	78,793	74,789
5	166,547	63,813	79,497	74,316

Результати:

Y_norm

0.21141 0.17680 0.17322 0.11251
0.12834 0.08076 0.09352 0.04340
0.11253 0.07190 0.07764 0.02698
0.08279 0.04277 0.04914 0.00495
0.08163 0.04372 0.05139 0.00376
0.06306 0.03428 0.04365 0.00000
0.00000 0.01180 0.01379 0.01156
0.05952 0.03061 0.02724 0.04188
0.11246 0.05206 0.08863 0.12177
0.18419 0.15940 0.15625 0.19148
0.26880 0.25618 0.28912 0.27916
0.26099 0.23951 0.17461 0.26666
0.31780 0.29611 0.29616 0.32204
0.39164 0.37266 0.33923 0.38294
0.43313 0.41411 0.41471 0.42163
0.51119 0.49628 0.49679 0.50914

За всіма вибірками:
Пуск
Показати графіки

За неопределенными значениями:
Пуск
Показати графіки

Хочем / Учим / Lambda / A / C / pe / pa(T) / pa(x) / F(pu) / F(T) / F(x)

Рис. 5.1. Задання вихідних характеристик

Функції наближення $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, m}$, які з практично прийнятною похибкою у розумінні чебишевського наближення характеризують реальні функціональні залежності $y_i = f_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, m}$, знаходять на основі послідовності моделей

$$\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3 \rightarrow \Phi_{i1}, \Phi_{i2}, \Phi_{i3} \rightarrow \Phi_i.$$

Наведемо результати формування цих моделей.

Визначивши із системи рівнянь (5.4) матриці $\|\lambda_{j_1 p_1}^0\|, \|\lambda_{j_2 p_2}^0\|, \|\lambda_{j_3 p_3}^0\|$, на підставі формули (5.9) одержимо для $\Psi_{s_i}(x_{j_s})$, $s = \overline{1, 3}$, $j_1 = 1; 2$, $j_2 = 1; 2$, $j_3 = \overline{1, 3}$ такі співвідношення:

$$\Psi_{11}(x_{11}) = 0,171T_0^*(x_{11}) - 0,108T_1^*(x_{11}) - 0,089T_2^*(x_{11});$$

$$\Psi_{12}(x_{12}) = 0,171T_0^*(x_{12}) + 0,278T_1^*(x_{12}) + 0,379T_2^*(x_{12});$$

$$\Psi_{21}(x_{21}) = 0,123T_0^*(x_{21}) - 0,257T_1^*(x_{21}) + 0,204T_2^*(x_{21});$$

$$\Psi_{22}(x_{22}) = 0,123T_0^*(x_{22}) + 0,434T_1^*(x_{22}) + 0,175T_2^*(x_{22});$$

$$\Psi_{31}(x_{31}) = 0,150T_0^*(x_{31}) + 0,025T_1^*(x_{31}) + 0,018T_2^*(x_{31});$$

$$\Psi_{32}(x_{32}) = 0,150T_0^*(x_{32}) + 0,238T_1^*(x_{32}) + 0,113T_2^*(x_{32});$$

$$\Psi_{33}(x_{33}) = 0,150T_0^*(x_{33}) + 0,355T_1^*(x_{33}) + 0,117T_2^*(x_{33}).$$

Далі з використанням формули (5.8) із систем рівнянь (5.6) визначимо матриці $\|a_{j_1}^{(1)}\|, \|a_{j_2}^{(2)}\|, \|a_{j_3}^{(3)}\| \forall i \in [1, m]$. Таким чином для Φ_{ie} , $i = \overline{1, 4}$; $s = \overline{1, 3}$ одержимо:

$$\Phi_{11}(x_1) = 1,073\Psi_{11}(x_{11}) + 0,962\Psi_{12}(x_{12});$$

$$\Phi_{21}(x_1) = 0,957\Psi_{11}(x_{11}) + 1,014\Psi_{12}(x_{12});$$

$$\Phi_{31}(x_1) = 0,964\Psi_{11}(x_{11}) + 1,018\Psi_{12}(x_{12});$$

$$\Phi_{41}(x_1) = 0,960\Psi_{11}(x_{11}) + 1,048\Psi_{12}(x_{12});$$

$$\Phi_{12}(x_2) = 1,040\Psi_{21}(x_{21}) + 0,989\Psi_{22}(x_{22});$$

$$\Phi_{22}(x_2) = 1,012\Psi_{21}(x_{21}) + 0,991\Psi_{22}(x_{22});$$

$$\Phi_{32}(x_2) = 1,025\Psi_{21}(x_{21}) + 0,994\Psi_{22}(x_{22});$$

$$\Phi_{42}(x_2) = 0,940\Psi_{21}(x_{21}) + 1,038\Psi_{22}(x_{22});$$

$$\Phi_{13}(x_3) = 1,158\Psi_{31}(x_{31}) + 0,925\Psi_{32}(x_{32}) + 0,960\Psi_{33}(x_{33});$$

$$\Phi_{23}(x_3) = 0,946\Psi_{31}(x_{31}) + 1,031\Psi_{32}(x_{32}) + 0,983\Psi_{33}(x_{33});$$

$$\Phi_{33}(x_3) = 0,971\Psi_{31}(x_{31}) + 1,014\Psi_{32}(x_{32}) + 0,999\Psi_{33}(x_{33});$$

$$\Phi_{43}(x_3) = 0,858\Psi_{31}(x_{31}) + 1,156\Psi_{32}(x_{32}) + 0,981\Psi_{33}(x_{33}).$$

Остаточний результат формування функцій наближення $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, 4}$ отримуємо агрегуванням відповідних розв'язків на підставі співвідношень (5.7):

$$\Phi_1(x_1, x_2, x_3) = 0,073\Phi_{11}(x_1) - 0,022\Phi_{12}(x_2) + 0,953\Phi_{13}(x_3),$$

$$\Phi_2(x_1, x_2, x_3) = 0,120\Phi_{21}(x_1) - 0,078\Phi_{22}(x_2) + 0,959\Phi_{23}(x_3),$$

$$\Phi_3(x_1, x_2, x_3) = 0,127\Phi_{31}(x_1) - 0,081\Phi_{32}(x_2) + 0,954\Phi_{33}(x_3),$$

$$\Phi_4(x_1, x_2, x_3) = -0,023\Phi_{41}(x_1) + 0,018\Phi_{42}(x_2) + 1,005\Phi_{43}(x_3).$$

Відтворені функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, 4}$, виражені через зміщені поліноми Чебишева, мають вигляд:

$$\begin{aligned}\Phi_1(x_1, x_2, x_3) = & 0,013T_0^*(x_{11}) - 0,008T_1^*(x_{11}) - 0,007T_2^*(x_{11}) + \\ & + 0,012T_0^*(x_{12}) + 0,019T_1^*(x_{12}) + 0,027T_2^*(x_{12}) - \\ & - 0,003T_0^*(x_{21}) + 0,006T_1^*(x_{21}) - 0,005T_2^*(x_{21}) - \\ & - 0,003T_0^*(x_{22}) - 0,010T_1^*(x_{22}) - 0,004T_2^*(x_{22}) + \\ & + 0,166T_0^*(x_{31}) + 0,028T_1^*(x_{31}) + 0,020T_2^*(x_{31}) + \\ & + 0,132T_0^*(x_{32}) + 0,210T_1^*(x_{32}) + 0,099T_2^*(x_{32}) + \\ & + 0,137T_0^*(x_{33}) + 0,325T_1^*(x_{33}) + 0,107T_2^*(x_{33});\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_2(x_1, x_2, x_3) = & 0,020T_0^*(x_{11}) - 0,012T_1^*(x_{11}) - 0,010T_2^*(x_{11}) + \\ & + 0,021T_0^*(x_{12}) + 0,034T_1^*(x_{12}) + 0,046T_2^*(x_{12}) - \\ & - 0,010T_0^*(x_{21}) + 0,020T_1^*(x_{21}) - 0,016T_2^*(x_{21}) - \\ & - 0,009T_0^*(x_{22}) - 0,033T_1^*(x_{22}) - 0,013T_2^*(x_{22}) + \\ & + 0,136T_0^*(x_{31}) + 0,023T_1^*(x_{31}) + 0,016T_2^*(x_{31}) + \\ & + 0,148T_0^*(x_{32}) + 0,236T_1^*(x_{32}) + 0,111T_2^*(x_{32}) + \\ & + 0,141T_0^*(x_{33}) + 0,334T_1^*(x_{33}) + 0,110T_2^*(x_{33});\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_3(x_1, x_2, x_3) = & 0,021T_0^*(x_{11}) - 0,013T_1^*(x_{11}) - 0,011T_2^*(x_{11}) + \\ & + 0,022T_0^*(x_{12}) + 0,036T_1^*(x_{12}) + 0,049T_2^*(x_{12}) - \\ & - 0,010T_0^*(x_{21}) + 0,021T_1^*(x_{21}) - 0,017T_2^*(x_{21}) - \\ & - 0,010T_0^*(x_{22}) - 0,035T_1^*(x_{22}) - 0,014T_2^*(x_{22}) + \\ & + 0,139T_0^*(x_{31}) + 0,023T_1^*(x_{31}) + 0,016T_2^*(x_{31}) + \\ & + 0,145T_0^*(x_{32}) + 0,231T_1^*(x_{32}) + 0,109T_2^*(x_{32}) + \\ & + 0,143T_0^*(x_{33}) + 0,338T_1^*(x_{33}) + 0,112T_2^*(x_{33});\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_4(x_1, x_2, x_3) = & -0,004T_0^*(x_{11}) + 0,002T_1^*(x_{11}) + 0,002T_2^*(x_{11}) - \\ & - 0,004T_0^*(x_{12}) - 0,007T_1^*(x_{12}) - 0,009T_2^*(x_{12}) + \\ & + 0,002T_0^*(x_{21}) - 0,004T_1^*(x_{21}) + 0,003T_2^*(x_{21}) + \\ & + 0,002T_0^*(x_{22}) + 0,008T_1^*(x_{22}) + 0,003T_2^*(x_{22}) + \\ & + 0,129T_0^*(x_{31}) + 0,022T_1^*(x_{31}) + 0,015T_2^*(x_{31}) + \\ & + 0,174T_0^*(x_{32}) + 0,277T_1^*(x_{32}) + 0,131T_2^*(x_{32}) + \\ & + 0,148T_0^*(x_{33}) + 0,350T_1^*(x_{33}) + 0,116T_2^*(x_{33}).\end{aligned}$$

Такі самі функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, 4}$ у вигляді багаточленів, для нормованих змінних x_1, x_2, x_3 описують співвідношення:

$$\begin{aligned}\Phi_1(x_1, x_2, x_3) = & 0,039x_{11} - 0,056x_{11}^2 - 0,173x_{12} + 0,212x_{12}^2 + 0,005x_{21} - \\ & - 0,038x_{21}^2 + 0,012x_{22} - 0,031x_{22}^2 - 0,101x_{31} + 0,157x_{31}^2 - 0,375x_{32} + \\ & + 0,795x_{32}^2 - 0,209x_{33} + 0,858x_{33}^2 + 0,123;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_2(x_1, x_2, x_3) = & 0,057x_{11} - 0,082x_{11}^2 - 0,300x_{12} + 0,368x_{12}^2 + 0,168x_{21} - \\ & - 0,128x_{21}^2 + 0,041x_{22} - 0,108x_{22}^2 - 0,083x_{31} + 0,129x_{31}^2 - 0,421x_{32} + \\ & + 0,892x_{32}^2 - 0,215x_{33} + 0,883x_{33}^2 + 0,091;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_3(x_1, x_2, x_3) = & 0,061x_{11} - 0,088x_{11}^2 - 0,321x_{12} + 0,393x_{12}^2 + 0,178x_{21} - \\ & - 0,135x_{21}^2 + 0,043x_{22} - 0,113x_{22}^2 - 0,085x_{31} + 0,131x_{31}^2 - 0,412x_{32} + \\ & + 0,873x_{32}^2 - 0,218x_{33} + 0,894x_{33}^2 + 0,094;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_4(x_1, x_2, x_3) = & -0,011x_{11} + 0,016x_{11}^2 + 0,060x_{12} - 0,073x_{12}^2 - 0,036x_{21} + \\ & + 0,027x_{21}^2 - 0,010x_{22} + 0,026x_{22}^2 - 0,079x_{31} + 0,122x_{31}^2 - 0,495x_{32} + \\ & + 1,049x_{32}^2 - 0,225x_{33} + 0,925x_{33}^2 + 0,062.\end{aligned}$$

Остаточню функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, 4}$ подано у вигляді багаточленів для ненормованих змінних:

$$\begin{aligned}\Phi_1(x_1, x_2, x_3) = & 376,152x_{11} - 35,010x_{11}^2 - 718,833x_{12} + 150,055x_{12}^2 + 325,590x_{21} - \\ & - 21,216x_{21}^2 + 91,772x_{22} - 5,469x_{22}^2 - 0,902x_{31} + 0,011x_{31}^2 - 15,456x_{32} + \\ & + 1,351x_{32}^2 - 15,375x_{33} + 5,833x_{33}^2 - 1573,261;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_2(x_1, x_2, x_3) = & 209,199x_{11} - 19,471x_{11}^2 - 472,927x_{12} + 98,723x_{12}^2 + 419,049x_{21} - \\ & - 27,307x_{21}^2 + 121,617x_{22} - 7,248x_{22}^2 - 0,281x_{31} + 0,003x_{31}^2 - 6,578x_{32} + \\ & + 0,575x_{32}^2 - 6,008x_{33} + 2,279x_{33}^2 - 2026,330;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_3(x_1, x_2, x_3) = & 271,605x_{11} - 25,279x_{11}^2 - 611,813x_{12} + 127,715x_{12}^2 + 536,092x_{21} - \\ & - 34,933x_{21}^2 + 154,137x_{22} - 9,186x_{22}^2 - 0,348x_{31} + 0,004x_{31}^2 - 7,793x_{32} + \\ & + 0,681x_{32}^2 - 7,360x_{33} + 2,792x_{33}^2 - 2594,071;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_4(x_1, x_2, x_3) = & -62,649x_{11} + 5,831x_{11}^2 + 145,776x_{12} - 30,430x_{12}^2 - \\ & - 137,746x_{21} + 8,976x_{21}^2 - 45,103x_{22} + 2,688x_{22}^2 - 0,414x_{31} + 0,005x_{31}^2 - \\ & - 11,955x_{32} + 1,045x_{32}^2 - 9,727x_{33} + 3,690x_{33}^2 + 823,432.\end{aligned}$$

Відтворена у класі адитивних функцій функціональна залежність $\Phi_2(x_1, x_2, x_3)$ і графік функції $y_2(x_1, x_2, x_3)$, побудований за дискретними значеннями її вибірки, зображені на рис. 5.2.

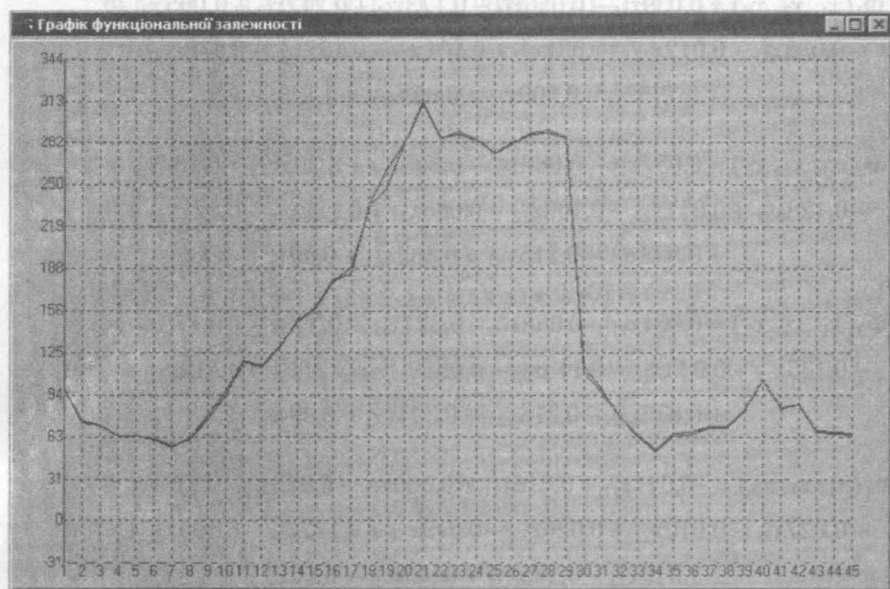


Рис. 5.2. Відтворена функціональна залежність $\Phi_2(x_1, x_2, x_3)$
і графік функції $y_2[X_1, X_2, X_3]$

Приклад 2. Розглянемо задачу відтворення функцій $y_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, 4}$ за заданими дискретними значеннями X_s , $s = \overline{1, 3}$ і Y_i , $i = \overline{1, 4}$ вибірки, наведеної у табл. 5.2. Розмірності векторів X_1, X_2, X_3 дорівнюють відповідно $n_1 = 2, n_2 = 2, n_3 = 2$; обсяг вибірки $q_0 = \overline{1, 50}$; кількість цільових функцій $m = 4$.

Таблиця 5.2. Вибірка вихідних даних для прикладу 2.

q_0	X_{11}	X_{12}	X_{21}	X_{22}	X_{31}	X_{32}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	0	0	0	0	0	0	0,844	1,0128	0,7596	0,70896
2	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	1,13796	1,25175	0,91037	0,86485
3	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	1,38072	1,65686	1,24265	1,15980
4	0,03	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	1,52508	1,67759	1,22006	1,15906
5	0,45	0	0,7	1	1,1	0,46	2,4676	2,96112	2,22084	2,07278
6	1,5	1,9	0,4	1,5	1,5	0,56	5,472	6,0192	4,3776	4,15872
7	0	2	0,3	1,6	0,4	0,66	3,7668	4,52016	3,39012	3,16411
8	0	0,21	0,2	1,7	0,3	0,76	2,1842	2,40262	1,74736	1,65999
9	0	0,22	0,1	0	0,2	0,08	1,1624	1,39488	1,04616	0,97641
10	0,1	0,3	0,7	1	0,1	0,96	1,9056	2,09616	1,52448	1,44825
11	0	0,4	0,6	1	1	1	2,664	3,1968	2,3976	2,23776
12	0,5	0,5	0,5	1	0	1	2,184	2,4024	1,7472	1,65984

q_0	X_{11}	X_{12}	X_{21}	X_{22}	X_{31}	X_{32}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
13	0,6	0,6	0,4	0,96	0,95	0,94	2,94660	3,53592	2,65194	2,47514
14	0,5	0,43	0,3	0,2	0	0,84	1,7658	1,94238	1,41264	1,34201
15	0	0	0,4	0,4	0,62	0,74	1,56582	1,87898	1,40924	1,31529
16	0,3	0,23	0	0,6	0,72	0,64	1,93146	2,12461	1,54517	1,46791
17	0	0,13	0,6	0,8	0	0,54	1,4398	1,72776	1,29582	1,20943
18	0,01	0,9	0,09	0	0,92	0,44	2,46414	2,71055	1,97131	1,87274
19	0	1	1	0	1	0,34	2,796	3,3552	2,5164	2,34864
20	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25	0,24	1,47232	1,61955	1,17785	1,11896
21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	1,22868	1,47441	1,10581	1,03209
22	1	0	1	0	1	0	2,194	2,4134	1,7552	1,66744
23	0,1	0,9	0,9	0,1	0,9	0,1	2,5468	3,05616	2,29212	2,13931
24	0	0,31	0	0,3	0,8	0,2	1,7502	1,92522	1,40016	1,33015
25	0,87	0	0,88	0,2	0,7	0,3	1,9092	2,29104	1,71828	1,60372
26	0,97	0,11	0	0,1	0,6	0,4	1,7998	1,97978	1,43984	1,36784
27	1	0	1	0	0,5	0,5	1,854	2,2248	1,6686	1,55736
28	0,1	0	0,7	1	0,4	0,6	1,6836	1,85196	1,34688	1,27953
29	0	1,5	0,8	0	0,3	0,7	2,6924	3,23088	2,42316	2,26161
30	0,4	1,3	0,9	0	0,2	0,8	2,6704	2,93744	2,13632	2,02950
31	0	1,1	1	0	0,1	0,9	2,3376	2,80512	2,10384	1,96358
32	1	0	0	1	0	1	1,834	2,0174	1,4672	1,39384
33	1	0	0	1	1	0	2,284	2,7408	2,0556	1,91856
34	0,93	0,12	0,11	0,9	0,99	0,18	2,37914	2,61706	1,90331	1,80815
35	0,41	0,68	0,4	1	0	0,22	2,056	2,4672	1,8504	1,72704
36	0,31	0	0,3	0,7	1	0,36	2,0428	2,24708	1,63424	1,55252
37	0	0,88	0,2	0,8	0	0,4	1,9928	2,39136	1,79352	1,67395
38	0,11	0	0,1	0,56	0,55	0,54	1,47684	1,62452	1,18147	1,1224
39	0	1	0	0,4	0,49	0,68	2,26374	2,71649	2,03737	1,90154
40	0	0,7	1	0,34	0,33	0,72	2,08502	2,29352	1,66802	1,58462
41	1,5	0,8	0	0,28	0,27	0,86	2,57068	3,08481	2,31361	2,15937
42	0,15	0,94	0,93	0,12	0,11	0,9	2,25503	2,48053	1,80402	1,71382
43	0	1	1	0	0	1	2,244	2,6928	2,0196	1,88496
44	1	0	1	0	0	1	1,744	1,9184	1,3952	1,32544
45	0,91	0,12	0,93	0,14	0,15	0,96	1,85796	2,22955	1,67216	1,56068
46	0,87	0,28	0,89	0,2	0,21	0,82	1,97198	2,16918	1,57758	1,49870
47	0,73	0,34	0,75	0,36	0,37	0,78	2,04998	2,45998	1,84498	1,72198
48	0,69	0,95	1	0	1,76	0,64	4,30229	4,73252	3,44183	3,26974
49	0,55	0,84	0	0,46	0,38	0,5	2,22537	2,67045	2,00283	1,86931
50	0,41	0,73	0,12	0,45	0,36	0,46	2,06706	2,27377	1,65365	1,57097

Вікно програми із вихідними характеристиками та отриманими результатами розв'язання для прикладу 2 зображено на рис. 5.3.

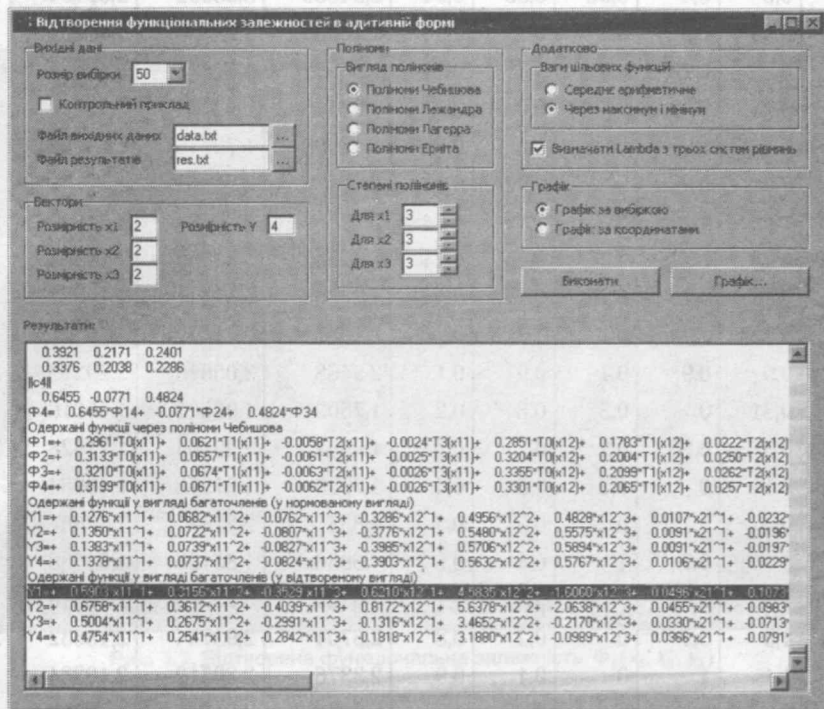


Рис. 5.3. Вікно програми із вихідними характеристиками та отриманими результатами розв'язання для прикладу 2

Відтворені функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, 4}$ за дискретними значеннями вибірки одержані агрегуванням відповідних розв'язків на підставі співвідношень (5.7) і мають такий вигляд:

$$\Phi_1(x_1, x_2, x_3) = 0,6057\Phi_{11}(x_1) - 0,0810\Phi_{12}(x_2) + 0,5220\Phi_{13}(x_3);$$

$$\Phi_2(x_1, x_2, x_3) = 0,6334\Phi_{21}(x_1) - 0,0664\Phi_{22}(x_2) + 0,4801\Phi_{23}(x_3);$$

$$\Phi_3(x_1, x_2, x_3) = 0,6461\Phi_{31}(x_1) - 0,0658\Phi_{32}(x_2) + 0,4677\Phi_{33}(x_3);$$

$$\Phi_4(x_1, x_2, x_3) = 0,6455\Phi_{41}(x_1) - 0,0771\Phi_{42}(x_2) + 0,4824\Phi_{43}(x_3).$$

Ті самі відтворені функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, 4}$, виражені через зміщені поліноми Чебишева, мають вигляд:

$$\begin{aligned} \Phi_1(x_1, x_2, x_3) = & 0,2961T_0^*(x_{11}) + 0,0621T_1^*(x_{11}) - 0,0058T_2^*(x_{11}) - 0,0024T_3^*(x_{11}) - \\ & - 0,2851T_0^*(x_{12}) + 0,1783T_1^*(x_{12}) + 0,0222T_2^*(x_{12}) + 0,0000T_3^*(x_{12}) - \\ & - 0,0313T_0^*(x_{21}) + 0,0053T_1^*(x_{21}) - 0,0025T_2^*(x_{21}) + 0,0000T_3^*(x_{21}) - \\ & - 0,0304T_0^*(x_{22}) - 0,0173T_1^*(x_{22}) - 0,0056T_2^*(x_{22}) - 0,0001T_3^*(x_{22}) + \\ & + 0,2220T_0^*(x_{31}) + 0,1639T_1^*(x_{31}) + 0,0409T_2^*(x_{31}) - 0,0104T_3^*(x_{31}) + \\ & + 0,2193T_0^*(x_{32}) + 0,0529T_1^*(x_{32}) - 0,0171T_2^*(x_{32}) + 0,0000T_3^*(x_{32}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_2(x_1, x_2, x_3) = & 0,3133T_0^*(x_{11}) + 0,0657T_1^*(x_{11}) - 0,0061T_2^*(x_{11}) - 0,0025T_3^*(x_{11}) + \\ & + 0,3204T_0^*(x_{12}) + 0,2004T_1^*(x_{12}) + 0,0250T_2^*(x_{12}) + 0,0000T_3^*(x_{12}) - \\ & - 0,0265T_0^*(x_{21}) - 0,0045T_1^*(x_{21}) - 0,0021T_2^*(x_{21}) + 0,0001T_3^*(x_{21}) - \\ & - 0,0258T_0^*(x_{22}) - 0,0147T_1^*(x_{22}) - 0,0048T_2^*(x_{22}) - 0,0000T_3^*(x_{22}) + \\ & + 0,2067T_0^*(x_{31}) + 0,1526T_1^*(x_{31}) + 0,0381T_2^*(x_{31}) - 0,0097T_3^*(x_{31}) + \\ & + 0,2089T_0^*(x_{32}) + 0,0504T_1^*(x_{32}) - 0,0163T_2^*(x_{32}) + 0,0000T_3^*(x_{32});\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_3(x_1, x_2, x_3) = & 0,3210T_0^*(x_{11}) + 0,0674T_1^*(x_{11}) - 0,0063T_2^*(x_{11}) - 0,0026T_3^*(x_{11}) + \\ & + 0,3355T_0^*(x_{12}) + 0,2099T_1^*(x_{12}) + 0,0262T_2^*(x_{12}) + 0,0000T_3^*(x_{12}) - \\ & - 0,0266T_0^*(x_{21}) - 0,0045T_1^*(x_{21}) - 0,0021T_2^*(x_{21}) + 0,0001T_3^*(x_{21}) - \\ & - 0,0259T_0^*(x_{22}) - 0,0148T_1^*(x_{22}) - 0,0048T_2^*(x_{22}) - 0,0000T_3^*(x_{22}) + \\ & + 0,2023T_0^*(x_{31}) + 0,1493T_1^*(x_{31}) + 0,0373T_2^*(x_{31}) - 0,0095T_3^*(x_{31}) + \\ & + 0,2062T_0^*(x_{32}) + 0,0498T_1^*(x_{32}) - 0,0161T_2^*(x_{32}) + 0,0000T_3^*(x_{32});\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_4(x_1, x_2, x_3) = & 0,3199T_0^*(x_{11}) + 0,0671T_1^*(x_{11}) - 0,0062T_2^*(x_{11}) - 0,0026T_3^*(x_{11}) + \\ & + 0,3301T_0^*(x_{12}) + 0,2065T_1^*(x_{12}) + 0,0257T_2^*(x_{12}) + 0,0000T_3^*(x_{12}) - \\ & - 0,0309T_0^*(x_{21}) - 0,0052T_1^*(x_{21}) - 0,0025T_2^*(x_{21}) + 0,0001T_3^*(x_{21}) - \\ & - 0,0301T_0^*(x_{22}) - 0,0172T_1^*(x_{22}) - 0,0056T_2^*(x_{22}) - 0,0000T_3^*(x_{22}) + \\ & + 0,2081T_0^*(x_{31}) + 0,1536T_1^*(x_{31}) + 0,0384T_2^*(x_{31}) - 0,0097T_3^*(x_{31}) + \\ & + 0,2112T_0^*(x_{32}) + 0,0510T_1^*(x_{32}) - 0,0165T_2^*(x_{32}) + 0,0000T_3^*(x_{32}).\end{aligned}$$

Функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, 4}$ у формі багаточленів для нормованих змінних такі:

$$\begin{aligned}\Phi_1(x_1, x_2, x_3) = & 0,1276x_{11} + 0,0682x_{11}^2 - 0,0762x_{11}^3 - 0,3286x_{12} + 0,4956x_{12}^2 + 0,4828x_{12}^3 + \\ & + 0,0107x_{21} - 0,0232x_{21}^2 + 0,0020x_{21}^3 - 0,0130x_{22} + 0,0859x_{22}^2 - 0,1747x_{22}^3 - \\ & - 0,1867x_{31} + 0,8261x_{31}^2 - 0,3325x_{31}^3 - 0,4800x_{32} + 2,8984x_{32}^2 - 1,5457x_{32}^3 - 0,1978;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_2(x_1, x_2, x_3) = & 0,1350x_{11} + 0,0722x_{11}^2 - 0,0807x_{11}^3 - 0,3776x_{12} + 0,5480x_{12}^2 + \\ & + 0,5575x_{12}^3 + 0,0091x_{21} - 0,0196x_{21}^2 + 0,0017x_{21}^3 - 0,0110x_{22} + 0,0729x_{22}^2 - \\ & - 0,1482x_{22}^3 - 0,1738x_{31} + 0,7691x_{31}^2 - 0,3095x_{31}^3 - 0,4533x_{32} + 2,7253x_{32}^2 - 1,4509x_{32}^3 - 0,2024;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_3(x_1, x_2, x_3) = & 0,1383x_{11} + 0,0739x_{11}^2 - 0,0827x_{11}^3 - 0,3985x_{12} + 0,5706x_{12}^2 + 0,5894x_{12}^3 + \\ & + 0,0091x_{21} - 0,0197x_{21}^2 + 0,0017x_{21}^3 - 0,0111x_{22} + 0,0732x_{22}^2 - 0,1488x_{22}^3 - \\ & - 0,1701x_{31} + 0,7526x_{31}^2 - 0,3029x_{31}^3 - 0,4459x_{32} + 2,6770x_{32}^2 - 1,4243x_{32}^3 - 0,2052;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_4(x_1, x_2, x_3) = & 0,1378x_{11} + 0,0737x_{11}^2 - 0,0824x_{11}^3 - 0,3903x_{12} + 0,5632x_{12}^2 + 0,5767x_{12}^3 + \\ & + 0,0106x_{21} - 0,0229x_{21}^2 + 0,0020x_{21}^3 - 0,0129x_{22} + 0,0851x_{22}^2 - 0,1730x_{22}^3 - 0,1750x_{31} + \\ & + 0,7744x_{31}^2 - 0,3116x_{31}^3 - 0,4575x_{32} + 2,7488x_{32}^2 - 1,4630x_{32}^3 - 0,2058.\end{aligned}$$

Остаточно одержимо функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = 1, 4$, у формі багаточленів для не-нормованих змінних:

$$\begin{aligned}\Phi_1(x_1, x_2, x_3) &= 0,5903x_{11} + 0,3156x_{11}^2 - 0,3529x_{11}^3 + 0,6210x_{12} + 4,5835x_{12}^2 - 1,6060x_{12}^3 + \\ &+ 0,0496x_{21} - 0,1073x_{21}^2 + 0,0092x_{21}^3 + 0,1199x_{22} - 0,3809x_{22}^2 - 0,7086x_{22}^3 - \\ &- 0,8640x_{31} + 3,8234x_{31}^2 - 1,5386x_{31}^3 - 5,3562x_{32} + 41,1563x_{32}^2 - 23,9001x_{32}^3 - 0,0716; \\ \Phi_2(x_1, x_2, x_3) &= 0,6758x_{11} + 0,3612x_{11}^2 - 0,4039x_{11}^3 + 0,8172x_{12} + 5,6378x_{12}^2 - 2,0638x_{12}^3 + \\ &+ 0,0455x_{21} - 0,0983x_{21}^2 + 0,0084x_{21}^3 + 0,1271x_{22} - 0,4232x_{22}^2 - 0,6406x_{22}^3 - \\ &- 0,8701x_{31} + 3,8506x_{31}^2 - 1,5496x_{31}^3 - 5,7552x_{32} + 44,4979x_{32}^2 - 25,8884x_{32}^3 - 0,0005; \\ \Phi_3(x_1, x_2, x_3) &= 0,5004x_{11} + 0,2675x_{11}^2 - 0,2991x_{11}^3 - 0,1316x_{12} + 3,4652x_{12}^2 - 0,2170x_{12}^3 + \\ &+ 0,0330x_{21} - 0,0713x_{21}^2 + 0,0061x_{21}^3 + 0,0463x_{22} - 0,1087x_{22}^2 - 0,4904x_{22}^3 - \\ &- 0,6153x_{31} + 2,7229x_{31}^2 - 1,0958x_{31}^3 - 3,2243x_{32} + 23,9426x_{32}^2 - 13,7591x_{32}^3 + 0,0174; \\ \Phi_4(x_1, x_2, x_3) &= 0,4754x_{11} + 0,2541x_{11}^2 - 0,2842x_{11}^3 - 0,1818x_{12} + 3,1880x_{12}^2 - 0,0989x_{12}^3 + \\ &+ 0,0366x_{21} - 0,0791x_{21}^2 + 0,0068x_{21}^3 + 0,0453x_{22} - 0,0942x_{22}^2 - 0,5470x_{22}^3 - \\ &- 0,6037x_{31} + 2,6714x_{31}^2 - 1,0750x_{31}^3 - 3,0571x_{32} + 22,5711x_{32}^2 - 12,9475x_{32}^3 - 0,0009.\end{aligned}$$

Відтворену функціональну залежність $\Phi_1(x_1, x_2, x_3)$ і графік функції $Y_1[X_1, X_2, X_3]$ для прикладу 2 наведено на рис. 5.4.

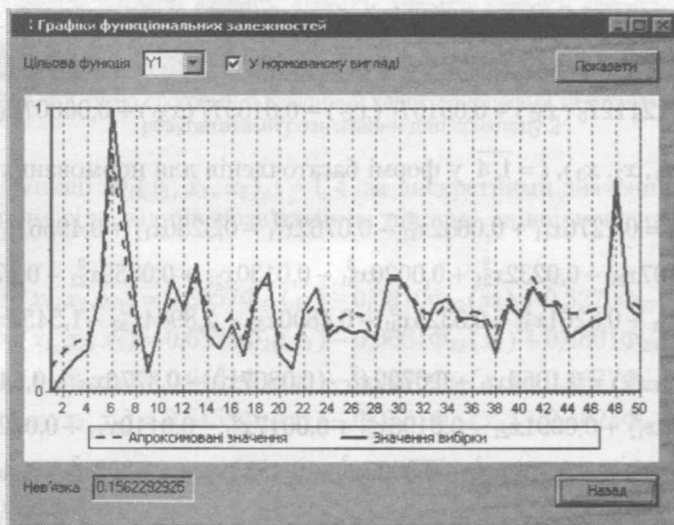


Рис. 5.4. Відтворена функціональна залежність $\Phi_1(x_1, x_2, x_3)$ і графік функції $Y_1[X_1, X_2, X_3]$.

5.2.2. Задача відтворення функцій у мультиплікативній формі за дискретною вибіркою

У наведених вище прикладах функціональні залежності формуються у класі адитивних функцій і зображаються у вигляді суперпозиції функцій від змінних x_1, x_2, x_3 . Такий вибір цілком обґрунтований, оскільки прийнято, що компоненти векторів x_1 ,

x_2, x_3 незалежні. Однак у деяких практичних задачах це неприйнятно, оскільки невідомо, залежними чи незалежними є компоненти векторів x_1, x_2, x_3 . Найскладніший випадок, коли компоненти векторів x_1, x_2, x_3 залежні. За цієї умови формування структури $\Phi_i(x_1, x_2, x_3), i = \overline{1, m}$ у класі адитивних функцій призведе до великих відхилів отриманих залежностей від реальних багатфакторних закономірностей, оскільки не буде враховано взаємні впливи компонентів векторів x_1, x_2, x_3 на властивості $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$.

Формуючи структуру моделей, враховуватимемо вплив на властивості шуканих функцій $\Phi_i(x_1, x_2, x_3), i = \overline{1, m}$ не лише групи компонент кожного вектора x_1, x_2, x_3 , а й взаємні впливи компонент різних векторів x_1, x_2, x_3 . Тому для виявлення багатфакторних закономірностей запропоновано сформувати ієрархічну багаторівневу систему моделей у класі мультиплікативних функцій [139].

Зобразимо систему моделей у вигляді послідовності таких рівнів:

$$y_i = \Phi_i(x), \quad i = \overline{1, m}; \quad (5.10)$$

$$[1 + \Phi_i(x)] = \prod_{k=1}^{K_0} [1 + \Phi_{ik}(x_k)]^{c_{ik}}; \quad (5.11)$$

$$[1 + \Phi_{ik}(x_k)] = \prod_{j_k=1}^{n_k} [1 + \Psi_{ikj_k}(x_{kj_k})]^{a_{ikj_k}}; \quad (5.12)$$

$$[1 + \Psi_{ikj_k}(x_{kj_k})] = \prod_{p_{jk}=1}^{p_{jk}} [1 + \varphi_{p_{jk}}(x_{kj_k})]^{l_{jk}}. \quad (5.13)$$

Для зручності обчислень після нескладних перетворень моделі (5.11)–(5.13) подамо у формі адитивних функцій:

$$\ln[1 + \Phi_i(x)] = \ln \left\{ \prod_{k=1}^{K_0} [1 + \Phi_{ik}(x_k)]^{c_{ik}} \right\}; \quad \ln[1 + \Phi_i(x)] = \sum_{k=1}^{K_0} c_{ik} \ln[1 + \Phi_{ik}(x_k)];$$

$$\Phi_i(x) = \exp \left\{ \sum_{k=1}^{K_0} c_{ik} \ln[1 + \Phi_{ik}(x_k)] \right\} - 1; \quad (5.14)$$

$$\Phi_{ik} = \exp \left\{ \sum_{j_k=1}^{n_k} a_{ikj_k} \ln[1 + \Psi_{ikj_k}(x_{kj_k})] \right\} - 1; \quad (5.15)$$

$$\Psi_{ikj_k}(x_{kj_k}) = \exp \left\{ \sum_{p_{jk}=1}^{p_{jk}} l_{jk} \ln[1 + \varphi_{p_{jk}}(x_{kj_k})] \right\} - 1. \quad (5.16)$$

Відзначимо деякі особливості ієрархічної системи моделей. На першому ієрархічному рівні системи розміщено моделі (5.11) і (5.14), які визначають залежність кожної функції $\Phi_i(x), i = \overline{1, m}$ від змінних $x_k, k = \overline{1, K_0}$. На другому рівні – моделі (5.12) і (5.15), які визначають залежність кожної функції $\Phi_{ik}(x_k)$ окремо від компонент $x_{kj_k}, k = \overline{1, K_0}, j_k = \overline{1, n_k}$ змінних $x_k, k = \overline{1, K_0}$ відповідно. На третьому рівні – моделі (5.13) і (5.16), які визначають функції $\Psi_{ikj_k}(x_{kj_k}), x_{kj_k}, k = \overline{1, K_0}, j_k = \overline{1, n_k}$.

Ця ієрархічна система дає змогу на основі векторів $x = (x_k | k = \overline{1, K_0})$ і $x_k = (x_{kj_k} | k = \overline{1, K_0}; j_k = \overline{1, n_k})$ формувати окремо структури моделей (5.11)–(5.13) і (5.14)–(5.16), в яких основними структуротвірними ФЕ є функції $\varphi_{p_k}(x_{kj_k})$.

Відтворимо функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3), i = \overline{1, 4}$ за заданим обсягом вибірки дискретних даних $X_s, s = \overline{1, 3}$ та $Y_i, i = \overline{1, 4}$, наведених у табл. 5.1. Вікно програми задання вихідних

даних: обсягу вибірки; кількості цільових функцій; кількості векторів x_s та їхньої розмірності; значень степенів поліномів; вибору умов оцінювання початкового наближення функцій; вибору способу розв'язання системи рівнянь (5.4) (єдина система чи три системи окремо), а також значень максимальних і мінімальних відхилів функції $\Phi_2(x_1, x_2, x_3)$ від дискретних значень вибірки $Y_2[X_1, X_2, X_3]$ зображено на рис. 5.5. Тут же наведено графік відтвореної функції $\Phi_2(x_1, x_2, x_3)$, яка зображена в мультиплікативній формі. Графік функції $Y_2[X_1, X_2, X_3]$ побудовано за значеннями дискретної вибірки.

Відтворені функції $\Phi_i(x_1, x_2, x_3)$, $i = \overline{1, 4}$ одержані агрегуванням відповідних розв'язків на підставі співвідношень (5.11)–(5.13) і мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}\Psi_{11}(x_{11}) &= (1,5)^{0,0777295} (3,12x_{11} + 15,03)^{0,114941} (9,7344x_{11}^2 + 86,5072x_{11} + \\ &+ 192,831)^{0,146933} (37,1205x_{11}^3 + 485,628x_{11}^2 + 2114,29x_{11} + 3065,28)^{0,118541} - 1; \\ \Psi_{12}(x_{12}) &= (1,5)^{0,0777295} (2,94x_{12} + 5,985)^{0,602141} (8,6436x_{12}^2 + 28,3318x_{12} + \\ &+ 23,8552)^{0,329136} (31,0593x_{12}^3 + 144,545x_{12}^2 + 220,983x_{12} + 112,869)^{-0,079337} - 1; \\ \Psi_{21}(x_{21}) &= (1,5)^{0,103405} (3,3x_{21} + 20,85)^{-0,32523} (10,89x_{21}^2 + 129,91x_{21} + \\ &+ 388,073)^{0,389109} (43,923x_{21}^3 + 775,671x_{21}^2 + 4562,41x_{21} + 8940,01)^{-0,0834892} - 1; \\ \Psi_{22}(x_{22}) &= (1,5)^{0,103405} (5,88x_{22} + 24,045)^{0,392262} (34,5744x_{22}^2 + 269,049x_{22} + \\ &+ 524,057)^{0,370097} (248,475x_{22}^3 + 2867,7x_{22}^2 + 11025,7x_{22} + 14124,2)^{0,197783} - 1; \\ \Psi_{31}(x_{31}) &= (1,5)^{0,0351869} (300x_{31} + 30)^{0,085386} (90000x_{31}^2 + 17300x_{31} + \\ &+ 832)^{0,0502533} (0,07x_{31}^3 + 0,06x_{31}^2 + 897900x_{31} + 28490)^{0,0280712} - 1; \\ \Psi_{32}(x_{32}) &= (1,5)^{0,0351869} (60x_{32} + 3)^{0,47717} (3600x_{32}^2 + 220x_{32} + \\ &+ 4)^{0,0268206} (264000x_{32}^3 + 20800x_{32}^2 + 408x_{32} + 5)^{-0,00681945} - 1; \\ \Psi_{33}(x_{33}) &= (1,5)^{0,0351869} (30x_{33} + 0,3)^{0,582053} (900x_{33}^2 - 52x_{33} + \\ &+ 1,39)^{-0,0204128} (33000x_{33}^3 - 3710x_{33}^2 + 105,9x_{33} + 1,463)^{-0,0215009} - 1; \\ \Phi_{11}(x_1) &= (\Psi_{11} + 1)^{0,637338} (\Psi_{12} + 1)^{0,0930169} - 1; \\ \Phi_{12}(x_2) &= (\Psi_{21} + 1)^{0,107742} (\Psi_{22} + 1)^{-0,066333} - 1; \\ \Phi_{13}(x_3) &= (\Psi_{31} + 1)^{0,106661} (\Psi_{32} + 1)^{0,5654043} (\Psi_{33} + 1)^{0,74188} - 1; \\ \Phi_{21}(x_1) &= (\Psi_{11} + 1)^{0,4387406} (\Psi_{12} + 1)^{0,173249} - 1; \\ \Phi_{22}(x_2) &= (\Psi_{21} + 1)^{0,0599518} (\Psi_{22} + 1)^{-0,448568} - 1; \\ \Phi_{23}(x_3) &= (\Psi_{31} + 1)^{0,132208} (\Psi_{32} + 1)^{0,566331} (\Psi_{33} + 1)^{0,792533} - 1; \\ \Phi_{31}(x_1) &= (\Psi_{11} + 1)^{0,46741} (\Psi_{12} + 1)^{0,188974} - 1; \\ \Phi_{32}(x_2) &= (\Psi_{21} + 1)^{0,074937} (\Psi_{22} + 1)^{-0,46837} - 1; \\ \Phi_{33}(x_3) &= (\Psi_{31} + 1)^{0,115089} (\Psi_{32} + 1)^{0,529878} (\Psi_{33} + 1)^{0,806946} - 1; \\ \Phi_{41}(x_1) &= (\Psi_{11} + 1)^{0,125671} (\Psi_{12} + 1)^{0,0591671} - 1; \\ \Phi_{42}(x_2) &= (\Psi_{21} + 1)^{0,0508546} (\Psi_{22} + 1)^{-0,00753406} - 1; \\ \Phi_{43}(x_3) &= (\Psi_{31} + 1)^{0,0850168} (\Psi_{32} + 1)^{0,707902} (\Psi_{33} + 1)^{0,838657} - 1;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_1(x_1, x_2, x_3) &= 679,713[\Phi_{11}(x_1) + 1]^{1,06018}[\Phi_{12}(x_2) + 1]^{1,46359}[\Phi_{13}(x_3) + 1]^{0,961271} + 109,926; \\ \Phi_2(x_1, x_2, x_3) &= 257,985[\Phi_{21}(x_1) + 1]^{1,28673}[\Phi_{22}(x_2) + 1]^{1,4494}[\Phi_{23}(x_3) + 1]^{0,946762} + 51,534; \\ \Phi_3(x_1, x_2, x_3) &= 312,198[\Phi_{31}(x_1) + 1]^{1,28158}[\Phi_{32}(x_2) + 1]^{1,49631}[\Phi_{33}(x_3) + 1]^{0,951132} + 62,453; \\ \Phi_4(x_1, x_2, x_3) &= 398,771[\Phi_{41}(x_1) + 1]^{1,56375}[\Phi_{42}(x_2) + 1]^{1,75381}[\Phi_{43}(x_3) + 1]^{0,889233} + 71,817.\end{aligned}$$

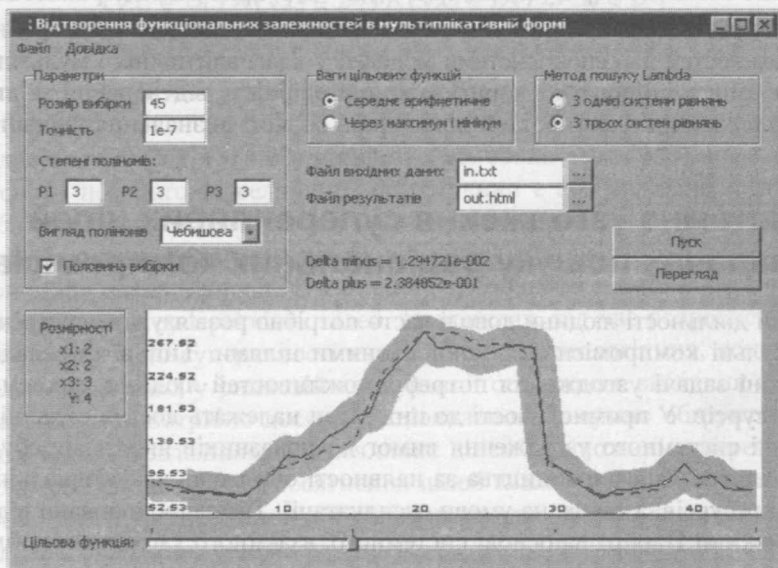


Рис. 5.5. Вікно задання вихідних даних для прикладу 3.

Відтворена функціональна залежність $\Phi_2(x_1, x_2, x_3)$ і графік функції $Y_2[X_1, X_2, X_3]$.

Незначна відмінність функціональних залежностей, отриманих у класі адитивних функцій (див. рис. 5.2) і в класі мультиплікативних функцій (рис. 5.5), свідчить про незалежність компонентів векторів x_1, x_2, x_3 і достовірність одержаних відтворених функціональних залежностей.

Виконання обчислювальних експериментів щодо відтворення функціональних залежностей дає змогу сформулювати такі рекомендації.

1. Під час розв'язання несумісної системи лінійних рівнянь (5.4) для відшукування коефіцієнтів $\|\lambda\| = \langle \|\lambda_{j_1 p_1}\|, \|\lambda_{j_2 p_2}\|, \|\lambda_{j_3 p_3}\| \rangle$ слід вибирати як значення b_{q_0} середньозважені значення $b_{q_0} = \{ \max_{i \in [1, m]} Y_i[q_0] + \min_{i \in [1, m]} Y_i[q_0] \} / 2$, якщо функціональні залежності $Y_i[q]$, $i = \overline{1, m}$ однієї природи і їхні нормовані значення приблизно однакові. Якщо ж функціональні залежності $Y_i[q]$, $i = \overline{1, m}$ суттєво різноманітні та їхні нормовані значення для всіх $i = \overline{1, m}$ істотно відрізняються, то застосування середньозваженої оцінки призведе до незадовільних результатів. У цьому разі доцільно вибирати значення $b_{i q_0}$, які дорівнюють нормованим значенням $Y_i[q]$, $i = \overline{1, m}$.
2. У випадку, якщо степінь використовуваних поліномів Чебишева невисокий ($P_{j_s} \leq 4$, кількість рівнянь у системі не менша за кількість змінних), то найкращим варіантом є відшукування коефіцієнтів $\|\lambda\| = \langle \|\lambda_{j_1 p_1}\|, \|\lambda_{j_2 p_2}\|, \|\lambda_{j_3 p_3}\| \rangle$ з однієї системи рівнянь (5.4), оскільки буде враховано залежність $Y_i[q]$, $i = \overline{1, m}$ від усіх аргументів X_s , $s = \overline{1, 3}$.

У разі роботи з високими степенями ($P_{js} \geq 6$, кількість рівнянь у системі менша за кількість невідомих) доцільно систему рівнянь (5.4) розв'язувати окремо у вигляді трьох систем рівнянь, визначаючи з кожної системи $\lambda_{j_s p_s}$, $s = \overline{1, 3}$.

3. Можна знайти всі коефіцієнти a_{is} , $s = \overline{1, 3}$ (5.2) з однієї системи рівнянь, оскільки в цьому разі враховано залежність $Y_i[q]$, $i = \overline{1, m}$ від усіх аргументів X_s , $s = \overline{1, 3}$. Тоді на завершальному етапі агрегування для пошуку коефіцієнтів c_{is} , $s = \overline{1, 3}$ потрібне лише незначне коригування, і всі c_{is} , $s = \overline{1, 3}$ приблизно дорівнюватимуть 1.

Наведені приклади показують, що запропонований підхід до відтворення функціональних залежностей на основі системи моделей у класі адитивних і мультиплікативних функцій дає змогу оцінювати і коригувати достовірність відтворення за дискретними даними незалежно від властивостей показників області визначення шуканих функцій.

5.3. Системне узгодження суперечливих цілей у задачах пошуку раціональних компромісів

У практичній діяльності людини доволі часто потрібно розв'язувати суперечності й шукати раціональні компроміси між конфліктними цілями. Типові приклади таких задач — це різні задачі узгодження потреб і можливостей людини, зокрема її запитів і наявних ресурсів. У промисловості до цих задач належать досить складні багатокритерійні задачі системного узгодження вимог до показників якості виробу з технологічними можливостями виробництва за наявності обмежень на матеріальні, фінансові та інші види ресурсів, а також на умови експлуатації. Тут запропоновано підхід до формування множини Парето на основі системного, взаємного узгодження області визначення і множини значень цільових функцій за умови, що апіорно невідомий факт існування непорожньої множини можливих компромісів суперечливих цілей [122, 123]. Водночас у типовому формулюванні задачі пошуку компромісів покладають, що множина Парето апіорно існує [109, 146].

Суть підходу розглянемо на прикладі однієї з практично важливих задач концептуального проектування складних систем, а саме задачі узгодження вимог до зовнішніх і внутрішніх показників виробу у випадку апіорі відомих обмежень на показники зовнішніх впливів. Вважаємо відомими цільові функції у вигляді (5.7) і (5.8).

5.3.1. Математична постановка задачі

Задано вимоги до зовнішніх показників y для умовного виробу:

$$y \in B^{\pm}, \quad B^{\pm} = \{B_i^{\pm}, i = \overline{1, m}\}, \quad B_i^{\pm} = \{y_i | b_i^{-} \leq y_i \leq b_i^{+}, i \in [1, m]\} \quad (5.17)$$

та вимоги до внутрішніх показників x_1 :

$$x_1 \in D_1^{\pm}, \quad D_1^{\pm} = \{x_1 | x_1 = \langle x_{1j_1}, j_1 = \overline{1, n_1} \rangle, d_{1j_1}^{-} \leq x_{1j_1} \leq d_{1j_1}^{+}\}. \quad (5.18)$$

Крім того, на показники зовнішніх впливів задано обмеження у вигляді:

$$x_2 \in D_2^*, \quad D_2^* = \{x_2 | x_2 = \langle x_{2j_2}, j_2 = \overline{1, n_2} \rangle, d_{2j_2}^{-} \leq x_{2j_2} \leq d_{2j_2}^{+}\}, \quad (5.19)$$

$$x_3 \in D_3^*, \quad D_3^* = \{x_3 | x_3 = \langle x_{3j_3}, j_3 = \overline{1, n_3} \rangle, d_{3j_3}^{-} \leq x_{3j_3} \leq d_{3j_3}^{+}\}. \quad (5.20)$$

Нехай також відомі функціональні залежності зовнішніх показників y від змінних $x = (x_1, x_2, x_3)$ у вигляді (5.7)–(5.8).

Потрібно сформулювати таку множину Парето $P_{D,B}(\Phi)$ для функцій $\Phi = \{\Phi_i(x), i = \overline{1, m}\}$, у якій на підставі вихідних даних (5.17)–(5.19) забезпечуватиметься раціональне взаємне узгодження області визначення D^* функцій Φ і множини B^* значень цих функцій з урахуванням умов:

$$(\forall x_1 \in D_1^*) \wedge (\forall x_2 \in D_2^*) \wedge (\forall x_3 \in D_3^*) \Rightarrow \exists y \in B^*; \quad (5.21)$$

$$\forall y \in B^* \Rightarrow (\exists x_1 \in D_1^*) \wedge (\exists x_2 \in D_2^*) \wedge (\exists x_3 \in D_3^*); \quad (5.22)$$

$$y \in B^* \Leftrightarrow (y_1 \in B_1^*) \wedge \dots \wedge (y_i \in B_i^*) \wedge \dots \wedge (y_m \in B_m^*). \quad (5.23)$$

У співвідношеннях (5.17)–(5.23) прийнято, що знаки « $\pm$ » і « $*$ » визначають відповідно кориговні і некориговні величини. Ці величини є або апіорно заданими обмеженнями, або остаточними результатами розв'язання задачі. Важлива особливість використаної формалізації полягає у виборі принципу раціональності розв'язку замість типового принципу оптимальності. Такий вибір зумовлений кількома факторами, серед яких найважливішим є суперечність цілей. Наприклад, під час розроблення складної технічної системи маємо суперечності економічних, технологічних, конструктивних та інших цілей. Крім того, у ринковій конкуренції особливого значення набуває фактор часу. За цих умов потрібно досягти раціонального розумно обгрунтованого компромісу водночас із досягненням суперечливих цілей на множині суперечливих обмежень, причому обмеження на час досягнення цілей вважають найпріоритетнішим.

Відзначимо практичну необхідність і доцільність одночасного виконання умов (5.21) та (5.22) під час формування множини Парето. Ці умови відображають різні підходи до вибору раціонального розв'язку, який визначає шукану множину Парето. Умова (5.21) передбачає прийняття як вихідних даних внутрішніх показників за наявності незмінюваних обмежень на показники зовнішніх впливів. На практиці такі обмеження задані стандартами для різних видів виробів, виконання яких обов'язкове. При цьому шуканими величинами є показники якості. Цей підхід дає змогу одержати відповідь на запитання: які показники якості можна одержати за обраних внутрішніх показників і за наявності заданих обмежень на показники зовнішніх впливів?

Умова (5.22) передбачає інший підхід: за вихідні дані взяти вимоги до зовнішніх показників якості, а шуканими величинами є внутрішні показники виробу. Це дає можливість одержати відповідь на запитання: які внутрішні показники необхідні для реалізації заданих показників якості за наявності заданих обмежень на показники зовнішніх впливів?

Отже, за незмінюваних обмежень на показники зовнішніх впливів перший підхід забезпечує формування «вигляду» виробу залежно від задання внутрішніх параметрів до визначення якості виробу. Другий підхід реалізує протилежну послідовність: від задання якості виробу до вибору структури і внутрішніх показників. Математично суть першого підходу полягає у побудові множини Парето як множини значень функцій Φ , оптимальних за Парето на апіорно заданій незмінюваній області їхнього визначення D^* . Такий підхід є типовим у разі пошуку компромісів із використанням множини Парето [109, 146].

Другий підхід реалізує формування області D^* методом такого її коригування, внаслідок якого можна досягти оптимальних значень функцій Φ . Його запропонував

В. М. Глушков для задачі системної оптимізації [27]. Узагальнення цього підходу для багатокритерійних лінійних задач оптимізації за інтервального задання переваг наведено у праці [28], а для людино-машинних процедур оптимізації – у праці [46].

Особливо слід наголосити, що у системній задачі розкриття концептуальної невизначеності ці підходи не є взаємозамінними у тому розумінні, що можна вибрати будь-який із них і на його основі сформувати структуру складної системи та вимоги до її функціонування. За умов концептуальної невизначеності нарізне використання будь-якого підходу не забезпечує одержання раціонального компромісу цілей за такими причинами. Насамперед суперечності цілей мають багаторівневу, ієрархічну структуру.

Перший рівень – це концептуальні суперечності, які стосуються задуму виробу, системні суперечності у вигляді необхідних потреб і потенційних можливостей на різних стадіях життєвого циклу виробу тощо. Другий рівень – міжсистемні суперечності реалізованості виробу у формі суперечностей між системою вимог до зовнішніх показників, які характеризують властивості та якість виробу, і системою вимог до внутрішніх показників, що характеризують конструктивні, технологічні та інші властивості реалізованості виробу. Третій рівень – внутрішньосистемні суперечності між різними групами вимог (технічними, експлуатаційними, економічними та іншими) у системі зовнішніх показників і між різними групами вимог (конструктивними, технологічними та іншими) у системі внутрішніх показників.

Ці суперечності відображають, власне кажучи, складність тільки одного концептуального етапу на стадії проектування виробу. Складність зазначених суперечностей цілком очевидна, але її підвищують ще й інші фактори.

1. Всі суперечності є взаємопов'язаними і взаємозалежними.
2. Вимоги до конструктивних, технологічних та інших груп показників виробу формують фахівці різних профілів.

Звідси випливає потреба розроблення й удосконалення методологічного і математичного апарату розв'язання суперечностей на основі раціонального компромісу.

5.3.2. Системне узгодження вимог між зовнішніми і внутрішніми показниками виробу

Розглянемо випадки системного узгодження вимог між різними групами та комплексами зовнішніх і внутрішніх показників умовного виробу. Системну узгодженість розуміють як раціональний компроміс між різними групами вимог до виробу для досягнення його рентабельності і конкурентоспроможності під час адаптації проекту до наявних технологічних, ресурсних та інших можливостей виробництва. При цьому слід урахувати як прямий, так і зворотний взаємозв'язок показників. Так, наприклад, заміна матеріалу може зумовити не лише зміну технології обробки конструктивного елемента, але й зміну певних якісних показників, зокрема, технічних, експлуатаційних, економічних тощо. І навпаки, зміна вимог до якісного певного показника може зумовити не тільки зміну технології обробки матеріалу, але й повну зміну структури конструкції і форми конструктивних елементів та виробу загалом.

Ці фактори свідчать про практичну потребу і доцільність формування множини Парето за одночасного виконання умов (5.21) і (5.22). Суть підходу до формування такої множини полягає у послідовному ітераційному коригуванні вихідних множин

(5.17) і (5.18) за незмінюваних обмежень (5.19) і (5.20) на основі обчислювальних та інтерактивних процедур для досягнення одночасного виконання умов (5.21) і (5.22).

Послідовність перевірки умов (5.21) або (5.22) можуть визначати як об'єктивні, так і суб'єктивні фактори, і тому початком процедури може бути перевірка кожної з цих умов. Розглянемо алгоритм формування множини Парето, у якому реалізацію обчислювальних процедур (ОП) починають із перевірки умови (5.21).

ОП-1. За вихідними даними (5.17)–(5.18) для всіх $i = \overline{1, m}$ на основі формул (5.7)–(5.8) потрібно виконати такі дії.

1.1. Знайти:

$$\begin{aligned} y_i^- &= \min_{x \in D^+} \Phi_i(x); \\ y_i^+ &= \max_{x \in D^+} \Phi_i(x). \end{aligned} \quad (5.24)$$

1.2. Сформувати:

$$\begin{aligned} B^* &= \langle B_i^*; i = \overline{1, m} \rangle; \\ B_i^* &= \{y_i | y_i^- \leq y_i \leq y_i^+\}. \end{aligned} \quad (5.25)$$

1.3. Перевірити виконання умов:

$$(\forall i = \overline{1, m} \rightarrow y_i^- \leq b_i^-) \wedge (\forall i = \overline{1, m} \rightarrow y_i^+ \geq b_i^+) \Rightarrow B^+ \supseteq B^*; \quad (5.26)$$

$$(\exists i \in [1, m] \rightarrow y_i^- > b_i^-) \vee (\exists i \in [1, m] \rightarrow y_i^+ < b_i^+) \Rightarrow B^+ \neq B^*. \quad (5.27)$$

1.4. Проаналізувати результати перевіркою умов:

- ♦ якщо виконується умова (5.26), то (5.17) і (5.18) — сумісні, а (5.25) — шуканий результат;
- ♦ якщо виконується умова (5.27), то (5.17) і (5.18) — несумісні, і потрібно коригувати (5.17) або (5.18).

Коментарі

K1.1. Якщо виконується умова (5.26), то вимоги (5.17) до зовнішніх параметрів реалізуються за вихідних даних (5.18), а співвідношення (5.25) визначає шуканий результат.

K1.2. Якщо виконується умова (5.27), то ОПР виконує корекцію: або в (5.17) тих значень $B_i, i \in [1, m]$, які відповідають умові (5.27), після чого повторно виконують процедуру ОП-1; або відповідних вихідних даних у (5.18), і переходять до наступної ОП.

ОП-2. За вихідними даними для $B_i^*, i = \overline{1, m}, D_2^*, D_3^*$ потрібно виконати такі дії.

2.1. Сформувати дискретні аналоги:

$$\hat{B}^* = \{y_i | y_i = y_i[q_0]; y_i[q_0] \in B_i^*; q_0 = \overline{1, k_0}; y_i[1] = b_i^-; y_i[k_0] = b_i^+\}; \quad (5.28)$$

$$\hat{D}_2^* = \{x_2 | x_2 = x_2[q_2]; x_2[q_2] \in D_2^*; q_2 = \overline{1, k_2}; x_2[1] = d_2^-; x_2[k_2] = d_2^+\}; \quad (5.29)$$

$$\hat{D}_3^* = \{x_3 | x_3 = x_3[q_3]; x_3[q_3] \in D_3^*; q_3 = \overline{1, k_3}; x_3[1] = d_3^-; x_3[k_3] = d_3^+\}. \quad (5.30)$$

2.2. Сформувати систему рівнянь:

$$y_i[q_0] - \Phi_i(x_1, x_2[q_2], x_3[q_3]) = 0; \quad i = \overline{1, m}; \quad q_0 = \overline{1, k_0}. \quad (5.31)$$

2.3. Розв'язати систему (5.31) і за результатами розв'язання знайти:

$$x_1^- = \arg \min_{i \in [1, m]} \Phi_i(x); \quad x_1^+ = \arg \max_{i \in [1, m]} \Phi_i(x);$$

$$x_1^- = \{x_{1j_1}^- | j_1 = \overline{1, n_1}\}; \quad x_1^+ = \{x_{1j_1}^+ | j_1 = \overline{1, n_1}\}.$$

2.4. Перевірити виконання умов:

$$(\forall j_1 = \overline{1, n_1} \rightarrow x_{1j_1}^- \geq d_{1j_1}^-) \wedge (\forall j_1 = \overline{1, n_1} \rightarrow x_{1j_1}^+ \leq d_{1j_1}^+) \Rightarrow D_1^* \supseteq D_1^\pm; \quad (5.32)$$

$$(\exists j_1 \in [1, n_1] \rightarrow x_{1j_1}^- < d_{1j_1}^-) \vee (\exists j_1 \in [1, n_1] \rightarrow x_{1j_1}^+ > d_{1j_1}^+) \Rightarrow D_1^* \neq D_1^\pm; \quad (5.33)$$

$$D_1^* = \{x_1 | x_1 = \langle x_{1j_1}, j_1 = \overline{1, n_1} \rangle, x_{1j_1}^- \leq x_{1j_1} \leq x_{1j_1}^+\}. \quad (5.34)$$

2.5. Проаналізувати результати перевіркою умов:

- ♦ якщо виконується умова (5.32), то (5.17) і (5.18) – сумісні, а (5.34) – шуканий результат;
- ♦ якщо виконується умова (5.33), то (5.17) і (5.18) – несумісні, і потрібно коригувати (5.17) або (5.18).

Коментарі

K2.1. Система рівнянь (5.31) містить $N = m \times k_0$ рівнянь і формується з умови:

$$y_i[q_0] = \Phi_i(x_1, x_2[q_2], x_3[q_3]); \\ i = \overline{1, m}; q_0 = \overline{1, k_0}, q_0 \Leftrightarrow \langle q_2, q_3 \rangle.$$

K2.2. У загальному випадку $N > n_1$, і (5.31) – несумісна система нелінійних рівнянь, де невідомими є компоненти x_{1j_1} , $j_1 = \overline{1, n_1}$ вектора x_1 .

K2.3. Якщо виконується умова (5.32), то вихідні значення $x_1 \in D_1^\pm$ забезпечують виконання вимог $y \in B^*$, і замість $x_1 \in D_1^\pm$ можна взяти $x_1 \in D_1^*$. Якщо виконується умова (5.33), то вихідні значення $x_1 \in D_1^\pm$ не дають змоги реалізувати задані вимоги $y \in B^*$. Тому потрібне коригування: або значень x_{1j_1} , для яких виконується умова (5.33), або вимог до тих $y_i \in B^*$, для яких не виконується умова (5.32). Варіанти розв'язання вибирає ОПР, і залежно від прийнятого рішення повторно виконують ОП-1 або ОП-2. Умовою завершення обчислень є одночасне виконання умов (5.26) і (5.32). Отже, послідовне виконання зазначених інтерактивних процедур забезпечує раціональний компроміс як між системою вимог до зовнішніх і внутрішніх показників виробу, так і між різними групами вимог у кожній системі.

У результаті, за одночасного виконання умов (5.26) і (5.32) і, як наслідок, – умов (5.21) і (5.22), одержуємо шукану множину Парето $P_{D,B}(\Phi)$. Вона характеризується тріадою $\langle D^*, B^*, \Phi \rangle$, забезпечує системне, взаємне інтервальне узгодження області визначення D^* і множини значень B^* для кожної функції множини Φ , її описує співвідношення [122, 123]:

$$P_{D,B}(\Phi) = \Delta \{ \langle D^*, B^*, \Phi \rangle | [\Phi : D^* \rightarrow B^*] \wedge [\Phi^{-1} : B^* \rightarrow D^*] \}.$$

Відзначимо важливу особливість виробів, показники яких є елементами множини Парето. Такі вироби мають системно узгоджений взаємозв'язок множин зовнішніх

і внутрішніх показників. Тому за будь-якого вибору значень зовнішніх показників $y \in B^*$ для множини внутрішніх показників виконується умова $x_1 \in D_1^*$. Справедливе і зворотнє твердження: $\forall x_1 \in D_1^* \Rightarrow \exists y \in B^*$, при цьому виконуються відповідні умови (5.19) і (5.20) для показників зовнішніх впливів.

Очевидно, що множина таких виробів необмежена. Для вибору єдиного раціонального виробу необхідно відповідно до принципу доповнюваності Геделя ввести додаткову систему критеріїв і на її підставі остаточно вибрати виріб.

5.3.3. Приклади пошуку раціональних компромісів

Приклад 1. Використовуючи наведений вище алгоритм, знайдемо множину Парето для внутрішніх $X_1(X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}), X_2(X_{21}, X_{22}), X_3(X_{31}, X_{32})$ і зовнішніх $Y(Y_1, Y_2, Y_3)$ параметрів за вибіркою обсягом даних $q_0 = 1, 25$, показаною у табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Вихідні дані за експериментальною вибіркою

q_0	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{31}	X_{32}	Y_1	Y_2	Y_3
1	0	1	0,4	0,5	0	1	0	0,5	2,28400	1,59933	1,16522
2	0	0,09	0,3	0,6	0,01	0,9	0,12	0,6	1,50970	1,05679	0,76995
3	0,22	0,08	0,2	0,07	0,02	0,8	0,22	0,7	1,55233	1,08663	0,79169
4	0,33	0,07	0,1	0,08	0,03	0,7	0,32	0,8	1,60862	1,12604	0,8204
5	0,44	0,06	0	0,09	0,04	0,6	0,42	0,9	1,67857	1,175	0,85607
6	0,55	0,5	0,5	0,1	0,05	0,05	0,52	1	1,91218	1,33853	0,97521
7	0,66	0,04	0,6	0,09	0,06	0,4	0,62	0,4	1,84825	1,29378	0,94261
8	0,77	0,03	0,7	0,08	0,07	0,3	0,72	0,3	1,94798	1,36359	0,99347
9	0,88	0,02	0,8	0,07	0,08	0,2	0,82	0,2	2,06137	1,44296	1,0513
10	0,99	0,01	0,9	0,06	0,09	0,1	0,92	0,1	2,18842	1,53191	1,1161
11	1	0	1	0,05	1	0	1	0	2,44475	1,71133	1,24682
12	2	1,5	0,25	0,04	1,8	1,1	2	1,2	5,32518	3,72763	2,71584
13	1,2	0,13	0,45	0,03	1,4	1,5	1,6	1,7	4,58537	3,20976	2,33854
14	1	0,6	0	0,02	0,7	0,4	0,3	0,5	2,26572	1,586	1,15552
15	0,8	0,1	0,45	0,01	0	0,7	1	0,7	2,48330	1,73833	1,2665
16	1,3	1,8	1,5	0	1,9	0,4	1,5	1,7	5,78220	4,04754	2,94892
17	1,1	0,19	1,9	0,15	2	0,3	1,6	1,8	4,55915	3,19141	2,32517
18	0,9	2	2,3	0	0,21	0,2	1,7	1,9	6,03620	4,22534	3,07846
19	0,7	2,1	0,27	0,11	0,22	0,1	1,8	2	5,75073	4,02551	2,93287
20	0,5	2,2	0,31	0	0,23	0	1,9	0,21	5,42210	3,79547	2,76527
21	0,3	1,3	0,7	0,12	0,14	0,95	1	1,2	3,71637	2,60146	1,89535
22	0,2	1,4	0,8	0,14	1,5	0,84	0,11	1,3	3,33138	2,33196	1,6990
23	0,1	1,5	0,9	0,16	1,6	0,73	0,12	1,4	3,41644	2,39151	1,74239
24	0	1,6	1	0	1,7	0,62	0,13	1,5	3,49744	2,44821	1,7837
25	1,5	1,7	1,1	0,13	1,8	0,51	0,14	1,6	4,23661	2,96563	2,16067

Ітераційну процедуру пошуку множини Парето ілюструє серія вікон програми (рис. 5.6–5.9).

Ітераційна процедура пошуку

Межі змінних (D_+)		Коригування X_1		Межі змінних (D_0)	
x_{11} :	[0 2]	Коригування X_1 $D_+ \rightarrow D_0$	x_{11} :	[0 2]	
x_{12} :	[0 2,2]		x_{12} :	[0 2,2]	
x_{13} :	[0 2,3]		x_{13} :	[0 2,3]	
x_{14} :	[0 0,16]		x_{14} :	[0 0,16]	

Межі функцій (B_+)		Коригування Y		Межі функцій (B_0)	
y_1 :	[1 7]	Коригування Y $B_+ \rightarrow B_0$	y_1 :	[1,105 5,855]	
y_2 :	[1 5]		y_2 :	[0,935 4,027]	
y_3 :	[0 4]		y_3 :	[0,802 2,952]	

Процедура коригування обмежень на Y

B_+ не вкладено в B_0 ,
потрібно підкоригувати межі (B_+) для функцій y_1, y_2, y_3 ,
або перейти до процедури коригування меж для X_1 .

Рис. 5.6. Процедура коригування Y

Ітераційна процедура пошуку

Межі змінних (D_+)		Коригування X_1		Межі змінних (D_0)	
x_{11} :	[0 2]	Коригування X_1 $D_+ \rightarrow D_0$	x_{11} :	[0,588 0,691]	
x_{12} :	[0 2,2]		x_{12} :	[0,704 0,773]	
x_{13} :	[0 2,3]		x_{13} :	[0,879 0,917]	
x_{14} :	[0 0,16]		x_{14} :	[0,038 0,108]	

Межі функцій (B_+)		Коригування Y		Межі функцій (B_0)	
y_1 :	[1 7]	Коригування Y $B_+ \rightarrow B_0$	y_1 :	[1,105 5,855]	
y_2 :	[1 5]		y_2 :	[0,935 4,027]	
y_3 :	[0 4]		y_3 :	[0,802 2,952]	

Процедура коригування обмежень на X_1

Якщо D_+ не вкладено в D_0 ,
потрібно підкоригувати межі (D_+) для X_1 .

Рис 5.7. Процедура коригування X_1

Для виконання вимог до X_1 змінимо межі для $X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}$ (рис. 5.8)

Ітераційна процедура пошуку

Межі змінних (D_+)		Коригування X_1		Межі змінних (D_0)	
x_{11} :	[0,588 0,691]	Коригування X_1 $D_+ \rightarrow D_0$	x_{11} :	[0,588 0,691]	
x_{12} :	[0,704 0,773]		x_{12} :	[0,704 0,773]	
x_{13} :	[0,879 0,917]		x_{13} :	[0,879 0,917]	
x_{14} :	[0,038 0,108]		x_{14} :	[0,038 0,108]	

Межі функцій (B_+)		Коригування Y		Межі функцій (B_0)	
y_1 :	[1 7]	Коригування Y $B_+ \rightarrow B_0$	y_1 :	[1,105 5,855]	
y_2 :	[1 5]		y_2 :	[0,935 4,027]	
y_3 :	[0 4]		y_3 :	[0,802 2,952]	

Процедура коригування обмежень на X_1

Якщо D_+ не вкладено в D_0 ,
потрібно підкоригувати межі (D_+) для X_1 .

Рис. 5.8. Процедура коригування X_1

Застосовуючи послідовно процедури коригування для X_1 і Y , одержимо узгоджену за внутрішніми і зовнішніми параметрами множину Парето (рис. 5.9).

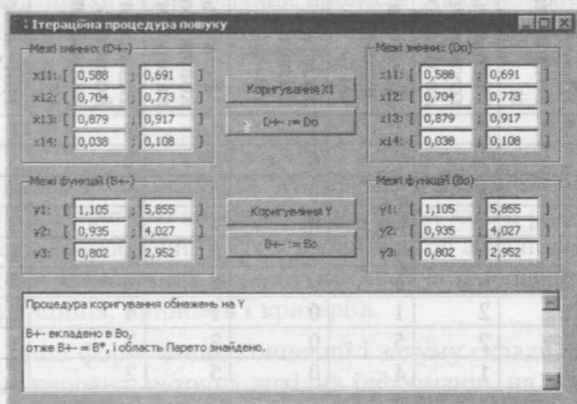


Рис. 5.9. Узгоджена за внутрішніми і зовнішніми параметрами множина Парето

Приклад 2. Нехай потрібно за певний термін виконати певну роботу, наприклад, вирити котлован. Роботу можна виконати тільки за допомогою комплексу машин: виїмка землі — екскаваторами, транспортування — вантажівками або тракторами із причепом, укладання вивезеної землі — планувальною машиною (бульдозером, котком тощо). Задача полягає в тому, щоб підібрати параметри всіх цих машин так, щоб увесь їх комплекс працював ефективно, а роботу було виконано вчасно.

Ефективність роботи комплексу залежить від кількох груп параметрів: параметрів котлована (глибини, довжини, ширини, твердості ґрунту), параметрів дороги (довжини і якості), параметрів екскаваторів (місткості ковша), параметрів вантажівок (вантажопідйомності), параметрів бульдозера (потужності) (табл. 5.4). Задачу розв'язували, використовуючи наведений вище алгоритм.

Інтерфейс користувача організовано у вигляді багатовіконного програмного інтерфейсу, що дає змогу одночасно відображати й оперувати всіма даними, доступними ОНР. Ці дані у процесі роботи алгоритму можна змінювати.

Таблиця 5.4. Вихідні дані для прикладу 2

Номер вибірки	Глибина котлована, м	Довжина котлована, м	Ширина котлована, м	Твердість ґрунту (число твердості)	Довжина дороги, км	Якість дороги, ум. од.	Місткість ковша екскаватора, м³	Вантажопідйомність вантажівки (т)	Потужність бульдозера, к. с.	Вартість робіт, тис. грн	Тривалість робіт, год
1	8	8	3	1	3	0	3	2	3	400	18
2	1	4	2	2	5	1	5	3	1	100	14
3	5	5	3	1	3	0	2	4	1	500	12
4	10	8	4	1	5	1	4	5	2	300	20
5	2	7	3	1	5	0	1	2	2	200	10
6	2	6	2	2	3	0	3	4	3	100	11
7	6	3	1	1	3	0	5	3	1	300	17
8	7	5	2	1	5	1	2	2	2	400	19
9	6	4	3	2	1	0	2	5	2	500	13
10	8	4	3	1	4	1	3	2	3	250	10

Таблиця 5.4 (продовження)

Номер вибірки	Глибина котлована, м	Довжина котлована, м	Ширина котлована, м	Твердість ґрунту (число твердості)	Довжина дороги, км	Якість дороги, ум. од.	Місткість ковша екскаватора, м³	Вантажопідйомність вантажівки (т)	Потужність бульдозера, к. с.	Вартість робіт, тис. грн	Тривалість робіт, год
11	2	3	3	2	1	1	1	3	1	270	14
12	5	5	2	1	2	0	2	2	1	370	17
13	9	8	1	1	5	0	5	5	3	550	19
14	3	7	4	1	3	0	4	4	2	150	15
15	4	6	3	1	2	1	3	3	1	370	13
16	5	5	2	2	1	0	2	2	2	420	18
17	7	2	1	2	1	0	1	4	2	170	11
18	3	9	2	2	5	0	3	3	1	120	10
19	4	7	5	1	4	0	5	2	1	280	17

Результати розв'язання такі:

- ♦ раціональні значення якісних показників та відповідні їм значення конструктивних показників і параметрів зовнішнього впливу;
- ♦ остаточний результат у вигляді шуканої множини Парето після виконання потрібної кількості ітерацій;
- ♦ початкові обмеження на значення параметрів і функцій.

Розв'язуючи задачу в інтерактивному діалоговому режимі, одержуємо узгоджену множини Парето (табл. 5.5).

Таблиця 5.5. Узгоджена множини Парето

Глибина котлована, м	Довжина котлована, м	Ширина котлована, м	Твердість ґрунту (число твердості)	Довжина дороги, км	Якість дороги, ум. од
[1,709; 4,884]	[4,192; 6,595]	[1,688; 3,3]	[1; 2]	[1,015; 5,11]	[0;1]

Місткість ковша екскаватора, м³	Вантажопідйомність вантажівки, т	Потужність бульдозера, к. с.	Вартість робіт, тис. грн	Тривалість робіт, год
[1,778; 3,898]	[2,367; 4,046]	[1,589; 1,953]	[16,119; 559,599]	[8,078; 20,374]



Рис. 5.10. Ітераційна процедура відшукування множини Парето

Отже, наведені приклади ілюструють практичну можливість знаходити раціональний компроміс між суперечливими цілями під час розробки окремих виробів нової техніки або організації низки технологічних процесів у єдину технологію будівельних, промислових чи інших видів робіт із використанням системи різних видів техніки.

Висновки

- ♦ Запропоновано підхід до відтворення функціональних залежностей за експериментально отриманою дискретною вибіркою в системній задачі розкриття концептуальної невизначеності. Розроблений підхід зводиться до задачі системно узгодженого розкриття множини різнорідних невизначеностей із різнотипною інформацією на основі єдиних принципів, прийомів і критеріїв.
- ♦ На початковому етапі формування концепції і задуму складного виробу нової техніки наявна лише неповна, неточна вихідна інформація, на підставі якої потрібно сформулювати цільові функції створення нового виробу. При цьому слід враховувати не лише різнорідність усіх видів невизначеностей, але й різнорідність і різнотипність властивостей розглянутих груп факторів. За цих умов вибір кількості цільових функцій, їхніх аналітичних залежностей, обґрунтування їхнього змісту і призначення є неформалізовною процедурою.
- ♦ Під час розроблення підходу до відтворення функціональних залежностей однією з основних є задача вибору класу і структури функцій наближення, які мають бути не лише максимально наближеними до емпіричних даних у розумінні певного критерію, але й мати певні екстремальні властивості. Важлива особливість задачі полягає також у потребі вибору раціонального компромісу між суперечливими вимогами: максимізації рівня достовірності процедури виявлення шуканої закономірності і мінімізації складності і трудомісткості процедури формування шуканої функціональної залежності.
- ♦ З огляду на ці особливості і властивості розглянутої задачі функції наближення формують у вигляді ієрархічної багаторівневої системи моделей. На першому ієрархічному рівні реалізують модель, що визначає в класі адитивних (мультиплікативних) функцій залежність функцій наближення від змінних x_1, x_2, x_3 . Шукані функції формують і зображають у вигляді суперпозиції функцій від змінних x_1, x_2, x_3 . На другому ієрархічному рівні формують моделі, що визначають залежність функцій наближення окремо від компонентів змінних x_1, x_2, x_3 , котрі є векторами. На третьому ієрархічному рівні розв'язують задачу вибору класу і структури функцій наближення, вибору критеріїв і методів їхньої побудови.
- ♦ Обґрунтовано доцільність вибору апроксимуючих функцій у вигляді зміщених поліномів Чебишева, а критерію — як чебишевського, що дає змогу виявляти окремі, досить великі викиди у дискретній вибірці. На четвертому рівні розв'язують задачу формування функцій Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 , яку можна звести до чебишевської задачі наближення для несумісної системи лінійних рівнянь.
- ♦ Проведені обчислювальні експерименти підтвердили, що запропонований підхід до відтворення функціональних залежностей на основі системи моделей у класі адитивних і мультиплікативних функцій дає змогу оцінювати і коригувати достовірність відтворення за дискретними даними незалежно від властивостей показників

області визначення шуканих функцій. При цьому обґрунтовано, що адитивні функції доцільно використовувати тоді, коли компоненти векторів x_1, x_2, x_3 незалежні. У разі, якщо компоненти векторів x_1, x_2, x_3 залежні, потрібно реалізувати відтворення функціональних залежностей на основі системи моделей у класі мультиплікативних функцій.

- ♦ Запропоновано також підхід до формування множини Парето на основі системного, взаємного узгодження області визначення і множини значень цільових функцій за умови, що апіорно невідомо, чи існує непорожня множина можливих компромісів суперечливих цілей. Важлива особливість використаної формалізації полягає у виборі принципу раціональності розв'язку замість типового принципу оптимальності. Суть підходу до формування такої множини полягає у послідовному ітеративному коригуванні вихідних множин внутрішніх конструктивних і зовнішніх якісних характеристик із використанням обчислювальних та інтерактивних процедур для досягнення взаємного узгодження області визначення і множини значень цільових функцій. Перший підхід за наявності незмінюваних обмежень на показники зовнішніх впливів забезпечує формування «вигляду» виробу. Другий підхід реалізує протилежну послідовність: від задання якості виробу до вибору структури і внутрішніх показників. Математично суть першого підходу полягає у побудові множини Парето як множини значень цільових функцій, оптимальних за Парето на апіорно заданій незмінюваній області їхнього визначення. Другий підхід реалізує формування області визначення через таке її коригування, внаслідок якого досягають оптимальних значень цільових функцій.
- ♦ Наведені приклади ілюструють практичну можливість відшукування раціонального компромісу на основі узгодження області визначення і множини значень цільових функцій. Розв'язанням практичної задачі показано можливість пошуку раціонального компромісу між суперечливими цілями під час розробки окремих виробів нової техніки або організації низки технологічних процесів у єдину технологію будівельних, промислових чи інших видів робіт із використанням системи техніки різних видів.

Розділ 6

Розкриття невизначеностей у задачах взаємодії і протидії коаліцій

- ♦ Формалізація і розв'язання системних задач розкриття невизначеностей активної взаємодії і протидії коаліцій
- ♦ Загальна стратегія розв'язання задач системної взаємодії або системної протидії коаліцій
- ♦ Формалізація ризиків у задачах системної взаємодії або системної протидії коаліцій

У попередньому розділі розглянуто задачі розкриття різних типів невизначеностей у процесі взаємодії чи протидії цілей або інтересів окремих суб'єктів чи кількох партнерів, не об'єднаних між собою у певні групи (коаліції). Водночас на практиці реалізуються не лише складніші форми взаємодії і протидії, але й складніші організаційні структури суб'єктів. Наприклад, у світовій економіці існують різні міжнаціональні об'єднання, союзи, а також інші форми взаємозв'язків і взаємодій виробників та споживачів різних видів послуг, сировини і готової продукції. За умов ринкової економіки для таких суб'єктів характерні одночасні впливи факторів невизначеності, ризику, конкуренції, взаємодії або протидії. Тому практичний інтерес становить дослідження і розроблення методів розв'язання системних задач активної взаємодії і протидії таких об'єднань і коаліцій.

У цьому розділі розроблено математичний апарат формалізації і розв'язання системних задач розкриття невизначеності та оптимізації цілей партнерів однієї коаліції в задачах активної взаємодії і протидії кількох коаліцій.

6.1. Математичне формулювання задачі

6.1.1. Специфіка та особливості об'єктів дослідження

Спочатку коротко пояснімо специфіку та особливості об'єктів дослідження. У загальному випадку множину коаліцій X можна зобразити як об'єднання двох підмножин:

$$X = X_1 \cup X_2. \quad (6.1)$$

Підмножину X_1 складають коаліції, які взаємодіють між собою як партнери, і стратегічні цілі яких збігаються, а інтереси можуть відрізнятися, але не є антагоністичними.

До підмножини X_2 входять коаліції, кожна з яких діє у власних інтересах і є конкурентом інших суб'єктів певного виду практичної діяльності. Конкуренти — це такі

суб'єкти практичної діяльності, стратегічні цілі яких є антагоністичними, але дії для їх досягнення не суперечать установленим правилам, наприклад, національному або міжнародному праву. Поряд із дозволеними законодавством видами конкуренції на національному і світовому ринку існує форма прямої протидії суб'єктів, у якій вони виступають як суперники. Зокрема, таким прикладом є несумлінна конкуренція, суть якої полягає у порушенні одним або кількома суб'єктами правових основ конкуренції для досягнення власних цілей. Їх протиправні дії у власних інтересах завдають прямих збитків іншим суб'єктам на ринках попиту або збуту. У свою чергу постраждалі суб'єкти в межах своїх прав і можливостей вживають заходів у відповідь. Протидії коаліцій характерні для різних видів військових конфліктів, локальних і світових воєн. За масштабами територій бойових дій, рівнем матеріальних збитків і кількістю жертв населення найбільш вражаючим прикладом протидії коаліцій можна вважати Другу світову війну.

Найскладніший випадок — одночасна наявність двох видів дій: взаємодії і протидії коаліцій. Тому дослідження умов у процесі взаємодії і протидії коаліцій становить практичний інтерес.

Перейдемо до математичного опису об'єктів дослідження. Підмножини X_1 і X_2 характеризуються кількісним і якісним складом коаліцій. *Кількісну характеристику* цих підмножин зобразимо у вигляді об'єднання скінченної кількості коаліцій:

$$X_1 = \bigcup_{k_1=1}^{K_1} X_{1k_1}; \quad X_2 = \bigcup_{k_2=1}^{K_2} X_{2k_2},$$

де k_1 і k_2 визначають місце коаліції відповідно в об'єднанні X_1 і X_2 за певною ознакою, наприклад, за часом вступу.

Кількісний склад кожної коаліції — важлива характеристика її можливостей у досягненні спільних цілей учасників. Тому коаліції можуть бути впорядковані в X_1 і X_2 за цією характеристикою. Далі покладають, що порядковий номер r коаліції зростає у разі зменшення кількісного складу коаліції. Тоді маємо

$$X_{11} > X_{12} > \dots > X_{1r} > X_{1r+1} > \dots > X_{1K_1};$$

$$X_{1r} \in X_1; \quad r \in K_{01}; \quad K_{01} = [1, K_1];$$

$$X_{21} > X_{22} > \dots > X_{2r} > X_{2r+1} > \dots > X_{2K_2};$$

$$X_{2r} \in X_2; \quad r \in K_{02}; \quad K_{02} = [1, K_2].$$

Однак для досягнення успіху кожним учасником суттєве значення має також *якісний склад* учасників коаліції, що зумовлено багатьма факторами. Серед них найважливішими є цілі та задачі об'єднання учасників у коаліцію. Очевидно, що можливості учасників кожної коаліції відрізняються за багатьма показниками, зокрема, фінансовими, кадровими та іншими ресурсами. Як наслідок, різняться також розміри внесків учасників у досягнення поставлених коаліцією цілей. Тому місце кожного учасника в коаліції доцільно впорядкувати за цим показником.

Множини P_{1r} та P_{2r} учасників кожної коаліції $X_{1r} \in X_1$ і $X_{2r} \in X_2$ зобразимо у формі

$$P_{1r} = \{P_{1i_r} | i_r = \overline{1, m_{1r}}\}, \quad P_{2r} = \{P_{2i_r} | i_r = \overline{1, m_{2r}}\}, \quad (6.2)$$

де i_r — порядковий номер учасника в r -й коаліції, визначений його внеском у досягнення цілей коаліції; m_r — загальна кількість учасників r -ї коаліції. Індeksi «1» і «2»

визначають належність коаліції відповідно до підмножин X_1, X_2 . Тоді склад учасників кожної коаліції $X_{1r} \in X_1$ і $X_{2r} \in X_2$ характеризують умови

$$X_{1r} = \{P_{1i_r} | P_{1i_r} \in P_{1r}; P_{1i_r} > P_{1(i_r+1)}; [i_r, i_{r+1}] \in I_{01r}\}; \quad I_{01r} = [1; m_{1r}];$$

$$X_{2r} = \{P_{2i_r} | P_{2i_r} \in P_{2r}; P_{2i_r} > P_{2(i_r+1)}; [i_r, i_{r+1}] \in I_{02r}\}; \quad I_{02r} = [1; m_{2r}].$$

Загальну кількість M_{01} і M_{02} учасників в об'єднанні підмножин X_1 і X_2 визначають підсумовуванням

$$M_{01} = \sum_{r=1}^{K_{01}} m_{1r}; \quad M_{02} = \sum_{r=1}^{K_{02}} m_{2r}.$$

Надалі під час дослідження процесів тільки взаємодії або тільки протидії коаліцій індекси «1» і «2» вилучатимемо з опису зазначених властивостей.

6.1.2. Формалізований опис цілей у разі взаємодії коаліцій

Розглянемо математичний опис цілей коаліції. Почнемо з підмножини X_1 , тобто з формалізації цілей взаємодії коаліцій. Для коаліцій $X_{11} \in X_1$, $X_{12} \in X_1$ відповідно до формули (6.2) склад учасників визначають співвідношеннями:

$$P_1 = \{P_{1i} | i_1 = \overline{1, m_1}\};$$

$$P_2 = \{P_{2i} | i_2 = \overline{1, m_2}\}.$$

Кожний учасник будь-якої коаліції має власну вектор-функцію цілей. Множину вектор-функцій власних цілей усіх учасників r -ї коаліції описують у вигляді

$$\bar{f}_r^m = \{\bar{f}_{ri} | i_r = \overline{1, m_r}\}, \quad (6.3)$$

де $\bar{f}_{ri}$ — вектор-функція i_r -го учасника r -ї коаліції. Індекс m показує, що $\bar{f}_r^m$ є множиною, що складається з m_r елементів вигляду $\bar{f}_{ri}$, де параметр i_r — порядковий номер елемента в цій множині. Для коаліцій, порядкові номери яких 1 і 2, ці множини визначені співвідношеннями:

$$\bar{f}_1^m = \{\bar{f}_{1i_1} | i_1 = \overline{1, m_1}\};$$

$$\bar{f}_2^m = \{\bar{f}_{2i_2} | i_2 = \overline{1, m_2}\}.$$

Аргумент вектор-функції кожного учасника будь-якої коаліції визначають два вектори: вектор власних стратегічних рішень учасника і вектор коаліційних стратегічних рішень, що є спільними для всіх учасників. Надалі для спрощення рішення називатимемо *стратегіями*. Вектор $\bar{x}_{ri}$, власних стратегій i_r -го учасника r -ї коаліції, значення якого i_r -й учасник змінює на свій розсуд, зображують у вигляді:

$$\bar{x}_{ri} = \{x_{ri}^{(j)} | j = \overline{1, n_{ri}}\}, \quad (6.4)$$

де j — порядковий номер компоненти вектора власних стратегій i_r -го учасника r -ї коаліції; $x_{ri}^{(j)}$ — компонента, порядковий номер якої дорівнює j .

Для i_1 -го учасника першої коаліції ($r = 1$) маємо

$$\bar{x}_{1i_1} = \{x_{1i_1}^{(j)} | j = \overline{1, n_{1i_1}}\}.$$

Аналогічно, для i_2 -го учасника другої коаліції ($r = 2$)

$$\bar{x}_{2i_2} = \{x_{2i_2}^{(j)} | j = \overline{1, n_{2i_2}}\}.$$

Вектор спільних стратегій для r -ї коаліції визначають за формулою

$$\bar{\chi}_r = \{\chi_{r,l_r} | l_r = \overline{1, \rho_r}\}, \quad (6.5)$$

де $\bar{\chi}_r$ — вектор спільних коаліційних стратегій r -ї коаліції; χ_{r,l_r} — l_r -та компонента вектора $\bar{\chi}_r$; l_r — порядковий номер компоненти вектора $\bar{\chi}_r$; ρ_r — загальна кількість компонент вектора $\bar{\chi}_r$.

Для першої і другої коаліцій ($r = 1, 2$) вектори спільних стратегій на підставі формули (6.5) характеризують співвідношення

$$\bar{\chi}_1 = \{\chi_{1i_1} | l_1 = \overline{1, \rho_1}\}; \quad \bar{\chi}_2 = \{\chi_{2i_2} | l_2 = \overline{1, \rho_2}\}.$$

Цілі i_r -го учасника r -ї коаліції визначає вектор-функція

$$\bar{f}_{i_r}(\bar{x}_{i_r}, \bar{\chi}_r) = \{f_{i_r, k_r}(\bar{x}_{i_r}, \bar{\chi}_r) | k_r = \overline{1, L_{i_r}}\}, \quad (6.6)$$

аргументами якої є вектор власних стратегій і вектор спільних коаліційних стратегій. Для i_1 -го учасника першої ($r = 1$) коаліції маємо

$$\bar{f}_{1i_1}(\bar{x}_{1i_1}, \bar{\chi}_1) = \{f_{1i_1, k_1}(\bar{x}_{1i_1}, \bar{\chi}_1) | k_1 = \overline{1, L_{1i_1}}\}.$$

Аналогічно, для i_2 -го учасника другої коаліції ($r = 2$)

$$\bar{f}_{2i_2}(\bar{x}_{2i_2}, \bar{\chi}_2) = \{f_{2i_2, k_2}(\bar{x}_{2i_2}, \bar{\chi}_2) | k_2 = \overline{1, L_{2i_2}}\}.$$

Кожна коаліція формує загальну вектор-функцію цілей взаємодії учасників коаліції як партнерів. Для r -ї коаліції вектор-функцію цілей взаємодії учасників записують у вигляді

$$\bar{F}_r = \{F_{r,\gamma_r}(\bar{\Phi}_r, \bar{f}_r) | \gamma_r = \overline{1, \Gamma_r}\}, \quad (6.7)$$

де F_{r,γ_r} — γ_r -та компонента вектор-функції цілей взаємодії учасників r -ї коаліції; Γ_r — загальна кількість компонент вектор-функції $\bar{F}_r$; $\bar{\Phi}_r$ — вектор-функція спільних цілей r -ї коаліції; $\bar{f}_r$ — вектор-функція власних цілей учасників r -ї коаліції, визначена співвідношенням (6.3).

Для першої ($r = 1$) і другої ($r = 2$) коаліцій вектор-функції цілей взаємодії учасників на підставі формули (6.7) можна подати так:

$$\bar{F}_1 = \{F_{1,\gamma_1}(\bar{\Phi}_1, \bar{f}_1) | \gamma_1 = \overline{1, \Gamma_1}\}; \quad \bar{F}_2 = \{F_{2,\gamma_2}(\bar{\Phi}_2, \bar{f}_2) | \gamma_2 = \overline{1, \Gamma_2}\}.$$

Вектор-функція спільних цілей кожної коаліції залежить як від спільних стратегій коаліцій, так і від власних стратегій усіх учасників коаліції. Для r -ї коаліції її зображують у вигляді

$$\bar{\varphi}_r(\bar{x}_r, \bar{\chi}_r) = \{\varphi_{r s_r}(\bar{x}_r, \bar{\chi}_r) | s_r = \overline{1, s_{0r}}\}, \quad (6.8)$$

де $\bar{x}_r$ — вектор власних стратегій усіх учасників r -ї коаліції, який визначається співвідношенням

$$\bar{x}_r = \{\bar{x}_{ir} | i_r = \overline{1, m_r}\}. \quad (6.9)$$

Для першої і другої коаліцій ($r = 1; 2$) вектор-функції спільних цілей мають вигляд:

$$\bar{\varphi}_1(\bar{x}_1, \bar{\chi}_1) = \{\varphi_{1 s_1}(\bar{x}_1, \bar{\chi}_1) | s_1 = \overline{1, s_{01}}\}; \quad \bar{\varphi}_2(\bar{x}_2, \bar{\chi}_2) = \{\varphi_{2 s_2}(\bar{x}_2, \bar{\chi}_2) | s_2 = \overline{1, s_{02}}\},$$

де $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ — вектори власних стратегій для всіх учасників першої і другої коаліцій; $\bar{\chi}_1, \bar{\chi}_2$ — вектори спільних стратегій першої і другої коаліцій.

Вектор-функцію власних цілей взаємодії всіх учасників r -ї коаліції як складову вектор-функції цілей $\bar{F}_r$ взаємодії учасників r -ї коаліції можна записати в такому вигляді:

$$\bar{f}_r(\bar{x}_r, \bar{\chi}_r) = \langle f_{r i_r}(\bar{x}_{r i_r}, \bar{\chi}_r), i_r = \overline{1, m_r} \rangle, \quad (6.10)$$

де $\langle f_{r i_r}(\bar{x}_{r i_r}, \bar{\chi}_r), i_r = \overline{1, m_r} \rangle$ — кортеж як єдиний цілісний об'єкт, що складається з m_r елементів вигляду $f_{r i_r}$, розміщених у порядку зростання їх порядкових номерів.

Відмінність $\bar{f}_r$ від $\bar{f}_r^m$ полягає в тому, що $\bar{f}_r^m$ визначає множину, елементом котрої є $f_{r i_r}$, і яка є сукупністю m_r окремих елементів $f_{r i_r}$.

Отже, $\bar{f}_r$ — єдиний цілісний об'єкт із m_r взаємопов'язаних елементів. На основі формули (6.10) можна сформулювати вектор-функцію активних цілей взаємодії всіх учасників першої і другої коаліцій ($r = 1$ і $r = 2$) у вигляді

$$\bar{f}_1(\bar{x}_1, \bar{\chi}_1) = \langle f_{1 i_1}(\bar{x}_{1 i_1}, \bar{\chi}_1), i_1 = \overline{1, m_1} \rangle; \quad \bar{f}_2(\bar{x}_2, \bar{\chi}_2) = \langle f_{2 i_2}(\bar{x}_{2 i_2}, \bar{\chi}_2), i_2 = \overline{1, m_2} \rangle.$$

Слід звернути увагу на одну деталь опису: кожна вектор-функція $\bar{f}_{r i_r}$ залежить від вектора $\bar{x}_{r i_r}$ власних стратегій тільки i_r -го учасника коаліції, а вся сукупність спільних коаліційних стратегій r -ї коаліції залежить від вектора $\bar{\chi}_r$. На практиці це означає, що спільні коаліційні рішення впливають на інтереси кожного учасника коаліції, а власні рішення $\bar{x}_{r i_r}$ i_r -го учасника дають йому змогу регулювати власну стратегію за наявних умов взаємодії у коаліції. За таких можливостей для всіх учасників коаліції одержуємо, що вектор-функція $\bar{f}_r$ власних цілей взаємодії всіх учасників r -ї коаліції залежатиме як від усієї сукупності спільних коаліційних стратегій $\bar{\chi}_r$, так і від сукупності власних стратегій усіх учасників, тобто $\bar{f}_r = \bar{f}_r(\bar{x}_r, \bar{\chi}_r)$.

З урахуванням цього зауваження з формули (6.7) на основі формул (6.8)–(6.10) випливає, що кожна компонента вектор-функції $\bar{F}_r$ залежить від $\bar{x}_r$ і $\bar{\chi}_r$. Тому

$$\bar{F}_r = \{F_{r \gamma_r}(\bar{x}_{0r}) | \gamma_r = \overline{1, \Gamma_r}\},$$

де $\bar{x}_{0r}$ — вектор узагальненого рішення r -ї коаліції, який визначатимемо як кортеж

$$\bar{x}_{0r} = \langle \bar{x}_r, \bar{\chi}_r \rangle, \quad (6.11)$$

що складається з послідовно розміщених компонент векторів $\bar{x}_r$ і $\bar{\chi}_r$.

6.1.3. Формалізований опис цілей у разі протидії коаліцій

Розглянемо випадки *протидії коаліцій*. Перейдемо до математичного опису цілей коаліції підмножини X_2 на прикладі протидії двох коаліцій. *Вектор-функцію цілей протидії двох коаліцій* зобразимо у вигляді:

$$\bar{F}_{r+1}(\bar{x}_{0r}, \tilde{x}_{0r+1}) = \bar{F}_{r+1} \{ \bar{F}_r(\bar{x}_{0r}, \tilde{x}_{0r+1}), \tilde{F}_{r+1}^{(r)}(\bar{x}_{0r}, \tilde{x}_{0r+1}) \}; \quad (6.12)$$

$$\bar{F}_{r+1r}(\bar{x}_{0r+1}, \tilde{x}_{0r}) = \bar{F}_{r+1r} \{ \bar{F}_{r+1}(\bar{x}_{0r+1}, \tilde{x}_{0r}), \tilde{F}_r^{(r+1)}(\bar{x}_{0r+1}, \tilde{x}_{0r}) \}. \quad (6.13)$$

Покладаючи для простоти запису $r = 1$, маємо:

$$\bar{F}_{12}(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02}) = \bar{F}_{12} \{ \bar{F}_1(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02}), \tilde{F}_2^{(1)}(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02}) \};$$

$$\bar{F}_{21}(\bar{x}_{02}, \tilde{x}_{01}) = \bar{F}_{21} \{ \bar{F}_2(\bar{x}_{02}, \tilde{x}_{01}), \tilde{F}_1^{(2)}(\bar{x}_{02}, \tilde{x}_{01}) \}.$$

Цільові вектор-функції взаємодії партнерів в одній коаліції взаємно невідомі іншій, що відповідає реальним умовам протидії для випадку конкуренції або протистояння коаліцій. Тоді вважатимемо, що точно відомі тільки функції взаємодії партнерів у власній коаліції, тобто для коаліції 1 точно відома вектор-функція $\bar{F}_1$, для коаліції 2 — вектор-функція $\bar{F}_2$. Вектор-функція $\tilde{F}_2^{(1)}$ описує цілі взаємодії партнерів коаліції 2 у формі її інтерпретації коаліцією 1 у вектор-функції $\bar{F}_{12}$ і є наближеною в тому сенсі, що коаліція 1 не має повної інформації про цілі та рішення коаліції 2 та формує цю вектор-функцію (тобто вигляд і кількість її компонент, вигляд і кількість компонент вектора й аргументів $\tilde{x}_{02}$) за умов неповноти й невизначеності вихідної інформації про цілі та рішення коаліції 2. Аналогічно вектор-функція $\tilde{F}_1^{(2)}$ описує цілі взаємодії партнерів коаліції 1 у формі її інтерпретації коаліцією 2 у вектор-функції $\bar{F}_{21}$ і є наближеною в тому сенсі, що коаліція 2 не має повної інформації про цілі та рішення коаліції 1 та формує цю вектор-функцію (тобто вигляд і кількість її компонент, вигляд і кількість компонент вектора й аргументів $\tilde{x}_{01}$) за умов неповноти, неточності й невизначеності вихідної інформації про цілі та рішення коаліції 1. Унаслідок відмінності рівня інформаційного забезпечення у випадках формування пари $\bar{F}_1$ та $\tilde{F}_1^{(2)}$ і пари $\bar{F}_2$ та $\tilde{F}_2^{(1)}$ для кожної з них виконується

$$\bar{F}_1 \neq \tilde{F}_1^{(2)}; \quad \bar{F}_2 \neq \tilde{F}_2^{(1)}.$$

Кожна вектор-функція $\tilde{F}_1^{(2)}$ і $\tilde{F}_2^{(1)}$ залежить як від узагальнених стратегій власної коаліції, так і від стратегій протидіючої коаліції. Відповідно до прийнятих раніше припущень і повної інформованості про дії власної коаліції і неповної інформованості про дії протидіючої коаліції для вектор-функцій $\tilde{F}_1^{(2)}$ і $\tilde{F}_2^{(1)}$ маємо

$$\tilde{F}_1^{(2)} = \tilde{F}_1^{(2)}(\tilde{x}_{01}^{(2)}, \bar{x}_{02}); \quad \tilde{F}_2^{(1)} = \tilde{F}_2^{(1)}(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02}^{(1)}),$$

де $\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01}$ — точні значення вектора узагальнених стратегій відповідно другої і першої коаліцій, які точно відомі лише безпосереднім учасникам відповідної коаліції; $\tilde{x}_{01}^{(2)}$ — наближені значення вектора узагальнених стратегій коаліції 1 у формі наближеної інтерпретації коаліцією 2; $\tilde{x}_{02}^{(1)}$ — наближені значення вектора узагальнених стратегій коаліції 2 у формі наближеної інтерпретації коаліцією 1.

Розглянемо задачу розкриття невизначеностей для випадку протидії коаліцій з урахуванням невизначеності ситуацій. Фактори природних, кліматичних та інших невизначеностей ситуацій у задачі взаємодії коаліцій враховані для коаліцій $r=1$ та $r=2$ відповідно вектор-функціями

$$\bar{F}_{1\alpha} = \bar{F}_{1\alpha}(\bar{\alpha}_1), \quad \bar{\alpha}_1 = [\alpha_{11}, \dots, \alpha_{1k_1}, \dots, \alpha_{1k_{01}}]; \quad (6.14)$$

$$\bar{F}_{2\alpha} = \bar{F}_{2\alpha}(\bar{\alpha}_2), \quad \bar{\alpha}_2 = [\alpha_{21}, \dots, \alpha_{2k_2}, \dots, \alpha_{2k_{02}}]. \quad (6.15)$$

Кожна коаліція незалежно формує як систему показників, так і прийоми оцінювання їх впливу на результати своєї діяльності, тому функції та їх аргументи для коаліцій відрізняються.

У загальному випадку з урахуванням факторів невизначеності ситуації вектор-функції цілей протидії двох коаліцій записують у формі

$$\bar{F}_{\alpha 12} = \bar{F}_{\alpha 12} \{ \bar{F}_1(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}), \bar{F}_2^{(1)}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}), \bar{F}_{1\alpha}(\alpha_1) \}; \quad (6.16)$$

$$\bar{F}_{\alpha 21} = \bar{F}_{\alpha 21} \{ \bar{F}_2(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01}), \bar{F}_1^{(2)}(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01}), \bar{F}_{2\alpha}(\alpha_2) \}. \quad (6.17)$$

Вектор-функції $\bar{F}_{1\alpha}(\bar{\alpha}_1)$ і $\bar{F}_{2\alpha}(\bar{\alpha}_2)$ визначають взаємодію партнерів відповідно в коаліціях $r=1$ та $r=2$ за умов впливу факторів невизначеності ситуацій, та описуються співвідношеннями

$$\bar{F}_{1\alpha}(\bar{\alpha}_1) = \bar{F}_{1\alpha}(\bar{\varphi}_{1\alpha}, \bar{f}_{1\alpha}); \quad (6.18)$$

$$\bar{F}_{2\alpha}(\bar{\alpha}_2) = \bar{F}_{2\alpha}(\bar{\varphi}_{2\alpha}, \bar{f}_{2\alpha}). \quad (6.19)$$

Тут вектор-функції спільних і власних цілей учасників позначено так:

$$\bar{\varphi}_{1\alpha} = \bar{\varphi}_{1\alpha}(\bar{x}_1, \bar{\chi}_1, \bar{\alpha}_1); \quad \bar{\varphi}_{2\alpha} = \bar{\varphi}_{2\alpha}(\bar{x}_2, \bar{\chi}_2, \bar{\alpha}_2);$$

$$\bar{f}_{1\alpha} = \bar{f}_{1\alpha}(\bar{x}_1, \bar{\chi}_1, \bar{\alpha}_1); \quad \bar{f}_{2\alpha} = \bar{f}_{2\alpha}(\bar{x}_2, \bar{\chi}_2, \bar{\alpha}_2).$$

На основі співвідношень (6.16), (6.17) можна описати процеси як взаємодії партнерів, так і протидії двох коаліцій. Їх досить просто узагальнити на випадок взаємодії кількох коаліцій.

Нехай, як прийнято в (6.1), X_1 коаліцій взаємодіють як партнери. Тоді вектор-функцію цілей кожної коаліції описують математичні моделі, визначені співвідношенням (6.7) і зв'язаними з ним. У підсумку одержуємо множину вектор-функцій, що визначають цілі взаємодії партнерів у X_1 коаліціях:

$$\bar{F}_{X_1}^0 = \{ F_{X_{1j}}^0(\bar{\varphi}_{X_{1j}}, \bar{f}_{X_{1j}}) | j = \overline{1, p_1} \}; \quad (6.20)$$

$$\bar{F}_{X_1}^\alpha = \{ F_{X_{1j}}^\alpha(\bar{\varphi}_{X_{1j}}, \bar{f}_{X_{1j}}, \bar{f}_{X_{1j}}^\alpha) | j = \overline{1, p_1}^\alpha \}, \quad (6.21)$$

де співвідношення (6.20) описує процес взаємодії за відсутності невизначеності ситуацій, а співвідношення (6.21), одержане з (6.7) з урахуванням (6.18), характеризує процес взаємодії партнерів за невизначеності ситуацій.

З огляду на те, що X_1 коаліцій об'єднуються в *суперкоаліцію*, кожну X_{1j} -ту коаліцію ($j = \overline{1, p_1}$) розглядатимемо як учасника взаємодії у суперкоаліції, враховуючи при цьому, що взаємодію учасників описують співвідношенням (6.7). Тоді для суперкоаліції маємо

$$\bar{F}^0 = \bar{F}^0(\bar{\Phi}_{X_1}^0, \bar{F}_{X_1}^0); \quad \bar{F}^\alpha = \bar{F}^\alpha(\bar{\Phi}_{X_1}^\alpha, \bar{F}_{X_1}^\alpha),$$

де $\bar{F}_{X_1}^0$ і $\bar{F}_{X_1}^\alpha$ визначені співвідношеннями (6.20) і (6.21); $\bar{\Phi}_{X_1}^0$, $\bar{\Phi}_{X_1}^\alpha$ — вектор-функції спільних цілей суперкоаліції за умов відповідно відсутності або наявності невизначеності ситуацій.

Вектор-функції спільних цілей суперкоаліції формують аналогічно до співвідношень (6.8), (6.9):

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{X_1}^0 &= \{\Phi_{s_{X_1}}^0(\bar{X}, \bar{\Xi}) | s_{X_1} = \overline{1, s_{0X_1}}\}; \\ \bar{\Phi}_{X_1}^\alpha &= \{\Phi_{s_{X_1}}^\alpha(\bar{X}, \bar{\Xi}, \bar{A}) | s_{X_1} = \overline{1, s_{0X_1}}\},\end{aligned}$$

де $\bar{X}$ — вектор, який визначає усі власні рішення учасників суперкоаліції і складається з компонент, кожна з яких визначає рішення відповідної коаліції, що входить на правах учасника до суперкоаліції:

$$\bar{X} = \{\bar{X}_{X_{1jk}} | k = \overline{1, p_{2j}}, j = \overline{1, p_1}\},$$

де $\bar{X}_{X_{1jk}}$ — вектор власних рішень k -го учасника X_{1jk} -ї коаліції. Вектор $\bar{\Xi}$ — вектор спільних рішень суперкоаліції, який має такий вигляд:

$$\bar{\Xi} = \{\bar{\Xi}_l | l_0 = \overline{1, N_0}\},$$

де $\bar{\Xi}_{l_0} - l_0$ -та компонента спільних рішень суперкоаліції, узгоджено прийнята всіма учасниками.

Вектор $\bar{A}$ визначає вплив факторів невизначеності ситуацій на діяльність суперкоаліції і має вигляд

$$\bar{A} = \{\alpha_{X_{1jk}} | k = \overline{1, p_{2j}}, j = \overline{1, p_1}\},$$

де $\alpha_{X_{1jk}}$ характеризує кількісний вплив k -го фактора невизначеності ситуації на діяльність X_{1jk} -ї коаліції.

Моделі, що описують процеси протидії X_2 коаліцій, будують аналогічно на підставі формул (6.16) і (6.17), але вони відрізнятимуться кількістю змінних і цільових вектор-функцій, які дорівнюватимуть кількості протидіючих коаліцій у X_2 .

6.2. Загальна стратегія розв'язання задач системної взаємодії або системної протидії коаліцій

6.2.1. Принципи практичних дій коаліцій

Підходи, принципи і методи розв'язання задач системної взаємодії або протидії коаліцій ґрунтуються на основних принципах системного аналізу. На першому етапі розв'язання цього типу задач дослідник має визначити:

- ♦ інтереси та цілі учасників коаліції, а також можливий внесок у їхнє досягнення кожним учасником;
- ♦ прийоми і підходи, які використовує кожний учасник для досягнення поставлених цілей;

- ♦ прийоми, які можна використовувати для протидії досягненню суперником поставлених цілей, та їхні особливості, переваги і недоліки;
- ♦ обмеження і перешкоди, що об'єктивно наявні і суб'єктивно сформовані, які можуть впливати на реалізацію цілей на практиці.

Інтереси учасників цілком визначаються прагненням досягти таких основних результатів:

- ♦ збільшити значення вектор-функцій власних цілей у практичній діяльності коаліцій;
- ♦ мінімізувати ризик можливого збитку за невизначеності дій конкурентів.

Для реалізації власних інтересів учасники повинні дотримуватися певних правил вибору і принципів прийняття рішень. Із багатьох можливих підходів, правил і принципів практичної діяльності виділимо низку принципів, найважливіших для прийняття рішень під час розроблення і реалізації стратегії взаємодії і протидії коаліцій, які подамо як принципи практичних дій.

1. Максимізація власних цільових функцій до певних меж, узгоджених із партнерами, на основі раціонального вибору відповідних власних рішень.
2. Прагнення до раціонального компромісу дій і внесків учасників під час вибору і реалізації спільних коаліційних рішень.
3. Прагнення до пріоритетного відношення під час вибору і реалізації спільних цілей коаліції.
4. Розумна обережність за умов невизначеності ситуації або неповноти інформації про протиборчу сторону.
5. Схильність до раціональних дій для мінімізації ступеня і рівня ризику кожного учасника коаліції і коаліції у цілому.
6. Вибір раціональної стратегії дій на підставі попередньо сформованої множини Парето.

6.2.2. Принцип мінімізації ризику

Сформульовані принципи потребують додаткових пояснень. Вони в тій чи іншій мірі традиційні для таких дисциплін, як теорія ігор, теорія прийняття рішень, теорія дослідження операцій. Ці принципи певною мірою формалізовані з використанням нечітких множин, враховуючи неповноту інформації і наявність різних невизначеностей. Разом із тим, виходячи із загальних принципів обережності, тут запропоновано інший підхід і його реалізацію, а саме: замість традиційно прийнятого принципу гарантованого результату, як основного принципу теорії дослідження операцій, слід скористатися основним принципом теорії ризику — *принципом мінімізації ризику*. На перший погляд здається, що між цими принципами немає відмінності, оскільки принцип гарантованого результату також веде до мінімізації ризику. Таке міркування правильне, якщо не враховувати кілька важливих особливостей і відмінностей цих двох принципів. Головна відмінність полягає в тому, що принцип гарантованого результату не враховує ймовірнісний характер ризику, а тільки величину збитку, але при цьому не розглядається питання про те, яка ймовірність появи найнесприятливішої ситуації, на яку зорієнтовано цей підхід. Отже, за такого підходу не враховано ступінь

ризик, під яким розуміють імовірність появи несприятливої ситуації. І якщо імовірність такої ситуації незначна, то цей підхід призводить до великих збитків. У такому випадку доцільно застосовувати принцип мінімізації ризику, який одночасно враховує як ймовірнісний характер ризику, так і величину збитку.

Більше того, у деяких економічних застосуваннях принцип гарантованого результату може призвести до абсурдних рішень. Наприклад, у разі планування виробництва нового товару, що не має ні прототипів, ні аналогів, найгіршою ситуацією буде нульовий рівень його реалізації. Зрозуміло, що розв'язувати задачу оптимізації доходу в цій ситуації безглуздо, оскільки знаходити $\max_{x_1} \min_{x_2} f(x_1, x_2)$, якщо $\min_{x_2} f(x_1, x_2) = 0$, де x_1 — ціна товару; x_2 — рівень продажу, що дорівнює $x_2 = 0$; $f(x_1, x_2)$ — рівень доходу, за будь-якого x_1 неможливо. Розв'язок тут тільки один: товар виробляти не можна, оскільки гарантований дохід нульовий, а отже, замість прибутку виробник матиме збиток, який дорівнюватиме вартості товару. Цей приклад ілюструє, що принцип гарантованого результату неефективний у тих ситуаціях, коли потрібна теоретична оцінка, — за умов максимальної невизначеності ситуації. Зазначене не свідчить, що такий принцип узагалі не застосовний на практиці. Він ефективний, якщо апіорі відомо, що ймовірність появи несприятливої ситуації велика, а гарантований результат відмінний від нуля.

І, нарешті, слід звернути увагу на таке питання: що ж забезпечить гарантований результат? Як відомо, його визначає максимум, тобто $\max_{x_1} \min_{x_2} f(x_1, x_2)$. Це означає, що у найгіршому випадку $\min_{x_2} f(x_1, x_2)$ потрібно вибрати найкращий розв'язок $\max_{x_1} f(x_1, x_2)$.

Тут постає природне запитання: а якщо розв'язок x_1 не найкращий, то, напевно, не забезпечуватиметься $\max_{x_1} f(x_1, x_2)$ і одержуваний результат буде гірший від гарантованого.

Отже, принцип гарантованого результату забезпечує певний результат тільки для найкращого розв'язку в найгіршій ситуації. Але, як відомо, на практиці пошук найкращого розв'язку може бути або занадто трудомістким за часом, або надто складним за реалізацією. Тому часто доцільно обмежитися так званим *раціональним розв'язком*, який досить близький до оптимального. Але ступінь цієї близькості не визначено і не гарантовано. Отже, для такого випадку принцип гарантованого результату не дозволяє оцінити якість розв'язку, бо його ні з чим не можна порівняти, оскільки гарантований результат не отримують, доки не знайдуть найкращий розв'язок.

Друга важлива відмінність принципу мінімізації ризику від принципу гарантованого результату полягає у виборі системи відліку одержуваного результату. Принцип гарантованого результату використовує систему точкового відліку, беручи за його початок гарантований результат, а принцип мінімізації ризику — систему інтервального відліку, межі якого — найгірший і найкращий результати. Переваги інтервальної і недовіки точкової систем відліку полягають також у тому, що інтервальна система дає змогу визначити відносний рівень одержаного результату порівняно з найгіршим і найкращим результатами, можливими за певних умов, а це, своєю чергою, дозволяє наперед задати нижню межу гранично допустимого збитку незалежно від абсолютних значень як одержуваного результату, так і меж інтервалу. При цьому відносний відлік одночасно показує, наскільки одержаний результат перевищує найгірший і наскільки не досягає найкращого. Усіх цих можливостей точковий відлік не забезпечує, більше того, у разі використання принципу гарантованого результату навіть не постає питання про знаходження найкращого або найгіршого результатів і порівняння з ними гарантованого результату.

Третя відмінність розглянутих принципів така. Прийоми і методи реалізації принципу гарантованого результату принципово не зорієнтовано на використання досвіду та інтуїції фахівця-експерта в галузі евристичних методів і прийомів. Усі прийоми, застосовувані у разі використання принципу гарантованого результату, орієнтовані на умову, що вихідна інформація є повною, точною і достовірною. Але в реальних задачах такі умови швидше виняток, ніж правило. Реальні задачі характеризуються неповнотою, неточністю, невизначеністю і суперечливістю вихідної інформації. Усунути ці недоліки можна завдяки використанню евристичних прийомів, знань і досвіду експертів. Принцип мінімізації ризиків дає змогу використовувати їх, зокрема, під час розв'язання таких задач:

- ♦ визначення рівня гранично допустимого збитку (в економіці це рівень, нижче за який настає банкрутство; у військовій справі — рівень збитку, нижче від якого учасники зазнають поразки);
- ♦ визначення рівня досягнення можливого граничного результату — максимально і мінімально можливого результатів прогнозованих ситуацій.

До того ж не виключають й інші прийоми, зокрема застосування нечітких множин, ситуаційного прогнозування тощо.

6.2.3. Припущення та обмеження в задачах взаємодії і протидії коаліцій

Проаналізуємо припущення, характерні для розглянутого класу задач у традиційних дисциплінах.

Однією з найважливіших умов, що мають як теоретичне, так і практичне значення, є *ступінь інформованості учасників*. У теорії дослідження операцій зазвичай вважають, що учасники прагнуть до взаємної інформованості. Це припущення дає змогу значно спростити розв'язання задачі. Водночас на практиці у разі протидії учасників спостерігається інша тенденція — кожен із них прагне приховати свої задуми і рішення. Справді, на практиці важко уявити таку ситуацію, коли два конкуренти або супротивники взаємно повідомляють один одному точні відомості про свої цілі, можливості й плановані дії. Звідси практично важливішою є така формалізація задачі протидії, у якій цього припущення немає, тобто учасники не мають точної інформації як про цілі іншої сторони, так і про прийняті рішення. З такого погляду потрібно формалізувати розглянуту задачу. У співвідношеннях (6.12), (6.13) та інших прийнято, що функції взаємодії у кожній коаліції її учасникам точно відомі, але функції взаємодії у протидіючій коаліції невідомі, і кожна коаліція інтерпретує їх по-своєму. За цих умов очевидно, що важливе значення має інформаційний аналіз як складова системного аналізу. *Мета інформаційного аналізу* — підвищити рівень інформованості про справи і задуми протидіючої сторони. У теоретичному аспекті інформаційний аналіз вивчає форми і способи одержання інформації з погляду досягнення поставленої мети. Наприклад, на практиці часто задачі інформаційного аналізу покладають на розвідку. Слід зазначити, що питанню інформованості приділяють особливу увагу як окремі фірми, так і держави. Зокрема, у черговому посланні Президента США з питань національної безпеки наголошено на значущості як військової, так і економічної розвідки.

Друге доволі суттєве припущення, яке часто приймають у теорії дослідження операцій, полягає в тому, що учасники прагнуть до ситуації рівноваги. Кожен із них, прагнучи

до збільшення своєї цільової функції, вибирає таку стратегію дій, за якої забезпечуватиметься досягнення максимального результату. Таке припущення природне у разі взаємодії партнерів. Кожний партнер вибирає таку стратегію, що забезпечує досягнення максимального результату та не перешкоджає досягненню такого самого результату іншими учасниками коаліції.

Водночас для задачі протидії коаліції таке припущення є неприйнятним, оскільки кожна коаліція прагне досягти своїх цілей через погіршення результатів протидіючої сторони. Наприклад, конкурент намагатиметься збільшити власний обсяг продажу на ринку за рахунок конкурентів, оскільки попит на ринку обмежений. Аналогічно, кожен із супротивників має на меті завдати шкоди іншому. Надалі під час розв'язання задачі протидії коаліцій на підставі принципу мінімізації ризиків припущення про прагнення до ситуації рівноваги вводити не будемо.

До того ж не виключено застосування й інших прийомів, зокрема застосування нечітких множин, ситуаційного прогнозування тощо.

Далі розглянемо обмеження, прийняті для розв'язання задач взаємодії або протидії коаліцій. При цьому практично прийнятним обмеженням є задання області допустимих змін кожного аргументу вектор-функції цілей.

Обмеження 1. Кожний аргумент будь-якої вектор-функції взаємодії чи протидії обмежений зверху і знизу. Введення таких обмежень цілком узгоджене із практичними можливостями кожного учасника — вони обмежені економічними, технічними та іншими факторами. Тому введення обмеження на область допустимих змін аргументів призводить до обмеженості кожної компоненти вектор-функцій цілей.

Обмеження 2. Кожна компонента будь-якої вектор-функції взаємодії чи протидії обмежена зверху і знизу. Це зумовлено тим, що внаслідок дії фізичних законів жодна з компонент вектор-функції цілей як взаємодії, так і протидії, не може бути нескінченно великою за обмежених значень аргументів.

Обмеження 3. Існує ситуація, за якої вектор-функція цілей взаємодії партнерів коаліції:

- ♦ за всіма компонентами досягає максимального значення;
- ♦ за всіма компонентами досягає мінімального значення.

Обмеження 4. Для кожного протидіючого учасника існують дві ситуації:

- ♦ ситуація, за якої його вектор-функція протидії досягає максимального значення за всіма компонентами;
- ♦ ситуація, за якої усі компоненти його вектор-функції досягають мінімального значення.

Обмеження 5. Ситуація, за якої зростають усі компоненти вектор-функції цілей протидії одного учасника, одночасно є ситуацією, за якої зменшуються компоненти вектор-функцій протидії другого учасника.

Наступне обмеження стосується невизначеності інформації у різних ситуаціях.

Обмеження 6. Для штатних ситуацій, зумовлених гранично допустимими значеннями характеристик природних явищ, зміни вектор-функції взаємодії або протидії залишаються скінченними та обмеженими за будь-яких природних та інших явищ. Для позаштатних ситуацій, характеристики яких виходять за межі типових значень природних та інших явищ (урагани, землетруси, повені тощо), числові значення вектор-функцій взаємодії або протидії виходять за межі інтервалу штатних ситуацій і мо-

жуть вийти за межі гранично допустимих збитків. Для критичних ситуацій, характеристики яких описують значення, що перевищують критичні значення, вектор-функції взаємодії або протидії можуть мати числові значення, які перевищують критичний поріг, за яким прийняті вектор-функції втрачають фізичний зміст і стають неприйнятними для опису процесів, що відбуваються.

Особливо слід наголосити на значущості останнього обмеження. У теорії дослідження операцій та інших аксіоматичних дисциплінах не враховують того, що в реальних процесах (як у технічних та економічних, так і соціальних та інших сферах) діє пороговий механізм, суть якого полягає в тому, що у разі перевищення певного порога принципово змінюються властивості процесів. Тому всі процеси, які перевищують задані пороги і призводять до аварій, катастроф та інших небажаних наслідків, майже не вивчені у цих дисциплінах. Водночас виявлення умов появи критичних і позаштатних ситуацій — важлива задача, і для її розв'язання слід використовувати весь наявний теоретичний арсенал системного аналізу, теорії дослідження операцій, теорії катастроф, теорії ризику та інших підходів. Уведення зазначених обмежень — перший крок до розв'язання цієї задачі.

Зазначимо, що ці обмеження принципово відрізняються від припущень. Уведення припущень зумовлено прагненням спростити задачу, а введення обмежень — реально діючими факторами і ніяк не пов'язане з методами розв'язання задачі.

Далі, використовуючи розглянуту стратегію аналізу припущень і обмежень, перейдемо до формалізації стратегії учасників взаємодії або протидії та розроблення методів розв'язання цієї задачі.

6.3. Формалізація стратегії протидії коаліції

6.3.1. Формалізація стратегії протидії двох коаліцій

Формалізуємо основні характеристики стратегії протидії коаліцій за заданих обмежень з метою розроблення раціональних прийомів її реалізації.

На першому етапі розглянемо випадок протидії двох коаліцій, а потім результат узагальнимо на випадок протидії суперкоаліцій.

1. Ступінь досягнення інтересів коаліції 1 характеризуватимемо інтервальними оцінками

$$\bar{I}_{12}^*(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) = \frac{\bar{F}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) - \bar{F}_{12}^-}{\bar{F}_{12}^+ - \bar{F}_{12}^-}; \quad (6.22)$$

$$\bar{I}_{12}^*(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) = \frac{\bar{F}_{12}^+ - \bar{F}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02})}{\bar{F}_{12}^+ - \bar{F}_{12}^-}, \quad (6.23)$$

де $\bar{F}_{12}^+$, $\bar{F}_{12}^-$ — максимальне і мінімальне значення цільової функції $\bar{F}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02})$ у штатній ситуації; $\bar{I}_{12}$, $\bar{I}_{12}^*$ — величини, що визначають відносний рівень відмінності $\bar{F}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02})$ відповідно від мінімального і максимального значень інтервалу. Якщо $\bar{F}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) = \bar{F}_{12}^-$, маємо $\bar{I}_{12} = 0$, що свідчить про відсутність відносної відмінності від мінімального значення інтервалу. Водночас $\bar{I}_{12}^* = 1$, що свідчить про гранично велику відносну відмінність $\bar{F}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02})$ від мінімального значення інтервалу.

Аналогічно, при $\bar{F}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) = \bar{F}_{12}^+$ маємо $\bar{I}_{12}' = 1$ і $\bar{I}_{12}'' = 0$, що дає змогу зробити протилежний висновок порівняно з попереднім: немає відмінності $\bar{F}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02})$ від максимального значення інтервалу і є гранично велика відмінність від $\bar{F}_{12}^-$. Зазначимо, що виконуються співвідношення

$$0 \leq \bar{I}_{12}' \leq 1; \quad 0 \leq \bar{I}_{12}'' \leq 1, \quad (6.24)$$

$$\bar{I}_{12}' + \bar{I}_{12}'' = 1. \quad (6.25)$$

Нерівності (6.24) виконуються для умов, що відповідають штатним ситуаціям. Із формули (6.25) випливає, що достатньо визначити одну інтервальну оцінку, яку можна розглядати як відносну функцію цілей. Якщо взяти до уваги, що $\bar{F}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02})$ — вектор-функція, то зрозуміло, що $\bar{I}_{12}'$ і $\bar{I}_{12}''$ будуть також вектор-функціями певного порядку.

Аналіз властивостей функцій $\bar{I}_{12}'$ і $\bar{I}_{12}''$ дає змогу формалізувати головну мету стратегії реалізації інтересів коаліції 1 через максимізацію відповідних вектор-функцій у вигляді:

$$\bar{F}_{12} \rightarrow \max; \quad \bar{I}_{12}' \rightarrow \max; \quad (6.26)$$

$$\bar{F}_{12} \rightarrow \max; \quad \bar{I}_{12}'' \rightarrow \min. \quad (6.27)$$

З умови $\bar{F}_{12} \rightarrow \max$ випливає $\bar{I}_{12}' \rightarrow \max$ або $\bar{I}_{12}'' \rightarrow \min$. Слід зазначити, що співвідношення (6.26) і (6.27) математично еквівалентні, а відмінність між ними зумовлена відмінністю фізичного змісту $\bar{I}_{12}'$ і $\bar{I}_{12}''$. Подальші перетворення доцільно виконати після формалізації обмежень, умов раціонального компромісу та умов мінімізації ризику.

Аналогічно для коаліції 2 маємо:

$$\bar{F}_{21} \rightarrow \max; \quad \bar{I}_{21}' \rightarrow \max;$$

$$\bar{F}_{21} \rightarrow \max; \quad \bar{I}_{21}'' \rightarrow \min,$$

де

$$\bar{I}_{21}'(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01}) = \frac{\bar{F}_{21}(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01}) - \bar{F}_{21}^-}{\bar{F}_{21}^+ - \bar{F}_{21}^-}; \quad (6.28)$$

$$\bar{I}_{21}''(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01}) = \frac{\bar{F}_{21}^+ - \bar{F}_{21}(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01})}{\bar{F}_{21}^+ - \bar{F}_{21}^-}. \quad (6.29)$$

2. Формалізація обмежень 1 для штатних ситуацій традиційна і полягає у заданні області зміни аргументів вектор-функції цілей.

Область зміни рішень для учасників коаліції 1 зобразимо у формі

$$\bar{x}_{11} \in \bar{D}_{11}, \dots, \bar{x}_{1i} \in \bar{D}_{1i}, \dots, \bar{x}_{1m_1} \in \bar{D}_{1m_1},$$

де

$$\bar{x}_{1i} = \{x_{1ij} | j = \overline{1, n_{1i}}\}, \quad \bar{x}_i = \{\bar{x}_{1i} | i = \overline{1, m_1}\};$$

$$\bar{D}_{1i} = \{D_{1ij} | j = \overline{1, n_{1i}}\}, \quad \bar{D}_{1ij} = \{x_{1ij} | d_{1ij}^- \leq x_{1ij} \leq d_{1ij}^+\}.$$

Тут $\bar{x}_1$ — вектор власних рішень для всіх учасників коаліції 1, індекс «1» — номер коаліції, i — порядковий номер учасника в коаліції, j — порядковий номер власного рішення учасника коаліції.

Аналогічно, для коаліції 2 маємо

$$\bar{x}_{2i} = \{x_{2ij} | j = \overline{1, n_{2i}}\}; \quad \bar{x}_2 = \{\bar{x}_{2i} | i = \overline{1, m_2}\};$$

$$\bar{D}_{2i} = \{D_{2ij} | j = \overline{1, n_{2i}}\}; \quad \bar{D}_{2ij} = \{x_{2ij} | d_{2ij}^- \leq x_{2ij} \leq d_{2ij}^+\}.$$

Область допустимих змін $\bar{\chi}_1$ спільних коаліційних рішень запишемо у вигляді

$$\bar{\chi}_1 \in \bar{D}_1, \quad \bar{\chi}_1 = \{\chi_{1i} | i = \overline{1, p_1}\}; \quad (6.30)$$

$$\bar{D}_1 = \{D_{1i} | i = \overline{1, p_1}\}, \quad \bar{D}_{1i} = \{x_{1i} | d_{1i}^- \leq x_{1i} \leq d_{1i}^+\}, \quad (6.31)$$

де χ_{1i} — компонента вектора спільних коаліційних рішень коаліції 1; $\bar{D}_{1i}$ — допустимий інтервал для i -ї компоненти вектора $\bar{x}_1$.

Аналогічно, для коаліції 2 маємо

$$\bar{\chi}_2 \in \bar{D}_2, \quad \bar{\chi}_2 = \{\chi_{2i} | i = \overline{1, p_2}\}; \quad (6.32)$$

$$\bar{D}_2 = \{D_{2i} | i = \overline{1, p_2}\}, \quad D_{2i} = \{x_{2i} | d_{2i}^- \leq x_{2i} \leq d_{2i}^+\}. \quad (6.33)$$

3. Формалізуємо обмеження на фактори невизначеності ситуацій, використовуючи традиційні прийоми, характерні для теорії дослідження операцій і теорії прийняття рішень, а також методичні прийоми теорії ризику.

Фактори невизначеності ситуацій (природні та інші) у разі взаємодії коаліцій характеризуватимемо за допомогою області допустимих значень вектора параметрів $\bar{\alpha}_1$ для коаліції 1 і $\bar{\alpha}_2$ — для коаліції 2, а також ймовірністю виникнення певних ситуацій, кожен з яких характеризує певний набір показників. Прийоми формалізації області допустимих змін векторів $\bar{\alpha}_1$ і $\bar{\alpha}_2$ подібні до розглянутих раніше. Враховуючи співвідношення (6.14) та (6.15) і беручи до уваги прийоми формування співвідношень (6.30)–(6.33), запишемо:

$$\bar{\alpha}_1 \in \bar{D}_{\alpha_1}, \quad \bar{\alpha}_1 = \{\alpha_{1k_1} | k_1 = \overline{1, k_{01}}\};$$

$$\bar{D}_{\alpha_1} = \{D_{\alpha_1 k_1} | k_1 = \overline{1, k_{01}}\};$$

$$D_{\alpha_1 k_1} = \{\alpha_{1k_1} | \alpha_{1k_1}^- \leq \alpha_{1k_1} \leq \alpha_{1k_1}^+\};$$

$$\bar{\alpha}_2 \in \bar{D}_{\alpha_2}, \quad \bar{\alpha}_2 = \{\alpha_{2k_2} | k_2 = \overline{1, k_{02}}\};$$

$$\bar{D}_{\alpha_2} = \{D_{\alpha_2 k_2} | k_2 = \overline{1, k_{02}}\};$$

$$D_{\alpha_2 k_2} = \{\alpha_{2k_2} | \alpha_{2k_2}^- \leq \alpha_{2k_2} \leq \alpha_{2k_2}^+\}.$$

Перейдемо до формалізації імовірнісних властивостей ситуацій, використовуючи теорію ризику. Вважаємо, що є певна множина ситуацій, для яких може бути здійснена протидія коаліцій. Кожну ситуацію для коаліцій 1 і 2 формально запишемо у вигляді:

$$S_{L_1} = \{\eta_{L_1}, \bar{\alpha}_{L_1}\}, \quad L_1 = \overline{1, L_{01}};$$

$$S_{L_2} = \{\eta_{L_2}, \bar{\alpha}_{L_2}\}, \quad L_2 = \overline{1, L_{02}};$$

де L_1, L_2 — порядковий номер ситуацій відповідно для коаліцій 1 і 2; η_{L_1}, η_{L_2} — імовірність появи ситуацій S_{L_1} і S_{L_2} ; $\bar{\alpha}_{L_1}$ і $\bar{\alpha}_{L_2}$ — числові значення відповідних векторів $\bar{\alpha}_1$ і $\bar{\alpha}_2$, визначених у формі:

$$\bar{\alpha}_{L_1} = \{\alpha_{1k_1}^{L_1} \in D_{\alpha_1 k_1} | k_1 = \overline{1, k_{01}}\};$$

$$\bar{\alpha}_{L_2} = \{\alpha_{2k_2}^{L_2} \in D_{\alpha_2 k_2} | k_2 = \overline{1, k_{02}}\}.$$

Тоді множини ситуацій, що відповідають коаліціям 1 і 2, можна записати у вигляді:

$$S_{01} = \{S_{L_1} | L_1 = \overline{1, L_{01}}\}; \quad (6.34)$$

$$S_{02} = \{S_{L_2} | L_2 = \overline{1, L_{02}}\}. \quad (6.35)$$

6.3.2. Групи факторів ризику

Проаналізуємо та формалізуємо властивості і показники ризику. Застосуємо два основні показники ризику: ступінь ризику і рівень ризику. *Ступінь ризику* визначатимемо як імовірність появи події, що призводить до небажаних наслідків для цілей відповідної коаліції. *Рівень ризику* визначимо як розмір потенційного збитку для коаліції у разі впливу факторів ризику.

Вважатимемо, що походження ризику зумовлено впливом таких груп факторів:

- ♦ факторами ризику непрогнозованих ситуацій у разі протидії коаліцій;
- ♦ факторами форс-мажорного ризику;
- ♦ факторами інформаційного ризику, зумовленого неточністю, неповнотою і недостовірністю вихідної інформації про наміри і цілі протидіючої сторони.

Проаналізуємо першу групу факторів ризику. Очевидно, що практично неможливо передбачити всі ситуації протидії, оскільки їх множина майже нескінченна. Але ймовірність появи багатьох ситуацій мала. Тому на практиці встановлюють певний поріг ймовірності появи найхарактернішої ситуації і виключають із розгляду всі інші ймовірності, поява яких нижча за рівень порога.

З урахуванням цього зауваження множини S_{01} і S_{02} можна подати у вигляді:

$$S_{01} = \{S_{1L_1} \Rightarrow \langle \eta_{1L_1}, \bar{\alpha}_{1L_1} \rangle | \eta_{1L_1} \geq \eta_{01}, L_1 = \overline{1, L_{01}}\}; \quad (6.36)$$

$$S_{02} = \{S_{2L_2} \Rightarrow \langle \eta_{2L_2}, \bar{\alpha}_{2L_2} \rangle | \eta_{2L_2} \geq \eta_{02}, L_2 = \overline{1, L_{02}}\}, \quad (6.37)$$

де η_{01}, η_{02} — граничні значення ймовірностей, задані відповідно коаліціями 1 і 2.

Множини S_{01} і S_{02} поєднують у загальному випадку як прогнозовані, так і непрогнозовані ситуації протидії коаліцій. Оскільки множину розглянутих ситуацій покладають скінченною, то вона утворює повну групу подій. Якщо вважати, що прогнозовані ситуації незалежні, то ймовірність появи хоча б однієї з множини прогнозованих ситуацій для коаліцій 1 і 2 відповідно визначатимуть співвідношення

$$\eta_{1ps} = 1 - \prod_{L_1=1}^{L_{1ps}} (1 - \tilde{\eta}_{1L_1}); \quad \eta_{2ps} = 1 - \prod_{L_2=1}^{L_{2ps}} (1 - \tilde{\eta}_{2L_2}), \quad (6.38)$$

де L_{1ps}, L_{2ps} — кількість прогнозованих ситуацій у множинах S_{01} і S_{02} ; η_{1L_1}, η_{2L_2} — ймовірність появи L_1 і L_2 прогнозованих ситуацій із множин S_{01} і S_{02} відповідно.

У такому разі ймовірності η_{1ns} і η_{2ns} непрогнозованих ситуацій із множин S_{01} і S_{02} визначають співвідношеннями

$$\eta_{1ns} = 1 - \eta_{1ps}; \quad \eta_{2ns} = 1 - \eta_{2ps}. \quad (6.39)$$

Припущення про те, що кожна множина S_{01} і S_{02} є скінченною й утворює повну групу подій, досить жорстке і не завжди виконується на практиці.

Проаналізуємо другу групу факторів ризику, зумовленого впливом факторів форс-мажорного ризику, що призводять до появи надзвичайних і несприятливих за певних умов подій (повеней, штормів, землетрусів тощо). Зазначимо, що ці події в теорії та на практиці називають факторами неусувної сили, або форс-мажорними факторами. Цю групу факторів ризику доволі повно досліджено в літературі як у теоретичному, так і в практичному аспектах. Слід сказати, що існують різні національні і міжнародні системи спостереження, що дають змогу визначити найважливіші характеристики таких подій, зокрема, за певний час можна попередити про можливість появи штормів і повеней. Водночас на сьогодні не можна запобігти і попередити інші події, наприклад, землетруси. Тому розробляють методи оцінки ступеня і рівня ризику у разі впливу таких факторів, зокрема експертні методи. Їх використовують, базуючись на результатах багаторічних спостережень, а також досвіді, знаннях, інтуїції і передбаченні експертів. Це дозволяє, з одного боку, визначати ступінь ризику виникнення певного виду стихійного лиха за деякий період часу (ступінь ризику появи упродовж доби урагану, тайфуну тощо). З іншого боку, методи можуть бути зорієнтовані на оцінення ступеня ризику, наприклад, для певної місцевості у разі впливу одного або кількох видів стихійних лих. Так, ступінь ризику виникнення землетрусу для різних місцевостей неоднаковий і залежить як від виду місцевості (гори, рівнина тощо), так і від динаміки геологічних процесів в однотипних місцевостях. Наприклад, для Карпат, Паміру і Тибету ступінь ризику виникнення землетрусу різний.

Не розглядаючи особливості цих методів (про це йтиметься у процедурах інформаційного аналізу), вважатимемо, що ступінь ризику факторів неусувної сили характеризує ймовірність появи цих подій, яку позначимо η_{fm} .

Перейдемо до аналізу третьої групи факторів ризику, зумовленого неповнотою, неточністю, недостовірністю інформації про цілі та дії протидіючих коаліцій. Цей вид ризику зумовлений також недостатньою інформованістю кожної протидіючої сторони про цілі та дії іншої сторони. Математично цей факт виражають у тому, що вектор-функція взаємодії партнерів у коаліції 2, визначена у вигляді $\bar{F}_2$, учасникам коаліції 1 не відома, і вони інтерпретують її у вигляді $\tilde{F}_2$. При цьому коаліції 1 не відомі ні кількість цілей (тобто кількість компонент вектор-функції $\bar{F}_2$), ні відповідна форма подання кожної цілі. Тобто коаліції 1 не відомі компоненти як вектор-функції $\bar{F}_2$, так і функцій $\bar{\varphi}_2$, $\bar{f}_2$ з формули (6.7). Їй не відомі також аргументи функції (тобто вектори власних рішень кожного з учасників коаліції 2 $\bar{x}_{21}, \dots, \bar{x}_{2i_2}, \dots, \bar{x}_{2m_2}$ і вектори спільних коаліційних рішень $\bar{x}_{21}, \dots, \bar{x}_{2i_2}, \dots, \bar{x}_{2p_2}$ з формул (6.4), (6.5)). У коаліції 1 усі ці функції та аргументи виражені у власній інтерпретації.

Насамперед слід звернути увагу на комплексний характер відмінності $\bar{F}_2(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01})$ і $\tilde{F}_2^{(1)}(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02})$, який полягає у кількісній та якісній відмінності. Якісну відмінність визначає відмінність структури вектор-функцій $\bar{F}_2(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01})$ і $\tilde{F}_2^{(1)}(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02})$, а саме виду і кількості компонент цих функцій, а також виду і кількості компонент $\bar{\varphi}_2$ і $\tilde{\varphi}_2$, $\bar{f}_2$ і $\tilde{f}_2$, тобто в умові $n'_{2i_2} \neq n_{2i_2}$; $\rho'_2 \neq \rho_2$.

Кількісна відмінність виражена у відмінності числових значень функцій

$$\{\bar{x}_{2i_2}, i_2 = \overline{1, n_{2i_2}}\}; \quad \{\tilde{x}_{2i_2}, i_2 = \overline{1, n'_{2i_2}}\}; \\ \{\bar{\chi}_{2i_2}, i_2 = \overline{1, \rho_2}\}; \quad \{\tilde{\chi}_{2i_2}, i_2 = \overline{1, \rho'_2}\}.$$

Звідси випливає кілька практично важливих задач.

- ♦ Яким чином оцінити за таких умов ступінь відмінності вектор-функцій $\bar{F}_2(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01})$ і $\tilde{F}_2^{(1)}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02})$?
- ♦ Як кількісно виразити ступінь ризику як міру впливу неповноти, неточності, невизначеності інформації про цілі та дії протидійної сторони, якщо цей дефіцит інформації виражений настільки багатогранною відмінністю $\bar{F}_2(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01})$ і $\tilde{F}_2^{(1)}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02})$?
- ♦ Як визначити зміни ступеня ризику у разі уточнення якихось даних про цілі та дії протидійної сторони, тобто за підвищеного рівня інформованості?

Складність розв'язання цих практичних задач зумовлено тим, що через комплексну відмінність зазначених функцій жодну з наведених задач безпосередньо не можна звести до відомих задач і розв'язати відомими методами. Справді, якби $\bar{\varphi}_2$ і $\tilde{\varphi}_2$ відрізнялися компонентами тільки за формою, то ступінь відмінності легко було б визначити на базі теорії наближення функцій за відмінністю компонент із подальшим використанням будь-якої метрики, наприклад, евклідової. Аналогічно, якби аргументи цих функцій відрізнялися тільки числовими значеннями, то визначення відносної та абсолютної похибок стало б елементарною обчислювальною задачею.

Слід звернути увагу на ще одну принципову особливість відмінності розглянутої практичної задачі від задач теорії наближення функцій, теорії дослідження операцій, прийняття рішень. У всіх цих дисциплінах покладають відомими вектор-функції $\bar{F}_2(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01})$ і $\tilde{F}_2^{(1)}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02})$. У практичній задачі їх потрібно побудувати на підставі наявної інформації, тобто до розглянутих задач додається ще одна задача інформаційного забезпечення — побудова моделі у вигляді $\tilde{F}_2^{(1)}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02})$. Усі ці задачі становлять самостійний інтерес і зумовлюють потребу інформаційного аналізу як складової частини системного аналізу. Цей вид аналізу розглянемо у наступному розділі, де докладно буде подано розв'язання сформульованих вище задач. Зараз обмежимося лише такими відомостями. Як впливає з наведених міркувань, ступінь ризику, зумовлений недостатньою інформованістю, є функцією від кількості та якості інформації. Принципи їх оцінки з погляду ОПР, а також прийоми побудови відповідних моделей розглянемо в процесі інформаційного аналізу. Ступінь ризику впливу цього фактора зумовлений тим, що через неповноту, неточність і невизначеність інформації виникають події, які характеризуються небажаними наслідками для цілей певної коаліції, у нашому випадку — коаліції 1. Позначимо ступінь ризику цього виду η_m .

Як саме визначити ступінь ризику у разі впливу всіх наведених вище факторів ризику? Потрібно насамперед урахувати, що розглянуті фактори фізично утворюють імовірісно незалежні події. Вплив цих факторів розглянемо для двох умов.

1. Настання небажаної події, пов'язаної з впливом хоча б однієї з перелічених трьох груп факторів ризиків.
2. Настання небажаної для коаліції 1 події, пов'язаної з одночасним впливом факторів трьох груп ризиків.

Імовірність настання небажаної події, пов'язаної зі впливом факторів ризику хоча б однієї із зазначених груп, внаслідок незалежності подій різних груп визначає відношення

$$\eta_{1\Sigma} = 1 - (1 - \eta_{1ns})(1 - \eta_{1fm})(1 - \eta_{1in}), \quad (6.40)$$

де η_{1ns} , η_{1fm} , η_{1in} — ступінь ризику для коаліції 1 відповідно непрогнозованих ситуацій протидії, форс-мажорних подій та інформаційної невизначеності.

Імовірність настання небажаної події, пов'язаної з одночасним впливом факторів усіх груп ризику, внаслідок незалежності подій різних груп для коаліції 1 визначає співвідношення

$$\eta_{1\Pi} = \eta_{1ns}\eta_{1fm}\eta_{1in}. \quad (6.41)$$

Співвідношення (6.40) і (6.41) для коаліції 2 мають аналогічний вигляд.

У загальному випадку кількість груп факторів ризику для r -ї коаліції може дорівнювати N_f . Тоді співвідношення (6.40) і (6.41) набудуть вигляду:

$$\eta_{r\Sigma} = 1 - \prod_{k1=1}^{N_f} (1 - \eta_{k1}); \quad (6.42)$$

$$\eta_{r\Pi} = \prod_{k1=1}^{N_f} (\eta_{k1}). \quad (6.43)$$

Одержані результати формалізації стратегії протидії коаліцій дають змогу розглянути складніші випадки як взаємодії, так і протидії коаліцій.

6.3.3. Формалізація ризиків у задачах системної взаємодії або системної протидії коаліцій

Перейдемо до аналізу ступеня досягнення інтересів кожної коаліції з урахуванням факторів ризику. Зазначимо, що співвідношення (6.22), (6.23) і (6.28), (6.29) виконуються для штатних ситуацій, а вплив факторів ризику спричиняє появу позаштатних ситуацій. Дія позаштатних ситуацій може призвести до прямого або непрямого збитку. *Прямий збиток* — безпосереднє зменшення рівня досягнення мети (наприклад, скорочення обсягу виробництва або збуту продукції). *Непрямий збиток* — погіршення умов функціонування, що спричиняє зменшення значень цільових функцій відносно їхніх значень у штатних ситуаціях (наприклад, підвищення вартості вихідної сировини, податку на додану вартість продукції, збільшення транспортних витрат тощо). Рівень прямого збитку визначимо так:

$$\bar{J}_{12\eta_1}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \bar{\eta}_1) = \frac{\bar{\Phi}_{12\eta_1}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \bar{\eta}_1) - \bar{\Phi}_{12\eta_1}^-}{\bar{\Phi}_{12\eta_1}^+ - \bar{\Phi}_{12\eta_1}^-}, \quad (6.44)$$

де $\bar{\Phi}_{12\eta_1}^+$, $\bar{\Phi}_{12\eta_1}^-$ — максимальне і мінімальне значення розміру збитку для коаліції 1 від впливу факторів ризику; $\bar{\Phi}_{12\eta_1}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \bar{\eta}_1)$ — розмір збитку для коаліції 1 за аналізованої ситуації ризику; $\bar{\eta}_1 = (\eta_{ns}, \eta_{fm}, \eta_{in})$.

Співвідношення (6.44) визначає рівень ризику як розмір можливого прямого збитку від впливу факторів усіх груп ризику.

Для впливу факторів різних груп ризику — непрогнозованих ситуацій протидії, форс-мажорних факторів, факторів інформаційної невизначеності — розмір збитку визначатимемо співвідношеннями:

$$\bar{J}_{12ns}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{ns}) = \frac{\bar{\Phi}_{12\eta_{ns}}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{ns}) - \bar{\Phi}_{12\eta_{ns}}^-}{\bar{\Phi}_{12\eta_{ns}}^+ - \bar{\Phi}_{12\eta_{ns}}^-}; \quad (6.45)$$

$$\bar{J}_{12fm}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{fm}) = \frac{\bar{\Phi}_{12\eta_{fm}}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{fm}) - \bar{\Phi}_{12\eta_{fm}}^-}{\bar{\Phi}_{12\eta_{fm}}^+ - \bar{\Phi}_{12\eta_{fm}}^-}; \quad (6.46)$$

$$\bar{J}_{12in}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{in}) = \frac{\bar{\Phi}_{12\eta_{in}}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{in}) - \bar{\Phi}_{12\eta_{in}}^-}{\bar{\Phi}_{12\eta_{in}}^+ - \bar{\Phi}_{12\eta_{in}}^-}. \quad (6.47)$$

Унаслідок незалежності впливу факторів різних груп ризику підсумкову оцінку ризику можна одержати, базуючись на різних підходах:

- ураховуючи вплив факторів кожної групи ризику окремо;
- ураховуючи вплив факторів хоча б однієї групи;
- ураховуючи спільний вплив факторів усіх груп ризику.

Найдоцільніше оцінювати вплив факторів незалежно, а підсумковий рівень ризику в разі спільного впливу факторів кількох груп ризику, внаслідок незалежності впливу факторів різних груп, знаходити підсумовуванням можливого збитку.

Оскільки ступінь ризику від впливу факторів різних груп неоднаковий, то узагальнений рівень ризику від впливу факторів кожної групи враховуватимемо у формі:

$$\bar{U}_{1ns} = \bar{f}_{1ns}(\eta_{ns}) \bar{J}_{12ns}; \quad (6.48)$$

$$\bar{U}_{1fm} = \bar{f}_{1fm}(\eta_{fm}) \bar{J}_{12fm}; \quad (6.49)$$

$$\bar{U}_{1in} = \bar{f}_{1in}(\eta_{in}) \bar{J}_{12in}, \quad (6.50)$$

де $\bar{U}_{1ns}$, $\bar{U}_{1fm}$, $\bar{U}_{1in}$ — узагальнений рівень ризику для коаліції 1 у разі впливу факторів ризику непрогнозованих ситуацій, форс-мажорного ризику, інформаційної невизначеності; $\bar{J}_{12ns}$, $\bar{J}_{12fm}$, $\bar{J}_{12in}$ — величини збитку, визначені співвідношеннями (6.45)–(6.47); $\bar{f}_{1ns}(\eta_{ns})$, $\bar{f}_{1fm}(\eta_{fm})$, $\bar{f}_{1in}(\eta_{in})$ — вектор-функції, що враховують вигляд залежностей рівня збитку відповідно від ступеня ризику непрогнозованих ситуацій, форс-мажорного ризику, інформаційної невизначеності. У найпростішому випадку прийнято покладати:

$$\bar{f}_{1ns}(\eta_{ns}) = \eta_{ns}; \quad \bar{f}_{1fm}(\eta_{fm}) = \eta_{fm}; \quad \bar{f}_{1in}(\eta_{in}) = \eta_{in}. \quad (6.51)$$

З урахуванням впливу однієї групи факторів ризику цільові функції для коаліції 1 зобразимо у вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{\bar{F}}_{12\eta_{ns}}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{ns}) &= \\ &= \hat{\bar{f}}_1(\eta_{ns}) \bar{I}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}) - \bar{f}_{1ns}(\eta_{ns}) \bar{J}_{12ns}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{ns}), \end{aligned} \quad (6.52)$$

де $\hat{\bar{F}}_{12\eta_{ns}}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{ns})$ — вектор-функція цілей коаліції 1 за умов впливу непрогнозованих ситуацій протидії; $\bar{I}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{\tilde{x}}_{02})$ — вектор-функція цілей коаліції 1 за відсутності

факторів ризику, визначена співвідношенням (6.22); $\hat{f}_1(\eta_{ns})$ — вектор-функція, що враховує ступені ризику непрямого впливу непрогнозованих ситуацій протидії на рівень досягнення інтересів коаліцією 1; $\bar{f}_{1ns}(\eta_{ns})$ — вектор-функція, що враховує вигляд залежності рівня прямого збитку від ступеня ризику непрогнозованих ситуацій; $\bar{J}_{12ns}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{ns})$ — величина рівня прямого збитку від ступеня ризику непрогнозованих ситуацій.

У формулі (6.52) перший доданок ураховує непрямий збиток, а другий — прямий збиток від факторів ризику непрогнозованих ситуацій протидії на рівень досягнення інтересів коаліцією 1.

За одночасного впливу розглянутих вище трьох груп факторів ризику внаслідок незалежності їх впливу цільові функції для коаліції 1 визначатиме співвідношення

$$\begin{aligned} \hat{F}_{\Sigma 12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \bar{\eta}) = \\ = \hat{f}_1(\eta_{ns}) \hat{f}_1(\eta_{fm}) \hat{f}_1(\eta_{in}) \bar{I}'_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) - (\bar{U}_{1ns} + \bar{U}_{1fm} + \bar{U}_{1in}). \end{aligned} \quad (6.53)$$

Беручи до уваги, що в найпростішому випадку

$$\hat{f}_1(\eta_{ns}) = 1 - \eta_{ns}, \quad \hat{f}_1(\eta_{fm}) = 1 - \eta_{fm}, \quad \hat{f}_1(\eta_{in}) = 1 - \eta_{in}. \quad (6.54)$$

і з огляду на формули (6.48)–(6.50) співвідношення (6.53) набуде вигляду

$$\begin{aligned} \hat{F}_{\Sigma 12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \bar{\eta}) = \\ = (1 - \eta_{ns})(1 - \eta_{fm})(1 - \eta_{in}) \bar{I}'_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) - (\eta_{ns} \bar{J}_{12ns} + \eta_{fm} \bar{J}_{12fm} + \eta_{in} \bar{J}_{12in}). \end{aligned} \quad (6.55)$$

За одночасного впливу факторів N'_f груп ризику в загальному випадку виконуються умови:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{\Sigma 12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{\Sigma}) = \\ = \hat{f}_1(\eta_{\Sigma}) \bar{I}'_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) - \sum_{k=1}^{N'_f} \bar{f}_{1k}(\eta_k) \bar{J}_{12k}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k), \end{aligned} \quad (6.56)$$

де $\hat{f}_1(\eta_{\Sigma})$ — вектор-функція, що враховує ступінь ризику непрямого впливу всіх факторів усіх груп ризику на рівень досягнення інтересів коаліцією 1; $\bar{f}_{1k}(\eta_k)$ — вектор-функція, що відображає вигляд залежності рівня прямого збитку впливу k -ї групи факторів ризику від протидії на рівень досягнення інтересів коаліцією 1; $\bar{J}_{12k}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k)$ — величина рівня прямого збитку від впливу факторів k -ї групи ризику.

У найпростішому випадку після врахування формул (6.51) і (6.54) співвідношення (6.56) набуде вигляду

$$\begin{aligned} \bar{F}_{\Sigma 12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{\Sigma}) = \\ = \bar{I}'_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) \prod_{k=1}^{N'_f} (1 - \eta_k) - \sum_{k=1}^{N'_f} (\eta_k \bar{J}_{12k}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k)). \end{aligned} \quad (6.57)$$

Співвідношення (6.56) і (6.57) є більш загальними порівняно з традиційно прийнятими в теорії дослідження операцій і визначають залежності цільових функцій як від

рішень, прийнятих суб'єктами протидії, так і від параметрів факторів ризику. За відсутності впливу факторів ризику $\eta_k = 0$, $k = \overline{1, N'_f}$ співвідношення (6.57) набудуть вигляду (6.22).

Зазначимо, що в загальному випадку залежності рівня ризику і рівня досягнення інтересів коаліції від ступеня ризику є нелінійними. Математично такі залежності у співвідношенні (6.56) зручно подати експонентними функціями вигляду

$$\bar{f}_{ik}(\eta_k) = 1 - \exp(b_k \eta_k).$$

Якщо $\eta_k = 0$, то для всіх $k = \overline{1, N'_f}$ повинні виконуватися початкові умови

$$\hat{f}_i(\eta_\Sigma) = 1, \quad \bar{f}_{ik}(\eta_k) = 0,$$

що відповідає відсутності впливу факторів ризику.

Зокрема, для виконання цих умов функцію $\hat{f}_i(\eta_\Sigma)$ можна зобразити у вигляді

$$\hat{f}_i(\eta_\Sigma) = \exp \left(\frac{\sum_{k=1}^{N'_f} \alpha_k (1 - \eta_k)}{\sum_{k=1}^{N'_f} \alpha_k} - 1 \right).$$

Відповідно до формули (6.26) стратегію коаліції 1 на підставі співвідношення (6.56) з урахуванням факторів ризику визначають максимізацією вектор-функцій цілей

$$\hat{\bar{F}}_{\Sigma 12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_\Sigma) \rightarrow \max. \quad (6.58)$$

Цього досягають такими засобами.

1. Оптимізацією власних рішень для учасників коаліції $\bar{x}_1 = \{\bar{x}_{1i} | i = \overline{1, m_1}\}$, спільних коаліційних рішень вигляду $\bar{\chi}_1 = \{\bar{\chi}_{1i} | i = \overline{1, \rho_1}\}$ з використанням умови

$$\bar{x}_{01}^0 = \arg \max \bar{I}_{12}(\bar{x}_{01}). \quad (6.59)$$

2. Мінімізацією ступеня ризику $\{\eta_k | k = \overline{1, N'_k}\}$ на основі підвищення рівня інформованості ОПР про фактори ризику:

$$\bar{\eta}_k^0 = \arg \min_{\eta_k} \bar{J}_{12k}. \quad (6.60)$$

3. Системним узгодженням, максимізацією власної вектор-функції цілей $\bar{I}_{12}$ і мінімізацією рівня ризику $\bar{J}_{12k}$ завдяки оптимізації спільних коаліційних рішень і погоджених рішень учасників коаліції для певного заданого ступеня ризику.
4. Одночасною системно узгодженою максимізацією $\bar{I}_{12}$ і мінімізацією $\bar{J}_{12k}$ завдяки реалізації двох умов: оптимізації колективних рішень коаліції; підвищенню рівня інформованості кожного учасника коаліції про фактори ризику.

Ураховуючи однотипність підходів до побудови цільових функцій для 1 і 2 коаліцій, доходимо висновку, що наведені міркування слушні й для стратегії коаліції 2.

Звідси, порівнюючи співвідношення (6.12) і (6.13), можна одержати співвідношення, аналогічне до (6.56):

$$\begin{aligned} \hat{F}_{\Sigma 21}(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01}, \bar{\alpha}_2, \eta_{\Sigma}) = \\ = \bar{f}_2(\eta_{\Sigma}) \bar{f}_{21}(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01}) - \sum_{k=1}^{N_f} \bar{f}_{2k}(\eta_k) \bar{f}_{21k}(\bar{x}_{02}, \bar{x}_{01}, \bar{\alpha}_2, \eta_k). \end{aligned} \quad (6.61)$$

Виділимо принципову особливість задачі оптимізації, основний критерій оптимальності якої описує співвідношення (6.60). Ця задача умовна, на відміну від тієї, основний критерій якої визначає співвідношення (6.59). Умовність її полягає в тому, що оптимізацію виконують завдяки підвищенню рівня повноти, достовірності, точності інформації для ОПП про фактори відповідної групи ризику. Це зумовлює зниження ступеня і рівня ризику. Такого результату досягають знаходженням певного значення підсумкового вектора $\bar{\eta}_1$, компоненти якого визначають ступінь ризику певної групи факторів. Отже, задачу оптимізації за критерієм (6.60) слід розглядати як задачу максимізації рівня інформованості ОПП, а задачу оптимізації (6.59) — як задачу визначення власних рішень для учасників коаліції.

Слід також зазначити, що співвідношення (6.56) дає змогу визначити потенційно можливий рівень досягнення цілей для коаліції 1 у штатних і позаштатних ситуаціях з урахуванням факторів ризику. Завдяки цьому можна оптимізувати прийняте рішення в реальних умовах практичної діяльності суб'єктів коаліції, де впливу факторів ризику принципово не можна уникнути. Справді, будь-яку практичну діяльність здійснюють за впливу різних факторів ризику, наприклад, ризику зовнішніх природних впливів, стихійних лих, ринкової конкуренції, неповноти інформаційного забезпечення тощо. Ці види ризику принципово непереборні за своєю природою. Тому врахування ступеня і рівня ризику під час розв'язання прикладних задач як взаємодії, так і протидії учасників певної діяльності — актуальна і важлива для практики задача.

Співвідношення (6.56) і (6.61) базові для дослідження процесу протидії двох коаліцій за реальних умов впливу факторів ризику різної природи. Вплив кожного з цих факторів потрібно враховувати двома показниками: ступенем і рівнем ризику. Перший показник характеризує ймовірність небажаного впливу кожного фактора ризику, а другий — розмір потенційного збитку внаслідок небажаного впливу виявленого фактора ризику.

6.4. Методи розв'язання задач протидії коаліцій

6.4.1. Характерні особливості задач протидії коаліцій

Проаналізуємо можливості різних методів, які можна використовувати для розв'язання задач протидії коаліцій з урахуванням факторів ризику. Вибір методу багато в чому зумовлюють особливості задачі. Головну особливість розглянутого класу задач визначають умови, за яких реалізується стратегія дії кожної коаліції. Ці умови безпосередньо впливають зі стратегії дії кожної коаліції, яка полягає у підвищенні рівня реалізації власних інтересів завдяки збільшенню значення вектор-функції цілей і зниженню ступеня та рівня ризику наслідків впливу факторів невизначеності задуму і дій протидіючої сторони. Звідси випливає, що практичні задачі розкриття невизначеності

протидії коаліцій відрізняються від типових екстремальних задач наявністю принципово нових властивостей і особливостей. Серед них насамперед слід виділити специфіку формалізації цільових функцій. Цільові функції протидіючих сторін взаємозалежні, що безпосередньо впливає з факторів протидії. Звернімо увагу, що формувати їх потрібно за умов концептуальної невизначеності. Таку особливість зумовлено тим, що внаслідок протилежності цілей та інтересів кожна коаліція не зацікавлена у розголошенні своїх намірів. Тому в протидіючих коаліціях зазвичай немає достовірної інформації про фактори та цілі протидії, взаємно невідомі заплановані цілі та дії і, як наслідок, цільові функції та їхні аргументи. Кожна коаліція змушена інтерпретувати можливі дії протидіючої сторони за власними оцінками та прогнозами і на цій підставі формувати цільові функції протидіючої сторони та їх аргументи.

До інших особливостей задач протидії коаліцій, які ускладнюють їх розв'язання для кожного учасника, слід віднести:

- ♦ суперечності між спільними цілями коаліції та власними цілями учасників коаліції;
- ♦ суперечності між власними інтересами учасників кожної коаліції;
- ♦ взаємозалежність власних цілей учасників кожної коаліції зі спільними цілями коаліцій і спільними коаліційними рішеннями;
- ♦ можливість впливу великого обсягу непрогнозованих природних, кліматичних, екологічних, техногенних та інших факторів ризику, вплив яких може суттєво змінити умови і результати досягнення поставлених цілей;
- ♦ прямий вплив фактора часу на результативність стратегії дії кожного учасника і коаліції у цілому;
- ♦ необхідність досягнення системно узгоджених рішень і дій учасників коаліції за наявності досить великої множини вектор-функцій та їх аргументів.

Беручи до уваги наведені особливості задач, сформулюємо основні вимоги до методів розв'язання задач. Вони повинні забезпечувати:

- ♦ можливість своєчасної реалізації цілеспрямованих дій кожного учасника коаліції у межах узгодженої стратегії коаліції;
- ♦ кількісне оцінювання як ступеня досягнення потенційно прогнозованого найкращого результату дій, так і ступеня відмінності прогнозованого мінімально допустимого результату дій від потенційно можливого найгіршого результату;
- ♦ оцінювання похибок отриманого розв'язку для прийнятої стратегії дій, зумовлених неповнотою, невизначеністю і суперечливістю вихідної інформації про цілі, рішення і дії протидіючої коаліції;
- ♦ можливість уточнення первинного розв'язку в разі підвищення рівня достовірності інформованості про стратегію і наміри протидіючої коаліції;
- ♦ оцінювання ступеня і рівня ризику за умов можливого впливу форс-мажорних факторів, факторів ситуаційної невизначеності про цілі та наміри протидіючої коаліції, а також інших факторів ризику;
- ♦ оцінювання наслідків потенційних можливостей впливу непрогнозованих факторів ризику на рівень досягнення цілей коаліції.

Такі вимоги до методів та особливості розв'язання розглянутих задач зумовлюють потребу подолання низки обчислювальних труднощів. Для цього слід використовувати

ефективні методичні та евристичні прийоми, математичні методи, раціонально застосовувати обчислювальні й інтелектуальні можливості сучасних комп'ютерних систем та інформаційних мереж, а також можливості, досвід, передбачення, знання і вміння фахівців.

6.4.2. Розв'язання задач протидії коаліцій

Розв'яжемо поставлену задачу протидії коаліцій, беручи за основу співвідношення (6.56) за умову (6.58). Згідно зі стратегією дій кожного партнера і коаліції у цілому, а саме їх прагненням до підвищення рівня досягнення цілей і мінімізації ризику за умов невизначеності, проведемо декомпозицію вихідної задачі. Насамперед урахуємо особливості цільової функції (6.56). Також враховуватимемо її адитивність і фізичний зміст першого доданка, який визначає рівень досягнення цілі, а також фізичний зміст другого доданка, що визначає рівень збитку. За цих припущень подамо задачу максимізації цільової функції у формі

$$\hat{F}_{\Sigma 12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_{\Sigma}) \rightarrow \max, \quad (6.62)$$

що виконується за умов

$$\hat{f}_1(\eta_{\Sigma}) I'_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) \rightarrow \max, \quad (6.63)$$

$$\sum_{k=1}^{N'} \bar{f}_{1k}(\eta_k) \bar{J}_{12k}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k) \rightarrow \min. \quad (6.64)$$

Тут співвідношення (6.63) визначає умову досягнення максимального рівня вектор-функції у разі впливу факторів ризику. У цьому випадку можливий вплив факторів ризику відображає функція $\hat{f}_1(\eta_{\Sigma})$, але без урахування розміру збитку від їх впливу. Співвідношення (6.64) визначає умову мінімального загального рівня ризику в разі взаємодії всієї сукупності факторів ризику. При цьому враховано ступені ризику від впливу кожної групи факторів ризику і рівня відповідного збитку, зумовленого таким впливом. Зі співвідношень (6.63) і (6.64) випливає, що результату (6.62) досягають одночасним виконанням умов

$$\hat{f}_1(\eta_{\Sigma}) \rightarrow 1; \quad \bar{I}'_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) \rightarrow 1; \quad (6.65)$$

$$\bar{f}_{1k}(\eta_k) \rightarrow 0; \quad \bar{J}_{12k}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k) \rightarrow 0, \quad k = 1, N'. \quad (6.66)$$

Ці умови відображають потребу прагнення до максимуму кожного зі співмножників (6.63) і до мінімуму — кожного зі співмножників (6.64).

Границі, визначені виразом (6.65), випливають з фізичного змісту множників у співвідношенні (6.63). Перше співвідношення в (6.65) випливає з умови відсутності впливу факторів ризику. Таке припущення виконується за умови, що ймовірність впливу факторів ризику надзвичайно мала. Друге співвідношення в (6.65) характеризує умову досягнення потенційно можливого максимального рівня цільових функцій, що безпосередньо випливає з формули (6.22).

Границі, визначені виразом (6.66), випливають із фізичного змісту ступеня і рівня ризику за мінімального впливу різних факторів ризику. Фізичний зміст границі (6.66)

полягає в тому, що гранично малими значеннями ступеня і рівня ризику є їх нульові значення.

Зазначимо, що функції $\hat{f}_1(\eta_\Sigma) \rightarrow 1$ і $\bar{f}_{1k}(\eta_k) \rightarrow 0$ взаємозалежні, що впливає з фізичного змісту ступеня ризику як імовірнісної міри. Зі співвідношень (6.54) і умов незалежності впливу різних факторів ризику випливає, що граничні значення ступеня ризику у разі впливу множини факторів ризику лежать в інтервалі $[0; 1]$. Справді, у найпростішому випадку відповідно до формули (6.57) виконуються залежності

$$\hat{f}_1(\eta_\Sigma) = \prod_{k=1}^{N'_f} (1 - \eta_k);$$

$$\bar{f}_{1k}(\eta_k) = \eta_k, \quad k = \overline{1, N'_f}.$$

Звернімо увагу на той відомий факт, що ступінь ризику від впливу різних факторів ризику визначає рівень інформованості ОПР про ймовірності небажаних подій. Умовно це можна записати у вигляді $\eta = \eta(\bar{U})$, де $\bar{U}$ — вектор показників, які визначають рівень інформованості ОПР, а їх фізичний зміст, прийоми і методи визначення розглянемо під час інформаційного аналізу.

Ураховуючи цю залежність, а також взаємозв'язок функцій $\hat{f}_1(\eta_\Sigma)$ і $\bar{f}_{1k}(\eta_k)$, $k = \overline{1, N'_f}$, зі співвідношень (6.65), (6.66) одержимо таку умову для визначення раціонального рівня інформованості $\bar{U}^*$:

$$\begin{aligned} \hat{f}_1(\eta_\Sigma(\bar{U})) &\rightarrow 1; \\ \bar{f}_{1k}(\eta_k(\bar{U})) &\rightarrow 0, \quad k = \overline{1, N'_f}. \end{aligned} \quad (6.67)$$

Отже, щоб мінімізувати ступінь небажаного впливу, потрібно забезпечити мінімальну ймовірність ризику завдяки максимізації інформованості.

Для розв'язання цієї задачі зведемо її до чебишевської задачі наближення, подавши розглянуту умову як систему $(N'_f + 1)$ рівнянь вигляду

$$\bar{f}_k(\bar{U}) = 0, \quad k = \overline{1, N'_{0f}}. \quad (6.68)$$

Тут позначено:

$$\begin{aligned} \bar{f}_k(\bar{U}) &= \bar{f}_{1k}(\eta_k(\bar{U})), \quad k = \overline{1, N'_f}; \\ \bar{f}_k(\bar{U}) &= \hat{f}_1(\eta_\Sigma(\bar{U})) - 1, \quad k = N'_{0f} = \overline{1, N'_f + 1}. \end{aligned}$$

Беручи за міру чебишевського наближення величину

$$\Delta = \max_k |\bar{f}_k(\bar{U})|,$$

задачу наближення для системи (6.68) розглянемо як задачу знаходження такого значення $\bar{U}^*$, за якого величина Δ буде мінімально можливою в заданому інтервалі значень $\bar{U}^- \leq \bar{U}^* \leq \bar{U}^+$. У такому разі для Δ^0 виконується умова

$$\Delta^0 = \Delta(\bar{U}^*) = \min_{\bar{U}} \Delta, \quad (6.69)$$

а значення аргументу, яке забезпечить виконання цієї умови, визначає співвідношення

$$\bar{U}^* = \arg \min_{\bar{U}} \max_k |\bar{f}_k(\bar{U})|. \quad (6.70)$$

Задачу наближення системи (6.68) за критерієм (6.69) формалізовано за однакової значущості всіх груп факторів ризику. За різної значущості факторів ризику потрібно за міру чебишевського наближення взяти величину

$$\Delta_v = \max_k v_k |\bar{f}_k(\bar{U})|.$$

Тоді співвідношення (6.69) і (6.70) можна перетворити до вигляду

$$\Delta_v^0 = \Delta_v(\bar{U}^*) = \min_{\bar{U}} \Delta_v; \quad (6.71)$$

$$\bar{U}^* = \arg \min_{\bar{U}} \max_k |v_k \bar{f}_k(\bar{U})|,$$

де $1 > v_k > 0$ й нормоване умовою

$$\sum_{k=1}^{N_f'} v_k = 1.$$

Розв'язання системи (6.68) за критерієм (6.71) визначає раціональне значення $\bar{U}^*$ за умови, що ступінь ризику факторів різних груп неоднаковий і характеризується ваговими коефіцієнтами v_k , $k = \overline{1, (N_f' + 1)}$.

Слід звернути увагу, що у разі розкриття невизначеності системи (6.68) за критерієм (6.69) або (6.71) одержуємо раціональні, а не оптимальні значення розв'язку. Як відомо, під оптимальним розуміють такий розв'язок, якого не можна поліпшити. У цьому випадку ситуація інша. Для рівня інформованості $\bar{U}$ не можна апіорно встановити точних верхньої і нижньої меж інтервалу. Точні межі такого інтервалу трактують як граничні значення, які не може змінити ніяка додаткова інформація. Отже, за реальних умов оцінювання ризиків не можна точно оцінити ступінь і рівень ризику у разі впливу того чи іншого небажаного фактора. Зокрема, добре відомо, що розмір збитку від будь-якого стихійного лиха, який визначений як реалізований рівень ризику, точно можна оцінити тільки після настання події. Крім того, важливе значення мають взаємозв'язки факторів ризику, коли один небажаний фактор може призвести до непередбаченої появи і впливу іншого. Наприклад, ураган може спричинити за певних умов повінь і т. д. Усе зазначене дає підстави вважати, що прийняте рішення раціональне у межах прийнятої гіпотези розвитку небажаних подій на ґрунті певних оцінок й аналізу досвіду. Оцінювання ступеня і рівня ризику можна гарантувати лише в межах, визначених інтервалом інформованості. До того ж будь-яка додаткова інформація може суттєво змінити уявлення про ступінь і рівень ризику в межах розглянутого інтервалу у разі впливу небажаного фактора. Далі потрібно взяти до уваги, що принципово не можна звести до нуля ступінь ризику, оскільки, з одного боку, будь-які спостереження виконують з обмеженою точністю, а з іншого — з підвищенням рівня інформованості, наприклад, завдяки підвищенню точності вимірювання, зростають витрати на одержання відповідної інформації. За певних умов такі витрати можуть перевищити рівень можливого збитку від впливу факторів ризику.

Тому постає практична задача знаходження раціонального компромісу: визначення таких кількісних і якісних характеристик інформаційного ресурсу, за яких забезпечуватиметься певний раціональний баланс можливих витрат на одержання відповідної інформації про фактори ризику і можливого збитку від їх впливу.

Отже, не випадково в договорах торгівлі передбачено умови щодо кожної зі сторін у разі впливу форс-мажорних факторів.

Слід зазначити, що умови визначення раціонального рівня інформованості у формі (6.68) можна безпосередньо розглядати як багатоцільову задачу оптимізації. У цьому разі потрібно розкрити невизначеність багатьох цілей. Методологію розв'язання подібної задачі було розглянуто вище.

Тепер перейдемо до аналізу умов досягнення граничних значень рівнів цілей і рівнів ризику. Визначатимемо межі інтервалів кожного рівня. Для досягнення цілей така межа повинна визначати значення максимально можливого успіху, а для рівня ризику — мінімально можливого збитку. Зі співвідношень (6.65) і (6.66) для такого випадку можна одержати межі для зазначених рівнів. Так, рівень досягнення цілі визначатимуть співвідношення

$$\begin{aligned}\bar{I}_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) &\rightarrow 1; \\ \bar{J}_{12k}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k) &\rightarrow 0, \\ k &= \overline{1, N'_f}.\end{aligned}\quad (6.72)$$

Слід наголосити, що коаліція 1, для якої розв'язують розглянуту задачу, має можливість на свій розсуд змінювати тільки $\bar{x}_{01}$. Отже, можна визначити вигляд і якість компонент цього вектора, а також вибрати числові значення кожної компоненти з тих чи інших міркувань. За умов протидії коаліцій, як було зазначено стосовно компонент вектора $\bar{x}_{02}$, коаліція 1 не має точної інформації ні про кількість компонент вектора, ні про їх числові значення. Більше того, коаліція 1 не має точної інформації про вектор-функції цілей коаліції 2. Тому коаліція 1 на свій розсуд формує аналітичний вигляд вектор-функції цілей коаліції 2 і вибирає числові значення всіх компонент вектора $\bar{x}_{02}$. За цих умов прагнення коаліцій одночасно до максимізації інтересів і до мінімізації ризику зумовлює вибір як раціонального рішення таких значень $\bar{x}_{01}$ і $\bar{x}_{02}$, за яких одночасна відмінність досягнутого рівня інтересів від потенційно можливого і одержуваного рівня збитку від мінімально можливого буде мінімальною. Отже, одержуємо таке формулювання чебишевської задачі наближення:

Для системи рівнянь

$$\bar{G}_{1k}(\bar{x}_{01}) = 0, \quad k = \overline{1, N'_f} \quad (6.73)$$

знайти таке значення $\bar{x}_{01}^*$, за якого величина

$$\Delta_G = \max_{k \in \overline{1, N'_f}} |\mu_k| \bar{G}_{1k}(\bar{x}_{01}), \quad (6.74)$$

яку взято за міру чебишевського наближення системи (6.73), буде мінімально можливо:

$$\Delta_G^0 = \Delta_G(\bar{x}_{01}^*) = \min_{\bar{x}_{01} \in D_{01}} \Delta_G(\bar{x}_{01}). \quad (6.75)$$

У формулі (6.74) прийнято, що величини $\mu_k, 1 > \mu_k > 0, k = \overline{1, N'_f}$ зображають вагові коефіцієнти, що враховують ступінь значущості як різних видів збитку, так і цільової вектор-функції. Їх визначає співвідношення

$$\sum_{k=1}^{N'_f} \mu_k = 1.$$

Відповідно до стратегії мінімізації ризику функції $\bar{G}_{1k}(\bar{x}_{01})$ визначають співвідношення

$$\bar{G}_{1k}(\bar{x}_{01}) = \max_{\bar{x}_{02} \in D_{02}} \bar{J}_{12k}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k), \quad k = \overline{1, N'_f}. \quad (6.76)$$

$$\bar{G}_{1k}(\bar{x}_{01}) = \max_{\bar{x}_{02} \in D_{02}} |I'_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) - 1|; \quad k = N_{0f}; N_{0f} = N'_f + 1. \quad (6.77)$$

У співвідношеннях (6.76), (6.77) враховано, що в разі протидії коаліцій кожна з них вибирає такий вектор власних рішень, за якого протидіюча сторона мала б мінімальний рівень досягнення власних цілей і максимальний рівень збитку. Мінімальний рівень досягнення цілей відповідно до формули (6.72) виражають максимальним відхилом від потенційно досяжного рівня, що дорівнює 1.

У формалізації умов (6.72) у вигляді задачі (6.73)–(6.75) враховано, що коаліція 1 оптимізуватиме тільки власне рішення $\bar{x}_{01}$, а вектор $\bar{x}_{02}$ може бути таким, для якого створено найнесприятливіші умови для коаліції 1, а саме: значення рівня досягнення інтересів буде мінімально можливим за $\bar{x}_{02}$, а розмір збитку — максимально можливим за $\bar{x}_{02}$. Для цих умов значення $\bar{x}_{02}$ вибирають таким, щоб забезпечити найкращий результат, тобто мінімальний відхил від потенційно досяжних умов, визначених (6.72).

Слід звернути увагу на те, що задача (6.73)–(6.75) принципово відрізняється від класичної чебишевської задачі наближення. Відмінність несумісної системи нелінійних рівнянь полягає в тому, що у задачі (6.73)–(6.75) є вкладена екстремальна задача (6.76), (6.77). Тому перейдімо до її аналізу.

Задача (6.76), (6.77) — типова багатоцільова задача оптимізації, і за аналогією з формулою (6.72) мету оптимізації можна подати у вигляді

$$|I'_{12}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}) - 1| \rightarrow \max_{\bar{x}_{02} \in D_{02}}; \quad \bar{J}_{12k}(\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k) \rightarrow \max_{\bar{x}_{02} \in D_{02}}. \quad (6.78)$$

На перший погляд здається, ніби задача (6.78) за змістом протилежна до задачі визначення найкращого гарантованого результату, оскільки шукають максимум функцій, а відповідно до принципу гарантованого результату визначають мінімум деяких функцій. Однак насправді це не так. Так само, як і в задачі знаходження найкращого гарантованого результату, співвідношення (6.78) визначає найгірші умови для коаліції 1, які може створити коаліція 2. Відмінність зумовлено фізичним змістом функцій, що входять до (6.78). До задачі вигляду (6.78) можна звести задачу розкриття невизначеності багатьох цілей. Розв'язання цих задач докладно розглянуто у підрозд. 4.1.

Отже, розв'язання задачі (6.72) зводиться до розв'язання послідовності двох задач.

1. Визначення функцій $\bar{G}_{1k}(\bar{x}_{01})$ у формі (6.76) і (6.77), ґрунтуючись на розв'язку задачі (6.78).

2. Розв'язання чебишевської задачі наближення для системи (6.73) за критерієм (6.74) згідно з умовою (6.76).

Розв'язок цих задач можна зобразити у вигляді:

$$\tilde{x}_{02} = \arg \max_{\tilde{x}_{02} \in D_{02}} \{\bar{G}_{2k}(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k), \quad k = \overline{1, N'_f}\},$$

де

$$\bar{G}_{2k}(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k) = \begin{cases} \bar{J}_{12k}(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k), & k = \overline{1, N'_f}; \\ |I'_{12}(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02}) - 1|, & k = N_{0f}, N_{0f} = N'_f + 1; \end{cases}$$

$$\bar{x}_{01}^* = \arg \min_{\bar{x}_{01} \in \bar{D}_{01}} \max_k [\mu_k |\bar{G}_{2k}(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k)|];$$

$$\bar{G}_{1k}(\bar{x}_{01}) = \max_{\tilde{x}_{02} \in D_{02}} \{\bar{G}_{2k}(\bar{x}_{01}, \tilde{x}_{02}, \bar{\alpha}_1, \eta_k)\}.$$

Отже, розв'язання вихідної задачі (6.62) за умов (6.63) і (6.64) можна звести до розв'язання задачі чебишевського наближення системи (6.68) за критерієм (6.69) і до задачі чебишевського наближення системи (6.73) за критерієм (6.74), де потрібно знайти розв'язок задачі (6.78).

На завершення зазначимо, що в задачі (6.67) прийнято, що відповідні функції визначає тільки рівень інформованості. У реальних умовах протидії коаліцій ступінь і рівень впливу факторів ризику залежить не лише від рівня інформованості, але й від рішень, прийнятих коаліціями. Так, для коаліції 1 необхідно у загальному випадку покладати, що функції в задачі (6.67) залежать як від $\bar{U}$, так і від $\bar{x}_{01}$, $\tilde{x}_{02}$. Однак можна показати, що цей загальний випадок можна звести до умови (6.67) з використанням тих же прийомів, що й у зведенні задачі (6.72) до послідовності задач — задачі визначення $\bar{G}_{1k}(\bar{x}_{01})$ у формі (6.76) і (6.77) і задачі чебишевського наближення для системи (6.73) за критерієм (6.75) за умови (6.74). Формалізацію і розв'язання таких же задач для коаліції 2 виконують аналогічно.

Розглядаючи задачу протидії двох коаліцій, ми залишили поза увагою питання про вибір колективних загальнокоаліційних рішень і вибір кожним учасником коаліції власних рішень, тобто не розглядали випадки взаємодії учасників коаліцій. Слід зазначити, що взаємодія учасників у коаліції, де їх більше ніж 2, відрізняється деякими особливостями, властивостями і можливостями. Так, коаліція, поєднуючи ресурси і можливості в цілісний об'єкт, дає змогу за певних умов одержати загальний результат у досягненні цілі більший, ніж сума результатів окремих учасників. Тут починає діяти так званий суперадитивний закон складної системи. Фізично дію цього закону можна пояснити ширшою можливістю маневру силами і засобами, скороченням невиробничих витрат і низкою інших факторів. Наприклад, до об'єднання в коаліцію (зокрема, у виробничу корпорацію) учасники могли мати ринки збуту, випадково розподілені і по-різному розташовані від виробників за відстанями. У разі об'єднання в коаліцію з'являється можливість перерозподілити ринки збуту так, щоб зменшити, наскільки це можливо, відстані до всіх або більшості виробників, що дасть змогу корпорації скоротити загальні транспортні витрати і одержати додатковий прибуток. З'являється також можливість раціональнішого перерозподілу праці через наближення певних виробників до сировинного ринку тощо. Дія перелічених та деяких інших факторів створює нові умови для глобалізації практичної діяльності, що призводить до появи глобальних об'єднань виробників у різних галузях. Особливо це характерно у сфері інформатизації та комп'ютеризації.

Водночас, щоб реалізувати потенційні переваги коаліції, необхідно виконати певні умови; зокрема, однією з найважливіших є обмін інформацією між учасниками коаліції. Але тут виникає низка протиріч. Наприклад, обмін інформацією дає змогу, з одного боку, збільшити можливості коаліції і, як наслідок, можливості кожного учасника. Але з іншого боку, такий обмін може виявитися небажаним для одного або кількох учасників, якщо це призводить до розкриття їхньої комерційної таємниці. Багато особливостей і недоліків випливають із відмінностей стратегій взаємодії учасників коаліції, внаслідок чого одні учасники можуть одержати більше переваг, інші — менше, а деякі — взагалі опинитися у програвші. Тому учаснику є сенс вступати до коаліції лише за певних умов, зокрема, якщо він поліпшує свій результат.

Не будемо зупинятися на формалізації і розв'язанні цих задач, оскільки вони для певних умов досить докладно проаналізовані у деяких наукових дисциплінах, зокрема у теорії дослідження операцій і такому її важливому розділі, як теорія ігор. Зазначимо, що переваги і недоліки коаліцій у процесі взаємодії учасників вивчало немало авторів, але без урахування впливу факторів ризику. Наприклад, досить докладно це питання розглянуто в монографії Ю. Б. Гермейєра [26].

6.5. Приклади розв'язування задач протидії коаліцій

6.5.1. Розв'язування задачі конкуренції корпорацій у умовах електронної комерції

Розглянемо приклади протидії коаліцій з урахуванням факторів ризику.

Розв'язування задачі виконаємо на прикладі конкуренції корпорацій у умовах електронної комерції. Ця задача має свої особливості. Тому розглянемо низку факторів та умов, що характерні для сучасного періоду глобалізації світових процесів. Насамперед відзначимо принципи відмінності ринкової системи господарювання від адміністративно-планової системи управління народним господарством. В адміністративно-плановій системі основні аспекти господарювання були визначені цілями і задачами централізованого розподілу. І тому для виробництва майже всіх видів продукції апіорно було відомо: що, коли, для кого, в якій кількості необхідно виготовляти.

У ринковій системі господарювання регулятором виробництва і розподілу є обмін, обумовлений дією певних властивостей, особливостей і факторів ринку. По-перше, обмін спричинений наявністю суспільного розподілу праці. По-друге, кожна людина у процесі своєї діяльності виступає як виробник матеріальних чи інших видів продукції, інтелектуальних чи інших видів послуг. Але водночас кожна людина у процесі свого життя виступає як споживач різних видів продукції і послуг. Отже, суб'єкти можуть виступати на ринку в різній ролі: тільки як виробник чи споживач, або одночасно як виробник однієї продукції і споживач іншої. Очевидно, що наявні і потенційні учасники ринку відрізняються своїми запитами, потребами і купівельною спроможністю. Ці фактори створюють не лише невизначеність попиту і збуту конкретного виду продукції, але й призводять до невизначеності стану і процесів розвитку ринку. І такий ринок є для виробника за багатьма властивостями та умовами невідомим, невизначеним об'єктом. Найбільшою мірою таке бачення ринку характерне для виробника на стадії розробки інноваційної продукції. Виробник апіорно не знає: як оціняти

продукцію потенційні споживачі; як відреагують конкуренти на ринку; які будуть перспективи попиту і збуту продукції; які можуть бути впливи інших факторів і ситуацій ризику. І, як наслідок, виробнику невідомі можливості збуту і перспективи виробництва інноваційної продукції.

Такий ринок ставить виробництво в умови, коли виробнику потрібно враховувати стан і динаміку кількісної та якісної зміни запитів і потреб суб'єктів суспільства як покупців. Але водночас швидкий розвиток науки й техніки надає виробнику нові можливості розвитку й удосконалення виробництва. Серед них треба виділити наукомісткі виробничі технології, глобальні телекомунікаційні мережі та інформаційні технології. Особливо слід виділити технічні досягнення й інформаційні можливості глобальних телекомунікаційних мереж та інформаційних комп'ютерних технологій, що створили принципово нові умови для економічної діяльності. Головне досягнення полягає в реалізації можливості швидкого взаємного одержання інформації: виробниками — про запити і потреби покупців, а покупцям — про різноманітну продукцію і можливості різних виробників. По суті, створюються необхідні умови для формування принципово нової ринкової структури, основні елементи якої реалізовано у вигляді глобальної електронної комерції і глобальної електронної системи світового ринку. Внаслідок цього відбуваються якісні зміни у підприємницькій діяльності та умовах конкуренції.

Тому задачу конкуренції корпорацій формуватимемо і розв'язуватимемо з позиції вибору раціональної стратегії для досягнення успіху підприємницької діяльності за умов електронної комерції і впливу факторів ризику. Задачу формулюють і розв'язують з погляду досягнення цілей корпорації 1 за умов апріорно невідомих дій у відповідь корпорації 2.

Змістовне формулювання задачі

Вважаємо, що продукція корпорацій 1 і 2 є однотипною і належить до класу наукомістких виробів. Корпорації діють на ринку в режимі доуполії, тобто вони не пов'язані між собою ніякими угодами про ціни і види продукції, про розділ сфер впливу на ринку. Відомо, що корпорація 2 є основним виробником продукції 1 і основним конкурентом корпорації 1 на ринку попиту і збуту, тому під час аналізу стану на ринку не враховуватимемо можливості і дії інших конкурентів. Основною метою корпорації 1 є досягнення довгострокового комерційного успіху на основі введення на ринок нової продукції (далі продукція 2). Стратегія дій корпорації 1 орієнтована на швидке введення на ринок продукції 2 і подальшу заміну вихідної продукції 1. Стратегія дій корпорації 2 спрямована на залучення нових споживачів на основі поліпшення якості обслуговування і розширення сфери реклами. Дії і протидії корпорацій виявляються на стадії виробництва і введення корпорацією 1 на ринок продукції 2 і коригуються ними на стадії початкового зростання її попиту.

Потрібно кожній корпорації визначити раціональну стратегію виробництва і практичної діяльності на ринку збуту за наявних умов невизначеності і ризику на стадії виробництва і введення корпорацією 1 на ринок нової продукції 2.

Умови і результати діяльності корпорацій

Врахуємо, що для досягнення основної цілі корпорації 1 найважливішими є властивості, умови і фактори, що визначають перспективність і результативність виробництва і введення на ринок продукції 2. Тому передусім проаналізуємо вихідне становище кожної корпорації з виробництва і збуту продукції 1 за такими показниками.

Загальний обсяг $V_{\Sigma 1}$ виробництва продукції 1 розподілено у пропорції

$$V_{11} = \beta_{11} V_{\Sigma 1}; \quad V_{21} = \beta_{21} V_{\Sigma 1}; \quad \beta_{21} > \beta_{11}; \quad V_{\Sigma 1} = V_{11} + V_{21}, \quad (6.79)$$

де V_{11} і V_{21} — обсяги виробництва продукції 1 корпораціями 1 і 2 відповідно. Тут і далі перший індекс відповідає номеру корпорації, а другий — номеру продукції.

Обсяг попиту споживачів на продукцію 1 корпорацій характеризують дві групи:

$$N_{11} = \gamma_{11} N_{\Sigma 1}; \quad N_{21} = \gamma_{21} N_{\Sigma 1}; \quad \gamma_{21} > \gamma_{11}; \quad N_{\Sigma 1} = N_{11} + N_{21}, \quad (6.80)$$

де N_{11} і N_{21} — показники обсягу попиту споживачів на продукцію 1 корпорацій 1 і 2 відповідно; $N_{\Sigma 1}$ — загальний обсяг попиту.

Продукція 1 корпорацій є однаковою за призначенням, але відрізняється якістю, дизайном і вартістю:

$$C_{11} = \chi_{11} C_{21}; \quad \chi_{11} > 1, \quad (6.81)$$

де C_{11} і C_{21} — вартість одиниці продукції 1 корпорацій 1 і 2. Продукція 1 корпорації 1 має вищі якісні показники та вищу вартість, однак суттєво поступається за дизайном.

Відомо, що реальний валовий дохід корпорацій визначають відповідно вартість та обсяг реалізації продукції 1 кожної корпорації:

$$B_{11} = C_{11} \gamma_{11} V_{\Sigma 1}; \quad B_{21} = C_{21} \gamma_{21} V_{\Sigma 1}, \quad (6.82)$$

а прогнозований валовий дохід корпорацій оцінюють на основі прогнозу вартості та обсягу виробництва продукції 1:

$$\tilde{B}_{11} = C_{11} V_{11}; \quad \tilde{B}_{21} = C_{21} V_{21}. \quad (6.83)$$

Виконаний аналіз показує, що до введення корпорацією 1 на ринок продукції 2 результати діяльності корпорацій характеризують показники:

$$\beta_{11} = 0,27; \quad \beta_{21} = 0,73; \quad \gamma_{11} = 0,24; \quad \gamma_{21} = 0,76; \quad C_{11} = 1,08 C_{21}. \quad (6.84)$$

Відповідно до (6.79)–(6.83) для корпорацій 1 і 2 визначено функціональні залежності доходів корпорацій від збуту продукції 1:

$$\begin{aligned} \tilde{B}_{11} &= C_{11} V_{11} = 1,08 C_{21} 0,27 V_{\Sigma 1} = 0,2916 C_{21} V_{\Sigma 1}; \\ \tilde{B}_{21} &= C_{21} V_{21} = C_{21} 0,73 V_{\Sigma 1} = 0,73 C_{21} V_{\Sigma 1}; \end{aligned} \quad (6.85)$$

$$\begin{aligned} \tilde{B}_{11} &= 0,399 \tilde{B}_{21}; \quad \tilde{B}_{21} = 2,503 \tilde{B}_{11}; \\ B_{11} &= 1,08 C_{21} 0,24 V_{\Sigma 1} = 0,2592 C_{21} V_{\Sigma 1}; \\ B_{21} &= C_{21} 0,76 V_{\Sigma 1} = 0,76 C_{21} V_{\Sigma 1}; \end{aligned} \quad (6.86)$$

$$B_{11} = 0,341 B_{21}; \quad B_{21} = 2,932 B_{11}.$$

Із рівнянь (6.85) і (6.86) випливає, що доходи $\tilde{B}_{21}$, B_{21} корпорації 2 від збуту продукції 1 майже в 3 рази перевищують доходи $\tilde{B}_{11}$, B_{11} корпорації 1, а співвідношення (6.79),

(6.80) і (6.84) свідчать, що попит γ_{11} на продукцію 1 корпорації 1 майже на 13 % менший від обсягу β_{11} виробництва. Ці обставини є головним чинником, який визначає перевагу продукції 1 корпорації 2 над продукцією 1 корпорації 1. Звідси, як наслідок, виникає необхідність і доцільність розробки корпорацією 1 якісно нових наукомістких виробів.

Для досягнення поставленої цілі корпорація 1 свідомо розв'язувала задачу створення такої нової продукції 2 у класі наукомістких виробів, яка повинна мати суттєву перевагу перед наявними на ринку прототипами. Зокрема, продукція 2 повинна мати ширший діапазон можливих застосувань у практичній діяльності, кращі якісні показники за точністю, достовірністю й оперативністю виконання основних функцій, менші габарити і вагу, а також відрізнятися естетично приємним і практично зручним дизайном конструкції. Поставленої мети корпорація 1 досягла у процесі інноваційної діяльності, результатом якої стало створення такого інноваційного виробу, що цілком відповідає поставленим вимогам і не має аналогів і прототипів. Очевидно, що цей результат є якісним стрибком у розвитку розглянутого класу виробів, і для користувача виробу суттєво розширює можливості та підвищує якість практичної діяльності. Водночас для корпорації 1 зростає також невизначеність перспективи попиту і збуту виробу, і, як наслідок, суттєво підвищуються ступінь і рівень ризику створення економічно вигідного промислового виробництва цього виробу. Така невизначеність зумовлена багатьма факторами, серед яких визначальне значення має реакція потенційних покупців і практичних користувачів виробу, а також перспективи і можливості протидії конкурентів у цій сфері.

Першорядне значення реакції покупців і користувачів зумовлене тим, що із розширенням можливостей і функцій нового виробу одночасно зростає складність його освоєння і використання. Тому для тих, хто досить тривалий час застосовує подібний виріб у практичній діяльності, виникає необхідність адаптації до особливостей і можливостей нового виробу, що може викликати негативне ставлення (для роботи достатньо наявного виробу і немає потреби освоювати новий). Для тих, хто буде вперше освоювати і застосовувати новий виріб у практичній діяльності, з'являються труднощі стосовно консультації і використання, оскільки відсутній досвід роботи з новим виробом. Тому в корпорації 1 з'являється потреба раціональної організації таких заходів: рекламування і популяризації нового виробу; визначення раціонального обсягу малої серії; визначення і подання на ринок збуту раціонального обсягу типових зразків виробів малої серії. Для реалізації таких заходів потрібно визначити основні показники нової продукції на стадії введення її на ринок і на стадії початкового зростання попиту. За умов невизначеності і перспективності цих стадій основні показники формують у вигляді інтервальних оцінок. Корпорація 1 на стадії введення продукції 2 встановлює для неї прогнозовані інтервальні оцінки для таких основних показників:

- ♦ обсягу виробництва $V_{12} = \beta_{12}V_{\Sigma 12}$;
- ♦ обсягу попиту $N_{12} = \gamma_{12}N_{\Sigma 12}$;
- ♦ ринкової вартості $C_{12} = \chi_{12}C_{21}$;
- ♦ валового доходу $\bar{B}_{12} = k_{12}C_{12}V_{\Sigma 12}$.

Для стадії введення на ринок продукції 2 корпорацією 1 було прийнято такі інтервальні оцінки показників:

$$\begin{aligned} \beta_{12} &= [0,06; 0,12]; & \gamma_{12} &= [0,05; 0,11]; \\ \chi_{12} &= [1,08; 1,12]; & k_{12} &= [0,09; 0,15]. \end{aligned} \quad (6.87)$$

Для стадії початкового зростання попиту на продукцію 2 прогнозовано такі інтервальні оцінки:

$$\begin{aligned}\beta_{12} &= [0, 12; 0, 18]; & \gamma_{12} &= [0, 15; 0, 21]; \\ \chi_{12} &= [1, 10; 1, 18]; & k_{12} &= [0, 15; 0, 25].\end{aligned}\quad (6.88)$$

Аналогічні оцінки формує корпорація 2 на стадії початкового зростання попиту продукції 2, що буде показано у процесі розв'язування задачі.

На підставі прийнятих значень інтервальних оцінок показників (6.87), (6.88) корпорація 1 формує інтервальні оцінки для цільових функцій і меж очікуваних результатів. Аналогічні оцінки формує корпорація 2. Ступінь досягнення поставлених корпораціями цілей відповідно до (6.22) характеризують інтервальні оцінки

$$I'_{12}(x_1, \tilde{x}_2) = \frac{F_{12}(x_1, \tilde{x}_2) - F_{12}^-}{F_{12}^+ - F_{12}^-}, \quad I'_{21}(x_2, \tilde{x}_1) = \frac{F_{21}(x_2, \tilde{x}_1) - F_{21}^-}{F_{21}^+ - F_{21}^-}. \quad (6.89)$$

Тут F_{12}^+ , F_{12}^- і F_{21}^+ , F_{21}^- — границі очікуваних результатів діяльності відповідно корпорацій 1 і 2, що прогнозовані ними незалежно у сформованій ситуації на ринку збуту і без урахування можливого впливу факторів ризику. Вектори x_1 , $\tilde{x}_2$ корпорації 1 і вектори x_2 , $\tilde{x}_1$ корпорації 2 складаються з показників, що характеризують основні результати і перспективи їхньої практичної діяльності. Їх формують на підставі співвідношень (6.79)–(6.83), де x_1 і x_2 визначають інтервальні межі прогнозованих доходів відповідно корпорацій 1 і 2, а $\tilde{x}_2$ і $\tilde{x}_1$ — інтервальні межі прогнозованих впливів конкурентів на доходи корпорацій 1 і 2.

За аналогією з (6.82) і (6.83) усі компоненти векторів прогнозованих і реальних валових доходів корпорацій 1 і 2 на стадіях введення продукції 2 і початкового зростання попиту на продукцію 2 доцільно визначати з урахуванням (6.87) і (6.88) на підставі співвідношень

$$\begin{aligned}\tilde{B}_{ij} &= \tilde{k}_{ij} \tilde{x}_{ij} = \tilde{k}_{ij} C_0 V_0, & \tilde{x}_{ij} &\in [\tilde{x}_1; \tilde{x}_2]; \\ B_{ij} &= k_{ij} x_{ij} = k_{ij} C_0 V_0, & x_{ij} &\in [x_1; x_2].\end{aligned}$$

Значення C_0 і V_0 є відомими кожній корпорації на підставі аналізу середньої вартості C_0 одиниці продукції і прогнозованого обсягу V_0 попиту на продукції 1 і 2 на ринку збуту. Тому інтервальні оцінки визначають лише крайні значення показників k_{ij} для компонент зазначених векторів, що відображено в таблицях 6.1 і 6.2.

Наступною практично важливою характеристикою умов діяльності корпорацій є оцінки дії факторів ризику, що впливають на результативність практичної діяльності. Тому за умов ринкової економіки практично важливо забезпечити своєчасне виявлення й обґрунтоване передбачення можливих впливів різних факторів ризику. До найважливіших факторів належать фактори ситуацій протидії, інформаційної невизначеності і форс-мажорні фактори. Аналіз і оцінювання можливих впливів перелічених факторів ризику буде виконано у процесі розв'язування розглянутої задачі.

Математична постановка задачі

Відомі числові значення основних показників діяльності корпорацій 1 і 2 до введення корпорацією 1 продукції 2, що відображено у виразах (6.84)–(6.86). Корпорацією 1

встановлено інтервали прогнозованих показників валових доходів B_{11} і B_{12} відповідно продукції 1 і продукції 2, а також складено прогноз інтервалів зміни показників валових доходів $\tilde{B}_{21}$ і $\tilde{B}_{22}$ корпорації 2 завдяки переорієнтації частини її попиту на продукцію 2 корпорації 1 і зменшенню обсягу попиту споживачами продукції 1 корпорації 2. Інтервали прогнозованих показників валових доходів корпорації 1 визначено на підставі даних таблиці 6.1. Корпорацією 2 встановлено інтервали прогнозованих показників зміни валових доходів B_{21} і B_{22} завдяки розширенню реклами і поліпшенню якості своєї продукції 1, а також складено прогноз інтервалів можливої зміни показників валових доходів $\tilde{B}_{11}$ і $\tilde{B}_{12}$ корпорації 1 завдяки переорієнтації попиту частини споживачів із продукції 1 корпорації 2 на продукцію 2 корпорації 1 і зменшенню обсягу попиту споживачів на продукцію 1 корпорації 1. Інтервали прогнозованих показників валових доходів визначено на підставі даних із таблиці 6.2.

На основі експертного оцінювання для кожної корпорації визначають можливі ситуації ризику та основні крайні значення показників ризику. Кожна корпорація встановлює функціональні залежності взаємного впливу дій конкурента і власних дій на доходи практичної діяльності за наявних умов ринку. Корпорації задають вихідні і прогнозовані значення основних показників діяльності з умов доуполії відповідно до яких корпорації не мають інформації про наміри і дії конкурента.

Таблиця 6.1. Значення k_{ij} для корпорації 1

k_{ij} для x_1				$\tilde{k}_{ij}$ для $\tilde{x}_2$			
k_{11}^-	k_{11}^+	k_{12}^-	k_{12}^+	$\tilde{k}_{21}^-$	$\tilde{k}_{21}^+$	$\tilde{k}_{22}^-$	$\tilde{k}_{22}^+$
0,2352	0,3472	0,0925	0,133	0,656	0,851	0,611	0,7123

Таблиця 6.2. Значення k_{ij} для корпорації 2

k_{ij} для x_2				$\tilde{k}_{ij}$ для $\tilde{x}_1$			
k_{21}^-	k_{21}^+	k_{22}^-	k_{22}^+	$\tilde{k}_{11}^-$	$\tilde{k}_{11}^+$	$\tilde{k}_{12}^-$	$\tilde{k}_{12}^+$
0,6745	0,8611	0,6324	0,7623	0,1712	0,2625	0,0678	0,0944

Кожна корпорація планує свою діяльність і прогнозує дії конкурента на підставі власних припущень, прогнозів і оцінок.

Потрібно: на основі відомих вихідних даних та експертних оцінок.

1. Визначити раціональні функціональні залежності взаємного впливу дій конкурента і власних дій корпорацій на результати своєї діяльності за наявних умов ринку.
2. Виявити й оцінити умови і фактори ризику, що справляють найбільший і найменший негативний вплив на досягнення корпорацією 1 довгострокового комерційного успіху.
3. Спрогнозувати й оцінити можливі відповідні дії корпорації 2, що є факторами негативного впливу на досягнення цілей корпорації 1 за умов впливу факторів ризику.

Розв'язання задачі

1. Корпорації 1 і 2 планують показники своєї діяльності і прогнозують дії конкурента. Результати отримано у формі аналітичних залежностей цільових функцій $F_{12}(x_1, \tilde{x}_2)$,

$F_{21}(x_2, \tilde{x}_1)$ і вихідних граничних значень F_{12}^-, F_{12}^+ і F_{21}^-, F_{21}^+ , сформованих у такому вигляді:

$$F_{12}(x_1, \tilde{x}_2) = T_{11}k_{11}x_{11} + T_{12}k_{12}x_{12} + \tilde{T}_{21}\tilde{k}_{21}\tilde{x}_{21} - \tilde{T}_{22}\tilde{k}_{22}\tilde{x}_{22}; \quad (6.90)$$

$$\begin{aligned} F_{12}^+ &= k_{11}^+x_{11} + k_{12}^+x_{12} + \tilde{k}_{21}^+\tilde{x}_{21} - \tilde{k}_{22}^+\tilde{x}_{22}; & F_{12}^- &= k_{11}^-x_{11} + k_{12}^-x_{12} + \tilde{k}_{21}^-\tilde{x}_{21} - \tilde{k}_{22}^-\tilde{x}_{22}; \\ F_{21}(x_2, \tilde{x}_1) &= T_{21}k_{21}x_{21} + T_{22}k_{22}x_{22} - \tilde{T}_{11}\tilde{k}_{11}\tilde{x}_{11} - \tilde{T}_{12}\tilde{k}_{12}\tilde{x}_{12}; & (6.91) \\ F_{21}^+ &= k_{21}^+x_{21} + k_{22}^+x_{22} - \tilde{k}_{11}^+\tilde{x}_{11} - \tilde{k}_{12}^+\tilde{x}_{12}; & F_{21}^- &= k_{21}^-x_{21} + k_{22}^-x_{22} - \tilde{k}_{11}^-\tilde{x}_{11} - \tilde{k}_{12}^-\tilde{x}_{12}. \end{aligned}$$

Тут T_{11}, T_{12} визначають тривалість періодів формування валових доходів B_{11} і B_{12} завдяки збуту відповідно продукції 1 і продукції 2 корпорації 1; $\tilde{T}_{21}, \tilde{T}_{22}$ прогнозують тривалість періодів формування валового доходу B_{21} завдяки переорієнтації частини попиту споживачів із продукції 1 корпорації 2 на продукцію 2 корпорації 1 і формування валового доходу B_{22} корпорації 2 завдяки переорієнтації частини попиту з продукції 1 корпорації 1 на продукцію 2 корпорації 2.

Для корпорації 2 показники T_{21}, T_{22} визначають тривалість періоду формування доходів B_{21} і B_{22} . Дохід B_{21} формується завдяки типовому режиму збуту продукції 1, а дохід B_{22} визначає збільшення збуту продукції 1 завдяки розширенню діапазону дії реклами. $\tilde{T}_{11}, \tilde{T}_{12}$ відображають прогнозовану корпорацією 2 тривалість періоду негативного впливу корпорації 1 завдяки переорієнтації частини попиту з продукції 1 корпорації 2 на продукцію 2 корпорації 1 і через зменшення попиту на продукцію 1 корпорації 2 як невідповідну до вимог споживача.

Цільова функція $F_{12}(x_1, \tilde{x}_2)$ визначає відповідно до (6.90) загальний планований валовий дохід, що включає доходи $k_{11}x_{11}$ за період T_{11} і $k_{12}x_{12}$ — за період T_{12} , а також прогнозований валовий дохід $\tilde{k}_{21}\tilde{x}_{21}$ за період $\tilde{T}_{21}$ і прогнозований збиток $\tilde{k}_{22}\tilde{x}_{22}$ за період $\tilde{T}_{22}$. Цільова функція $F_{21}(x_2, \tilde{x}_1)$ визначає відповідно до (6.91) загальний планований дохід корпорації 2, що включає доходи $k_{21}x_{21}$ за період T_{21} і $k_{22}x_{22}$ за період T_{22} , а також прогнозовані збитки $\tilde{k}_{11}\tilde{x}_{11}$ за період $\tilde{T}_{11}$ і $\tilde{k}_{12}\tilde{x}_{12}$ за період $\tilde{T}_{12}$.

Для $F_{12}(x_1, \tilde{x}_2)$ корпорація 1 визначила числові значення періодів у місяцях так: $T_{11} = 12$, $T_{12} = 5$, $\tilde{T}_{21} = 9$, $\tilde{T}_{22} = 3$ і числові значення інших показників: $k_{11} = 0,2912$, $k_{12} = 0,1129$, $\tilde{k}_{21} = 0,6571$, $k_{22} = 0,6117$. Аналогічно для $F_{21}(x_2, \tilde{x}_1)$ корпорацією 2 визначено числові значення періодів: $T_{21} = 9$, $T_{22} = 5$, $\tilde{T}_{11} = 9$, $\tilde{T}_{12} = 1,5$ і числові значення показників: $k_{21} = 0,7679$, $k_{22} = 0,1129$, $\tilde{k}_{11} = 0,2162$, $\tilde{k}_{12} = 0,1622$.

У підсумку маємо, що основні показники цільових функцій і компонент граничних значень характеризують такі числові значення:

$$F_{12}(x_1, \tilde{x}_2) = 3,4981x_{11} + 0,5642x_{12} + 5,914\tilde{x}_{21} - 1,835\tilde{x}_{22};$$

$$F_{12}^- = 0,2352x_{11} + 0,0925x_{12} + 0,656\tilde{x}_{21} - 0,611\tilde{x}_{22};$$

$$F_{12}^+ = 0,3472x_{11} + 0,1332x_{12} + 0,8513\tilde{x}_{21} - 0,712\tilde{x}_{22};$$

$$F_{21} = 6,912x_{21} + 2,0924x_{22} - 1,9512\tilde{x}_{11} - 0,2436\tilde{x}_{12};$$

$$F_{21}^- = 0,6745x_{21} + 0,6324x_{22} - 0,1712\tilde{x}_{11} - 0,0678\tilde{x}_{12};$$

$$F_{21}^+ = 0,8613x_{21} + 0,7623x_{22} - 0,2613\tilde{x}_{11} - 0,0944\tilde{x}_{12}.$$

2. Визначають інтервальні оцінки $I'_{12}(x_1, \tilde{x}_2)$, $I'_{21}(x_2, \tilde{x}_1)$ доходів практичної діяльності корпорацій 1 і 2 на підставі (6.89), отриманих залежностей цільових функцій $F_{12}(x_1, \tilde{x}_2)$, $F_{21}(x_2, \tilde{x}_1)$ і вихідних граничних значень F_{12}^-, F_{12}^+ і F_{21}^-, F_{21}^+ . Отримують

функціональні залежності $I'_{12}(x_1, \tilde{x}_2)$ і $I'_{21}(x_2, \tilde{x}_1)$, що додатково враховують взаємні впливи корпорацій за умов одночасного введення на ринок вихідної продукції 1 корпораціями 1 і 2 і нової продукції 2 корпорацією 1.

$$I'_{12}(x_1, \tilde{x}_2) = \frac{3,2629x_{11} + 0,4717x_{12} + 5,2581\tilde{x}_{21} - 1,2241\tilde{x}_{22}}{0,1121x_{11} + 0,0407x_{12} + 0,19533\tilde{x}_{21} - 0,1012\tilde{x}_{22}};$$

$$x_1 = \langle x_{11}, x_{12} \rangle, \tilde{x}_2 = \langle \tilde{x}_{21}, \tilde{x}_{22} \rangle$$

$$I'_{21}(x_2, \tilde{x}_1) = \frac{6,2375x_{21} + 1,4612x_{22} - 1,7798\tilde{x}_{11} - 0,1758\tilde{x}_{12}}{0,1867x_{21} + 0,1299x_{22} - 0,0913\tilde{x}_{11} - 0,02661\tilde{x}_{12}};$$

$$\tilde{x}_1 = \langle \tilde{x}_{11}, \tilde{x}_{12} \rangle, x_2 = \langle x_{21}, x_{22} \rangle.$$

Показники $I'_{12}(x_1, \tilde{x}_2)$ і $I'_{21}(x_2, \tilde{x}_1)$ визначають відносну різницю внесків періодів $T_{11}, T_{12}, \tilde{T}_{21}, \tilde{T}_{22}$ і $T_{21}, T_{22}, \tilde{T}_{11}, \tilde{T}_{12}$ у загальний валовий дохід практичної діяльності відповідно корпорацій 1 і 2. Показники x_{11}, x_{12} корпорації 1 і x_{21}, x_{22} корпорації 2 визначають валовий дохід відповідних компонентів практичної діяльності, а показники $\tilde{x}_{21}, \tilde{x}_{22}$ і $\tilde{x}_{11}, \tilde{x}_{12}$ — рівень впливу протидії корпорації-конкурента. Зокрема, показник $\tilde{x}_{11}$ характеризує прогнозований корпорацією 2 рівень свого збитку від введення корпорацією 1 на ринок продукції 2, а показник $\tilde{x}_{21}$ — прогнозоване зростання доходу корпорації 1 від реалізації продукції 2 завдяки зменшенню попиту на продукцію 1 корпорації 2.

3. На підставі (6.57, 6.61) визначають функціональні залежності $F_{\Sigma 21}(x_2, \tilde{x}_1, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ взаємного впливу дій корпорації 2 і власних дій $F_{\Sigma 12}(x_1, \tilde{x}_2, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ корпорації 1 на результати своєї діяльності в позаштатних ситуаціях за умов дії різних груп факторів ризику без урахування ситуаційної невизначеності. Для виявлення впливу факторів ризику позаштатних ситуацій та оцінювання їхнього внеску до загального валового доходу практичної діяльності корпорацій 1 і 2 експертним оцінюванням було отримано такі матриці R_1, R_2 :

$$R_1 = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ \begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,11 & 0,01 & 0,3 & 0,4 \\ 0,23 & 0,05 & 0,1 & 0,3 \\ 0,32 & 0,15 & 0,15 & 0,25 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad R_2 = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 \\ \begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,15 & 0,21 & 0,16 & 0,25 & 0,32 \\ 0,17 & 0,22 & 0,08 & 0,35 & 0,38 \\ 0,27 & 0,35 & 0,11 & 0,30 & 0,42 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

$$\tilde{x}_2^1 \quad \tilde{x}_2^2 \quad \tilde{x}_2^3 \quad \tilde{x}_2^4 \quad \tilde{x}_2^5$$

Значення $J_{12ns}, \dots, J_{21in}$ рівня ризику задано в такому вигляді:

$$J_{12ns}(x_1, \tilde{x}_2) = a'_{12} I_{12}(x_1, \tilde{x}_2); \quad a'_{12} \in [0,05; 0,15],$$

$$J_{12fm}(x_1, \tilde{x}_2) = a''_{12} I_{12}(x_1, \tilde{x}_2); \quad a''_{12} \in [0,05; 0,25],$$

$$J_{12in}(x_1, \tilde{x}_2) = a'''_{12} I_{12}(x_1, \tilde{x}_2); \quad a'''_{12} \in [0,05; 0,35];$$

$$J_{21ns}(\tilde{x}_1, x_2) = a'_{21} I_{21}(\tilde{x}_1, x_2); \quad a'_{21} \in [0,05; 0,15],$$

$$J_{21fm}(\tilde{x}_1, x_2) = a''_{21} I_{21}(\tilde{x}_1, x_2); \quad a''_{21} \in [0,05; 0,25],$$

$$J_{21in}(\tilde{x}_1, x_2) = a'''_{21} I_{21}(\tilde{x}_1, x_2); \quad a'''_{21} \in [0,05; 0,3];$$

$$\tilde{x}_1 = \langle \tilde{x}_{11}, \tilde{x}_{12} \rangle, \quad \tilde{x}_{11} = \langle \tilde{x}_{11}^-, \tilde{x}_{11}^+ \rangle, \quad \tilde{x}_{12} = \langle \tilde{x}_{12}^-, \tilde{x}_{12}^+ \rangle;$$

$$\tilde{x}_2 = \langle \tilde{x}_{21}, \tilde{x}_{22} \rangle, \quad \tilde{x}_{22} = \langle \tilde{x}_{22}^-, \tilde{x}_{22}^+ \rangle, \quad \tilde{x}_{21} = \langle \tilde{x}_{21}^-, \tilde{x}_{21}^+ \rangle.$$

Розрахунки виконують для таких варіантів вихідних даних:

$$\begin{aligned}x_2^1 &= \langle \tilde{x}_{21} \in [10; 25]; \quad \tilde{x}_{22} \in [5; 10] \rangle, \\x_2^2 &= \langle \tilde{x}_{21} \in [35; 65]; \quad \tilde{x}_{22} \in [10; 25] \rangle, \\x_2^3 &= \langle \tilde{x}_{21} \in [45; 75]; \quad \tilde{x}_{22} \in [15; 25] \rangle, \\x_2^4 &= \langle \tilde{x}_{21} \in [60; 95]; \quad \tilde{x}_{22} \in [25; 30] \rangle; \\x_1^1 &= \langle \tilde{x}_{11} \in [5; 10]; \quad \tilde{x}_{12} \in [12; 25] \rangle, \\x_1^2 &= \langle \tilde{x}_{11} \in [12; 24]; \quad \tilde{x}_{12} \in [17; 35] \rangle, \\x_1^3 &= \langle \tilde{x}_{11} \in [15; 30]; \quad \tilde{x}_{12} \in [37; 52] \rangle, \\x_1^4 &= \langle \tilde{x}_{11} \in [25; 40]; \quad \tilde{x}_{12} \in [57; 75] \rangle, \\x_1^5 &= \langle \tilde{x}_{11} \in [40; 60]; \quad \tilde{x}_{12} \in [55; 85] \rangle.\end{aligned}$$

4. Деякі результати розрахунку взаємного впливу дій конкурента і власних дій корпорацій на результати своєї діяльності показані у вигляді графіків на рис. 6.1, 6.2 для ситуації S_1 на основі функціональних залежностей $I'_{12}(x_1, \tilde{x}_2)$ і $I'_{21}(x_2, \tilde{x}_1)$ для штатних умов і $F_{\Sigma 12}(x_1, \tilde{x}_2, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ та $F_{\Sigma 21}(x_2, \tilde{x}_1, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ з урахуванням факторів ризику.

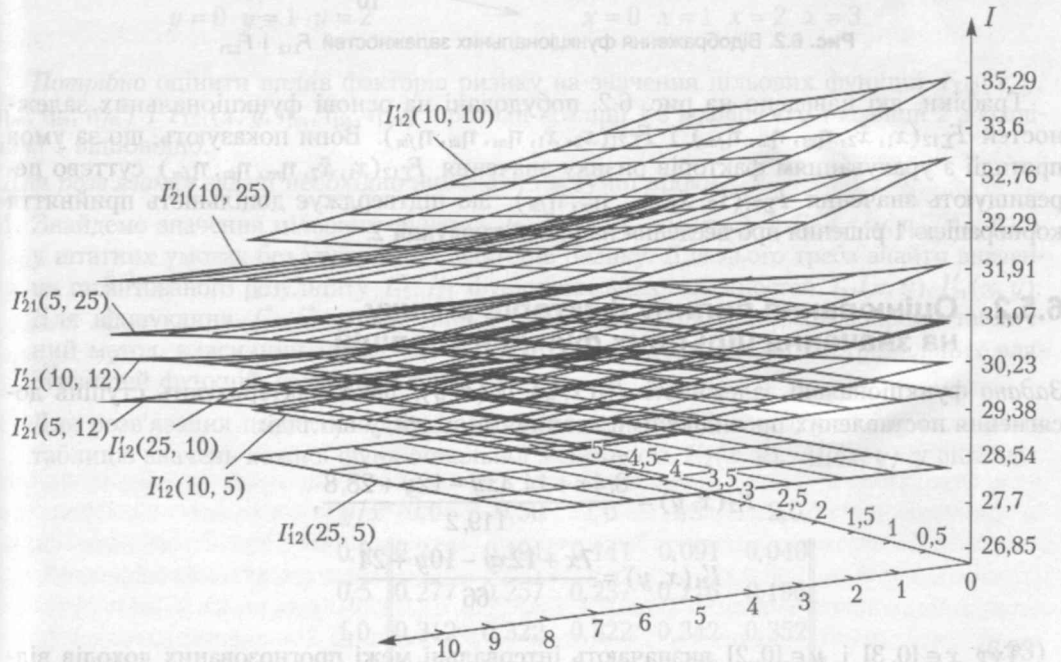


Рис. 6.1. Відображення функціональних залежностей $I'_{12}(x_1, \tilde{x}_2)$ і $I'_{21}(x_2, \tilde{x}_1)$

Результати, наведені на рис. 6.1 на основі функціональних залежностей $I'_{12}(x_1, \tilde{x}_2)$ і $I'_{21}(x_2, \tilde{x}_1)$, свідчать, що за умов протидії без урахування факторів ризику значення $I'_{12}(x_1, \tilde{x}_2)$ перевищують значення $I'_{21}(x_2, \tilde{x}_1)$.

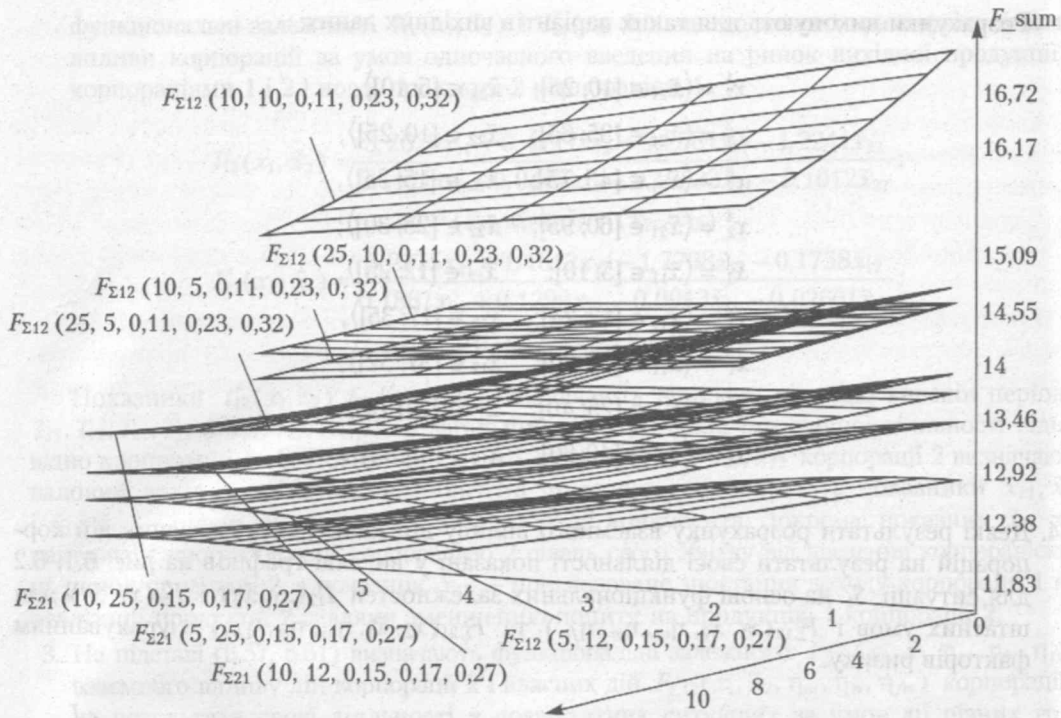


Рис. 6.2. Відображення функціональних залежностей $F_{\Sigma 12}$ і $F_{\Sigma 21}$

Графіки, які наведено на рис. 6.2, побудовані на основі функціональних залежностей $F_{\Sigma 12}(x_1, \tilde{x}_2, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ і $F_{\Sigma 21}(x_2, \tilde{x}_1, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$. Вони показують, що за умов протидії з урахуванням факторів ризику значення $F_{\Sigma 12}(x_1, \tilde{x}_2, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ суттєво перевищують значення $F_{\Sigma 21}(x_2, \tilde{x}_1, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$, що підтверджує доцільність прийняття корпорацією 1 рішення про введення на ринок продукції 2.

6.5.2. Оцінювання впливу факторів ризику на значення цільових функцій коаліцій

Задано функціональні залежності $I'_{12}(x, y)$, $I'_{21}(x, y)$, що характеризують ступінь досягнення поставлених протидіючими коаліціями цілей, у вигляді:

$$I'_{12}(x, y) = \frac{8,4x + 14,4xy - 12y + 28,8}{119,2},$$

$$I'_{21}(x, y) = \frac{7x + 12xy - 10y + 24}{66}.$$

Тут $x \in [0, 3]$ і $y \in [0, 2]$ визначають інтервальні межі прогнозованих доходів відповідно коаліцій 1 і 2.

Для коаліцій 1 і 2 задано функції збитку від дії різних груп факторів ризику — не прогнозованих ситуацій протидії, форс-мажорних факторів, факторів інформаційної невизначеності.

Значення збитку визначають співвідношення:

$$\begin{aligned}
 J_{12ns}(x, y) &= \frac{0,81y - 1,44xy - 0,6x + 11,4}{91}; \\
 J_{12fm}(x, y) &= \frac{0,2y + 0,4xy + 0,1x + 0,3}{29}; \\
 J_{12in}(x, y) &= \frac{1,32y - 0,72yx - 0,36x + 5,2}{10,3}; \\
 J_{21ns}(x, y) &= \frac{0,5y + 0,3xy + 0,4x + 1}{24}; \\
 J_{21fm}(x, y) &= \frac{1,08y - 0,96xy + 0,84x + 2,2}{9,4}; \\
 J_{21in}(x, y) &= \frac{0,7y + 0,2yx - 0,6x + 1,3}{18}.
 \end{aligned} \quad (6.92)$$

Також для кожної коаліції задано ситуаційні матриці ймовірностей факторів ризику:

$$R_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} y=0 \\ y=1 \\ y=2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,17 & 0,09 & 0,15 \\ 0,06 & 0,12 & 0,09 \\ 0,08 & 0,1 & 0,07 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}; \quad R_2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} x=0 \\ x=1 \\ x=2 \\ x=3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,1 & 0,1 & 0,15 & 0,02 \\ 0,05 & 0,1 & 0,1 & 0,1 \\ 0,05 & 0,1 & 0,25 & 0,01 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$$

Потрібно оцінити вплив факторів ризику на значення цільових функцій $F_{\Sigma 12}(x, y, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ і $F_{\Sigma 21}(x, y, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ протидії коаліції 1 з коаліцією 2 і коаліції 2 з коаліцією 1 відповідно.

Для розв'язання задачі необхідно виконати наступні кроки.

1. Знайдемо значення цільових функцій $F_{\Sigma 12}(x, y, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ і $F_{\Sigma 21}(x, y, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ у штатних умовах без урахування факторів ризику. Для цього треба знайти значення гарантованого результату I_{12}^*, I_{21}^* функціональних залежностей $I_{12}'(x, y), I_{21}'(x, y)$. Для відшукування I_{12}^*, I_{21}^* можна використовувати різні прийоми, зокрема табличний метод, класичний метод, що ґрунтується на дослідженні екстремальних властивостей функцій, графічний тощо.

Для розв'язання цього прикладу застосуємо табличний метод, у якому складають таблицю значень кожної функціональної залежності $I_{12}'(x, y), I_{21}'(x, y)$ у вигляді

$$I_{12}'(x, y) = \begin{matrix} y/x & 0,0 & 0,50 & 1,0 & 1,5 & 2,0 \\ \begin{matrix} 0,0 \\ 0,5 \\ 1,0 \\ 1,5 \\ 2,0 \\ 2,5 \\ 3,0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,242 & 0,191 & 0,141 & 0,091 & 0,040 \\ 0,277 & 0,257 & 0,237 & 0,216 & 0,196 \\ 0,312 & 0,322 & 0,322 & 0,342 & 0,352 \\ 0,347 & 0,388 & 0,428 & 0,468 & 0,508 \\ 0,383 & 0,453 & 0,523 & 0,594 & 0,664 \\ 0,418 & 0,518 & 0,619 & 0,720 & 0,820 \\ 0,453 & 0,584 & 0,715 & 0,846 & 0,977 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (6.93)$$

$$I'_{21}(x, y) = \begin{matrix} y/x & 0,0 & 0,5 & 1,0 & 1,5 & 2,0 \\ \begin{matrix} 0,0 \\ 0,5 \\ 1,0 \\ 1,5 \\ 2,0 \\ 2,5 \\ 3,0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,364 & 0,288 & 0,212 & 0,136 & 0,061 \\ 0,417 & 0,386 & 0,356 & 0,326 & 0,295 \\ 0,470 & 0,485 & 0,500 & 0,515 & 0,530 \\ 0,523 & 0,583 & 0,644 & 0,705 & 0,765 \\ 0,576 & 0,682 & 0,788 & 0,894 & 1,000 \\ 0,629 & 0,780 & 0,932 & 1,083 & 1,235 \\ 0,682 & 0,879 & 1,076 & 1,273 & 1,470 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (6.94)$$

а далі визначають гарантований результат за принципом:

$$I_{12}^* = \max_x \min_y I'_{12}(x, y);$$

$$I_{21}^* = \max_y \min_x I'_{21}(x, y).$$

Для першої коаліції значення гарантованого результату буде в точці $x = 3$, $y = 0$ і відповідатиме $I_{12}^* = I'_{12}(3, 0) = 0,453$, тобто $F_{\Sigma 12} = 0,453$.

Для другої коаліції це значення буде в точці $x = 0$, $y = 0$ і відповідатиме $I_{21}^* = I'_{21}(0, 0) = 0,364$, тобто $F_{\Sigma 21} = 0,364$.

- Знайдемо без урахування ситуаційної невизначеності значення цільових функцій $F'_{\Sigma 12}(x, y, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ для коаліції 1 і $F'_{\Sigma 21}(x, y, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ для коаліції 2 з урахуванням факторів ризику в точці гарантованого результату для кожної з протидіючих коаліцій. Для розв'язання цієї задачі використаємо ситуаційні матриці R_1 та R_2 ймовірностей факторів ризику для коаліцій 1 і 2 відповідно. Значення цільових функцій $F'_{\Sigma 12}(x, y, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ і $F'_{\Sigma 21}(x, y, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ визначимо за формулами (6.55) і (6.61).

Для коаліції 1 гарантований результат отримано у точці $x = 3$, $y = 0$. За значенням змінної $y = 0$ визначаємо, що необхідно виконати дослідження для ситуації S_1 . Отже, для першої коаліції буде враховано значення ймовірностей факторів ризику, що відповідають ситуації S_1 , тобто $\eta_{ns} = 0,17$, $\eta_{fm} = 0,06$, $\eta_{in} = 0,08$. Підставивши значення ймовірностей η_{ns} , η_{fm} , η_{in} , а також значення функцій $I'_{12}(x, y)$, $J_{12ns}(x, y)$, $J_{12fm}(x, y)$, $J_{12in}(x, y)$ у вираз (6.55), одержимо для коаліції 1 значення цільової функції у цій точці $F'_{\Sigma 12} = 0,274$.

Для коаліції 2 гарантований результат отримано у точці $x = 0$, $y = 0$. За значенням змінної $x = 0$ визначаємо, що необхідно розглянути ситуацію S_1 . Отже, для коаліції 2 візьмемо значення ймовірностей факторів ризику, що відповідають ситуації S_1 , тобто $\eta_{ns} = 0,1$, $\eta_{fm} = 0,05$, $\eta_{in} = 0,05$. Підставивши значення ймовірностей η_{ns} , η_{fm} , η_{in} , а також значення функцій $I'_{21}(x, y)$, $J_{21ns}(x, y)$, $J_{21fm}(x, y)$, $J_{21in}(x, y)$ у точці $x = 0$, $y = 0$ у вираз (6.61), одержимо для коаліції 2 значення цільової функції у цій точці $F'_{\Sigma 21} = 0,276$.

- Виберемо найнесприятливішу ситуацію з погляду ймовірності впливу факторів ризику. Для цієї ситуації знайдемо значення цільової функції для кожної з коаліцій з урахуванням і без урахування факторів ризику. Найнесприятливішу ситуацію для кожної коаліції можна знайти, використовуючи ситуаційні матриці ймовірностей

факторів ризику для коаліцій 1 і 2. Для цього потрібно визначити ймовірність появи кожної ситуації. Розглянемо ймовірності появи ситуацій S_1, S_2, S_3 для коаліції 1:

$$P(S_1) = 8,16 \cdot 10^{-4}, \quad P(S_2) = 1,08 \cdot 10^{-3}, \quad P(S_3) = 9,45 \cdot 10^{-4}.$$

Оскільки для коаліції 1 ймовірність появи ситуації S_2 максимальна, то ситуація S_2 є найнесприятливішою. Тому необхідно знайти максимальне значення функції $I'_{12}(x, y)$ для ситуації S_2 , тобто матриці $I'_{12}(x, y)$, що має вигляд (6.93), для змінної $y = 1$. Для ситуації S_2 значення цільової функції коаліції 1 в точці $y = 1$ і максимальне значення за x у точці $x = 3$, $I'_{12}(3, 1) = 0,715$. Отже, значення цільової функції коаліції 1 $F_{\Sigma 12n}$ без урахування факторів ризику $F_{\Sigma 12n} = 0,715$.

Розглянемо ймовірності появи ситуацій S_1, S_2, S_3, S_4 для коаліції 2:

$$P(S_1) = 2,5 \cdot 10^{-4}, \quad P(S_2) = 1 \cdot 10^{-3}, \quad P(S_3) = 3,75 \cdot 10^{-3}, \quad P(S_4) = 2 \cdot 10^{-5}.$$

Оскільки для другої коаліції ймовірність появи ситуації S_3 максимальна, то ситуація S_3 є найнесприятливішою. Отже, потрібно знайти максимальне значення функції $I'_{21}(x, y)$ для ситуації S_3 , тобто для змінної $x = 2$. Вихідна матриця значень цільової функції $I'_{21}(x, y)$ має вигляд (6.94). Для ситуації S_3 значення цільової функції коаліції 2 в точці $x = 2$ і максимальне значення за y у точці $y = 2$, $I'_{21}(2, 2) = 1$. Отже, значення цільової функції коаліції 2 $F_{\Sigma 21n}$ без урахування факторів ризику $F_{\Sigma 21n} = 1$.

Тепер знайдемо без урахування ситуаційної невизначеності значення цільових функцій $F'_{\Sigma 12n}(x, y, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ і $F'_{\Sigma 21n}(x, y, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ для кожної коаліції з урахуванням факторів ризику, використовуючи співвідношення (6.55) і (6.61).

Для коаліції 1 потрібно знайти значення цільової функції $F_{\Sigma 12}(x, y, \eta_{ns}, \eta_{in}, \eta_{fm})$ у точці $x = 3, y = 1$, при цьому маємо найнесприятливішу ситуацію S_2 , тобто значення ймовірностей для факторів ризику дорівнюватимуть: $\eta_{ns} = 0,09, \eta_{fm} = 0,12, \eta_{in} = 0,1$. З урахуванням впливу факторів ризику в найнесприятливішій ситуації значення цільової функції для коаліції 1 $F'_{\Sigma 12n} = 0,469$.

Для коаліції 2 потрібно знайти значення цільової функції у точці $x = 2, y = 2$, при цьому маємо найнесприятливішу ситуацію S_3 , тобто значення ймовірностей для факторів ризику дорівнюватимуть: $\eta_{ns} = 0,15, \eta_{fm} = 0,1, \eta_{in} = 0,25$.

З урахуванням впливу факторів ризику в найнесприятливішій ситуації значення цільової функції для коаліції 2 $F'_{\Sigma 21n} = 0,493$.

Проаналізуємо отримані результати. Відповідно до принципу гарантованого результату значення цільової функції $F_{\Sigma 12} = 0,453$ коаліції 1 більше, ніж значення цільової функції $F_{\Sigma 21} = 0,364$ коаліції 2. Під впливом факторів ризику значення обох цільових функцій зменшуються, і значення $F'_{\Sigma 12}(3, 0; 0,17; 0,08; 0,06) = 0,274$ коаліції 1 стає меншим, ніж значення $F'_{\Sigma 21}(0, 0; 0,1; 0,05; 0,05) = 0,276$ коаліції 1. Слід зазначити, що з урахуванням впливу факторів ризику значення цільової функції коаліції 2 змінилося незначно (на 25 %), у той час як відповідне значення для коаліції 1 під впливом факторів ризику зменшилося на 40 %. Отже, фактори ризику найбільше впливають на коаліцію 1.

Найнесприятливішою ситуацією для першої коаліції буде ситуація S_2 , а для коаліції 2 — ситуація S_3 . У випадку найнесприятливішої ситуації значення цільової функції

$F_{\Sigma 12n}(3,1) = 0,715$ коаліції 1 менше, ніж значення цільової функції $F_{\Sigma 21n}(2,2) = 1$ коаліції 2, але для обох коаліцій вони більші, ніж у випадку гарантованого результату. Під впливом факторів ризику значення цільових функцій обох коаліцій зменшуються практично вдвічі. Але й у цьому разі коаліція 2 буде у вигіднішому становищі порівняно з коаліцією 1: $F'_{\Sigma 12n}(3,1; 0,09; 0,1; 0,12) = 0,469$, $F'_{\Sigma 21n}(2,2; 0,15; 0,25; 0,1) = 0,493$. При цьому відповідні значення не менші від гарантованого результату для кожної коаліції.

Висновки

- ♦ Запропоновано математичний апарат формалізації і розв'язання системних задач розкриття невизначеності та оптимізації цілей партнерів однієї коаліції в задачах активної взаємодії і протидії кількох коаліцій.
- ♦ Розглянуто коаліції, які взаємодіють між собою як партнери і стратегічні цілі яких збігаються, а інтереси можуть різнитися, але не є антагоністичними, а також коаліції, кожна з яких діє у власних інтересах і є конкурентом інших суб'єктів певного роду практичної діяльності.
- ♦ Розроблено формалізований опис цілей для взаємодії і протидії коаліцій. Обґрунтовано, що вектор-функція загальних цілей кожної коаліції залежить як від спільних коаліційних стратегій, так і від власних стратегій усіх учасників коаліції. У випадку протидії коаліцій кожна вектор-функція $\vec{F}_1^{(2)}$ і $\vec{F}_2^{(1)}$ залежить як від узагальнених стратегій своєї коаліції, так і від стратегій протидіючої коаліції за повної інформованості про дії своєї коаліції і неповної — про дії протидіючої. У разі об'єднання коаліцій у суперкоаліцію кожен коаліцію розглядають як учасника взаємодії в суперкоаліції.
- ♦ Запропоновано принцип мінімізації ризику, який враховує як ймовірнісний характер ризику, так і величину збитку. Обґрунтовано, що принцип гарантованого результату неефективний за умов максимальної невизначеності ситуації.
- ♦ Наведено загальну стратегію розв'язання задач системної взаємодії або системної протидії коаліцій, що ґрунтується на застосуванні основних принципів системного аналізу. Як основний принцип запропоновано використовувати принцип мінімізації ризику, відповідно до якого ступінь досягнення інтересів коаліцій характеризують інтервальні оцінки, а також вводять такі групи факторів ризику: непрогнозованих ситуацій, форс-мажорного та інформаційного ризиків. З огляду на те, що дія позаштатних ситуацій може призводити до прямого і непрямого збитку, запропоновано формалізацію рівня прямого збитку від впливу факторів усіх груп ризику. Наведено залежності цільових функцій як від рішень, прийнятих суб'єктами протидії, так і від параметрів факторів ризику. Під час розв'язання задачі протидії коаліцій враховано дії кожного партнера і коаліції в цілому, а саме їхнє прагнення до збільшення рівня досягнення цілей і мінімізації ризику за умов невизначеності.
- ♦ Як приклади наведено розв'язання задач конкуренції корпорацій за умов електронної комерції, а також оцінювання впливу факторів ризику на значення цільових функцій коаліцій.

Розділ 7

Інформаційний аналіз системних задач

Основні цілі й задачі інформаційного аналізу

- ♦ Кількісні та якісні характеристики інформації
- ♦ Формалізація характеристик і показників інформованості ОПР
- ♦ Класифікація множини ситуацій за якісними показниками інформованості ОПР
- ♦ Класифікація і розпізнавання ситуацій за інтегральним і частковими показниками інформованості
- ♦ Розпізнавання ситуацій за умов неповноти і нечіткості інформації у процесі зміни інформованості ОПР

Усебічно вивчають інформацію різні дисципліни, зокрема інформатика, теорія інформації, теорія радіолокації, теорія розпізнавання тощо. Уведено показники оцінювання кількості інформації. Так, широко відомі підходи і показники Шеннона [36, 257], Колмогорова [75–78], Кульбака [83]. Запропоновано також інші показники і критерії оцінки властивостей інформації [31, 73, 76–79, 143, 162, 174]. Головна особливість цих підходів полягає в тому, що вони оцінюють переважно кількісні характеристики інформації і значно рідше — показники якості інформації, такі, як повнота, достовірність тощо.

7.1. Аналіз кількісних та якісних характеристик інформації

Під час формалізації і розв'язання реальних задач системного аналізу важливе значення мають якісні характеристики використовуваної інформації. Обґрунтованість, достовірність та ефективність розв'язання прикладних системних задач безпосередньо залежать не тільки від кількісних, але й від якісних характеристик інформації [93]. Звідси випливають принципово нові вимоги до оцінювання вихідної інформації і до процедури інформаційного аналізу.

7.1.1. Основні цілі й задачі інформаційного аналізу

Сформулюємо *основні цілі й задачі інформаційного аналізу* як одного з важливих інструментів формалізації та розв'язання системних задач. Цілі зводяться до забезпечення необхідного і технологічно можливого рівня інформаційного забезпечення достовірності та обґрунтованості розв'язання прикладних системних задач. Задачі інформаційного аналізу полягають у створенні методологічного і математичного інструментарію для досягнення поставлених цілей.

Досягнення поставлених цілей і розв'язання задач багато в чому залежить від взаємозв'язків і взаємозалежностей різних факторів та умов, фізичних припущень і технологічних обмежень, накладених на функціонування досліджуваного об'єкта. Ці особливості суттєво ускладнюють реальні системні задачі, перетворюючи кожен з них на унікальну. До таких задач насамперед слід віднести задачі технологічного передбачення, інноваційної діяльності, оцінювання ризиків і управління безпекою складних технічних систем. Тому методологічний і математичний інструментарій інформаційного аналізу доцільно формувати з урахуванням особливостей певного класу системних задач, що буде реалізовано у наступних розділах.

Мета цього розділу — формування єдиного підходу до системно узгодженого з погляду ОПР аналізу кількісних і якісних характеристик інформації, оцінювання їхнього впливу на достовірність, повноту і своєчасність розв'язання системних задач.

7.1.2. Формування поняття «інформація»

Методична складність формування такого важливого розділу знань, як інформаційний аналіз, зумовлена, з одного боку, наявністю багатьох трактувань поняття «інформація», а з іншого — відсутністю загальноприйнятого означення.

Відомі означення інформації відображають лише окремі сторони цього поняття, багатогранного за своїми властивостями і сферами застосування. Наведемо тільки два означення. «Інформація — відомості, передані усним, письмовим або іншим способом за допомогою умовних знаків, сигналів» [193]. «Інформація — сукупність знань про фактичні дані й залежності між ними. Є одним із видів ресурсів, які використовує людина в трудовій діяльності та побуті» [143]. Перше означення дано через поняття «відомості», «зміст». Однак ці поняття характеризуються неоднозначністю трактування у практичних застосуваннях і тому не дають змоги одержувати обґрунтовані оцінки кількості інформації [78]. У другому означенні залишаються без відповіді важливі запитання: як слід розуміти і застосовувати настільки неоднозначний термін «фактичні дані» і чому поняття обмежене тільки «знаннями про фактичні дані»? Відомо, що на практиці під час формування і прийняття рішень використовують широкий спектр знань, зокрема знання, отримані на основі інтуїції та передбачення.

Є означення, що виділяють інформацію як фундаментальне поняття через її специфічну роль і заперечення її подібності до інших фундаментальних понять, наприклад, матерії та енергії. Так, зокрема, у своїй основній роботі з кібернетики [261] Н. Вінер зазначає: «Інформація — це інформація, а не матерія і не енергія». Суть цього трактування він розкриває таким означенням: «Інформація — це позначення змісту, який ми черпаємо із зовнішнього світу у процесі нашого пристосування до нього і приведення у відповідність до нього нашого мислення» [261].

Причини і суть такого становища досить повно охарактеризував Флехтнер (Flechtner H. J.): «Поняття інформації — не тільки центральне поняття теорії інформації, але також і одне з фундаментальних понять кібернетики. Водночас це найважче поняття для кожного, хто хоче вникнути в суть проблем кібернетики. Уже побіжний огляд літератури свідчить про те, що є не лише зовсім різні означення, але й стисле формулювання цього поняття, що дає теорія інформації, вкладає у нього значення, зовсім відмінне від того, яке ми звикли пов'язувати з цим поняттям» [31].

Щодо терміна «інформація» слід уточнити, що в теорії інформації подано математично обґрунтоване визначення кількості інформації, але дотепер немає однозначного визначення самої інформації. Вважаємо за потрібне ввести таке визначення поняття «інформація».

Інформація — це упорядкована послідовність змістовно взаємно узгоджених і структурно взаємопов'язаних слів, малюнків, діаграм, таблиць і (або) інших засобів письмового, усного, наочного, технічного відображення станів, дій, розміщень та інших властивостей і (або) процесів досліджуваного об'єкта будь-якої природи.

7.1.3. Деякі відомості з теорії інформації

Коротко проаналізуємо сучасні відомості з теорії інформації та визначимо їх практичні можливості для формування математичного апарату інформаційного аналізу й умов функціонування складних систем.

Початком формування теорії інформації прийнято вважати праці К. Шеннона [190, 191], хоча вони були зорієнтовані на дослідження систем зв'язку як певної сфери діяльності. Такий підхід зумовлений тим, що в них уперше було запропоновано означення *кількості інформації*. Означення, обґрунтоване К. Шенноном на підставі поняття *ентропії*, описує математична формула

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i. \quad (7.1)$$

Формула визначає ентропію повної групи випадкових подій або випадкових станів. Тут враховано, що за змістом ентропія є оберненою величиною до кількості інформації. Величина H — міра невизначеності множини, що складається з n випадкових подій з імовірностями $p_1, \dots, p_n$. З формули (7.1) випливає, що $H = 0$ за умови, що із множини подій відбудеться тільки одна, і принципово неможлива одночасна поява інших подій. Така умова виконується у разі послідовної передачі повідомлення по літерах.

Отже, кількість інформації строго визначена, як образно висловився М. Мазур [93], «...способом, що не залишає місця для розмірковувань над тим, що таке кількість інформації, тому що вона одержана розумною термінологічною угодою, яка ґрунтується на математичній формулі». Не зупиняючись на деталях і суті розробленої К. Шенноном математичної теорії зв'язку, слід відзначити її величезний внесок у науку. Він полягає в тому, що з доволі загальних позицій було виявлено основні проблеми функціонування систем зв'язку і зведено їх у єдину строгую сукупність математичних співвідношень, моделей і висновків.

Розширення можливостей і сфери застосування теорії інформації, а потім і становлення її як самостійної науки пов'язані з розвитком кібернетики, початок якій покладено основною роботою Н. Вінера [261]. Поставлені кібернетикою якісно нові проблеми висунули й нові вимоги до формування вихідної інформації. Особливо суттєвою вимогою стає «логічна незалежність інформації від будь-яких імовірнісних припущень» [78]. Звідси випливає практично важлива задача розроблення нових принципів і підходів до формування та оцінювання кількості інформації. Ступінь строгості дослідження властивостей і особливостей інформації, наявний у перших працях К. Шеннона, виявився недостатнім для розв'язання такого типу задач [78]. Виникла потреба вийти на якісно новий рівень дослідження, а саме на рівень строго математичного обґрунтування основних властивостей інформації. Це було зроблено у працях [77, 78, 24, 184–186]. Особливе значення серед результатів цих праць мають запропоновані А. М. Колмогоровим ідеї визначення кількості інформації, на підставі яких розроблено комбінаторний та алгоритмічний підходи. Такі підходи, *по-перше*, забезпечили логічну незалежність властивостей інформації від імовірнісних припущень. *По-друге*, виникла

можливість визначати кількість інформації, що є характеристикою індивідуального об'єкта, реалізованого у вигляді окремого слова або неперервного повідомлення у вигляді діаграми. Величезна заслуга А. М. Колмогорова, його учнів і співавторів полягає в тому, що вони вивели теорію інформації на рівень строгої математичної дисципліни, створили основу для нового наукового напрямку — *алгоритмічної теорії інформації* і суттєво розширили сферу її застосування [78].

Водночас навіть після настільки строгого визначення кількості інформації і появи дисципліни «Теорія інформації» ще недостатньо вивчено деякі її розділи.

По-перше, справді, є поняття «кількість інформації», але не було настільки ж строгого поняття «інформація».

По-друге, введені поняття кількості інформації мають специфічні особливості та обмеження. Так, кількість інформації з формули К. Шеннона можна визначити тільки за умови, що досліджуваний об'єкт є елементом деякої дискретної множини з апіорно заданим на ній розподілом імовірностей. Такий варіант реалізовано у системі зв'язку для передачі повідомлень, що складаються з окремих знаків, наприклад, літер. У разі переходу до неперервних повідомлень таке оцінювання стає неможливим: усі природні аналогії ентропії тоді дорівнюють нескінченності [76, 78]. Комбінаторний і алгоритмічний підходи А. М. Колмогорова виключають імовірнісне обмеження К. Шеннона й суттєво розширюють сферу об'єктів, для яких можна визначити кількість інформації. Кількість інформації досліджуваного об'єкта, наприклад, ще не виданої книги, можна визначити через її зіставлення з іншим об'єктом, зокрема, уже виданою книгою. Слід також виділити загальну особливість підходів К. Шеннона й А. М. Колмогорова: жоден із них не враховує неоднорідного характеру інформації, що є в багатьох системних задачах.

Водночас на практиці часто виникає потреба кількісної оцінки інформації за умов, для яких принципово не можуть виконуватися зазначені раніше обмеження й припущення. Зокрема, під час аналізу факторів ризику не можна визначити склад множини позаштатних ситуацій та ймовірність виникнення кожної події.

Здавалося б, із появою і широким впровадженням ПК, розвинених інформаційних систем проблема стала розв'язною: кількість інформації легко визначити за кількістю двійкових розрядів у байтах. Але й у цьому випадку проблему не завжди можна розв'язати однозначно — у різних текстових редакторах обсяг інформації неоднаковий для одного й того самого тексту. Крім того, той самий зміст повідомлення можна передати як різними словами-синонімами, довжина машинного слова для яких неоднакова, так і стилістично по-різному будувати фразу. Наприклад, на запит про наявність товару можна коротко і зрозуміло відповісти двома словами: «товару немає», але можна дати відповідь з доволі оригінальними подробицями на декількох сторінках. Крім того, не виключено можливість передачі повідомлень, граматично правильних, але безглузких: «за сигналом «три зелені свистки» я вас чекаю в дубовому бору». Але водночас не виключено, що таке повідомлення шифроване і для певних осіб буде цілком змістовним.

Зазначимо також, що праці з теорії інформації можна поділити на три групи [93].

До першої групи належать праці, у яких кількісні властивості інформації охарактеризовано якісно: наприклад, інформація може бути максимальною, мінімальною, середньою тощо, і, власне кажучи, в цих випадках не цікавляться суттю поняття «інформація».

У другу групу входять праці, у яких поняття «інформація» використовують без його змістовного пояснення: наприклад, «перенесення інформації», «передача інформації за допомогою сигналів», «інформація, що міститься у множині символів» тощо, нібито вважаючи, що мова йде про поняття загальноприйняте, яке не допускає різночитання.

У працях третьої групи зроблено спробу пояснити суть поняття «інформація» за допомогою досить загальних трактувань: наприклад, з використанням таких термінів, як «відомості», «зміст» тощо. Деякі з таких означень наведено раніше.

Водночас розвиток деяких теоретичних і прикладних дисциплін — теорії управління, теорії прийняття рішень, теорії дослідження операцій тощо — зумовив потребу уточнення основних понять теорії інформації, зокрема, потребу узгодженого означення кількості та якості інформації. З'явилися праці, у яких проаналізовано низку практично важливих інформаційних аспектів відповідних дисциплін і наукових напрямів. До них потрібно насамперед віднести роботи Ю. Б. Гермейера [26] і його учнів.

7.1.4. Якісні властивості інформації

Слід зазначити, що за допомогою відомих підходів визначення кількості інформації розв'язують задачі з позиції аналізу загальних властивостей об'єкта і не враховують позиції ОНР стосовно досліджуваного об'єкта. Однак позиції різних ОНР можуть принципово різнитися. Наприклад, один із них аналізуватиме множину ситуацій ризику, виходячи з крайньої обережності, а інший — буде прихильником раціонального ризику. Тому виникла потреба визначення кількості та якості інформації не тільки для опису наявних властивостей і особливостей досліджуваного об'єкта, а й з погляду формування і досягнення цілей ОНР на основі його бачення як необхідних властивостей та особливостей досліджуваного об'єкта, так і шляхів та засобів їх реалізації. Для цього ОНР повинен мати певний рівень інформованості про об'єкт. За такого підходу до інформаційного аналізу насамперед виникають запитання:

- ♦ що слід розуміти під інформованістю ОНР?
- ♦ якими показниками доцільно оцінювати рівень інформованості ОНР?
- ♦ як кількісно оцінювати ступінь інформованості ОНР про деякі можливі ситуації, зокрема інформованість про фактори ризику?

За аналогією з визначенням кількості інформації введемо такі поняття.

Рівень інформованості ОНР — це показник рівня знань про предмет аналізу або досліджень. Кількісно рівень інформованості ОНР характеризуватимемо величиною зміни рівня невизначеності знань унаслідок одержання інформації.

Під *інформованістю ОНР* будемо розуміти зміну рівня невизначеності знань про ситуацію або предмет аналізу внаслідок одержання інформації.

З одержанням інформації рівень невизначеності ситуації може знижуватися, якщо інформація точна, але може і зростати, якщо вона навмисно перекручена або недостовірна (тобто не підтверджена досвідом, розрахунками, документами чи іншим способом).

Крім того, невизначеність ситуації можна оцінювати, виходячи з цілей системного аналізу, зокрема з погляду оцінки ступеня і рівня ризику. Для кожної певної ситуації її характеризують такі види невизначеності знань:

- ♦ невизначеність, пов'язана з можливістю появи тієї чи іншої ситуації;
- ♦ невизначеність, що характеризується якістю наявної і новоодержуваної інформації;
- ♦ невизначеність, пов'язана зі ступенем впливу тієї чи іншої ситуації на рівень ризику.

Звідси випливає, що підвищення рівня інформованості ОНР не завжди зумовлює розкриття невизначеності появи тієї чи іншої ситуації, як це було прийнято під час формування співвідношення (7.1).

Тому доцільно визначити рівень інформованості ОНР з урахуванням усіх наведених факторів. Спочатку визначимо обернену величину — рівень неінформованості.

Проаналізуємо деякі прийоми і суть розкриття *невизначеності появи ситуації*. Вважатимемо, що *рівень неінформованості* — це невизначеність знання про появу тієї чи іншої альтернативи з прогнозованої множини ситуацій. Значення невизначеності знання можна оцінювати на підставі різних підходів. Нехай множина можливих ситуацій M_s дискретна, і кожний елемент S_i множини M_s характеризує певна ймовірність ρ_i для $i = \overline{1, m_s}$. Тоді значення неінформованості H_s будемо визначати як рівень невизначеності відомостей про M_s . Отже, маємо умову, аналогічну до умови для формули (7.1). Тому невизначеність можна визначити як ентропію

$$H_s = - \sum_{i=1}^{m_s} \rho_i \log \rho_i. \tag{7.2}$$

Зазначимо, що для рівноймовірних подій $\rho_i = 1/m_s$ і $H_s = \log m_s$.

Тепер проаналізуємо вплив якості інформації на рівень інформованості ОПР. Слід звернути увагу на те, що оцінювання якості інформації найменш досліджене як в інформатиці, так і в інших наукових дисциплінах, тією чи іншою мірою пов'язаних з інформацією: теорії оптимального управління, теорії прийняття рішень тощо.

Сьогодні немає прийнятої системи показників оцінки якісних характеристик інформації. Тому недоцільно зупинятися на аналізі різних підходів до їхньої формалізації, оскільки вони незастосовні до розв'язання більшості практичних задач системного аналізу.

Наведемо лише суттєві якісні властивості інформації, що принципово важливі для розв'язання задач системного аналізу, зокрема для оцінки ступеня і рівня ризику в штатних, позаштатних і критичних ситуаціях. До таких властивостей належать: невизначеність, неточність, неповнота, нечіткість, несвоечасність, недостовірність, суперечливість.

Невизначеність — властивість, що відображає наявність декількох альтернативних описів ситуації.

Неточність — властивість, що свідчить про наявність певного інтервалу допусків або похибки вимірів чи розрахунків у кількісних параметрах і (або) якісних характеристиках опису ситуації.

Неповнота — властивість, яка відображає наявність інформаційних прогалин в описі ситуації (щось пропущене, описане недостатньо тощо).

Нечіткість — властивість, що характеризує розпливчастість опису ситуації, коли неможливо точно визначити наявність або відсутність певної властивості чи її точну кількісну характеристику (наприклад, не можна точно кількісно описати такі поняття, як комфортна погода, сприятлива ситуація — їхній опис суб'єктивний, розпливчастий).

Несвоечасність — властивість, що характеризує співвідношення в часі між моментом настання якоїсь події і моментом одержання інформації про неї. Якщо ОПР не має достатньо часу для формування і прийняття рішення на підставі отриманої інформації, то вона несвоечасна.

Недостовірність — властивість, що відображає наявність кількісних даних або якісних характеристик, що не відповідають реальному стану ситуації.

Суперечливість — властивість, яка свідчить про наявність кількісних або якісних характеристик, що мають значення або зміст, який суперечить іншим даним.

Наведені означення потрібно враховувати під час формування показників інформованості ОПР.

7.2. Формалізація характеристик і показників інформованості ОПР

Розглянувши з погляду системного аналізу якісні властивості інформації, перейдемо до формалізації показників кількості та якості інформованості ОПР [135].

Очевидно, що для ОПР важливо, щоб одержувана інформація мала мінімум зазначених властивостей, таких як неповнота, недостовірність, несвоєчасність тощо. Тому як вихідні поняття для визначення інформованості ОПР візьмімо властивості інформації, протилежні за значенням наведеним.

Найважливішими з них із погляду ОПР є повнота, достовірність і своєчасність інформованості ОПР.

Повнота інформованості — властивість, що характеризує відповідність кількості одержуваної ОПР інформації тій, котра потрібна для прийняття рішення.

Своєчасність інформованості — властивість, що визначає, наскільки ресурс часу ОПР на формування і прийняття рішення відповідає ресурсу часу від моменту одержання інформації до моменту реалізації рішення.

Достовірність інформованості — властивість, що характеризує відповідність одержаної ОПР інформації реальному стану наявної ситуації.

7.2.1. Формалізація показника повноти інформованості

Кількісно повноту інформованості будемо характеризувати показником повноти інформованості I_{Π} :

$$I_{\Pi} = \frac{\Pi - \Pi^-}{\Pi^+ - \Pi^-}, \quad (7.3)$$

де Π^+ , Π^- — відповідно максимально доцільний і мінімально допустимий обсяг інформації, потрібний для прийняття рішення у певних умовах; Π — обсяг інформації, одержаної ОПР у наявній ситуації.

Величина I_{Π} визначає рівень повноти інформованості в тому сенсі, що показує, наскільки відносний обсяг одержаної інформації перевищує мінімально допустимий обсяг для прийняття рішення, тобто цей показник кількісно характеризує рівень повноти інформованості ОПР, виходячи з мінімально допустимого обсягу інформації Π^- . Слід звернути увагу, що величина $I_{\Pi} = 0$ при $\Pi = \Pi^-$, де $\Pi^- > 0$. Звідси випливає, що за початок відліку рівня повноти інформованості беруть таке значення, яке відповідає певному, мінімально допустимому обсягу інформації за реальних умов. Тут під реальними умовами слід розуміти умови взаємодії (чи протидії) партнерів у потенційно можливій або прогнозованій множині ситуацій. Величина Π характеризує обсяг інформації для певної, що складається у процесі взаємодії (відповідно — протидії), ситуації з прогнозованої множини ситуацій. При цьому кожній k -й конкретній ситуації відповідатиме власне значення Π_k . А значення Π^- і Π^+ спільні для всіх ситуацій з досліджуваної множини. Зазначимо, що Π^+ не збігається з Π_M^+ , що визначає гранично повний обсяг інформації про множину ситуацій.

Особливу увагу слід звернути на поняття *максимально доцільний обсяг інформації*, необхідний для прийняття рішення. На перший погляд здається, що збільшення обсягу інформації завжди зумовлює підвищення обґрунтованості рішення. Але на практиці така думка часто не справджується, оскільки обґрунтованість рішення підвищується у разі одержання не будь-якої інформації, а тільки корисної з погляду прийняття рішення.

Однак існують певні кількісні обмеження на максимально доцільний обсяг інформації для прийняття рішення, оскільки зі збільшенням її обсягу зростає час, необхідний на обробку цієї інформації. Може трапитися, що у разі збільшення обсягу інформації вище від певного рівня буде потрібне неприйнятне збільшення часу на її обробку. Це слушно й у тому разі, коли інформація корисна для прийняття рішення.

Справді, якщо інформація дублює наявні відомості або лише незначно їх доповнює, то її слід розглядати як надмірну. Проте поряд з інформацією, корисною для прийняття рішення, може бути й така, що містить відомості, непотрібні ОНР для прийняття рішення в певній ситуації.

Наприклад, транспортній організації для прийняття рішення про вибір маршруту для перевезення вантажу необхідна інформація про обсяг, вагу, пункти призначення тощо, але зовсім не потрібна інформація про те, на яких верстатах, з якого матеріалу виготовлені предмети, що є вантажем, і низка інших даних. Інформація, що не містить відомостей, корисних для прийняття рішення, шкідлива. Крім того, у разі протидії коаліцій може бути свідомо спотворена інформація кожної з них. Інформацію, у якій свідомо спотворено відомості, називають *дезінформацією*.

Слід також зауважити щодо значення Π^- . Тут під Π^- розуміють нижню межу обсягу інформації в тому сенсі, що рішення можна приймати за умови $\Pi \geq \Pi^- + \epsilon$, де ϵ — досить мала величина, оскільки для $\Pi = \Pi^-$ маємо $I_\Pi = 0$.

Взаємозв'язок величин, що характеризують повноту інформованості I_Π , можна зобразити у вигляді схеми (рис. 7.1).

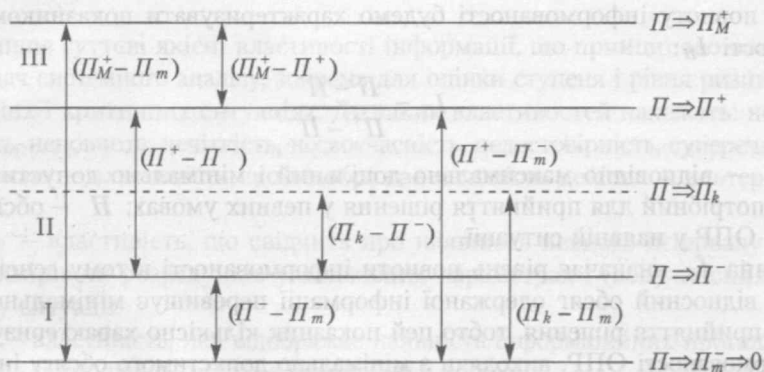


Рис. 7.1. Схема взаємозв'язку величин, що характеризують повноту інформованості I_Π

На рис. 7.1 введено такі позначення: $\Pi = \Pi_m^-$ — рівень повної відсутності інформації про фактори заданої множини ситуацій; $\Pi = \Pi^-$ — рівень мінімально допустимого обсягу інформації для прийняття рішення у певних умовах; $\Pi = \Pi^+$ — рівень максимально доцільного обсягу інформації для прийняття рішення у певних умовах; $\Pi = \Pi_m^+$ — рівень максимально повної інформації про фактори заданої множини ситуацій; $\Pi = \Pi_k$ — рівень, що відповідає k -й ситуації заданої множини.

Тут також виділено такі області:

- ♦ область I відповідає рівневі інформації в інтервалі $[\Pi_m^-, \Pi^-]$, що визначає *область недостатньої повноти інформованості ОНР*;
- ♦ область II відповідає рівневі інформації в інтервалі $[\Pi^-, \Pi^+]$, що визначає *область раціональної повноти інформованості ОНР*;
- ♦ область III відповідає рівневі інформації в інтервалі $[\Pi^+, \Pi_m^+]$, що визначає *область надмірної повноти інформованості ОНР*.

У загальному випадку рівень повноти інформованості ОПР залежатиме від того, якій із трьох зазначених областей відповідає рівень інформації Π_k (для k -ї конкретної аналізованої ситуації), яка ймовірність «влучення» кожної ситуації в задану множину ситуацій.

Значення $(\Pi^- - \Pi_m^-)$ визначає *рівень дефіциту інформації*, а $(\Pi_M^+ - \Pi^+)$ — *рівень надмірності інформації* для прийняття рішення. Як видно зі схеми (рис. 7.1), показник повноти інформованості I_{Π} доцільно використовувати для характеристики області II. Тому для областей I і III введемо додаткові показники:

- ♦ показник надлишкової повноти інформованості I_{Π}^+ :

$$I_{\Pi}^+ = \frac{\Pi_M^+ - \Pi^+}{\Pi^+ - \Pi^-};$$

- ♦ показник дефіциту повноти інформованості I_{Π}^- :

$$I_{\Pi}^- = \frac{\Pi^- - \Pi_m^-}{\Pi^+ - \Pi^-}.$$

Очевидно, що коли $\Pi_m^- = 0$, маємо $I_{\Pi}^- = \frac{\Pi^-}{\Pi^+ - \Pi^-}$.

Зазначимо, що в наведених означеннях не можна пропускати слово «повнота» і вживати терміни «показник надмірності інформованості» і «показник дефіциту інформованості», оскільки рівень надмірності та дефіциту інформованості залежить не тільки від рівня повноти інформації, але й від інших її властивостей — достовірності, своєчасності тощо.

7.2.2. Формалізація показника своєчасності інформованості

Тепер проаналізуємо властивість *своєчасності інформованості*. Ця властивість випливає з поняття «несвоєчасність інформованості», що йому протилежна. Проаналізуємо її за допомогою схеми (рис. 7.2).

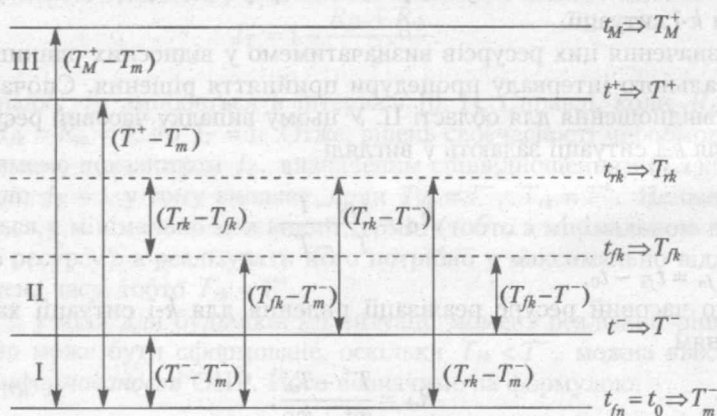


Рис. 7.2. Схема взаємозв'язку величин, що характеризують своєчасність інформованості I_T

На рис. 7.2 вжито такі позначення: t_0 — момент одержання інформації; t^- — момент закінчення процедури формування рішення за умови, що тривалість цієї процедури T^- ; t^+ — момент закінчення процедури формування рішення за умови, що тривалість цієї

процедури T^+ ; t_{rk} — момент реалізації рішення для k -ї ситуації; t_{fn} — момент початку формування рішення для k -ї ситуації; t_{fk} — момент закінчення формування рішення для k -ї ситуації; T^- — мінімально можлива тривалість періоду формування рішення для заданої множини ситуацій; T^+ — максимально можлива тривалість періоду формування рішення для заданої множини ситуацій; T_{rk} — тривалість періоду від моменту початку формування рішення до моменту його реалізації для певної k -ї ситуації; T_M^+ — максимально можлива для заданої множини ситуацій тривалість періоду від моменту початку формування рішення до моменту його реалізації, тобто T_M^+ — максимум T_{rk} на множині ситуацій; T_m^- — мінімально можлива для заданої множини ситуацій тривалість періоду від моменту початку формування рішення до моменту його реалізації, тобто T_m^- — мінімум T_{rk} на множині ситуацій; T_{fk} — тривалість періоду від моменту початку формування рішення k -ї ситуації до моменту його закінчення.

Вважаємо, що момент початку формування рішення збігається з моментом одержання інформації $t_{fn} = t_0$.

Виділимо три області:

- ♦ область *I* відповідає $t \in [T_m^-, T^-]$ і є областю *несвоєчасності інформованості ОПР*, оскільки $t_{rk} < T^-$ і, отже, неможливо навіть за мінімально допустимий час сформувати рішення;
- ♦ область *II* відповідає $t \in [T^-, T^+]$ і є областю *ризикованої своєчасності* в тому сенсі, що є певний ризик, що інформація буде несвоєчасною;
- ♦ область *III* відповідає $t \in [T^+, T_M^+]$ — це область *гарантованої своєчасності*, оскільки для кожного t_{rk} виконується умова $t_{rk} > T^+$.

Перейдемо до формалізації показника, що кількісно характеризує своєчасність інформованості ОПР. Цей показник є співвідношенням між часовим ресурсом формування рішення і часовим ресурсом його реалізації. Під *часовим ресурсом формування рішення* для k -ї ситуації із заданої множини ситуацій будемо розуміти період часу від моменту одержання інформації t_0 до моменту закінчення формування рішення t_{fk} для k -ї ситуації. *Часовий ресурс реалізації рішення* для k -ї ситуації із заданої множини ситуацій — період часу від моменту одержання інформації t_0 до моменту реалізації рішення t_{rk} для k -ї ситуації.

Кількісні значення цих ресурсів визначатимемо у відносних одиницях, нормуючи щодо максимального інтервалу процедури прийняття рішення. Спочатку одержимо відповідні співвідношення для області II. У цьому випадку часовий ресурс формування рішення для k -ї ситуації задають у вигляді

$$R_{fk} = \frac{T_{fk} - T^-}{T^+ - T^-}, \quad (7.4)$$

де $T_{fk} = t_{fk} - t_{fn} = t_{fk} - t_0$.

Аналогічно часовий ресурс реалізації рішення для k -ї ситуації характеризують співвідношенням

$$R_{rk} = \frac{T^+ - T_{rk}}{T^+ - T^-}, \quad (7.5)$$

де $T_{rk} = t_{rk} - t_0$.

Слід звернути увагу на одну особливість нормування для співвідношень (7.4) і (7.5). У формулі (7.4) припускаємо, що витрати часу на формування рішення мають бути мінімальними, тобто доцільно, щоб ресурс на формування рішення був якнайменшим.

Мінімально допустимий час в області II на формування рішення дорівнює T^- , отже, чисельник у формулі (7.4) показує, наскільки T_{fk} відрізняється від мінімально можливого значення t на інтервалі $[T^-, T^+]$ і визначає різницю між витратами часу на формування рішення для k -ї ситуації та мінімально можливим значенням t .

Нормування у співвідношенні (7.5) вибрано з інших міркувань. Для ОПР бажано, щоб момент реалізації рішення настав якнайпізніше, оскільки в цьому випадку є більше часу на формування рішення. Тому бажано, щоб T_{rk} було якомога ближчим до максимально можливого значення t на розглянутому інтервалі $[T^-, T^+]$. Чисельник у формулі (7.5) визначає абсолютну різницю T_{rk} від T^+ , і загалом R_{rk} визначає відносно різницю T^+ від T_{rk} .

Перейдемо до формалізації показника своєчасності інформованості ОПР. Відобразимо його на основі таких фізичних передумов: інформування буде своєчасним, якщо момент реалізації рішення t_{rk} настає не раніше, ніж сформується рішення, тобто не раніше від моменту t_{fk} . Тоді цей показник можна виразити через тривалість відповідних періодів:

$$I'_T = \frac{T_{rk} - T_{fk}}{T^+ - T^-}. \quad (7.6)$$

Відобразимо I'_T через введені часові ресурси R_{fk} і R_{rk} за допомогою перетворень

$$I'_T = \frac{T_{rk} - T^+ + T^+ - T^- + T^- - T_{fk}}{T^+ - T^-},$$

звідки випливає, що $I'_T = 1 - R_{fk} - R_{rk}$.

Легко побачити, що I'_T змінюється на інтервалі $[-1; 1]$. Справді, для $T_{fk} = T^+$ маємо $R_{fk} = 1$, $T_{rk} = T^-$, $R_{rk} = 1$, отже, $I'_T = -1$. Якщо $T_{fk} = T^-$, то $R_{fk} = 0$, $T_{rk} = T^+$, $R_{rk} = 0$, тому $I'_T = 1$.

Цей інтервал незручний для характеристики своєчасності інформованості, оскільки недостатній рівень інформованості ОПР характеризує від'ємне значення. Доцільно, щоб цей показник змінювався в інтервалі $[0; 1]$. Заміною змінних $I'_T = 2I_T - 1$ переходимо до показника I_T , який визначає співвідношення

$$I_T = 1 - \frac{R_{fk} + R_{rk}}{2}. \quad (7.7)$$

У цьому випадку I_T змінюється в інтервалі $[0; 1]$. Справді, коли $R_{fk} = R_{rk} = 1$, то $I_T = 0$, а коли $R_{fk} = R_{rk} = 0$, то $I_T = 1$. Отже, рівень своєчасності інформованості ОПР характеризуватимемо показником I_T , визначеним співвідношенням (7.7).

Зазначимо, що $I_T = 1$ у тому випадку, коли $T_{fk} = T^-$, $T_{rk} = T^+$. Це означає, що рішення формується у мінімально можливий термін (тобто з мінімальною витратою заданого часового ресурсу), а реалізувати його потрібно у максимально віддалений для цієї області момент часу, тобто $T_{rk} = T^+$.

Для області I, у якій для будь-якої k -ї ситуації момент реалізації рішення настає раніше, ніж воно може бути сформоване, оскільки $T_{rk} < T^-$, можна ввести показник *несвоечасності інформованості* ОПР. Його визначимо за формулою:

$$I_T = \frac{T^- - T_m}{T^+ - T^-}. \quad (7.8)$$

Для області III, у якій $T_{rk} > T^+$, тобто гарантовано, що момент реалізації рішення настане пізніше, ніж завершиться його формування за максимально можливою тривалістю,

введемо показник рівня розвитку своєчасності інформованості. Кількісно його визначимо у вигляді:

$$I_T^+ = \frac{T_M^+ - T^+}{T^+ - T^-}. \quad (7.9)$$

Змістовно величина I_T^+ у відносних одиницях визначає, наскільки рівень своєчасності інформованості в області III переважає найкращий результат в області II. Справдливо, найкращий результат в області II – значення $I_T = 1$. Перетворимо співвідношення (7.9):

$$I_T^+ = \frac{T_M^+ - T^- - T^+ + T^-}{T^+ - T^-} = \frac{T_M^+ - T^-}{T^+ - T^-} - 1. \quad (7.10)$$

Оскільки $T_M^+ > T^+$, то $\frac{T_M^+ - T^-}{T^+ - T^-} > 1$, а різниця показує, наскільки I_T^+ більше від максимального значення $I_T = 1$.

Тепер, після введення показників для всіх областей, потрібно докладніше проаналізувати властивості області II. Це зумовлено тим, що область має особливість: за певних умов для довільної k -ї ситуації із заданої множини ситуацій може бути реалізована одна з таких альтернатив:

- ♦ своєчасність інформованості гарантована з деяким резервом часу;
- ♦ своєчасність інформованості забезпечена;
- ♦ своєчасність інформованості не забезпечена.

Запишемо множину ситуацій у вигляді

$$S_0 = \{S_k | k = \overline{1, N_S}\}. \quad (7.11)$$

Проаналізуємо умови реалізації кожної із зазначених альтернатив.

7.2.3. Класифікація множини ситуацій за показником своєчасності інформованості

Для визначення умов реалізації кожної із зазначених альтернатив насамперед потрібно із заданої множини альтернатив виділити ситуації, що за властивістю своєчасності інформованості належать до областей I, II, III. Для цього задану множину ситуацій S_0 класифікуємо на підмножини, у кожній з яких виконується тільки одна із зазначених раніше умов своєчасності інформованості. Із множини S_T , де індекс «Т» означає, що класифікація ведеться за властивістю своєчасності інформованості, виділимо підмножини з такими властивостями:

$$\begin{aligned} S_{T_1} &= \{S_{k_1} \in S_0 | T_m^- \leq T_{rk_1} < T^-, k_1 = \overline{1, N_{T_1}}\}; \\ S_{T_2} &= \{S_{k_2} \in S_0 | T^- \leq T_{rk_2} \leq T^+, k_2 = \overline{1, N_{T_2}}\}; \\ S_{T_3} &= \{S_{k_3} \in S_0 | T^+ < T_{rk_3} \leq T_M^+, k_3 = \overline{1, N_{T_3}}\}; \\ N_{T_1} + N_{T_2} + N_{T_3} &= N_T, \end{aligned} \quad (7.12)$$

де S_{T_1} , S_{T_2} , S_{T_3} – підмножини ситуацій, для яких рівень своєчасності інформованості визначають відповідно області I, II, III. Властивості підмножин S_{T_1} і S_{T_3} розглянуто раніше. Підмножина S_{T_1} визначає ситуації, для яких своєчасність інформованості не забезпечена, а S_{T_3} – ситуації, для яких своєчасність гарантована з деяким резервом

часу. Зазначимо, що рівень своєчасності інформованості для цих підмножин визначають, як показано раніше, так: для $S_{T_1} : I_T = 0$; для $S_{T_2} : 0 \leq I_T \leq 1$; для $S_{T_3} : I_T \geq 1$.

Нагадаємо, що $I_T > 1$ означає наявність резерву часу для формування рішення, оскільки $T_{rk} \geq T^+$ (тобто тривалість від моменту одержання інформації до моменту реалізації рішення більша, ніж максимальний час на формування рішення).

Проаналізуємо множину S_{T_2} , властивості якої за своєчасністю інформованості характеризує область II. Виділимо в S_{T_2} підмножини, що різняться співвідношеннями тривалості періоду формування рішення:

$$\begin{aligned} S_{T_{21}} &= \{S_{k_{21}} \in S_{T_2} \mid T_{fk_{21}} > T_{rk_{21}}, k_{21} = \overline{1, N_{T_{21}}}\}; \\ S_{T_{22}} &= \{S_{k_{22}} \in S_{T_2} \mid T_{fk_{22}} = T_{rk_{22}}, k_{22} = \overline{1, N_{T_{22}}}\}; \\ S_{T_{23}} &= \{S_{k_{23}} \in S_{T_2} \mid T_{fk_{23}} < T_{rk_{23}}, k_{23} = \overline{1, N_{T_{23}}}\}, \end{aligned} \quad (7.13)$$

де $S_{T_{21}}$ — підмножина ситуацій, для яких тривалість періоду формування рішення перевищує тривалість періоду його реалізації. Під *періодом реалізації* будемо розуміти інтервал від моменту одержання інформації до моменту реалізації рішення. Підмножина $S_{T_{22}}$ — підмножина таких ситуацій, для яких період формування рішення дорівнює періоду його реалізації, тобто момент реалізації рішення збігається з моментом закінчення його формування. Підмножина $S_{T_{23}}$ — це підмножина таких ситуацій, для яких період формування рішення менший від періоду реалізації, тобто формування рішення для будь-якої ситуації заданої множини завершується раніше, ніж настає момент його реалізації.

Із властивостей областей I—III випливає, що підмножина $S_{T_{21}}$ за своїми властивостями збігається з множиною S_{T_1} в тому сенсі, що своєчасність інформованості не забезпечена для $S_k \in S_{T_{21}}$ і $S_k \in S_{T_1}$. Підмножина $S_{T_{22}}$ складається із ситуацій, для яких забезпечена своєчасність інформованості, але без наявності резерву часу. Підмножина $S_{T_{23}}$ — це підмножина таких ситуацій, для яких гарантована своєчасність інформованості з деяким резервом часу.

Множину S_0 за системою ознак, визначених співвідношеннями (7.12) і (7.13), можна поділити на дві підмножини S_T^+ і S_T^- , де S_T^+ — підмножина, для елементів якої можлива своєчасність інформованості ОПР; S_T^- — підмножина, для елементів якої неможливо забезпечити своєчасність інформованості. Ураховуючи властивості введених раніше підмножин, запишемо

$$S_T^+ = S_{T_3} \cup S_{T_{22}} \cup S_{T_{23}}; \quad S_T^- = S_{T_1} \cup S_{T_{21}}. \quad (7.14)$$

Звідси випливає, що для оцінювання показника своєчасності інформованості ОПР в умовах заданої множини ситуацій насамперед треба розв'язати задачу розпізнавання, а саме: для кожної певної ситуації визначити, до якої із уведених раніше множин вона належить.

7.2.4. Формалізація показника достовірності інформованості

Перейдемо до формалізації третьої властивості інформованості ОПР — *достовірності*. У цьому разі під *достовірністю інформованості* ОПР будемо розуміти властивість, яка характеризує ступінь відповідності інформації, одержаної ОПР, реальному стану ситуації. Достовірність інформованості розглядатимемо як інтегральну властивість у широкому розумінні, тобто як властивість, обернену до недостовірності інформованості, вважаючи, що остання зумовлена впливом низки факторів — неповноти, неточності, суперечливості, нечіткості, невизначеності вихідної інформації.

Для аналізу цієї властивості скористаємося схемою (рис. 7.3), на якій подано різні рівні достовірності інформованості. На схемі введено такі позначення: D_m^- — рівень, який відповідає браку яких-небудь знань про аналізовану множину ситуацій; D_M^+ — рівень, що відповідає повному, точному, несуперечливому знанню про аналізовану множину ситуацій; D^+ — максимальний практично доцільний рівень достовірності інформованості на заданій множині ситуацій; D^- — мінімальний практично доцільний рівень достовірності інформованості на заданій множині ситуацій; D_k — значення достовірності інформованості про k -ту ситуацію із заданої множини ситуацій.

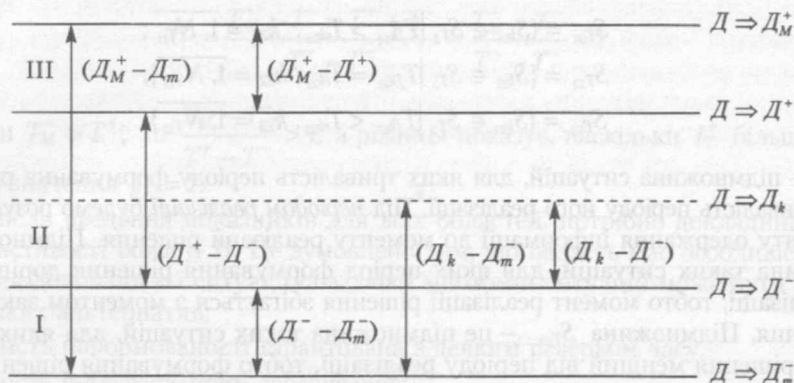


Рис. 7.3. Схема подання різних рівнів достовірності інформованості I_d

Рівні D_M^+ , D_m^- — граничні, потенційно можливі рівні достовірності інформованості, причому D_m^- — практично недоцільний, а D_M^+ — практично недосяжний через обмеженість інструментарію за точністю, роздільною здатністю, іншими подібними характеристиками.

Аналогічно до прийнятого раніше прийому виділимо три області:

- ♦ область I відповідає інтервалу $D \in [D_m^-, D^-]$ і визначає область неприйнятності рівня достовірності інформованості;
- ♦ область II відповідає інтервалу $D \in [D^-, D^+]$ і визначає область практично доцільної достовірності інформованості;
- ♦ область III відповідає інтервалу $D \in [D^+, D_M^+]$ і визначає область потенційної достовірності інформованості.

Уведемо показники достовірності інформованості для кожної області.

Для області I уведемо показник рівня дефіциту достовірності інформованості:

$$I_{d-} = \frac{D^- - D_m^-}{D^+ - D^-}. \quad (7.15)$$

Для області II — показник рівня достовірності інформованості:

$$I_d = \frac{D_k - D^-}{D^+ - D^-}. \quad (7.16)$$

Для області III — показник рівня резерву достовірності інформованості:

$$I_d^* = \frac{D_M^+ - D^+}{D^+ - D^-}. \quad (7.17)$$

7.2.5. Класифікація множини ситуацій за показниками повноти і достовірності інформованості

Після введення показників для основних властивостей інформованості, а саме: повноти, своєчасності й достовірності, з метою завершення процедури формалізації класифікуємо множину ситуацій за показниками повноти і достовірності інформованості. Оскільки ці показники за своїми властивостями класифікують ідентично, то розглянемо їх одночасно.

Множину S_0 , визначену співвідношенням (7.11), зобразимо так, щоб введені підмножини ситуацій мали властивості, визначені областями I, II, III за показниками повноти і достовірності інформованості. У такому разі класифікація за цими ознаками аналогічна класифікації, визначеній співвідношенням (7.12).

За властивістю повноти інформованості виділимо в множині S_0 підмножини:

$$\begin{aligned} S_{\Pi_1} &= \{S_{k_1} \in S_0 \mid \Pi_m^- \leq \Pi_{k_1} < \Pi^-, k_1 = \overline{1, N_{\Pi_1}}\}; \\ S_{\Pi_2} &= \{S_{k_2} \in S_0 \mid \Pi^- \leq \Pi_{k_2} \leq \Pi^+, k_2 = \overline{1, N_{\Pi_2}}\}; \\ S_{\Pi_3} &= \{S_{k_3} \in S_0 \mid \Pi^+ < \Pi_{k_3} \leq \Pi_M^+, k_3 = \overline{1, N_{\Pi_3}}\}. \end{aligned} \quad (7.18)$$

Аналогічно за властивістю достовірності інформованості введемо в множину S_0 підмножини вигляду:

$$\begin{aligned} S_{D_1} &= \{S_{k_1} \in S_0 \mid D_m^- \leq D_{k_1} < D^-, k_1 = \overline{1, N_{D_1}}\}; \\ S_{D_2} &= \{S_{k_2} \in S_0 \mid D^- \leq D_{k_2} \leq D^+, k_2 = \overline{1, N_{D_2}}\}; \\ S_{D_3} &= \{S_{k_3} \in S_0 \mid D^+ < D_{k_3} \leq D_M^+, k_3 = \overline{1, N_{D_3}}\}. \end{aligned} \quad (7.19)$$

Зазначимо, що, на відміну від класифікації за властивістю своєчасності, у цьому випадку немає потреби вводити додаткову класифікацію для множин S_{Π_2} і S_{D_2} . Це можна пояснити тим, що для властивості своєчасності інформованості характерний однозначний взаємозв'язок між моментом часу завершення формування рішення і моментом часу його реалізації. Справді, інформування своєчасне, якщо рішення сформовано до моменту, коли потрібно його реалізовувати, і навпаки. Без сумніву, такої суворої залежності для цих властивостей немає. Показники повноти і достовірності в загальному випадку — функції від часу в тому сенсі, що у період між надходженням вихідної інформації і початком формування рішення до його завершення може надійти додаткова інформація, що певним чином змінить (збільшить, якщо інформація достовірна, або зменшить, якщо інформація суперечить вихідній або є дезінформацією) показники повноти і достовірності інформованості. Якщо для аналізованої ситуації змінюються умови, що визначають її належність до області II, то внаслідок цього будуть змінюватися, покращуватися або погіршуватися, показники інформованості у сенсі повноти і (або) достовірності інформованості. У найзагальнішому випадку необхідно характеристики Π_k і D_k вважати функціями від часу, тобто покладати $\Pi_k(t)$, $D_k(t)$ і розглядати зміни цих величин у будь-який момент t від $t_{fk} = t_0 = 0$ до моменту реалізації рішення $t_{rk} = T_{rk}$. Водночас слід урахувувати, що визначальними або, точніше, критичними є два моменти: момент закінчення формування рішення $t = t_{fk} = T_{fk}$; момент реалізації рішення $t = t_{rk} = T_{rk}$. Справді, момент у t_{fk} буде визначено якість сформованого рішення, а в момент t_{rk} — якість реалізованого рішення, тобто якість рішення

у момент його реалізації. Причому в загальному випадку якість рішення може бути неоднаковою у певні моменти, оскільки при $t_{rk} > t_{fk}$ у період від закінчення формування рішення до його реалізації може надійти інформація, що змінить оцінку якості рішення.

І, нарешті, слід звернути увагу на те, що, крім області II, треба ввести класифікації і для множин S_{II_1} і S_{D_1} , оскільки в розглянуті раніше періоди $t \in [0, t_{fk}]$ і $t \in [0, t_{rk}]$ для визначення S_k можливий перехід до області II за показниками повноти й достовірності інформованості. Аналогічно для області III можливий перехід певних ситуацій за властивостями повноти і своєчасності інформованості в область II. Отже, для цих властивостей інформованості наведена класифікація у певний момент часу може змінити всі три підмножини.

Виникає потреба у введенні класифікації за властивостями повноти і достовірності для остаточного результату в момент закінчення формування рішення та в момент його реалізації. Беручи до уваги, що під час формування класифікацій (7.18) і (7.19) не було введено часових обмежень і що змінити рішення можна лише в період його формування (тобто якщо $t \in [0, t_{fk}]$), вважатимемо, що класифікації у вигляді (7.18), (7.19) визначають класи ситуацій за властивостями повноти і достовірності інформованості у момент закінчення формування рішення, тобто для $t = t_{fk}$.

Нехай співвідношення (7.18) і (7.19) визначають класифікацію множини S_0 за показниками повноти і достовірності інформованості ОПР на момент завершення формування рішення. Класифікацію в момент реалізації рішення $t = t_{rk}$ називатимемо класифікацією множини S_0 за повнотою і достовірністю обґрунтування реалізованого рішення, розуміючи під цим, що множину S_0 класифікують на підставі повноти і достовірності інформованості ОПР у момент реалізації рішення, тобто з урахуванням інформації, що надійшла за період після закінчення формування рішення до моменту його реалізації.

Цей вид класифікації за показниками повноти і достовірності обґрунтування реалізованого рішення подамо у такому вигляді:

$$\begin{aligned} S_{II_1}^r &= \{S_{k_1} \in S_0 \mid \Pi_m^- \leq \Pi_{k_1}(t) < \Pi^-, k_1 = 1, \overline{N_{II_1}^r}, t = T_{rk}\}; \\ S_{II_2}^r &= \{S_{k_2} \in S_0 \mid \Pi^- \leq \Pi_{k_2}(t) \leq \Pi^+, k_2 = 1, \overline{N_{II_2}^r}, t = T_{rk}\}; \\ S_{II_3}^r &= \{S_{k_3} \in S_0 \mid \Pi^+ < \Pi_{k_3}(t) \leq \Pi_M^+, k_3 = 1, \overline{N_{II_3}^r}, t = T_{rk}\}; \\ N_{II_1}^r + N_{II_2}^r + N_{II_3}^r &= N_{S_1}; \\ S_{D_1}^r &= \{S_{k_1} \in S_0 \mid \mathcal{D}_m^- \leq \mathcal{D}_{k_1}(t) < \mathcal{D}^-, k_1 = 1, \overline{N_{D_1}^r}, t = T_{rk}\}; \\ S_{D_2}^r &= \{S_{k_2} \in S_0 \mid \mathcal{D}^- \leq \mathcal{D}_{k_2}(t) \leq \mathcal{D}^+, k_2 = 1, \overline{N_{D_2}^r}, t = T_{rk}\}; \\ S_{D_3}^r &= \{S_{k_3} \in S_0 \mid \mathcal{D}^+ < \mathcal{D}_{k_3}(t) \leq \mathcal{D}_M^+, k_3 = 1, \overline{N_{D_3}^r}, t = T_{rk}\}; \\ N_{D_1}^r + N_{D_2}^r + N_{D_3}^r &= N_{S_2}. \end{aligned} \tag{7.20}$$
$$\tag{7.21}$$

Підбиваючи підсумки, зазначимо, що класифікації у формі (7.18) і (7.19) слід вважати основними, за якими можна визначити якість сформованого рішення, а класифікації (7.20) і (7.21) — контрольними у тому сенсі, що вони визначають якість обґрунтування рішення в момент його реалізації.

7.3. Класифікація і розпізнавання ситуацій за інтегральними і частковими показниками інформованості ОПР

Перейдемо до заключного етапу формалізації властивостей інформованості ОПР. У попередніх підрозділах розділу 7 класифіковано ситуації із заданої множини S_0 окремо за властивостями повноти, своєчасності і достовірності інформованості ОПР. У результаті було встановлено їх якісний взаємозв'язок із рівнями повноти, своєчасності і достовірності відповідного рішення. Але цілком очевидно, що сформоване рішення матиме потрібний рівень якості та ефективності, якщо під час його формування одночасно були забезпечені відповідні рівні повноти, достовірності і своєчасності інформованості про наявну ситуацію для мінімізації ступеня і рівня ризику.

У такому разі слід виконати такі дії:

- ♦ сформуванати інтегральний показник інформованості, що враховуватиме ступінь і рівень впливу кожного із уведених показників I_P, I_T, I_D на ступінь досягнення цілей ОПР;
- ♦ запропонувати класифікації заданої множини ситуацій S_0 за єдиною системою взаємозалежних показників I_P, I_T, I_D або за єдиним інтегральним показником інформованості;
- ♦ розробити прийоми і процедури розпізнавання належності певної ситуації S_k із заданої множини ситуацій S_0 до певного класу об'єктів із уведеної класифікації;
- ♦ розробити прийоми і методи оцінювання ступеня та рівня ризику для різних типів ситуацій;
- ♦ за умов виникнення заданої множини ситуацій запропонувати прийоми і процедури зниження ступеня та рівня ризику на основі раціональної стратегії інформованості ОПР у процесі формування рішення.

7.3.1. Властивості та особливості інтегрального показника інформованості

Під час формування інтегрального показника інформованості ОПР слід враховувати певні властивості та особливості введених показників I_P, I_T, I_D . Найважливіші властивості цих показників.

1. Рівень інформованості зростає безперервно від збільшення кожного з показників I_P, I_T, I_D або тільки одного з них.
2. Загальний рівень інформованості у разі збільшення його повноти, достовірності і своєчасності підвищується за нелінійним законом, а саме: приріст рівня інформованості поступово сповільнюється в міру наближення показників повноти, достовірності і своєчасності до їх граничних значень.
3. Рівень інтегрального показника інформованості у разі зменшення значення одного з показників нижче від деякого граничного значення не може бути компенсований завдяки збільшенню значень інших показників.
4. За нульового значення будь-якого з показників I_P, I_T, I_D загальний рівень інформованості також дорівнює нулю.

Перша властивість очевидна: зі зростанням повноти, своєчасності, достовірності інформованості зростають значення I_P , I_T , I_D , а також зростає рівень інформованості ОПР.

Друга властивість впливає із психометричних особливостей людини — здатності одночасно сприймати, запам'ятовувати й аналізувати тільки деякий обсяг нової інформації. Тому з наближенням обсягу наданої інформації до порога сприйняття зростання рівня інформованості ОПР сповільнюється. Ця властивість має велике значення у житті та діяльності людини, і її детально вивчає низка дисциплін насамперед психологія, зокрема такі її розділи, як психофізика, інженерна психологія, психологія праці. Практичну значущість цієї властивості підтверджують такі явища, як наявність больового порога сприйняття людиною сили звуку. Сприйняття змінюється за логарифмічним законом залежно від зростання сили звуку. У житті людині трапляються ті чи інші вияви цієї властивості. Один із них відомий зі статистики: обсяг статистичної вибірки у разі підвищення достовірності на ту саму відносну величину різко зростає з наближенням достовірності до одиниці. Наприклад, із підвищенням достовірності інформації на 10 % (з 0,9 до 0,99) потрібна вибірка майже в 50 разів більша, ніж з 0,8 до 0,88.

Третя і четверта властивості потребують більше докладних пояснень. Розглянемо третю властивість. Зазначимо, що $I_P = 0$ або $I_T = 0$, або $I_D = 0$ буде за рівня повноти, своєчасності або достовірності інформованості про певну ситуацію, меншого від певного мінімального значення, або такого, що дорівнює йому, визначеного значеннями P^* , T^* , D^* . Це означає, що за такої умови кількість інформації не задовольняє задані вимоги щодо її повноти, своєчасності або достовірності. З цією умовою не можна сформулювати рішення з потрібним рівнем якості.

Пояснимо сказане на прикладах. Якщо надана ОПР інформація абсолютно достовірна, але несвоечасна, то прийняти рішення не можна, і рівень загальної інформованості слід вважати таким, що дорівнює нулю. Наприклад, якщо повну і достовірну інформацію про напад на якийсь об'єкт одержано після нападу, то ставити і розв'язувати задачу щодо організації захисту об'єкта безглуздо. Аналогічно, якщо вчасно одержано повну інформацію, але вона недостовірна, то рівень інформованості ОПР також буде нульовим. Наприклад, якщо вчасно передано повну інформацію про підготовку нападу на об'єкт, але розташування об'єкта зазначено неправильно, зокрема, якщо напад буде здійснено на аналогічний об'єкт з іншим місцерозташуванням, то очевидно, що рішення про посилення охорони першого об'єкта даремне. З цієї властивості випливає висновок: несвоечасність інформованості не можна компенсувати ні рівнем повноти, ні рівнем її достовірності. Аналогічно не можна компенсувати жодну іншу властивість, якщо її показники нижчі від допустимого порога P^* , T^* або D^* .

Зазначені властивості визначають вимогу до інтегрального показника інформованості I , як функції від часткових показників I_P , I_T , I_D , що характеризують відповідно повноту, своєчасність і достовірність інформованості ОПР. Але очевидно, що рівень інформованості залежить не тільки від якісних, але й від кількісних характеристик інформації.

Під час попереднього розгляду означення кількості інформації одержано співвідношення для рівня неінформованості у вигляді

$$H_S = - \sum_{i=1}^{m_S} p_i \log p_i,$$

де m_S — загальна кількість елементів множини M_S , яка об'єднує всі теоретично можливі ситуації; p_i — ймовірність появи ситуації, $p_i \in M_S$. Очевидно, що на практиці

ймовірність деяких ситуацій із множини M_S буде настільки малою, що дозволяє виключити їх із розгляду. Наприклад, теоретично не виключено, що в Україні в середині червня випаде сніг, але ймовірність цієї події настільки незначна, що у разі розв'язання практичних задач для цієї пори року таку ситуацію можна виключити з аналізу. У підсумку одержимо множину S_0 заданих ситуацій, кількість елементів якої $N_S \leq m_S$. Множину S_0 формують на підставі експертних оцінок, статистичного аналізу та інших апіорних знань про ситуації. Усі якісні характеристики інформованості ОПР визначають саме для множини S_0 .

Зазначимо, що величиною, оберненою до неінформованості, буде рівень інформованості I_S , який визначають кількісні характеристики інформації. Тут рівень інформованості введено з таких міркувань: він є мірою можливості аналізу множини S_0 ситуацій. Міру можливості використовують у трактуванні теорії можливості [66].

Якщо про множину S_0 відомий такий обсяг інформації, що є можливість проаналізувати будь-яку ситуацію $S_i \in S_0$, то вважатимемо, що рівень інформованості $I_S = 1$, тобто він є показником можливості аналізу будь-якої ситуації $S_i \in S_0$. Очевидно, що в цьому разі рівень ентропії (рівень неінформованості про множину S_0) дорівнює нулю. Якщо про множину S_0 немає будь-якої інформації, то можливість розв'язання задачі аналізу якої-небудь ситуації з множини S_0 дорівнює нулю, тобто $I_S = 0$, що означає відсутність можливості аналізу будь-якої ситуації з множини S_0 . У цьому випадку ентропія про множину S_0 дорівнює максимальному значенню. Позначимо через H_S^+ максимальне значення ентропії про множину S_0 :

$$H_S^+ = \max H_S.$$

Із цих міркувань випливає, що $I_S = 1$, коли $H_S = 0$, і $I_S = 0$, коли $H_S = H_S^+$, $0 \leq H_S \leq H_S^+$. Уведемо I_S так:

$$I_S = 1 - \frac{H_S}{H_S^+}; \quad I_S = 1 - \left(-\sum_{i=1}^{N_S} p_i \log p_i \right) / H_S^+. \quad (7.22)$$

З умови рівномірності множини позаштатних і критичних ситуацій, якщо немає апіорної інформації, маємо $H_S^+ = \log N_S$.

Тепер перейдемо до формального опису властивостей інтегрального показника I інформованості ОПР. Очевидно, що у загальному випадку він буде залежати від усіх уведених вище показників $I_S, I_{II}, I_T, I_D, I_{II}^+, I_T^+, I_D^+, I_{II}^-, I_T^-, I_D^-$. Однак під час аналізу доцільно окремо розглядати показники інформованості для областей I, II, III.

Спочатку розглянемо область II для всіх часткових показників. Для цього показник інформованості I зобразимо як функцію від часткових показників у вигляді

$$I = f_I(\bar{I}_C), \quad (7.23)$$

де $\bar{I}_C$ — вектор часткових показників, який можна відобразити за допомогою таких еквівалентних форм:

$$\bar{I}_C = \langle I_S, I_{II}, I_T, I_D \rangle; \quad (7.24)$$

$$\bar{I}_C = \{I_q | q = Q_C, Q_C = \overline{1, q_0}\}. \quad (7.25)$$

У такому разі покладемо $q_0 = 4$, але взагалі для всіх областей у співвідношенні (7.25) слід покласти $q = q_\Sigma = 10$ (тобто враховувати всі перелічені часткові показники, зокрема I_{II}^+, I_{II}^- тощо).

Розглянемо особливості функції (7.23), беручи до уваги сформульовані раніше властивості. Перша особливість впливає із порогової властивості часткових показників. Вона полягає в тому, що неможливо компенсувати нестачу одного показника іншими, якщо значення цього показника нижче від порогового рівня. Відповідно до введених меж такими пороговими рівнями є Π^-, T^-, D^- . Звідси випливає, що

$$f_I(\bar{I}_C) = 0 \quad (7.26)$$

за умови, що існує таке $q \in Q_C$, для якого виконується $I_q = 0$.

З формули (7.26) випливає, що функція (7.23) має бути мультиплікативною функцією часткових показників:

$$f_I(\bar{I}_C) = \prod_{q=1}^{q_0} f_q(I_q). \quad (7.27)$$

Або, враховуючи формулу (7.24) як добуток нечітких відношень, це співвідношення зобразимо у вигляді

$$f_I(\bar{I}_C) = f_S(I_S) \circ f_\Pi(I_\Pi) \circ f_T(I_T) \circ f_D(I_D). \quad (7.28)$$

Слід зазначити, що для будь-якого q має виконуватися

$$f_q(I_q) = 0, \text{ для } I_q = 0. \quad (7.29)$$

Друга особливість полягає в тому, що в області Π для показників I_Π, I_T, I_D справедливі обмеження $0 < I_\Pi \leq 1, 0 < I_T \leq 1, 0 < I_D \leq 1$.

Це дає змогу ввести нормування для I , покладаючи $f_I(\bar{I}_C) = 1$, для будь-якого

$$q \in Q_C \Rightarrow I_q = 1. \quad (7.30)$$

Третю особливість функції (7.23) визначає розглянута раніше нелінійна залежність рівня інформованості від кожного з часткових показників, що зумовлено психометричними властивостями людини. Відповідно до цієї особливості кожне співвідношення, що входить до складу мультиплікативної функції (7.27) або (7.28), має бути описане функцією логарифмічного типу

$$f_q(I_q) = \log \left(1 + \sum_{l=0}^{m_q} b_{ql} I_q^l \right) \quad (7.31)$$

або в найпростішому випадку

$$f_q(I_q) = a_q \log(1 + b_q I_q); \quad f_q(I_q) = a_q \ln(1 + b_q I_q). \quad (7.32)$$

І на завершення розглянемо особливості формалізованого опису показника інформованості I , яке впливає з характеру зміни часткових показників I_S, I_Π, I_T, I_D у часі. Тут слід звернути увагу на принципову відмінність характеру зміни в часі показника I_T від інших показників.

Справді, під час формування рішення, що починається в момент $t = t_{fn} = 0$ і закінчується в момент $t = t_{rk}$, надходить додаткова інформація, що зумовлює збільшення повноти, достовірності і кількості інформації. Звідси випливає, що показники I_S, I_Π, I_D в загальному випадку — це зростаючі функції часу. Однак для показника I_T залежність інша, що зумовлено жорстким взаємозв'язком моменту закінчення формування рішення і моменту його реалізації. З огляду на те, що момент реалізації фіксований, і його

визначають зовнішні фактори, можна встановити, що показник своєчасності — спадна функція часу. Наприклад, момент реалізації визначають оголошений певний термін випуску нової продукції, сезонна зміна умов на транспортних магістралях тощо. Це впливає з відомого факту, що зі збільшенням обсягу інформації зростає час на її обробку і, отже, скорочується резерв часу до моменту реалізації рішення. Схематично розглянуті властивості можна зобразити за допомогою рис. 7.4.

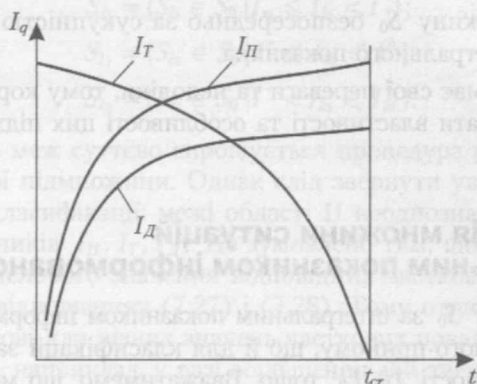


Рис. 7.4. Характер змін якісних характеристик інформованості в часі

Із викладеного випливає, що є суперечності між рівнем повноти і достовірності інформації, з одного боку, і рівнем своєчасності, з другого. Тому практично важлива задача — пошук раціонального компромісу між рівнями $I_П$, I_D і I_T у процесі формування рішення з урахуванням вимоги скорочення часу на його формування.

Для розв'язання цієї задачі потрібно врахувати залежність I_S , $I_П$, I_T , I_D від часу, тобто покласти $I_S = I_S(t)$, $I_П = I_П(t)$, $I_T = I_T(t)$, $I_D = I_D(t)$.

Певну функціональну залежність показників у формулі (7.32) визначають для певної множини ситуацій S_0 . Найзручніше зображати цю залежність у вигляді поліномів. Це дає змогу, по-перше, визначати коефіцієнти поліномів за допомогою відомих методів інтерполяції, по-друге, будь-яку неперервну функцію відповідно до теореми Вейерштрасса можна апроксимувати поліномом із будь-якою наперед заданою точністю. Тому надалі покладатимемо:

$$I_П(t) = \sum_{k=0}^{N_П} a_П t^k; \quad I_D(t) = \sum_{k=0}^{N_D} a_D t^k; \quad I_T(t) = \sum_{k=0}^{N_T} a_T t^k; \quad I_S(t) = \sum_{k=0}^{N_S} a_S t^k. \quad (7.33)$$

Отже, показник інформованості I для області Π визначають співвідношення (7.23), (7.27), (7.31), (7.33). Показники $I_П^-, I_П^+, I_T^-, I_T^+, I_D^-, I_D^+$ доцільно використовувати для формування обмежень в оптимізаційних задачах.

Перейдімо до аналізу задачі класифікації заданої множини S_0 ситуацій за системою показників інформованості. Задача полягає у визначенні, до якого класу за сукупністю показників інформованості належить певна аналізована ситуація. Для цього потрібно виконати два кроки:

- ♦ увести класифікацію множини S_0 ситуацій за показниками інформованості;
- ♦ формалізувати процедуру розпізнавання, що дозволяє визначити, до якого класу належить певна ситуація.

Класифікуємо множину S_0 за сукупністю показників інформованості. У підрозділі 7.2 було розглянуто процедуру класифікації окремо за кожним із показників I_{Π} , I_T , I_D . Тепер треба виконати класифікацію за їх сукупністю.

Тут принципово можливі два підходи.

1. Класифікувати множину S_0 за інтегральним показником інформованості I , що, як показано раніше, поєднує в одне ціле всі часткові показники.
2. Класифікувати множину S_0 безпосередньо за сукупністю часткових показників, не зводячи їх до інтегрального показника.

Кожний із підходів має свої переваги та недоліки, тому коротко розглянемо їх, що дасть змогу проаналізувати властивості та особливості цих підходів й одержати порівняльні оцінки.

7.3.2. Класифікація множини ситуацій за інтегральним показником інформованості

Класифікувати множину S_0 за інтегральним показником інформованості доцільно з використанням такого самого прийому, що й для класифікації за окремими частковими параметрами інформованості I_{Π} , I_D тощо. Вважатимемо, що можливі значення показника I розміщені у трьох областях, як це зображено на рис. 7.5.

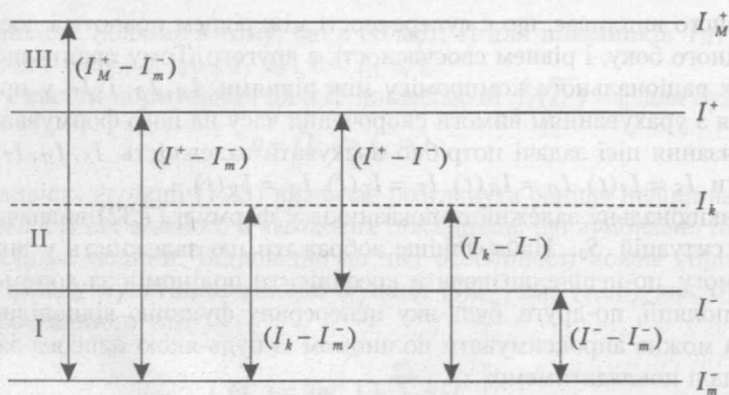


Рис. 7.5. Схема класифікації множини S_0 за інтегральним показником інформованості

Тут I_k — інтегральний показник інформованості k -ї ситуації, а значення I_M^+ , I^+ , I^- , I_m^- визначають межі областей.

Вважатимемо, що граничні значення меж областей визначені співвідношеннями (7.26)–(7.30) і відповідають таким значенням окремих показників інформованості:

$$\begin{aligned} I^+ &\Rightarrow I_{\Pi}^+, I_T^+, I_D^+; \\ I_m^- &\Rightarrow I_{\Pi}^- = 0; I_T^- = 0; I_D^- = 0. \end{aligned}$$

Межі I^+ і I^- , що формують область II, визначають із практичних міркувань на підставі оцінок експертів. Вони повинні задовольняти умову

$$1 \leq I^+ < I_M^+; \quad I_m^- \leq I^- < 1.$$

Беручи до уваги, що значення рівня інформованості $I^- = 0$ не має практичного сенсу, а рівень $I^+ = I_M^*$ практично недосяжний, слід покласти:

$$I^+ \in [0, 8; 0, 95]; \quad I^- \in [0, 05; 0, 15]. \quad (7.34)$$

Тоді вихідну множину S_0 можна поділити на три підмножини:

$$\begin{aligned} S_{I_1} &= \{S_{k_1} \in S_0 \mid I_m^- \leq I_{k_1} < I^-\}; \\ S_{I_2} &= \{S_{k_2} \in S_0 \mid I^- \leq I_{k_2} \leq I^+\}; \\ S_{I_3} &= \{S_{k_3} \in S_0 \mid I^+ < I_{k_3} \leq I_M^*\}. \end{aligned} \quad (7.35)$$

За заданих значень меж суттєво спрощується процедура розпізнавання ситуацій і віднесення їх до певної підмножини. Однак слід звернути увагу на одну принципову особливість введеної класифікації: межі області II неоднозначно взаємозалежні з межами часткових показників I_Π , I_I , I_Δ . Це зумовлено тим, що числове значення I залежить не лише від числового значення відповідних часткових показників, але й від вигляду $f_q(I_C)$ у співвідношеннях (7.27) і (7.28). Тому отримані з умови (7.34) значення I^+ і I^- неоднакові для різних значень часткових показників I_C , якщо змінити вигляд функції $f_q(I_C)$, наприклад, у разі збільшення або зменшення степеня полінома у формулі (7.31). Ця обставина ускладнює процедуру зіставлення різних розв'язків.

Друга особливість цієї класифікації полягає в тому, що не можна однозначно визначити, чи є множина S_{I_2} об'єднанням тільки множин $S_{\Pi_2} \cup S_{\Delta_2} \cup S_{I_2}$, чи вона є об'єднанням інших множин, а саме: $S_{\Pi_3} \cup S_{\Delta_2} \cup S_{I_2}$ або $S_{\Pi_2} \cup S_{\Delta_3} \cup S_{I_2}$ тощо, тобто якщо підмножина за одним частковим показником відповідає області II, за другим — області III, а за третім — області II або III. При цьому недостачі за одним окремим показником частково компенсуються важливішими властивостями інших показників.

7.3.3. Класифікація множини ситуацій за сукупністю часткових показників інформованості

Розглянемо класифікацію за системою часткових показників. При цьому слід звернути увагу на таку особливість. Класифікація за кількома показниками потребує відповіді на такі запитання.

1. До якого класу або підмножини слід віднести аналізовану ситуацію, якщо за одним показником вона належить до одного класу, за другим — до другого, за третім — до третього?
2. Чи можна обмежитися тільки трьома класами (підмножинами), чи потрібно вводити один або кілька додаткових класів (підмножин), що відповідають різним поєднанням підмножин за частковими показниками?

Відповіді на ці запитання сформулюємо в процесі виконання процедури формалізації. Очевидно, найпростіше ввести підмножини за сукупністю показників для найпростішого окремого випадку, коли елементи, що входять до них, відповідають однаковим областям I, II або III за всіма показниками. З урахуванням цих умов уведемо підмножини:

$$\begin{aligned} S_{\Sigma_1} &= \{S_{k_1} \in S_0 \mid I_{mq}^- \leq I_q < I_q^-, \forall q \in Q_C\}; \\ S_{\Sigma_2} &= \{S_{k_2} \in S_0 \mid I_q^- \leq I_q \leq I_q^+, \forall q \in Q_C\}; \\ S_{\Sigma_3} &= \{S_{k_3} \in S_0 \mid I_q^+ < I_q \leq I_{Mq}^*, \forall q \in Q_C\}, \end{aligned} \quad (7.36)$$

де I_q визначене співвідношеннями (7.24) і (7.25). Звернімо увагу на те, що відповідно до формули (7.26) інтегральний показник інформованості дорівнюватиме нулю ($I = 0$), якщо існує $q \in Q_C$, для якого $I_q = 0$. Але коли $I_q = 0$ і з урахуванням класифікації за кожним із часткових показників, рівень за відповідним показником елемента $S_k \in S_0$ буде меншим від мінімально необхідних рівнів I_{Π} , I_{Δ} чи I_{Γ} . Цей елемент належатиме до підмножини S_{Π} , S_{Δ} або S_{Γ} . Тому слід узяти до уваги, що у випадках, коли для деякої ситуації виконується умова $I_q = 0$ для кожного $q \in Q_C$, ця ситуація належить до підмножини S_{Σ_1} . Така обставина дає змогу підтвердити умову належності розглянутої ситуації S_{k_1} до S_{Σ_1} . Отже, елемент $S_{k_1} \in S_{\Sigma_1}$, якщо хоча б для одного q виконується умова $I_q < I_{\Gamma}$, з урахуванням того, що I_q — фізично невід'ємна величина ($I_q \geq 0$). Тоді множину S_{Σ_1} можна подати у вигляді

$$S_{\Sigma_1} = \{S_{k_1} \in S_0 \mid q \in Q_C \Rightarrow I_{mq} \leq I_q \leq I_{\Gamma}\}. \quad (7.37)$$

Далі розглянемо випадки, коли за одним показником виконується умова, що відповідає S_{Σ_2} , а за іншими показниками — S_{Σ_3} . При цьому важливо визначити, чи потрібно поділяти підмножини S_{Σ_2} та S_{Σ_3} , чи доцільно їх об'єднувати, оскільки для елементів як підмножини S_{Σ_2} , так і підмножини S_{Σ_3} виконується умова достатності інформованості. Але у разі об'єднання S_{Σ_2} і S_{Σ_3} буде втрачено інформацію про структуру часткових показників інформованості. Тому доцільно ввести двосторонню класифікацію: на першому рівні відкидати ті ситуації, що належать до підмножини S_{Σ_1} , а на другому — виділяти ситуації, що належать до підмножин S_{Σ_2} і S_{Σ_3} , а також до підмножини $S_{\Sigma_{21}}$, яка має такий вигляд:

$$S_{\Sigma_{21}} = \{S_{k_{21}} \in S_0 \mid q' \in Q_C \Rightarrow I_{q'} > I_{\Gamma}^+, q'' \in Q_C \setminus q' \Rightarrow I_{q''} \in [I_{\Gamma}^-, I_{\Gamma}^+]\}. \quad (7.38)$$

Отже, підмножина $S_{\Sigma_{21}}$ складається з елементів $S_{k_{21}} \in S_0$, для яких один із часткових показників лежить в інтервалі, що відповідає області III для цього показника, а інші — в інтервалі, що відповідає області II.

Визначимо підмножину $S_{\Sigma_{31}}$, що складається з елементів $S_{k_{31}} \in S_0$, для яких один із часткових показників лежить в інтервалі, що відповідає області II, а інші — в інтервалах, що відповідають області III кожного з показників.

$$S_{\Sigma_{31}} = \{S_{k_{31}} \in S_0 \mid \begin{array}{l} q' \in Q_C \Rightarrow I_{q'} \in [I_{\Gamma}^-, I_{\Gamma}^+], \\ q' \in Q_C \setminus q' \Rightarrow I_{q'} \in [I_{\Gamma}^+, I_{\Delta}^+], \end{array} \}. \quad (7.39)$$

Такий підхід до класифікації за сукупністю показників дає змогу уникнути недоліків класифікації за інтегральним показником інформованості, наведених вище. Однак він може бути більш трудомістким, якщо не обмежуватися тільки відкиданням ситуацій, які належать підмножині S_{Σ_1} . Якщо ж є можливість обмежитися тільки відкиданням $S_{k_1} \in S_{\Sigma_1}$, то такий підхід менш трудомісткий порівняно із підходом, що ґрунтується на класифікації за інтегральним показником, оскільки не потребує обчислення функцій типу (7.31) і (7.27).

Тепер перейдемо до формалізації процедури розпізнавання ситуацій і віднесення їх до певних класів. Формалізацію виконаємо в такій самій формі, як і для класифікації за інтегральним показником і за сукупністю часткових показників.

7.4. Розпізнавання ситуацій за умов нечіткої інформації

Потреба розпізнавати властивості та особливості наявних ситуацій характерна для різних сфер практичної діяльності. Для таких задач найважливіші три типи розпізнавання ситуацій: за умов повної визначеності вихідної інформації; за умов неповноти і нечіткості інформації; у процесі зміни інформованості ОПР. Розглянемо формулювання цих задач.

7.4.1. Математичні формулювання задач розпізнавання ситуацій

Задача 1. Розпізнавання ситуацій за умов повної визначеності вихідної інформації

Задано: поділ множини S_0 на скінченну кількість класів (підмножин) Ω_r , $r = \overline{1, R_0}$, $\bigcup_{r=1}^{R_0} \Omega_r = S_0$. Кожну підмножину характеризує визначена за кількістю і якістю інформація про властивості або ознаки елементів. Ситуацію S_k характеризує деяка інформація I_k , для якої можна визначити її якісні характеристики I_q із заданого класу характеристик $q \in Q_C$. Кожна величина I_q може набувати фіксованих значень із заданої множини допустимих значень $I_q \in [I_{mq}^-, I_{mq}^+]$.

Потрібно: за заданою інформацією I_k про ситуації S_k визначити, до якого класу (підмножини) Ω_r вона належить.

Наведене формулювання відповідає чітко заданим межах кожної підмножини $\Omega_r \in S_0$ і чітко заданій інформації про кожну ознаку (або характеристику) I_q , що міститься в наявній інформації I_k про аналізовану ситуацію S_k . Розв'язання цієї задачі дає змогу визначити, до якого класу за сукупністю показників інформованості (I_{Π}, I_T, I_d, I_s) належить розглянута ситуація S_k , якщо відома класифікація S_0 (тобто поділ S_0 на класи або підмножини за інтегральним показником інформованості або за сукупністю часткових показників). Залишаючи поки що відкритим питання про те, за допомогою яких прийомів і методів доцільно розв'язувати цю задачу, зазначимо, що вона має швидше теоретичне, ніж практичне значення. Це зумовлено такими факторами:

- ♦ на практиці інформація про певну ситуацію, наприклад, у задачах взаємодії або протидії суб'єктів характеризується неповнотою, неточністю, суперечливістю про зовнішні фактори (природні умови, зміни процесів на ринку попиту і збуту), про задуми протидіючої сторони тощо;
- ♦ інформація про певну ситуацію безперервно оновлюється, причому оновлена інформація може уточнювати попередню (тобто підвищувати рівень повноти і достовірності), а може заперечувати попередні відомості (тобто зменшувати рівень повноти і достовірності інформації унаслідок суперечливості нових і наявних відомостей).

Тому на практиці слід розв'язувати складнішу задачу розпізнавання, у якій треба враховувати як зміни ситуації, так і неповноту, неточність, суперечливість інформації. Причому зазначені особливості характерні для кожної певної ситуації, оскільки точно її спрогнозувати принципово неможливо. Наприклад, не можна описати всі параметри конкуренції на ринку програмних продуктів поточного року, якщо досвід свідчить, що кожна з конкуруючих фірм зберігає комерційну таємницю про нові розробки та повідомляє про них тільки тоді, коли продукт готовий до продажу, і конкуренти не встигнуть випустити рівноцінну продукцію. Отже, задачу розпізнавання ситуацій слід завжди формулювати з урахуванням неповноти і нечіткості вихідної інформації.

Задача 2. Розпізнавання ситуацій за умов неповноти і нечіткості інформації

Відомо: для заданої множини S_0 ситуацій $S_k \in S_0$ існує поділ на скінченну кількість підмножин (класів) Ω_r , $r = \overline{1, R_0}$, для якої виконується $\bigcup_{r=1}^{R_0} \Omega_r = S_0$. При цьому враховуємо, що поділ визначений не повністю, задано лише деяку неповну нечітку інформацію I_r про класи Ω_r , $r = \overline{1, R_0}$. Опис I_r класу Ω_r може бути набором функцій належності $\mu_{\Omega_r}(\bar{I}_{\Omega_r})$, де $\bar{I}_{\Omega_r}$ — вектор часткових показників інформованості про елементи класу Ω_r , $\bar{I}_{\Omega_r} = \{I_{rq} \mid q \in Q_c\}$. Кожний досліджуваний об'єкт $S_k \in S_0$ описує нечітка інформація, що є набором функцій належності $\mu_k(\bar{I}_k)$, де $\bar{I}_k = \{I_{kq} \mid q \in Q_c\}$ — вектор часткових показників інформованості про об'єкт S_k .

Потрібно: за наявною інформацією $\bar{I}_k$ про ситуації $S_k \in S_0$ визначити, до якого класу Ω_r належить ця ситуація.

У цьому формулюванні задача розпізнавання ситуації загальніша порівняно з розглянутою у підрозділі 7.4.1, оскільки, як відомо з теорії нечітких множин і нечітких відношень, чіткі множини — це окремий випадок нечітких при значеннях функції належності, що дорівнюють одиниці. Водночас це формулювання не враховує характеру зміни кількості та якості інформації у процесі формування рішення.

Наведемо формулювання задачі розпізнавання ситуації з урахуванням процедури формування рішення і зміни інформованості про ситуації S_k .

Задача 3. Розпізнавання ситуацій у процесі зміни інформованості ОПР

Відомо: задана множина ситуацій S_0 зображена у формі розбиття на скінченну кількість класів Ω_r , $r = \overline{1, R_0}$.

Потрібно: за наявною, але неповною інформацією $\bar{I}_k$ про ситуації S_k визначити, до якого класу $\Omega_r \in S_0$ належить S_k у будь-який заданий момент часу $t_{nk} \geq t_0 \geq t_{fk}$ процесу формування рішення, якщо часткові показники інформованості змінюються у часі: $I_q = I_q(t) \forall q \in Q_c$.

7.4.2. Розв'язання задач розпізнавання ситуацій за умов неповноти і нечіткості інформації

Розглянемо розв'язання сформульованих задач, попередньо пояснивши таке. Ці задачі належать до класу задач розпізнавання образів. У сучасній теорії розпізнавання образів цей термін вживають у досить широкому розумінні: деякий структурований наближений опис (ескіз) досліджуваного об'єкта або явища, причому часткова визначеність опису є принциповою властивістю образу. Основне призначення описів — використання у процесі встановлення відповідності об'єктів, тобто в доведенні їх ідентичності, аналогічності, подібності тощо, здійснюваному через порівняння (зіставлення).

Щодо сформульованих задач конкретизуємо термін «опис». Вважатимемо, що кожен клас об'єктів у загальному випадку описують або характеризують.

1. **Певний набір ознак.** Для задач розпізнавання ситуацій таким набором можуть бути часткові показники інформованості у формі (7.25) або ознаки складатимуться з інтегрального показника інформованості I , визначеного співвідношенням (7.23).
2. **Певні числові значення кожної ознаки.** Наприклад, за інтегральним показником інформованості, відповідно до співвідношення (7.35), введено три інтервали для ознаки, кожному з яких відповідає деяка множина ситуацій $S_{I_1}, S_{I_2}, S_{I_3}$. Аналогічно введено класифікації за частковими показниками інформованості. Далі кожний

об'єкт S_k характеризує опис $\bar{I}_k$, який є сукупністю ознак та їхніх значень, наприклад, у формі функції належності для нечітких множин або у вигляді функції, що набуває двох значень: «0» або «1». Значення «0» — ознака не відповідає заданій умові, а значення «1» — відповідає. Іноді вводять функцію, що набуває значень $[1 \wedge 0 \wedge \Delta]$, де Δ — це відсутність інформації про ознаку.

Опис об'єкта $\bar{I}_k(S_k) = \{I_{kq}(S_k) \mid q \in Q_k\}$ називають *стандартним*, якщо всі величини, наприклад $I_{kq}(S_k)$, набувають значень із множини допустимих значень. Для введених показників I_q область допустимих значень визначено інтервалом $[I_{mq}^-; I_{mq}^+]$, де I_{mq}^- , I_{mq}^+ — відповідно значення показника для нижньої межі області I і верхньої межі області III. Інформацію про належність об'єкта S_k до класу Ω_r визначають деякою *функцією належності* $\mu_{\Omega_r}^\alpha(S_k)$ або кодують числом «1» у випадку, якщо об'єкт належить до класу Ω_r , і числом «0», якщо $S_k \notin \Omega_r$. Функція належності $\mu_{\Omega_r}^\alpha(S_k)$ показує, що до класу Ω_r належить такий об'єкт S_k , для якого функція належності за кожним показником I_q має значення не менше від α , тобто $S_k \in \Omega_r$, якщо для всіх I_{kq} виконується

$$\mu_{\Omega_r}^\alpha(I_{kq}) \geq \alpha \quad \forall q \in Q_C.$$

Кодування записують у вигляді інформаційного вектора

$$\beta(S_k) = (\beta_1(S_k), \dots, \beta_r(S_k), \dots, \beta_{R_0}(S_k)),$$

де $\beta_r \in [0 \wedge 1 \wedge \Delta]$, а символ невизначеності Δ означає, що про належність об'єкта до класу Ω_r інформації немає.

Методи розв'язання задач

Розглянемо методи розв'язання сформульованих задач для деяких випадків. Вважатимемо, що існують тільки дві підмножини (класи): Ω_2 — клас ситуацій, для яких інтегральний показник інформованості I набуває значень не нижче від мінімально допустимого рівня; Ω_1 — клас ситуацій, для яких цей показник нижчий за мінімально допустимий рівень.

Ці класи, згідно із введеною раніше системою позначень (7.1)–(7.35), відповідають: Ω_2 — об'єднанню множин S_{I_2} і S_{I_3} , тобто $\Omega_2 = S_{I_2} \cup S_{I_3}$, а Ω_1 — класу S_{I_1} . Така задача належить до найпростіших задач класифікації, її розв'язують, перевіряючи умови, що випливає зі співвідношення (7.35).

Якщо $I_k(S_k) \geq I^-$, то $S_k \in \Omega_2$, інакше — $S_k \in \Omega_1$. Унаслідок, як це випливає з формули (7.35), усю множину S_0 буде поділено на дві підмножини:

$$\Omega_1 = \{S_{k_1} \in S_0 \mid I_k < I^-\}; \quad \Omega_2 = \{S_{k_2} \in S_0 \mid I_k \geq I^-\},$$

а будь-яку аналізовану ситуацію досить просто можна віднести до Ω_1 або Ω_2 .

Складніше розв'язати таку саму задачу для випадку, коли аналізовану ситуацію S_k описує система часткових показників:

$$\bar{I}_k(S_k) = \{I_{kq}(S_k) \mid q \in Q_C\}.$$

У цьому разі для ОПР недостатньо класифікації на два класи, оскільки для нього поставлена мета — не класифікація, а прийняття рішення в будь-якій наявній ситуації, зокрема й тоді, коли рівень інформованості недостатній за одним або кількома показниками. Тоді під час розгляду ОПР ситуацій, віднесених за різними показниками до класу недостатньої інформованості Ω_1 , вони будуть не еквівалентними. Справді, якщо через несвоєчасність надходження інформації S_k належить до класу Ω_1 тільки

за показником I_T , то ОПР повинен проаналізувати такі три альтернативи: чи можна у відведений час сформувати рішення; чи потрібно негайно приймати рішення, попередньо сформоване на підставі прогнозу та аналізу ситуації; або будь-яке рішення для цієї ситуації принципово не можна реалізувати. Наприклад, рішення про оборону об'єкта принципово не можна реалізувати, якщо в момент надходження інформації про напад очевидно, що об'єкт уже знищено. Знищення об'єкта зумовлено тим, що інформація про запуск крилатої ракети надійшла запізно, що суттєво перевищує час польоту ракети.

Якщо ситуацію віднесено до класу Ω_1 за показниками повноти, але вона задовольняє показники своєчасності і достовірності, то не треба розглядати варіант нереалізованості рішення, замість цього потрібно проаналізувати альтернативи: прийняти рішення щодо реалізації заходів для збільшення повноти інформованості або сформувати рішення за умов неповноти інформації.

Процедури класифікації та розпізнавання

Наведені міркування свідчать, що класифікація S_0 на Ω_1 і Ω_2 досить складна і, крім того, як зазначено у підрозділі 7.3, класифікація за інтегральною ознакою I має додаткові недоліки. Тому під час розв'язання задач розпізнавання за системою часткових показників потрібно модифікувати класифікації (7.39) і ввести нові класи, що дасть можливість уточнити, на підставі яких ознак досліджуваній об'єкт віднесено до класу Ω_1 або Ω_2 . Для цього доцільно процедуру класифікації зробити багаторівневою, що дозволить, з одного боку, підвищити точність її виконання і завдяки цьому дати точнішу інформацію ОПР про конкретну ситуацію, а з іншого боку — спростити і прискорити процедуру розпізнавання.

Процедуру розпізнавання, яка полягає у віднесенні до певного класу кожного ієрархічного рівня досліджуваного об'єкта S_k , зводять до послідовної перевірки умов, що визначають властивості відповідних класів. Процедуру розпізнавання проілюстровано схемою (рис. 7.6).

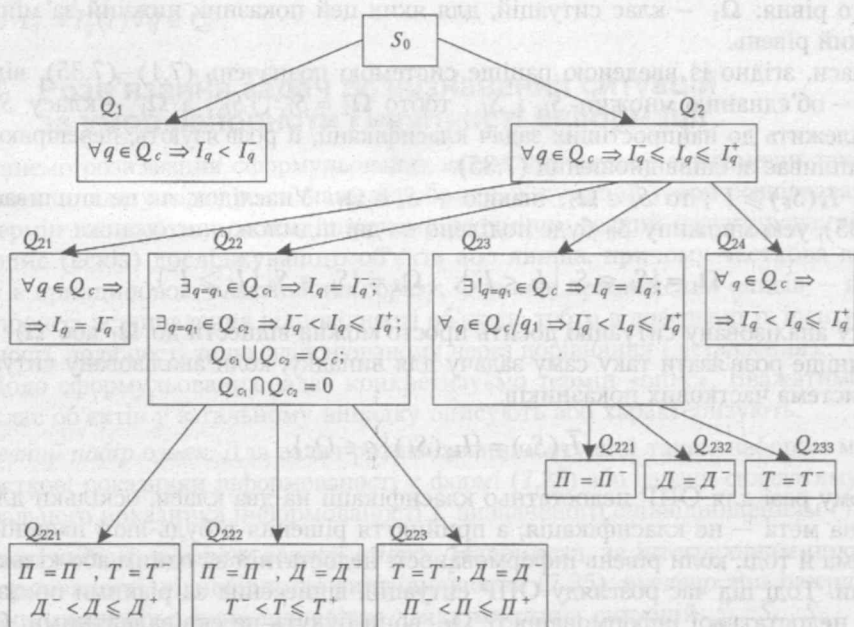


Рис. 7.6. Процедура розпізнавання за частковими показниками інформованості

Розв'яжемо такі дві задачі розпізнавання — для умов неповноти і нечіткості інформації. Слід зазначити, що задача з нечітко заданою інформацією і задача для умов неповноти, невизначеності, неточності й суперечливості інформації суттєво різняться. Водночас математично вони можуть бути зведені до аналогічних процедур.

Розглянемо спочатку задачу з нечітко заданою інформацією. Під час розв'язання цієї задачі потрібно формалізувати такі процедури:

- ♦ *процедуру класифікації множини S_0 з нечітко заданою інформацією про часткові показники інформованості;*
- ♦ *процедуру задання нечіткого відношення, що дасть змогу однозначно зіставляти нечіткий опис класу Ω_r і нечіткий опис досліджуваної ситуації S_k за кожним показником із системи часткових показників інформованості;*
- ♦ *процедуру композиції нечітких відношень, що дозволить однозначно зіставляти S_k і класи Ω_r за системою часткових показників.*

Формалізація процедур

Тепер перейдемо безпосередньо до формалізації зазначених процедур. Множина відношень як чітких, так і нечітких доволі різноманітна і потужна. Але з усього різноманіття відношень нас цікавлять лише бінарні відношення (оскільки порівнюють об'єкт S_k і один із класів Ω_r) і певні операції над відношеннями (оскільки порівняння виконують за сукупністю показників). Очевидно, з цілої низки можливих видів класифікацій найзручніше взяти таку класифікацію, яка за значення функції належності, що відповідає характеристичній функції звичайної множини, збігатиметься з прийнятою раніше багаторівневою класифікацією. Далі, у процедурі класифікації множини S_0 за нечітко заданою інформацією потрібно вирішити питання про вибір рівня порівняння класів, припускаючи, що множина S_0 матиме вигляд об'єднання нечітких множин.

Для виконання цих умов уведемо систему таких нечітких множин, властивості яких опишемо вербально.

$$\begin{aligned} A_{mq}^- &= \{I_q \mid \text{величина } I_q \text{ дуже близька до } I_{mq}^-, \forall q \in Q_c\}; \\ A_q^- &= \{I_q \mid \text{величина } I_q \text{ дуже близька до } I_q^-, \forall q \in Q_c\}; \\ A_q^+ &= \{I_q \mid \text{величина } I_q \text{ дуже близька до } I_q^+, \forall q \in Q_c\}; \\ A_{mq}^+ &= \{I_q \mid \text{величина } I_q \text{ дуже близька до } I_{mq}^+, \forall q \in Q_c\}. \end{aligned} \quad (7.40)$$

Такі співвідношення визначають нечіткі межі, що відповідають чітким межах вигляду $A_{mq}^- \Rightarrow I_{mq}^-$; $A_q^- \Rightarrow I_q^-$; $A_q^+ \Rightarrow I_q^+$; $A_{mq}^+ \Rightarrow I_{mq}^+$.

Кожну з цих нечітких множин зручно подати у вигляді таблиці, причому значення функції належності для різних $q \in Q_c$ можуть бути неоднаковими, але структура множин ідентична. Як обов'язкові умови для структури слід зазначити таке. Оскільки $I_{mq}^- = 0 \quad \forall q \in Q_c$, то кожному множині A_{mq}^- потрібно задавати в абсолютних величинах I_q . Наприклад, для $q = 1$, покладаючи $I_q = I_1$, подамо цю множину як табл. 7.1.

Таблиця 7.1. Значення I_q в абсолютних величинах

I_1	0	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12
$\mu_{A_{m1}^-}$	1	0,99	0,90	0,80	0,70	0,50	0,25	0

Тоді для функції належності $\mu_{A_{m1}}(I_1)$ множини A_{m1}^- можна покласти $I_1 \in V_1$, де $V_1 = [0; 0,12]$, і, припускаючи, що $\mu_{A_{m1}}(I_1)$ визначено з табл. 7.1, зобразити цю множину в стандартному вигляді:

$$A_{m1}^- = \{I_1 \mid I_1 \in V_1, \mu_{A_{m1}}(I_1) \geq 0\}.$$

Для інших множин значення I_q зручно задавати у відносних величинах (табл. 7.2).

Таблиця 7.2. Значення I_q у відносних величинах

γ_q^-	0,90	0,93	0,95	0,98	1	1,02	1,05	1,07	1,1
$\mu_{A_q^-}$	0	0,50	0,70	0,90	1	0,90	0,70	0,50	0

Тут γ_q^- визначає відносне значення I_q для множини A_q^- :

$$\gamma_q^- = \frac{I_q}{I_q^-}.$$

Тоді для множини $A_q^-(I_q)$ можна покласти $I_q = \gamma_q^- I_q^-$, де $\gamma_q^- \in V_q^-$; $V_q^- = [0,9; 1,1]$. Припускаючи, що $\mu_{A_q^-}(\gamma_q^-)$ визначають із табл. 7.2, множину A_q^- можна зобразити у стандартному вигляді так:

$$A_q^- = \{I_q \mid I_q = \gamma_q^- I_q^-; \mu_{A_q^-}(\gamma_q^-) \geq 0\}.$$

Аналогічно можна формалізувати всі інші нечіткі множини, визначені співвідношеннями (7.40). При цьому для множини A_{Mq}^+ потрібно визначати γ_{Mq}^+ на несиметричному інтервалі $[d^+; 1]$, де d^+ — значення γ_{Mq}^+ , за якого $\mu_{A_{Mq}^+}(d^+) = 0$, $d^+ < 1$. Слід зазначити, що формування розглянутих нечітких множин — неформалізована задача в тому сенсі, що табл. 7.1 і 7.2 створюють експерти або генерують на основі статистичної обробки деякого масиву експериментальних даних. Ці таблиці не можна одержати аналітично або на підставі розрахунків.

Враховуючи відомі властивості нечітких множин вигляду (7.40) і задаючи для них таблиці, коли всі $q_c \in Q_c$, можна побудувати нечіткі множини, що описують класифікацію S_0 для класів Ω_r , $r = \overline{1, R_0}$. Подамо множини (7.40) графічно (рис. 7.7):

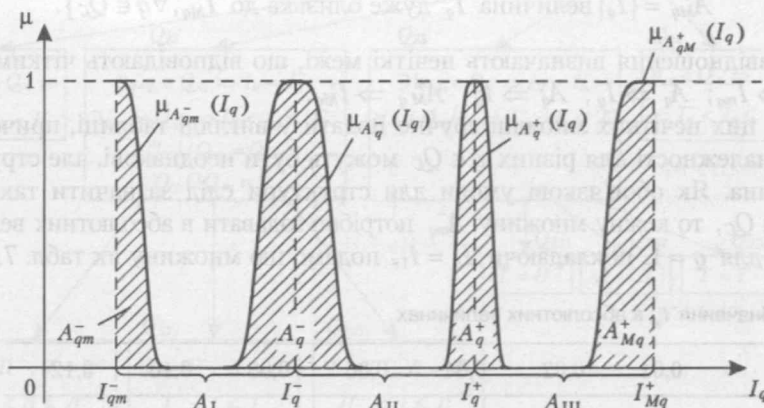


Рис. 7.7. Графічне зображення нечітких множин, описаних вербально співвідношеннями (7.40)

На рисунку зображено:

- ♦ область $A_I \Rightarrow I \in [I_{mq}^-, I_q^-]$;
- ♦ область $A_{II} \Rightarrow I \in [I_q^-, I_q^+]$;
- ♦ область $A_{III} \Rightarrow I \in [I_q^+, I_{Mq}^+]$.

Позначимо нечіткі множини, що відповідають зазначеним областям, символами A_I, A_{II}, A_{III} . Такі множини визначені нечітко заданими межами $A_{mq}^-, A_q^-, A_q^+, A_{Mq}^+$, функції належності яких подано на рис. 7.7. Потрібно одержати математичний опис A_I, A_{II}, A_{III} . З огляду на формулу (7.40), кожному множині A_I, A_{II}, A_{III} визначає множина точок числової осі, що задовольняє відповідні умови:

- ♦ для області A_I : $I_{mq}^- < I_q < I_q^-$;
- ♦ для області A_{II} : $I_q^- < I_q < I_q^+$;
- ♦ для області A_{III} : $I_q^+ < I_q < I_{Mq}^+$,

і має відповідні функції належності.

Отже, у цьому варіанті потрібно за нечітко заданих границь (7.40) одержати опис для інтервалів (або проміжків), що характеризують області A_I, A_{II}, A_{III} .

При цьому мають виконуватися такі обмеження.

1. Змінні I_q для всіх q і для кожної з областей A_I, A_{II}, A_{III} не можуть дорівнювати граничним значенням відповідних інтервалів від I_{mq}^- до I_{Mq}^+ ; отже, шукані нечіткі множини повинні мати нульові значення відповідних функцій належності за I_q , що дорівнюють граничним значенням $I_{mq}^-, I_q^-, I_q^+, I_{Mq}^+$ (рис. 7.7).
2. Слід враховувати, що межі числових множин визначені не фіксованими значеннями (точками), а нечіткими множинами $A_{mq}^-, A_q^-, A_q^+, A_{Mq}^+$, і, отже, поза ними відповідні функції належності шуканих множин мають дорівнювати 1. З цього випливає, що на межах значення функцій належності шуканих нечітких множин визначені як функції належності доповнення до нечітких множин $A_{mq}^-, A_q^-, A_q^+, A_{Mq}^+$. Тому потрібно побудувати доповнення до кожної граничної нечіткої множини $A_{mq}^-, A_q^-, A_q^+, A_{Mq}^+$ у межах відповідних областей A_I, A_{II}, A_{III} .

Для області A_I побудуємо доповнення $A_{mq}^{\prime -}$ і $A_q^{\prime -}$ нечітких множин A_{mq}^- і A_q^- відповідно. Нечітку множину $A_{mq}^{\prime -}$ з урахуванням функції належності вигляду

$$\mu_{A_{mq}^{\prime -}}(I_q) = 1 - \mu_{A_{mq}^-}(I_q)$$

характеризуватиме співвідношення

$$A_{mq}^{\prime -} = \{I_q | I_q \in V_1, \mu_{A_{mq}^{\prime -}}(I_q) = 1 - \mu_{A_{mq}^-}(I_q)\}, \quad (7.41)$$

де I_q визначають на інтервалі області A_I , тобто $I_q \in V_1$, де $V_1 = [I_{mq}^-, I_q^-]$.

Нечітку множину $A_q^{\prime -}$ з урахуванням функції належності вигляду

$$\mu_{A_q^{\prime -}}(I_q) = 1 - \mu_{A_q^-}(I_q)$$

описує співвідношення

$$A_q^{\prime -} = \{I_q | I_q \in V_1, \mu_{A_q^{\prime -}}(I_q) = 1 - \mu_{A_q^-}(I_q)\}. \quad (7.42)$$

Шукану множину A_I визначатимуть множини $A_{mq}^{\prime -}$ і $A_q^{\prime -}$.

Знайдемо перетин нечітких множин A_q^- і A_{mq}^- , позначивши його A_l . Визначимо функцію належності A_l у вигляді:

$$\mu_{A_l} = \mu_{A_{mq}^-}(I_q) \cap \mu_{A_q^-}(I_q) = \min(\mu_{A_{mq}^-}(I_q), \mu_{A_q^-}(I_q)). \quad (7.43)$$

Проаналізуємо співвідношення (7.43) на окремих інтервалах.

1. На інтервалі $[I_{mq}^-, I_{11}]$ маємо $\mu_{A_q^-}(I_q) < \mu_{A_{mq}^-}(I_q)$, отже, функція $\mu_{A_{l1}}$ відповідно до (7.43) задовольняє умову $\mu_{A_{mq}^-}(I_q) < 1$. Тому

$$\mu_{A_{l1}} = \mu_{A_{mq}^-}(I_q) \text{ для } I_q \in [I_{mq}^-, I_{11}].$$

2. На інтервалі $[I_{11}, I_{12}]$ маємо $\mu_{A_q^-}(I_q) = \mu_{A_{mq}^-}(I_q) = 1$, отже,

$$\mu_{A_{l2}} = \mu_{A_q^-}(I_q) = \mu_{A_{mq}^-}(I_q) = 1.$$

3. На інтервалі (I_{12}, I_q^-) маємо $\mu_{A_q^-}(I_q) < \mu_{A_{mq}^-}(I_q)$, тому для функції $\mu_{A_{l3}}$ виконується обмеження $\mu_{A_q^-}(I_q) < 1$.

Отже, для множини A_l , що є перетином нечітких множин A_q^- і A_{mq}^- , одержуємо співвідношення:

$$A_l = \{I_q \mid (\mu_{A_{mq}^-}(I_q) < 1 \ \forall I_q \in [I_{mq}^-, I_{11}]); \quad (7.44)$$

$$(\mu(I_q) = 1, \ \forall I_q \in [I_{11}, I_{12}]; \ (\mu_{A_q^-}(I_q) < 1 \ \forall I_q \in (I_{12}, I_q^-))\}.$$

Отже, множина A_l на трьох інтервалах визначена за допомогою різних функцій належності, значення яких на граничних інтервалах менше від 1, а на середньому інтервалі $[I_{11}, I_{12}]$ дорівнює 1.

Схематично вихідні множини A_q^- та A_{mq}^- і їх перетин у вигляді множини A_l зображено на рис. 7.8.

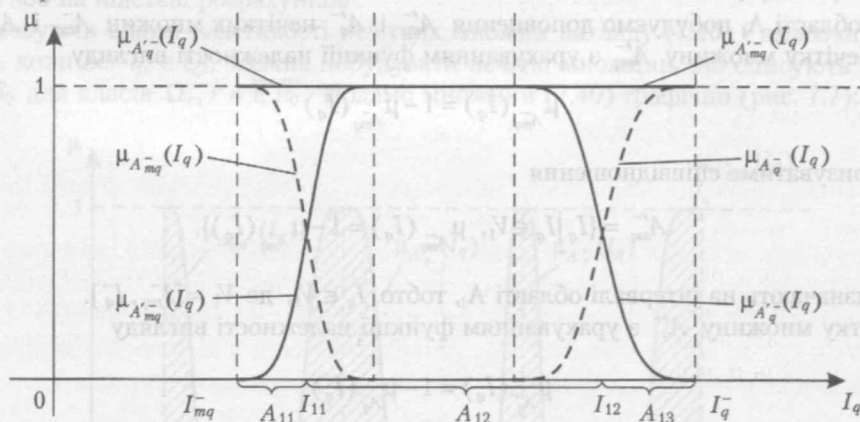


Рис. 7.8. Схематичне зображення нечіткої множини A_l , $I_{mq}^- < I_{11} < I_{12} < I_{13} < I_q^-$

Слід зазначити, що функція належності $\mu_{A_l}(I_q)$ зберігає свій вигляд згідно з означенням перетину у формі алгебричного добутку.

За аналогією з A_I можна знайти нечіткі множини A_{II} і A_{III} . Множину A_{II} описують у вигляді

$$A_{II} = \{I_q \mid I_q \in V_{II}^q, \mu_{A_{II}}(I_q) = 1\}, \quad (7.45)$$

де $V_{II}^q = [I_q^-, I_q^+]$, а $\mu_{A_{II}}(I_q)$ визначають як функцію належності множин A_q^- і A_q^+ , що є доповненнями множин

$$A_q^- = \{I_q \mid I_q \in V_{II}^q, \mu_{A_q^-}(I_q) \geq 0\};$$

$$A_q^+ = \{I_q \mid I_q \in V_{II}^q, \mu_{A_q^+}(I_q) \geq 0\},$$

відповідно.

Тут A_q^- і A_q^+ — нечіткі множини, що описують межі I_q^- і I_q^+ .

Множину A_{III} описує співвідношення

$$A_{III} = \{I_q \mid I_q \in V_{III}^q, \mu_{A_{III}}(I_q) \geq 0\}, \quad (7.46)$$

де $V_{III}^q = (I_q^+, I_{Mq}^+]$.

Надалі для того, аби підкреслити, що множини A_I , A_{II} , A_{III} визначають класифікацію за частковим показником I_q , позначатимемо A_{qI} , A_{qII} , A_{qIII} . Аналогічно будують нечіткі множини Ω_r , що описують класифікацію S_0 за частковими показниками інформованості.

Перейдемо до аналізу процедури розв'язання задачі розпізнавання ситуації за умов нечіткої інформації. Суть її полягає у порівнянні нечітких множин, що описують класи, і множин, які описують відповідні ситуації. Це дасть змогу однозначно зіставити в загальному випадку клас Ω_r і аналізовану ситуацію S_k за кожним із часткових показників інформованості I_q . Відповідно до прийнятого формулювання задачі ситуацію S_k як об'єкт дослідження будемо описувати множиною $C_q(S_k)$ за показниками I_q :

$$C_q(S_k) = \{I_q \mid I_q \in W_q, \mu_{S_k}(I_q) \geq 0\}, \quad (7.47)$$

де $W_q = [I_{mq}^-, I_{Mq}^+]$. Розпізнавання S_k розглядатимемо зокрема як задачу визначення, до якої множини A_{qI} , A_{qII} , A_{qIII} належить множина $C_q(S_k)$. Для цього потрібно знайти перетин нечітких множин

$$C_q(S_k) \cap A_{qI}, \quad C_q(S_k) \cap A_{qII}, \quad C_q(S_k) \cap A_{qIII}.$$

Зазначимо, що у разі задання $C_q(S_k)$ у формі (7.47) може виявитися, що об'єкт S_k одночасно належить двом чи навіть трьом класам. Тому під час розпізнавання S_k доцільно перейти від нечіткої множини $C_q(S_k)$ до чіткої множини, сформованої на основі деякого рівня α заданої нечіткої множини:

$$C_q^\alpha(S_k) = \{I_q \mid I_q \in W_q, \mu_{S_k}(I_q) \geq \alpha\}. \quad (7.48)$$

Тоді задача розпізнавання полягатиме у визначенні перетинів

$$C_q^\alpha(S_k) \cap A_{qI}, \quad C_q^\alpha(S_k) \cap A_{qII}, \quad C_q^\alpha(S_k) \cap A_{qIII}.$$

Розв'язок задачі розпізнавання S_k буде однозначним, якщо виконується умова, що тільки один із перетинів утворить непорожню множину, а інші перетини — порожню. Наприклад, для

$$\begin{aligned} \mu_{C_q^\alpha(S_k)} \cap \mu_{A_I} &= 0, \\ \mu_{C_q^\alpha(S_k)} \cap \mu_{A_{qII}} &\neq 0, \\ \mu_{C_q^\alpha(S_k)} \cap \mu_{A_{qIII}} &= 0, \end{aligned}$$

маємо

$$\begin{aligned} C_q^\alpha(S_k) \cap A_{qI} &= 0, \\ C_q^\alpha(S_k) \cap A_{qIII} &= 0, \\ C_q^\alpha(S_k) \cap A_{qII} &\neq 0. \end{aligned} \tag{7.49}$$

Схематичне зображення задачі розпізнавання ситуації S_k за умов нечіткої інформації ілюструє рис. 7.9.

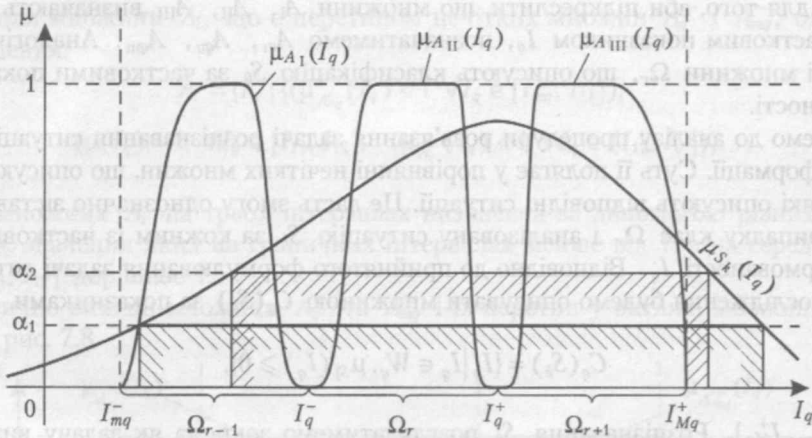


Рис. 7.9. Схематичне зображення задачі розпізнавання ситуації S_k

Слід звернути увагу на те, що після переходу до рівня $\alpha = \alpha_2$ нечітка множина $C_q(S_k)$ зводиться до звичайної множини $C_q^\alpha(S_k)$, що складається з тих елементів множини $C_q(S_k)$, для яких функція належності перевищує встановлений рівень α . Тому задача розпізнавання S_k із нечітко заданою інформацією зводиться до стандартної задачі розпізнавання з повністю визначеною, точною інформацією. Величину α слід трактувати як ступінь достовірності того, що S_k описано множиною $C_q^\alpha(S_k)$. Подальшу процедуру розпізнавання S_k виконують відповідно до розглянутої раніше багаторівневої схеми класифікації (див. рис. 7.6), і вона полягає у перевірці умови (7.48) на кожному ієрархічному рівні для кожного з показників.

Водночас у цій процедурі розпізнавання є специфічні особливості, на які слід звернути увагу.

1. Вибір рівня α — неформалізована задача, що здійснює безпосередньо ОПР. Тут є важлива особливість: у разі збільшення α зменшується ймовірність того, що S_k

одночасно належатиме декільком класам на одному чи кількох рівнях класифікації. Але одночасно зростає ймовірність виникнення ситуації, коли деякі об'єкти опиняться взагалі поза будь-яким класом. Априорно не можна виключити, що існують об'єкти S_k , для яких за умови $1 > \mu_{S_k} \geq 0$ може виявитися, що $\mu_{S_k}(I_q) < \alpha$. Це впливає з того, що не обов'язково $\mu_{S_k}(I_q)$ досягає максимального значення, яке дорівнює 1, для всіх $S_k \in S_0$, оскільки фізично величину $\mu_{S_k}(I_q)$ можна трактувати як результат групової експертизи. У разі зменшення значення α не тільки розширюється множина $C_q^\alpha(S_k)$, але й зростає ймовірність того, що у формулі (7.49) не буде порожніх перетинів взагалі. Тому визначення раціонального значення α — окрема задача, розв'язання якої для кожного певного практичного застосування доцільно покласти на адаптивну інтелектуальну систему підтримки рішень.

2. Як особливість розпізнавання належності S_k до деякого класу Ω_r у випадку нечіткої вихідної інформації слід вказати можливу неоднозначність розпізнавання за будь-якого значення α . Це пов'язано з тим, що множина $C_q^\alpha(S_k)$ — це інтервал, а не точка, як для точно заданої інформації, коли I_q дорівнює певному числу. У такому разі не можна дати ОПР однозначних рекомендацій. Отже, вироблення різних альтернативних рекомендацій та оцінення їх ефективності за певних умов також є окремою задачею, і її також доцільно покласти на адаптивні інтелектуальні системи підтримки рішень. Задача полягає у виборі раціональної альтернативи із множини можливих на основі їх багатофакторної порівняльної оцінки у сенсі заданого відношення переваги. Слід зазначити, що інтелектуальні системи підтримки рішень сформульованих задач мають бути гібридними експертними системами і забезпечувати як формування та обробку експертної інформації, так і аналіз та обробку статистичної чи іншої априорної інформації, а формувати рекомендації потрібно як з урахуванням нових знань, так і використовуючи раніше сформовану базу знань.

Не розглядаючи інші особливості інтелектуальних систем підтримки рішень, звернімо увагу на неоднозначність розпізнавання належності S_k до введених класів Ω_r . У загальному випадку можливі кілька варіантів неоднозначності.

Варіант 1. Для будь-яких значень α_1 і α_2 об'єкт S_k належить до кількох класів (рис. 7.10).

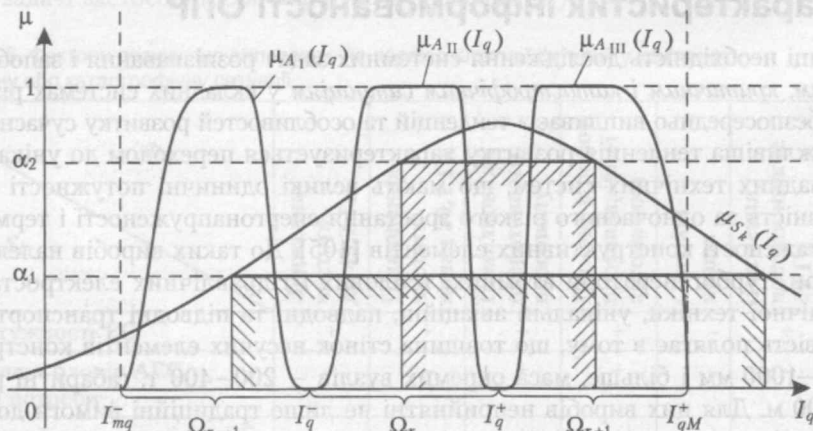


Рис. 7.10. Схематичне зображення задачі розпізнавання ситуації S_k для різних рівнів α

Варіант 2. У разі збільшення α від α_1 до α_2 для $\alpha_2 \rightarrow 1$ кількість класів, до яких належить S_k , зменшиться, але кількість класів Ω_r не буде менша за 2 (рис. 7.11).

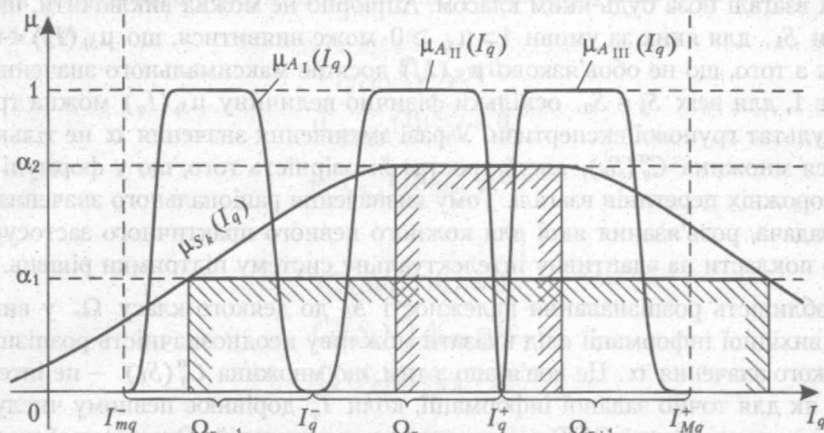


Рис. 7.11. Схематичне зображення задачі розпізнавання ситуації S_k для випадку $\alpha_2 \rightarrow 1$ (кількість класів Ω_r не менша за 2)

Варіант 3. У разі збільшення значення α до одиниці кількість класів у Ω_r скорочується до 1 (див. рис. 7.9).

Як видно з поданих варіантів, можлива принципово неусувна неоднозначність (варіанти 1 і 2), зумовлена неоднозначністю нечіткої оцінки (функції належності) S_k . У цьому разі ступінь належності певному класу Ω_r можна визначити зіставленням функції належності класу і функції належності об'єкта для заданого рівня α за допомогою процедури порівняння двох інтервалів. Такі процедури розроблені в теорії можливості [66].

7.5. Приклади задач розпізнавання критичних і катастрофічних ситуацій у разі зміни характеристик інформованості ОПР

На практиці необхідність дослідження системних задач розпізнавання і запобігання *по-застатним, критичним і катастрофічним ситуаціям* у складних системах різного призначення безпосередньо впливає з тенденцій та особливостей розвитку сучасної техніки.

Найважливіша тенденція розвитку характеризується переходом до унікальних машин і складних технічних систем, що мають великі одиничні потужності та високу продуктивність за одночасного різкого зростання енергонапруженості і термомеханічної навантаженості конструктивних елементів [105]. До таких виробів належать атомні реактори, турбогенератори атомних, теплових і гідравлічних електростанцій, виробы космічної техніки, унікальні авіаційні, надводні та підводні транспортні засоби. Їх особливість полягає в тому, що товщина стінок несучих елементів конструкцій досягає 200–1000 мм і більше, маса окремих вузлів – 200–400 т, габаритні розміри – до 100–200 м. Для цих виробів неприйнятні не лише традиційні вимоги до випробувань на міцність, ресурс і надійність, які застосовують для звичайних машин, механізмів і конструкцій серійного та масового виробництва, але й типові підходи і методи

аналізу процесів старіння і руйнування, розрахунку граничного стану матеріалів [105]. Водночас їх часткове або повне руйнування спричиняє не лише катастрофічні наслідки для виробів, але й матеріальні втрати, що набагато перевищують їх вартість. Катастрофічні ситуації згубно впливають на населення і навколишнє середовище в регіональному, національному чи глобальному масштабі. Упродовж останніх 30 років минулого століття такі аварії і катастрофи з багатомільйонними і багатомільярдними втратами мали місце майже в усіх промислово розвинених країнах [105]. Аналіз цих катастроф свідчить, що масштаби втрат можуть бути набагато меншими, якщо в позаштатній ситуації вчасно сформувати і реалізувати раціональні рішення ОПР.

Сформулюємо математично системні задачі розпізнавання і запобігання критичним і катастрофічним ситуаціям та запропонуємо алгоритм їх розв'язання на прикладі функціонування турбогенератора електростанції.

7.5.1. Визначення допустимого періоду часу на формування і реалізацію рішення, що запобігає катастрофічній ситуації

Математична постановка задачі

У процесі функціонування турбогенераторів електростанції під впливом множини $\Phi = \{\Phi_j \mid j = \overline{1, m}\}$ неконтрольованих факторів ризику Φ_j штатна ситуація S_i може перейти в критичну, надзвичайну або катастрофічну. Такий перехід може відбуватися упродовж деякого періоду часу, тривалість якого апіорі невідома, і який залежить від кількості, властивостей і тривалості впливу факторів $\Phi_j \in \Phi$.

Потрібно визначити такий допустимий період часу T_0 на формування і реалізацію рішення, для якого ймовірність переходу ситуації S_i в критичну, надзвичайну або катастрофічну не перевищуватиме задане значення $\eta = \eta_{\text{доп}}$.

Кількість факторів ризику і ситуацій задамо в табл. 7.3, де знак «+» означає, що за впливу відповідного фактора штатна ситуація (звичайний режим роботи турбогенераторів електростанції) переходить у критичну, надзвичайну або катастрофічну, а знак «-» — фактор ризику не впливає на ситуацію. Зазначимо, що метод й алгоритм розв'язання задачі застосовні для скінченних значень i та j .

Таблиця 7.3. Фактори ризику, що впливають на перехід штатної ситуації у критичну, надзвичайну або катастрофічну ситуації

$\Phi_j \backslash S_i$	Зниження частоти до 49,7 Гц	Підвищення частоти понад 50,1 Гц	Помилкові дії оперативного персоналу	Відмова в роботі протиаварійної автоматики	Стихійні явища	Зниження частоти нижче 49 Гц	Аварійне вимкнення великої потужності
Зміна потужності ЕС	+	+	+	+	-	+	+
Переведення блоків АЕС на власні потреби	-	-	+	+	-	-	+
Асинхронний режим роботи ЕС	-	-	+	+	+	+	+
Поділ енергосистеми на частини	-	-	+	+	+	+	-

Розв'язання задачі

Імовірність переходу ситуації S_i під впливом фактора $\Phi_j \in \Phi$; $j \in [1; 7]$ у критичну, надзвичайну або катастрофічну ситуацію залежить від зміни в часі повноти I_{Π}^j , достовірності I_{Δ}^j і своєчасності I_T^j інформованості ОПР. Імовірність η_j такої події визначає співвідношення

$$\eta_j = 1 - \lg[1 + \alpha_j I_j(t)];$$

$$I_j(t) = I_{\Pi}^j(t) I_{\Delta}^j(t) I_T^j(t).$$

Щоб прийняти рішення, потрібно знайти раціональний компроміс між рівнями I_{Π}^j , I_{Δ}^j , I_T^j для скорочення часу на його формування й реалізацію.

Показники повноти I_{Π}^j та достовірності I_{Δ}^j інформованості ОПР зростають із часом і визначені такими умовами:

$$I_{\Pi}^j(t) = \begin{cases} \hat{I}_{\Pi}^j(1 + \alpha_j t), & \text{якщо } 0 < \hat{I}_{\Pi}^j(1 + \alpha_j t) < 1, \\ 1, & \text{якщо } \hat{I}_{\Pi}^j(1 + \alpha_j t) \geq 1; \end{cases}$$

$$I_{\Delta}^j(t) = \begin{cases} \hat{I}_{\Delta}^j(1 + \gamma_j t), & \text{якщо } 0 < \hat{I}_{\Delta}^j(1 + \gamma_j t) < 1, \\ 1, & \text{якщо } \hat{I}_{\Delta}^j(1 + \gamma_j t) \geq 1. \end{cases}$$

Одночасно зі збільшенням часу впливу факторів $\Phi_j \in \Phi$ зменшується рівень показника своєчасності інформованості I_T^j відповідно до його властивостей, які характеризує співвідношення

$$I_T^j = \begin{cases} \hat{I}_T^j(1 - \beta_j t^2), & \text{якщо } 0 < \beta_j t^2 < 1, \\ 0, & \text{якщо } \beta_j t^2 \geq 1. \end{cases}$$

І, як наслідок, скорочується тривалість періоду часу на формування, прийняття і реалізацію рішення ОПР для запобігання переходу досліджуваної ситуації в критичну, надзвичайну або катастрофічну.

Коефіцієнти $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ характеризують динаміку змін показників інформованості. Їх визначають залежності:

$$\alpha_j = \begin{cases} e^{\hat{\alpha}_j \hat{I}_{\Pi}^j} 0,5, & \text{якщо } 0 < \hat{\alpha}_j \leq 1, \\ 0, & \text{якщо } \hat{\alpha}_j > 1; \end{cases}$$

$$\beta_j = \begin{cases} (\hat{\alpha}_j + \gamma_j) \hat{I}_T^j 10^{-5}, & \text{якщо } 0 < \hat{\alpha}_j + \gamma_j \leq 1, \\ 0, & \text{якщо } \hat{\alpha}_j > 1; \end{cases}$$

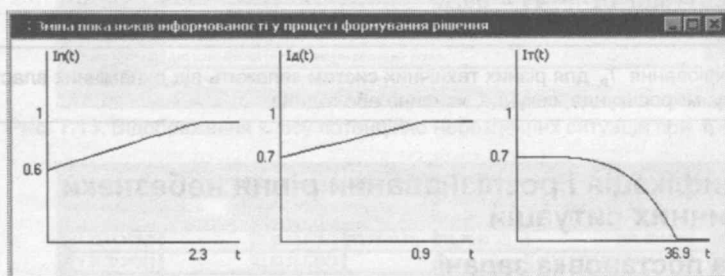
$$\gamma_j = \begin{cases} e^{\hat{I}_{\Delta}^j \hat{\alpha}_j} 0,05, & \text{якщо } 0 < \hat{\alpha}_j \leq 1, \\ 0, & \text{якщо } \hat{\alpha}_j > 1. \end{cases}$$

Значення $\hat{I}_{\Delta}^j, \hat{I}_{\Pi}^j, \hat{I}_T^j$ — попередні оцінки відповідних показників, які визначають експерти в момент виявлення позаштатного режиму турбогенератора, а коефіцієнти $\hat{\alpha}_j$ характеризують рівень впливу кожного з факторів $\Phi_j \in \Phi$; $j \in [1; 7]$ на властивості ситуацій S_i , $i \in [1; 4]$. Значення показників $\hat{I}_{\Delta}^j, \hat{I}_{\Pi}^j, \hat{I}_T^j$ і коефіцієнта $\hat{\alpha}_j$ подано в табл. 7.4.

Таблиця 7.4. Значення показників $\hat{I}_A^y, \hat{I}_I^y, \hat{I}_T^y$ і коефіцієнта $\hat{\alpha}_{ij}$

$S_i \backslash \Phi_j$	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7
$\hat{\alpha}_{ij}$							
S_1	0,50	0,60	0,65	0,50	—	0,70	0,60
S_2	—	—	0,60	0,70	—	—	0,40
S_3	—	—	0,70	0,70	0,40	0,55	0,65
S_4	—	—	0,75	0,60	0,40	0,50	—
$\hat{I}_I^y$							
S_1	0,60	0,70	0,40	0,80	—	0,70	0,60
S_2	—	—	0,50	0,60	—	—	0,50
S_3	—	—	0,40	0,40	0,40	0,80	0,60
S_4	—	—	0,60	0,30	0,35	0,60	—
$\hat{I}_A^y$							
S_1	0,70	0,80	0,40	0,70	—	0,70	0,70
S_2	—	—	0,30	0,80	—	—	0,80
S_3	—	—	0,30	0,80	0,40	0,60	0,60
S_4	—	—	0,50	0,70	0,30	0,70	—
$\hat{I}_T^y$							
S_1	0,80	0,80	0,60	0,80	—	0,80	0,90
S_2	—	—	0,70	0,90	—	—	0,60
S_3	—	—	0,50	0,80	0,50	0,70	0,75
S_4	—	—	0,80	0,75	0,55	0,80	—

Графіки зміни показників інформованості I_A, I_I, I_T у процесі формування рішення показані на рис. 7.12.

Рис. 7.12. Зміна показників інформованості I_A, I_I, I_T у процесі формування рішення

Для визначення тривалості допустимого періоду $T_0 = [T_1; T_2]$, де T_1 і T_2 відповідно нижня і верхня межі інтервалу, потрібно розв'язати нерівність:

$$0 \leq 1 - \lg(1 + \alpha_{ij} I_T^y I_I^y I_A^y (1 + \alpha_{ij} t)(1 + \gamma_{ij} t)(1 - \beta_{ij} t^2)) \leq \eta_{\text{доп}}. \quad (7.50)$$

За поданими у табл. 7.4 вихідними даними визначаємо коефіцієнти α_{ij} , β_{ij} , γ_{ij} у вигляді матриць:

$$\alpha_{ij} = \begin{pmatrix} 0,494 & 0,637 & 0,383 & 0,660 & 0 & 0,705 & 0,547 \\ 0 & 0 & 0,456 & 0,604 & 0 & 0 & 0,373 \\ 0 & 0 & 0,403 & 0,403 & 0,298 & 0,693 & 0,575 \\ 0 & 0 & 0,635 & 0,273 & 0,261 & 0,494 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\gamma_{ij} = \begin{pmatrix} 0,050 & 0,067 & 0,0495 & 0,050 & 0 & 0,070 & 0,060 \\ 0 & 0 & 0,040 & 0,078 & 0 & 0 & 0,045 \\ 0 & 0 & 0,047 & 0,078 & 0,030 & 0,050 & 0,062 \\ 0 & 0 & 0,062 & 0,060 & 0,027 & 0,050 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\beta_{ij} \cdot 10^{-4} = \begin{pmatrix} 0,389 & 0,563 & 0,259 & 0,568 & 0 & 0,620 & 0,546 \\ 0 & 0 & 0,347 & 0,613 & 0 & 0 & 0,254 \\ 0 & 0 & 0,225 & 0,385 & 0,164 & 0,520 & 0,478 \\ 0 & 0 & 0,558 & 0,249 & 0,158 & 0,435 & 0 \end{pmatrix}.$$

Із нерівності (7.50) знаходимо допустимі інтервали T_0 за різних значень $\eta_{\text{доп}} = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$. Розв'язки для $\eta_{\text{доп}} = 0,5$ наведено у табл. 7.5.

Таблиця 7.5. Допустимі інтервали T_0 на формування рішення

$\Phi_j \backslash S_i$	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7
S_1	[0; 30,2]	[0; 33,4]	[0; 36,2]	[0; 32,2]	—	[0; 27,2]	[0; 29,1]
S_2	—	—	[0; 39,4]	[0; 36,3]	—	—	[0; 41,3]
S_3	—	—	[0; 45,5]	[0; 35,4]	[0; 43,9]	[0; 28,2]	[0; 32,1]
S_4	—	—	[0; 31,3]	[0; 35,3]	[0; 30,1]	[0; 33,3]	—

Отже, для ситуації S_1 допустимий час на формування, прийняття і реалізацію рішення не має перевищувати $T_2 = 27,2$; для ситуації S_2 — $T_2 = 36,3$; для ситуації S_3 — $T_2 = 28,2$; для ситуації S_4 — $T_2 = 30,1$.

ПРИМІТКА

Вибір одиниці вимірювання T_0 для різних технічних систем залежить від динамічних властивостей досліджуваного процесу: мікросекунда, секунда, хвилина або година.

7.5.2. Класифікація і розпізнавання рівня небезпеки критичних ситуацій

Математична постановка задачі

На основі умов попередньої задачі дослідимо три класи критичних ситуацій:

- ♦ A_1 — клас особливо небезпечних ситуацій, для яких загальний час, потрібний для формування і реалізації рішення (період від початку його формування до реалізації) $T_0 \leq T^-$;
- ♦ A_2 — клас потенційно небезпечних ситуацій, для яких $T^- < T_0 \leq T^+$;
- ♦ A_3 — клас майже безпечних ситуацій, $T_0 > T^+$.

Нечіткі межі (T^+, μ_{T^+}) і (T^-, μ_{T^-}) періоду часу на формування рішення задано такими вибірками:

T^+	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
μ_{T^+}	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
T^-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
μ_{T^-}	0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0	0,9	0,7	0,5	0,3

Потрібно визначити, до якого класу A_j , $j = \overline{1, 3}$ належить кожна ситуація S_i , $i = \overline{1, 4}$.

Розв'язання задачі

Використовуючи вихідні дані та алгоритм розв'язання попередньої задачі, визначимо допустимий часовий інтервал на формування і реалізацію рішення $[T_j^-, T_j^+]$, для якого ймовірність переходу кожної ситуації $S_i \in S$ в критичну, надзвичайну або катастрофічну не перевищуватиме заданого допуску $\eta^+ = [0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9]$ за всіма факторами Φ_j , коли $\eta^- = 0,1$:

$$\eta^- \leq 1 - \log_2(1 + \alpha_{ij} I_{T^+}^{\eta^+} I_{D}^{\eta^+} (1 + \alpha_{ij} t)(1 + \gamma_{ij} t)(1 - \beta_{ij} t^2)) \leq \eta^+.$$

Для кожної ситуації $S_i \in S$ визначимо підсумковий допустимий часовий інтервал $[T_{S_i}^-, T_{S_i}^+]$, межі якого відповідають η^- , η^+ і встановлені з умов $T_{S_i}^- = \min T_j^-$ і $T_{S_i}^+ = \max T_j^+$.

На інтервалі $[T^-, T^+]$ визначимо місце розташування інтервалу $[T_{S_i}^-, T_{S_i}^+]$ і значення μ^-, μ^+ для всіх ситуацій $S_i \in S$.

З урахуванням зазначених етапів визначаємо, до якого класу A_j належить ситуація S_i , на основі зіставлення меж кожного класу A_j і меж інтервалу $[T_{S_i}^-, T_{S_i}^+]$.

Деякі результати класифікації ситуації S_i за класами A_j наведено на рис. 7.13 для $\eta = 0,5$ і рис. 7.14 для $\eta = 0,6$ відповідно.

Знаходження допустимого інтервалу T_0

Величина допуску: 0,5

[5.55;14.16]3	[7.56;18.67]3	[12.99;41.94]	[20.48;44.2]	[27.79;42.42]
[11.63;30.18]3	[3.88;10.63]3	Порож. н-на	[5.78;14.71]3	[30.38;52.18]
	[21.61;48.8]		[4.13;11.03]3	Порож. н-на
[5.12;13.26]3	[24.76;43.5]		[4.29;11.4]34	Порож. н-на

Результати обчислень:

для ситуації S1: Для класифікації ситуації змініть величину допуску

для ситуації S2: Для класифікації ситуації змініть величину допуску

для ситуації S3: Для класифікації ситуації змініть величину допуску

для ситуації S4: Для класифікації ситуації змініть величину допуску

Рис. 7.13. Відображення класу потенційно небезпечних ситуацій при $\eta = 0,5$

Знаходження допустимого інтервалу T_0

Величина допуску: 0,6

[4.22;14.16]3	[5.89;18.67]3	[10.29;42.41]	[16.28;45.33]	[21.46;44.94]
[9.24;30.18]3	[2.83;10.63]3		Порож. н-на	[4.41;14.71]3
	[17.3;49.89]			[3.06;11.03]3
[3.86;13.26]3	[19.43;45.33]			[3.18;11.4]34

Результати обчислень:

для ситуації S1: Для класифікації ситуації змініть величину допуску

для ситуації S2: Для класифікації ситуації змініть величину допуску

для ситуації S3: Клас потенційно небезпечних ситуацій

для ситуації S4: Для класифікації ситуації змініть величину допуску

Рис. 7.14. Відображення класу потенційно небезпечних ситуацій для $\eta = 0,6$

Наведений підхід до розв'язання задач розпізнавання критичних і катастрофічних ситуацій на прикладі функціонування турбогенераторів електростанції можна рекомендувати як загальну методику розв'язання цього типу задач для класу великих технічних систем, якими керує ОПР на підставі попередньо вироблених рішень. Однак слід зазначити, що певна технічна система має свої особливості, які у процесі розв'язання таких задач треба враховувати емпірично.

Висновки

- ♦ Сформульовано основні цілі і задачі інформаційного аналізу як одного з важливих інструментів формалізації і розв'язання системних задач. Обґрунтовано, що цілі можна звести до забезпечення практично необхідного і технологічно можливого рівня інформаційного забезпечення достовірності та обґрунтованості рішення, а задачі інформаційного аналізу полягають у створенні методологічного і математичного інструментарію для досягнення поставлених цілей.
- ♦ На підставі проведеного аналізу кількісних і якісних характеристик інформації обґрунтовано потребу введення означень кількості та якості інформації з погляду формування і досягнення цілей ОПР на основі його бачення як необхідних властивостей та особливостей досліджуваного об'єкта, так і шляхів та засобів їх реалізації.
- ♦ Уведено поняття інформованості ОПР, рівня інформованості ОПР, якісних властивостей інформації: невизначеності, неточності, неповноти, нечіткості, несвоєчасності, недостовірності, суперечливості. Формалізовано повноту, достовірність і своєчасність інформованості ОПР, обґрунтовано особливості формалізації для кожного із введених показників інформованості.
- ♦ Введено поняття інтегрального показника інформованості ОПР, обґрунтовано зміну рівня інформованості залежно від властивостей та особливостей часткових показників інформованості, що входять у нього. Проаналізовано особливості зміни якісних показників повноти, достовірності і своєчасності.
- ♦ Запропоновано процедуру класифікації множини ситуацій за якісними характеристиками інформованості за допомогою введеного інтегрального показника інформованості і за системою взаємозалежних часткових показників інформованості.
- ♦ Введено і формалізовано поняття рівня інформованості, що є мірою можливості аналізу будь-якої ситуації з множини досліджуваних ситуацій.
- ♦ Розроблено прийоми і процедури розпізнавання належності певної ситуації S_k із заданої множини S_0 ситуацій до певного класу об'єктів із введеної класифікації.
- ♦ Наведено математичні формулювання задач розпізнавання ситуацій за умов неповноти і нечіткості інформації та у процесі зміни інформованості ОПР. Запропоновано методи розв'язання цих задач.
- ♦ Подано математичне формулювання системних задач розпізнавання і запобігання критичним та катастрофічним ситуаціям, запропоновано алгоритм їх розв'язання на прикладі функціонування турбогенераторів електростанції. Розроблений підхід до розв'язання таких задач можна рекомендувати як загальну методику розв'язання цього типу задач для класу великих технічних систем, якими керує ОПР на підставі попередньо вироблених рішень.

Розділ 8

Структурно-функціональний аналіз складних ієрархічних систем

- ♦ Основні властивості та особливості складних ієрархічних систем
- ♦ Функціональні і конструктивно-технологічні властивості різних типів та видів систем
- ♦ Формалізація задачі структурно-функціонального аналізу
- ♦ Загальна стратегія розв'язання задачі структурно-функціонального аналізу
- ♦ Структура узагальненого алгоритму структурно-функціонального аналізу
- ♦ Системна оптимізація складних конструктивних елементів сучасної техніки

У цьому розділі розглядається структурно-функціональний аналіз* (СФА) складних ієрархічних систем, який є основою розвитку сучасної науки та техніки у наукомістких галузях промисловості. СФА використовується для визначення потенційно необхідних якісних і кількісних показників структури і функцій складної системи, а також для знаходження раціонального компромісу взаємозв'язків та взаємозалежностей між її функціональними елементами.

8.1. Основні властивості та особливості складних ієрархічних систем

Розглянемо основні проблеми, які становлять загальну задачу системного аналізу складних багаторівневих ієрархічних систем (СБІС).

Структурно-функціональний аналіз систем цього класу належить до найскладніших, але найважливіших задач сучасної науки і техніки. Значущість цих задач постійно зростає, що зумовлено потребами промисловості у широкому впровадженні та розвитку наукомістких технологій. Задачі структурно-функціонального аналізу за ступенем складності належать до класу задач організованої складності, який займає основну частину спектра складності. Межами цього спектра є два у деякому сенсі протилежні класи задач — організованої простоти і неорганізованої складності. Це означає, що основна його частина, за винятком двох меж, залишається незабезпеченою методично в тому сенсі, що відповідні задачі не можна розв'язати ні аналітичними, ні статистичними методами. У цій частині спектра знаходиться переважна більшість практичних задач із різних галузей науки і техніки, економіки, соціології тощо. Особливості цих задач полягають у тому, що вони описують об'єкти, які мають такі принципово нові властивості, як організованість, ієрархічність, субпідрядність, адаптивність, стійкість, керованість. Тому задачі цього класу називають *задачами організованої складності*.

* Дослідження виконані за участю наукового співробітника ІПСА НТУУ «КПІ» О. П. Опаріної.

8.1.1. Особливості задач організованої складності

Об'єкти, для яких характерні задачі організованої складності, мають такі особливості:

- ♦ принципово не можна знехтувати впливом більшості зовнішніх і внутрішніх факторів;
- ♦ складно одержати вчасно змістовні статистичні оцінки;
- ♦ принципова неформалізованість більшості прикладних задач аналізу (наприклад, вибір структури об'єкта, критеріїв переваг варіантів тощо);
- ♦ потреба урахування реальних умов і можливих впливів багатофакторних ризиків, які характеризуються невизначеністю, неповнотою, неточністю, суперечливістю вихідної інформації;
- ♦ принципова неможливість опису точними показниками якості (наприклад, естетичність, зручність користування тощо) більшість практично важливих властивостей об'єктів.

Методологічні підходи до розв'язання системних задач цієї категорії складності розроблено недостатньо. Вони розвиваються завдяки широкому застосуванню евристичних прийомів і методів створення інтелектуальних засобів підтримки рішень на основі систематизації, узагальнення та нагромадження знань і досвіду розробників.

У цьому розділі описано принципи та підходи до розв'язання такого класу задач, розглянуто процедури їх алгоритмізації та числового розв'язання.

8.1.2. Основні властивості та особливості складних ієрархічних систем

Важлива особливість прийняття рішень у складних ієрархічних системах — надання свободи дій ОПР на різних ієрархічних рівнях під час формування і вибору ним рішень. Через це постає складна неформалізована проблема раціонального розподілу зусиль і повноважень щодо прийняття рішень між ОПР на різних ієрархічних рівнях системи. Такий підхід зумовлений потребою реалізувати потенційні можливості складної ієрархічної структури щодо економії різних видів ресурсів та організації її раціонального функціонування.

Однак розв'язання цієї проблеми багато в чому ускладнюють такі особливості складних ієрархічних структур:

- ♦ для вищих рівнів ієрархії системи має місце краще розуміння цілей, призначення, функції, можливостей об'єкта і різних аспектів його поведінки, але водночас і вищий рівень неповноти, невизначеності, неточності й суперечливості вихідної інформації;
- ♦ у разі послідовного переходу до нижчих рівнів ієрархії зменшується рівень невизначеності й підвищується можливість детальнішого конкретнішого опису структури і конструкції ФЕ та спроможність до конкретизації різних робіт і задач.

Ці особливості породжують суперечності: на вищому рівні ієрархії розуміння цілей і задач об'єкта значно вище, але водночас суттєво нижчий рівень розуміння певних шляхів їх досягнення, конкретних можливостей альтернативних проектних рішень певних ФЕ нижніх рівнів. На найнижчому рівні прямо протилежна ситуація: майже повне розуміння певних технічних, технологічних та інших можливостей альтернативних проектних рішень ФЕ, однак майже повне нерозуміння ролі та місця певних ФЕ для досягнення концептуальних цілей, що стоять перед складною ієрархічною системою загалом.

Розв'язання цих суперечностей — одна з найважливіших задач загальної стратегії СФА. Завдяки зазначеним особливостям цього досягають.

1. Формуванням ієрархії задач СФА послідовно зверху вниз за ієрархічною структурою прийняття рішень.
2. Формуванням розв'язку вихідної задачі СФА послідовно знизу вгору за ієрархічною структурою.
3. Послідовним узгодженням цілей СФА та одержуваних розв'язків задач на основі інтерактивної реалізації пунктів 1, 2.

Ще одна суперечність зумовлена специфікою прийняття рішень. Як відомо, в будь-якій реальній процедурі прийняття рішення є дві дуже прості, але надзвичайно важливі особливості:

- ♦ час на прийняття і виконання рішення в реальній ситуації обмежений, а несвоєчасність виконання цих дій може мати невиправні наслідки.
- ♦ неповнота вихідної інформації та брак достатніх знань про причини і наслідки впливу неконтрольованих факторів ускладнюють розуміння та оцінювання наявної ситуації.

Ці особливості призводять до суперечності: з одного боку, для забезпечення своєчасності розв'язання такого типу задач бажано скоротити час на формування та обґрунтування рішення, а з іншого — для підвищення рівня обґрунтованості і достовірності рішення бажано збільшити час його формування для одержання повнішої інформації і детальнішого вивчення наявної ситуації. Практична значущість розв'язання цієї суперечності очевидна з урахуванням розглянутих особливостей. Слід також звернути увагу на пороговий механізм дії фактора часу: абсолютно обґрунтоване й найефективніше рішення буде непотрібне, якщо воно несвоєчасне.

Прийоми розв'язання цієї суперечності залежать від багатьох факторів, серед яких можна виділити такі:

- ♦ рівень необхідної оперативності прийняття рішення;
- ♦ рівень можливого збитку від необґрунтованого рішення;
- ♦ рівень апіорної інформованості ОПР про об'єкт СФА і наявні можливості одержання інформації у процесі формування рішення.

Крім того, слід враховувати такі суттєві умови:

- ♦ на якому етапі життєвого циклу об'єкта виконують СФА — етапі розроблення чи експлуатації;
- ♦ в яких режимах функціонування об'єкта виконують СФА — у штатній, позаштатній, критичній чи надзвичайній ситуаціях.

Водночас можна запропонувати загальні прийоми, застосовні майже до будь-якого варіанта СФА:

- ♦ раціональний вибір кількості рівнів прийняття рішення залежно від ліміту часу;
- ♦ формування раціональної ієрархії задач за ступенем важливості на кожному рівні прийняття рішення;
- ♦ забезпечення раціональної координації діяльності всіх рівнів формування і прийняття рішень.

Наведені властивості та особливості реальних складних ієрархічних систем суттєво впливають на стратегію розв'язання задачі СФА.

8.1.3. Функціональні та конструктивно-технологічні властивості різних типів і видів систем

Структурні властивості субпідрядності, взаємозалежності і визначеності неоднакові для технічних, організаційних та організаційно-технічних систем. Однак для цих систем є і спільне у зазначених властивостях. Зупинимося тільки на загальних функціональних і конструктивно-технологічних властивостях різних типів і видів систем.

- ♦ *Спостережність* — властивість, що виражається у можливості визначати стан системи в минулому або в поточний момент часу за результатами спостережень за певними параметрами і характеристиками системи.
- ♦ *Керованість* — властивість, що виражає здатність системи загалом і її функціональних елементів зокрема адекватно реагувати на впливи зовнішнього середовища. Наприклад, ФЕ верхнього ієрархічного рівня управляють елементами нижнього ієрархічного рівня.
- ♦ *Чутливість* — властивість, що характеризує ступінь реагування системи на зміну факторів впливу і власних параметрів.
- ♦ *Стійкість* — властивість, що визначає здатність системи у заданих межах зберігати якісні характеристики своєї поведінки у разі впливу неконтрольованих факторів.
- ♦ *Координованість* — властивість, яка характеризує здатність функціональних елементів одного ієрархічного рівня погоджувати дії з ФЕ інших рівнів на основі досягнення єдиних цілей складної системи загалом.
- ♦ *Адаптивність* — властивість, що визначає здатність системи змінювати структуру і параметри функціональних елементів для пристосування до мінливих зовнішніх умов.
- ♦ *Складність* — властивість, яка характеризує ступінь насиченості певного процесу або системи функціональними елементами, а також кількість і різноманітність зв'язків між ними. Можна виділити такі види складності:
 - ♦ *структурна* — визначає рівень складності структурних взаємозв'язків між функціональними елементами у складній ієрархічній системі;
 - ♦ *функціональна* — визначає рівень складності функцій, реалізованих системою загалом та її функціональними елементами;
 - ♦ *технологічна* — визначає складність технологій, покладених в основу функціонування системи, і технологій керування процесами функціонування;
 - ♦ *конструктивна* — визначає складність створення і реалізації системи та її функціональних елементів;
 - ♦ *інформаційна* — характеризує обсяги та складність інформаційних потоків, різноманітність і способи перетворення інформації у складних ієрархічних системах.
- ♦ *Ефективність* — властивість, що характеризує результативність досягнення системою цілей певного процесу або системи. Можна виділити такі види ефективності.
 - ♦ *технологічна* — характеризує результативність досягнення технологічних ефектів і цілей;
 - ♦ *техніко-економічна* — характеризує ступінь сумірності досягнутого результату з витратами, наприклад, відношення технологічної ефективності до витрат ресурсів на її досягнення.

- ♦ *Надійність* — властивість, що визначає здатність системи на заданому інтервалі часу функціонувати без відмов зі збереженням усіх її якісних характеристик і режимів.
 - ♦ *Живучість* — властивість, що визначає здатність системи зберігати певний рівень працездатності з появою відмов окремих її функціональних елементів.
- Далі розглянемо загальні конструктивно-технологічні властивості цього класу систем.
- ♦ *Матеріаломісткість* — властивість, що характеризує рівні витрат матеріалів різних видів на реалізацію конструктивних елементів системи.
 - ♦ *Металомісткість* — властивість, що характеризує рівень витрат різних металів, зокрема дорогоцінних, на реалізацію всіх функціональних елементів і конструкцій системи. Ця властивість є додатковою щодо попередньої і виділяє метали із загального рівня витрат матеріалів на конструктивні елементи системи.
 - ♦ *Енергоємність* — властивість, що характеризує рівень витрат різних видів енергії або енергетичних ресурсів на забезпечення функціонування системи.
 - ♦ *Капіталомісткість* — властивість, що характеризує рівень загальних фінансових витрат на розробку, виробництво та експлуатацію системи.
 - ♦ *Трудомісткість* — властивість, що характеризує рівень трудових витрат на розробку, виробництво та експлуатацію системи.

8.1.4. Обмеження і припущення задач системного аналізу складної ієрархічної системи

Наведемо деякі обмеження і припущення. Насамперед будемо покладати, що з усіх можливих етапів життєвого циклу системи розглядають лише етап розробки (проектування та експериментальне відпрацювання). Вибір цього етапу зумовлено такими міркуваннями. Передусім, він найскладніший і найвідповідальніший. Складність етапу характеризує найбільша невизначеність цілей, структури, функцій, властивостей елементів, а також неповнота, неточність, суперечливість вихідної інформації. Відповідальність визначає те, що саме на цьому етапі приймають найважливіші рішення щодо майже всіх сторін створюваної системи, і тому наявність навіть незначної помилки в кінцевому підсумку призводить до надмірно великих втрат. Крім того, задачі системного аналізу для інших етапів життєвого циклу, зокрема для етапів виробництва й експлуатації, не тільки аналогічні, але й багато в чому є окремим випадком задачі системного аналізу об'єкта на етапі розробки. Тому за *припущення* візьмемо умову, що задачу системного аналізу складної ієрархічної системи на етапі розробки можна розглядати як узагальнену задачу системного аналізу на всьому життєвому циклі виробу (ЖЦВ).

За обмеження вважатимемо, що структуру складної ієрархічної системи строго визначено. Наприклад, для певних технічних систем ієрархічні рівні строго визначено тестами. Зокрема, для радіоелектронних систем прийнято таку ієрархічну структуру: об'єкт $\Rightarrow$ функціональна система $\Rightarrow$ функціональний пристрій $\Rightarrow$ функціональний блок $\Rightarrow$ функціональний модуль.

Зазначимо, що принциповою особливістю всіх етапів проектування складних ієрархічних систем є заздалегідь не прогнозоване поєднання різноманітних неформалізованих і досить трудомістких обчислювальних задач. Наприклад, основа проектування технічного виробу — технічне завдання (ТЗ), яке визначає призначення, сферу застосування, основні функції та загальні характеристики виробу, а також основні вимоги до технічних,

експлуатаційних й інших показників якості виробу. Принципово неусувною особливістю вимог до складних ієрархічних систем є їхня суперечливість. Наприклад, вимога високої надійності суперечить вимозі малої вартості, вимога зменшення металомісткості — вимозі підвищення надійності тощо.

Крім того, на етапі ТЗ не завжди визначено деякі найважливіші відомості про систему щодо:

- ♦ умов і режимів її функціонування;
- ♦ обмежень та умов виробництва;
- ♦ особливостей умов експлуатації;
- ♦ особливостей взаємодії з іншими однотипними та аналогічними системами і виробами.

Зазвичай немає даних про те, що запропоновані вимоги вибрані раціонально, системно погоджені і не є принципово несумісними.

Неповнота, невизначеність, неточність, суперечливість і нечіткість вихідної інформації на початковому етапі розробки складної ієрархічної системи зумовлюють потребу в розв'язанні низки важливих задач, взаємопов'язаних єдиною метою — виконання ТЗ у межах виділених ресурсів і заданого ліміту часу.

До таких задач насамперед належать:

- ♦ оцінювання принципової можливості виконання заданих вимог;
- ♦ уточнення умов функціонування та експлуатації проектованої системи;
- ♦ вибір та обґрунтування цілей проектування та експлуатації;
- ♦ вибір та обґрунтування принципів функціонування системи;
- ♦ формування й обґрунтування допустимої множини альтернативних варіантів ієрархічної структури виробу;
- ♦ вибір та обґрунтування раціональної структури системи, складу і взаємозв'язків функціональних елементів для кожного ієрархічного рівня;
- ♦ вибір та обґрунтування функцій системи загалом і функцій усіх елементів для кожного ієрархічного рівня;
- ♦ раціональна декомпозиція вимоги до системи у формі вимог до функціональних елементів для всіх ієрархічних рівнів;
- ♦ формування та обґрунтування альтернативних варіантів проектних рішень функціональних елементів для всіх ієрархічних рівнів;
- ♦ вибір та обґрунтування групи критеріїв оцінки якості проектних рішень для всіх ієрархічних рівнів;
- ♦ вибір та обґрунтування раціональних проектних рішень функціональних елементів для всіх ієрархічних рівнів;
- ♦ вибір та обґрунтування критеріїв оцінки системних (структурних, функціональних, конструктивно-технологічних та інших) властивостей системи;
- ♦ оцінка міри відповідності реалізованих структурних, функціональних і конструктивно-технологічних властивостей системи заданим вимогам;
- ♦ оцінка складності і техніко-економічної ефективності системи.

Наведені задачі доцільно об'єднати у три важливі групи:

- ♦ задачі СФА складної ієрархічної системи;
- ♦ задачі аналізу управління функціонуванням складної ієрархічної системи;
- ♦ задачі техніко-економічного аналізу складної ієрархічної системи.

Кожну з цих груп задач розв'язують за умов багатофакторних ризиків, значною мірою зумовлених неповнотою, невизначеністю, суперечливістю вихідної інформації.

8.1.5. Змістове формулювання загальної задачі системного аналізу СБІС

Огляд основних властивостей та особливостей складних ієрархічних систем дає підстави дати таке змістове формулювання *загальної задачі системного аналізу СБІС*.

Відомо дані про СБІС, що визначають сферу її застосування, основні функції і загальні характеристики, а також основні вимоги до функціональних, технологічних, конструктивних та експлуатаційних показників якості її функціонування. *Апріорно відомо*, що ці дані функціонально неповні, суперечливі і неточні.

Потрібно визначити загальну структуру системи, раціонально розподілити вимоги між ФЕ всіх ієрархічних рівнів, вибрати та обґрунтувати групу критеріїв оцінки якості проектних рішень системи загалом та її ФЕ зокрема, оптимізувати проектні рішення ФЕ за прийнятою групою критеріїв і виконати задані вимоги до системи.

Ієрархічна структура системи визначає потребу введення багаторівневої процедури формування і прийняття рішень. Цього досягають послідовним розв'язанням наведених раніше трьох груп задач. Процес їх розв'язання інтерактивний. Наприклад, одержавши неприйнятні розв'язки третьої задачі, потрібно повторити процедуру розв'язання, повертаючись до першої. Агрегування результатів розв'язання усіх трьох задач дає шуканий розв'язок загальної задачі системного аналізу СБІС.

8.2. Формалізація задачі структурно-функціонального аналізу

Формалізація задачі СФА впливає із загальної задачі системного аналізу складних ієрархічних систем.

Формалізуємо цю задачу. Для цього структуруємо складну ієрархічну систему. Тут доречно нагадати вислів двох відомих фахівців із теорії систем. Дж. Гоген і Ф. Вареля в одній зі своїх праць зазначили: «Світ більшою частиною не поділяється для нас на системи, підсистеми, середовище тощо. Ми самі його так поділяємо, виходячи з різних міркувань, що звичайно зводяться до одного спільного — для зручності».

Цією фразою визначено головну особливість структурування системи — забезпечення зручності її опису з точки зору конкретного дослідника. Звідси випливає, що цей процес є принципово неформалізованим і цілком суб'єктивним. Тому розглянемо тільки загальні ідеї та прийоми структурування і наведемо формалізований опис із позиції сформульованої задачі.

Один із головних аргументів на користь структурування складних ієрархічних систем — зручність і видимість процесу проектування. Тут можна навести цілу низку факторів і міркувань, що обґрунтовують цю тезу. Обмежимося такими.

Структурування дає змогу суттєво спростити розв'язання задач як виробництва (дозволяє обмежити номенклатуру комплектуючих деяким набором готових модулів та інших елементів), так й експлуатації (спростити діагностування, поліпшити ремонтпридатність, скоротити номенклатуру запасних виробів і приладів і, в кінцевому підсумку, підвищити надійність системи). Однак структурування має не тільки переваги, але й недоліки. Один із основних недоліків — складність створення такої структури і такого її формального опису, для яких будь-які дві альтернативи проектних рішень ФЕ незалежно від того, якими способами і прийомом їх одержано, можна було б точно, всебічно та об'єктивно порівняти між собою.

8.2.1. Структуризація і формалізований опис властивостей системи та вимог до неї

Перейдемо до структуризації і формалізованого опису властивостей системи та вимог до неї.

Множину властивостей аналізованої системи зобразимо у вигляді впорядкованої за значущістю структури класів:

$$B_0 = \{B_v \mid v = \overline{1, m_0}\}, \quad (8.1)$$

де B_0 — множина властивостей системи; B_v — v -й клас, який поєднує певну категорію властивостей, що мають загальні прояви, наприклад, клас структурних властивостей, клас функціональних властивостей, клас конструктивно-технологічних властивостей, а також інші класи — клас ергономічних властивостей, клас естетичних властивостей тощо.

Кожний клас B_v визначає сукупність властивостей b_{vi} :

$$B_v = \{b_{vi} \mid i = \overline{1, m_v}\}. \quad (8.2)$$

Наприклад, у класі функціональних властивостей як b_{vi} можна брати управління, стійкість, адаптованість та інші властивості.

Кожну i -ту властивість b_{vi} класу B_v характеризує множина показників

$$Y_{vi} = \{y_{vik} \mid k = \overline{1, k_v}\}, \quad (8.3)$$

де y_{vik} — k -й показник i -ї властивості v -го класу B_v .

Вимоги до властивостей системи можна узагальнено подати так.

Вимоги до властивостей v -го класу визначає множина A_v :

$$A_v = \{Z_{vi} \mid i = \overline{1, m_v}\}, \quad (8.4)$$

де Z_{vi} — множина вимог до i -ї властивості класу B_v , визначена співвідношенням

$$Z_{vi} = \{z_{vik} \mid k = \overline{1, k_v}\}, \quad (8.5)$$

де z_{vik} — вимоги до k -го показника i -ї властивості класу B_v .

Вимоги до показників зазвичай задають з урахуванням інтервалу допустимих значень або необхідного значення в одній із форм:

$$z_{vik}^- \leq z_{vik} \leq z_{vik}^+; \quad z_{vik} = z_{vik}^0 \pm \Delta z_{vik}; \quad z_{vik} = z_{vik}^0 (1 \pm \delta z_{vik}),$$

де Δz — абсолютне значення допуску; δz — відносне значення допуску, %.

Умови функціонування системи визначає множина умов експлуатації S_e , які характеризують деяку множину зовнішніх факторів впливу за номенклатурою і допусками у вигляді

$$S_e = \{w_{je} \mid w_{je}^- \leq w_{je} \leq w_{je}^+, j_e = \overline{1, Q_e}\}, \quad (8.6)$$

де w_{je} — показник одного з факторів умов експлуатації, наприклад, температури, вологості, вібрації чи інших зовнішніх факторів; w_{je}^- , w_{je}^+ — відповідно допустимі мінімальне та максимальне значення розглянутого показника. Наприклад, для певного класу технічних об'єктів температурний інтервал можна задавати у межах від -40 до $+20$ °C. Ситуації і фактори ризику в штатній, позаштатній і критичній ситуаціях визначають у процесі розробки системи або коротко характеризують у ТЗ.

Перейдемо до формалізованого опису структури і функцій системи. Припустимо, що структура системи відповідає такій ієрархічній структурі: система $\Rightarrow$ функціональна система $\Rightarrow$ функціональний пристрій $\Rightarrow$ функціональний блок $\Rightarrow$ функціональний модуль.

Вважатимемо, що кожний q -й ієрархічний рівень складається з множини V_q функціональних елементів:

$$V_q = \{V_{qp} \mid q = \overline{1, Q}, p = \overline{1, P_0}\}, \quad (8.7)$$

де V_{qp} — p -й функціональний елемент q -го ієрархічного рівня; Q — загальна кількість ієрархічних рівнів.

Кожний ФЕ характеризується вектором показників, які для елементів $V_{qp} \in V_q$ визначені співвідношенням

$$X_{qp} = \{x_{qpj} \mid j = \overline{1, n_{xp}}\}, \quad (8.8)$$

де x_{qpj} — j -й показник p -го ФЕ q -го ієрархічного рівня; n_{xp} — загальна кількість показників.

Кожний ФЕ виконує деяку множину функцій. Наприклад, визначені функції перетворення сигналів, функції обробки інформації тощо.

Множину функцій елемента $V_{qp} \in V_q$ опишемо:

$$\Phi_{qp} = \{f_{qpk} \mid k = \overline{1, n_{qpk}}\}, \quad (8.9)$$

де f_{qpk} — k -та функція p -го ФЕ множини V_q .

Кожна функція f_{qpk} залежить від вектора показників $\bar{X}_{qp}$:

$$f_{qpk} = f_{qpk}(\bar{X}_{qp}),$$

де склад і вигляд функцій потрібно визначити у процесі виконання системного аналізу.

Кожний ФЕ впливає на загальні властивості системи. Ступінь впливу ФЕ у загальному випадку описують у вигляді

$$F: X \rightarrow Y, \quad (8.10)$$

де X — множина показників ФЕ системи; Y — множина показників, що визначають властивості системи; F — функціонал, який реалізує перетворення X на Y .

Формування і реалізація перетворення (8.10) — одна з головних цілей структурно-функціонального аналізу складної ієрархічної системи за групою вимог, заданих у формі (8.4)–(8.6). Цієї мети досягають одночасним неформальним вибором структури системи загалом і ФЕ всіх ієрархічних рівнів.

Наведений формалізований опис умов і структури системи дає змогу перейти до математичного формулювання задачі.

Під час розробки складних ієрархічних систем задачу СФА формують на етапі ескізного проектування, де також визначають шляхи її розв'язання. Подальше уточнення як формулювання задачі, так і її розв'язку здійснюють на етапі технічного проектування.

Розв'язок розглянутої задачі можна сформулювати, застосовуючи метод імітаційного моделювання властивостей об'єкта для оцінювання можливості реалізації заданих вимог і розкриття невизначеності цілей та умов. Надалі потрібно знайти раціональний компроміс між суперечливими вимогами до системи і раціонально розподілити вимоги до показників функціональних елементів усіх ієрархічних рівнів.

8.2.2. Формалізований опис задачі

Визначено: вимоги до властивостей проектованої системи:

$$A_0 = \{A_v \mid v = \overline{1, m_0}\}, \quad (8.11)$$

які не повністю описують її характеристики і показники (8.1)–(8.5). Визначено також основні умови функціонування системи у вигляді (8.6)–(8.9), її призначення та область застосовності.

Потрібно: розробити ієрархічну структуру системи; з урахуванням формули (8.11) обґрунтувати вимоги до ФЕ всіх рівнів, запропонувати й обґрунтувати математичні моделі, які встановлюють взаємозв'язок параметрів ФЕ та показників властивостей системи у формі (8.10); розробити групу критеріїв виконання заданих вимог; вибрати й обґрунтувати такі проектні рішення, які забезпечують мінімальну відмінність одержуваної множини B_0 властивостей від множини A_0 , визначеної умовою (8.11), у сенсі прийнятих критеріїв і заданих допусків.

Коротко цю формалізовану задачу можна подати у вигляді такої послідовності задач.

1. *Задача декомпозиції вимог.* Задано множину вимог A_0 . Потрібно побудувати послідовність перетворень:

$$F_A : A_0 \rightarrow \bigcup_{q=1}^Q A_q; \quad F_{Ap} : A_q \rightarrow \bigcup_{p=1}^{P_0} A_{qp}; \quad F_{qp} : A_{qp} \rightarrow \bigcup_{k=1}^{K_{pk}} z_{qpk}, \quad (8.12)$$

де A_0 , A_q , A_{qp} — множина вимог до системи, множина вимог до ФЕ q -го ієрархічного рівня і множина вимог до показників p -го ФЕ q -го ієрархічного рівня, відповідно. Функціонали F_A , F_{Ap} , F_{qp} і множини A_{qp} , A_{qpk} , z_{qpk} визначають з умов, заданих співвідношеннями (8.15), (8.16).

2. *Задача формування багаторівневої структури.* Потрібно за умов, визначених співвідношенням (8.12), побудувати послідовність перетворень:

$$f_q : V_0 \rightarrow \bigcup_{q=1}^Q V_q; \quad f_q^{-1} : \bigcup_{q=1}^Q V_q \rightarrow V_0; \quad f_{qp} : V_q \rightarrow \bigcup_{p=1}^{P_0} V_{qp}, \quad (8.13)$$

де V_0 — множина ФЕ системи в цілому; V_q — множина ФЕ q -го ієрархічного рівня; V_{qp} — p -й ФЕ q -го ієрархічного рівня. Функціонали f_q , f_{qp} і множини V_0 , V_q , V_{qp} можна знайти з умов (8.15), (8.16).

3. *Задача раціонального вибору параметрів ФЕ.* Для структури, визначеної співвідношенням (8.13), за умов (8.12), (8.15), (8.16) потрібно знайти прямі та обернені нечіткі відношення:

$$\begin{aligned} &A_0 R_0 Y_0, Y_0 R_0^{-1} A_0, A_q R_q Y_q, Y_q R_q^{-1} A_q, \\ &A_{qp} R_{qp} Y_{qp}, Y_{qp} R_{qp}^{-1} A_{qp}, Z_{qpk} R_{qpk} X_{qpk}, X_{qpk} R_{qpk}^{-1} Z_{qpk}, \end{aligned} \quad (8.14)$$

де R_0, R_0^{-1} — нечіткі відношення, які визначають взаємозв'язок вимог до властивостей системи загалом і всієї сукупності значень реалізованих параметрів ФЕ для всіх ієрархічних рівнів; R_q, R_q^{-1} — нечіткі відношення, які визначають співвідношення вимог до параметрів та їхніх значень для q -го ієрархічного рівня; R_{qp}, R_{qp}^{-1} — нечіткі відношення, які визначають співвідношення між вимогами до параметрів p -го ФЕ q -го ієрархічного рівня і числовими значеннями його параметрів; R_{qpk}, R_{qpk}^{-1} — нечіткі відношення, які визначають співвідношення вимог і числових значень k -го показника p -го ФЕ q -го рівня. Нечіткі відношення $R_0, R_0^{-1}, R_q, R_q^{-1}, R_{qp}, R_{qp}^{-1}, R_{qpk}, R_{qpk}^{-1}$ і множини $Y_0, Y_q, Y_{qp}, X_{qpk}$ знаходять з умови (8.15).

4. *Задача багатоцільової оцінки функціональних якісних показників системи.* За даними ТЗ потрібно побудувати систему оцінювання якості розв'язків усієї сукупності задач 1–3. Оцінити якість розв'язків потрібно, використовуючи функціонал, який будь-якій парі елементів множини ставить у відповідність число, котре дає змогу визначити, на якій відстані один від одного знаходяться ці елементи з погляду деякого фундаментального упорядкування.

Розв'язання цієї задачі складається з двох етапів.

1. Побудова функціонала

$$\delta_n : W_A \times W_y \rightarrow R_n, \quad (8.15)$$

де R_n — n -вимірний числовий простір; W_A — множина, однозначно визначена функціональним перетворенням множин A і S_e та множини факторів ризику Ω_0 ; W_y — множина, однозначно визначена функціональним перетворенням множин Y і S_e та множини факторів ризику Ω_0 .

2. Знаходження таких розв'язків задач 1–3, для яких величина

$$R^* = \max_n R_n(W_y),$$

прийнята за міру якості об'єкта, була б мінімально можливою:

$$R^* = R^0; \quad R^0 = \min_Y R^*(Y). \quad (8.16)$$

Слід звернути увагу на деякі принципові особливості задач СФА.

- ◆ **Наявність прямого і оберненого взаємозв'язків задачі.** Для того, щоб виконати декомпозицію вимог, потрібно знати ієрархічну структуру системи. Але, щоб створити таку структуру, треба знати вимоги до ФЕ всіх рівнів.

Далі, розв'язувати задачі (8.13) і (8.14) слід за умови (8.16). Однак її можна забезпечити тільки у випадку, якщо відомий розв'язок задачі (8.15). Водночас задачу (8.15)

можна розв'язати, якщо відомі розв'язки (8.13) і (8.14). Такий багаторазовий взаємозв'язок характерний для задач системного аналізу, що відрізняє їх від задач аксіоматичних наукових напрямів і теорій (теорії дослідження операцій, теорії прийняття рішення тощо).

- ♦ Задачі структурно неповно визначені. У задачі (8.12) відома лише множина A_0 . Інші множини і функціонали потрібно одержати у процесі розв'язання розглянутої задачі. Так, у задачі (8.13) невідомі всі величини і всі функціонали, тобто $V_0, V_q, V_{qp}, f_q, f_{qp}, f_q^{-1}, f_{qp}^{-1}$.
- ♦ Задачі частково або цілком неформалізовані. Зокрема, принципово неможливо формалізувати процедуру формування множини альтернатив проектних рішень на кожному ієрархічному рівні. Можна формалізувати процедуру вибору кращої у певному сенсі альтернативи із заданої множини.

Зазначені особливості свідчать про принципові труднощі розв'язання цього класу задач. При цьому слід враховувати, що співвідношення (8.13)–(8.16) дають тільки математичний опис задачі, і на їхній основі не можна безпосередньо організувати обчислювальний процес.

8.3. Загальна стратегія розв'язання задачі структурно-функціонального аналізу

Розглянуті властивості та особливості задачі СФА дають змогу перейти до вивчення стратегії її розв'язання. Під *стратегією* будемо розуміти загальну послідовність прийомів, принципів, підходів і методів, реалізація яких дасть можливість формалізувати певну практичну задачу і забезпечити досягнення загальної мети СФА.

Загальна мета СФА визначена загальною постановкою задачі СФА і полягає в одержанні із заданим ступенем достовірності та обґрунтованості сформульованих раніше часткових задач СФА за раціонального виконання заданих до системи вимог, обмежень та умов. Для досягнення цієї мети стратегія повинна забезпечувати [121]:

- ♦ побудову ієрархічної структури системи;
- ♦ розподіл вимог і функцій між різними ієрархічними рівнями;
- ♦ раціональний вибір елементів і структури функціонального взаємозв'язку ФЕ різних ієрархічних рівнів;
- ♦ раціональний вибір елементів і структури кожного ієрархічного рівня;
- ♦ раціональний вибір функцій і параметрів ФЕ на кожному ієрархічному рівні.

8.3.1. Властивості та особливості задач СФА

Розглянуті задачі мають такі властивості та особливості, як *неформалізованість і багаторівневий прямий та зворотний параметричний взаємозв'язок*. Остання особливість потребує певного пояснення. Суть її полягає в тому, що *прямий взаємозв'язок* свідчить про залежність розв'язку задачі нижчого ієрархічного рівня від рішення, прийнятого на вищому ієрархічному рівні. Наприклад, вимоги до ФЕ ієрархічних рівнів визначають загальні

вимоги до об'єкта загалом. *Зворотний взаємозв'язок* свідчить про залежність властивостей, можливостей та інших характеристик ФЕ вищого ієрархічного рівня від відповідних рішень, прийнятих на нижчому ієрархічному рівні. Наприклад, усі габарити, матеріаломісткість об'єкта загалом визначають рішення, прийняті під час вибору ФЕ нижчих рівнів. При цьому прямий та зворотний взаємозв'язки можуть визначати *функціональні і параметричні взаємозалежності* ФЕ різних ієрархічних рівнів і, як наслідок, відповідний вигляд залежності розв'язуваних задач.

Наприклад, задача мінімізації ваги об'єкта загалом параметрично взаємозалежна із задачами мінімізації ваги ФЕ різних ієрархічних рівнів. Але водночас ця задача функціонально взаємозалежна з іншими задачами — мінімізації габаритів, оптимізації технічних характеристик (міцності, надійності, довговічності конструкції).

Цей приклад ілюструє, що ієрархічні взаємозв'язки в реальному об'єкті, що особливо виявляється у процесі його розроблення, досить різноманітні за своєю природою і наслідками.

Проаналізуємо ще одну особливість задач СФА. В усіх наведених формулюваннях поставлена задача раціонального вибору, а не оптимізації. Відмінність цих формулювань принципова. Розв'язок задачі оптимізації має бути єдиним, а розв'язок задачі раціонального вибору — це один із розв'язків множини Парето. Потреба прийнятого раніше формулювання зумовлена принциповою неформалізованістю розглянутих задач СФА. Наприклад, принципово неформалізованою задачею є формування множини можливих ієрархічних структур об'єкта, множини критеріїв порівняльної оцінки структур, множини ФЕ певного ієрархічного рівня, а також низка інших задач СФА.

Найважливіша властивість таких задач — неоднозначність розв'язку. Це зумовлено неоднозначністю формування різними ОПР як множини можливих альтернатив, так і множини можливих критеріїв порівняння альтернатив. Рішення ОПР визначають суб'єктивні фактори — його досвід, інтуїція, знання, уподобання тощо. Звідси очевидно, що навіть однакові множини альтернатив можуть бути проранжовані ОПР у вигляді різних послідовностей.

8.3.2. Прийоми і підходи до розв'язання задач СФА

Особливості і властивості задач СФА зумовлюють під час реалізації стратегії розв'язання таких задач потребу використання певних прийомів і підходів.

1. *Орієнтація на раціональне використання* як можливостей людини-експерта, так і можливостей сучасних інтелектуальних інформаційних систем і технологій (збереження великих масивів даних; розпаралелювання обчислювальних процесів; виконання деяких інтелектуальних функцій, зокрема нагромадження і використання знань тощо). Такий прийом дозволяє використовувати сильні сторони людини та можливості обчислювальної техніки. Крім того, цей прийом дає можливість використовувати сучасні й потенційні можливості ПК.
2. *Орієнтація на багатоконтурне використання* ітераційної процедури розв'язання послідовності задач СФА. Завдяки такому підходу можна скоротити витрати часових та інших ресурсів виключенням із подальшого аналізу малоперспективних альтернатив рішень на кожному рівні у послідовності задач СФА.

3. *Застосування інтерактивного режиму* під час реалізації стратегії розв'язання всіх задач СФА. Такий підхід, *по-перше*, дозволяє раціонально використовувати обчислювальні системи для розв'язання неформалізованих задач через надання експертами допоміжної інформації (вихідних даних, різних шкал для оцінки певних властивостей тощо). *По-друге*, підхід надає ОПР можливість змінювати деякі дані у процес розв'язування загальної задачі СФА, орієнтуючись на дані одержуваних розв'язків часткових задач системного аналізу (наприклад, змінювати порядок переваги критеріїв, допустимі інтервали зміни параметрів тощо). *По-третьє*, підхід дає змогу одержувати потрібну обґрунтованість і достовірність рішень тільки для перспективних альтернатив, виконуючи попередній аналіз альтернатив на підставі грубіших оцінок.
4. *Раціональне використання можливостей* засобів і методів інтелектуальних систем підтримки рішень у вигляді довідково-аналітичних та експертно-порадних систем. Цей прийом дає змогу оперативно та ефективно нагромаджувати, зберігати і використовувати дані та знання про певну предметну область. До них насамперед слід віднести дані й знання про розробку, випробування, технічну діагностику та експлуатацію аналогів і прототипів розроблюваного об'єкта, дані про матеріали і комплектуючі, а також інші довідкові дані.

Розглянуті прийоми і підходи застосовують під час розроблення нових видів систем різного призначення, наприклад, нової техніки. Тут під виробами нової техніки розумітимемо технічні вироби різного призначення, розроблювані на основі нових ідей, технологій, матеріалів, а також вироби, адаптовані до нових умов експлуатації і застосування. Поняття «виріб» державний стандарт визначає так: «виріб — одиниця промислової продукції, кількість якої вимірюють у штуках або екземплярах».

Ці підходи та прийоми застосовні і до розв'язання задач аналізу складних систем у різних умовах їх експлуатації і застосування, зокрема для оцінювання властивостей і можливостей таких систем у критичних або надзвичайних ситуаціях.

Загальну стратегію розв'язання задач СФА реалізують на основі методологічного, інформаційного, алгоритмічного, програмного та інших видів забезпечення проектування, макетування, експериментального й дослідного виробництва, випробування та серійного випуску нової техніки.

Зміст, призначення, застосування та інші характеристики зазначених видів забезпечення регламентують різні державні стандарти, відомчі інструкції і додатки. Розглянемо лише деякі аспекти алгоритмічного забезпечення.

Насамперед слід звернути увагу на відмінність понять «стратегія» та «алгоритм» розв'язання задачі. *Стратегія* порівняно з алгоритмом охоплює більш широкий арсенал підходів, методів і прикладів, включаючи разом з іншими й формулювання та формалізацію задачі. *Алгоритм* містить тільки певну послідовність дій для розв'язання вже сформульованої задачі. Унаслідок цього ту саму стратегію можна реалізувати різними алгоритмами.

Крім того, стратегія, на відміну від алгоритму, охоплює не лише технічні, але й організаційні аспекти розв'язання задачі. Практичну значущість раціональної організації процедури розв'язання задачі СФА визначає потреба узгодження всіх дій розробників за часом, цілями та очікуваними результатами. Досвід свідчить, що практичні задачі СФА можуть розв'язувати кілька десятків організацій. Зокрема, у розробленні космічних

апаратів брали участь кілька сотень КБ та НДІ різних профілів. Звідси маємо практичну потребу узгодженого планування робіт і контролю за їх своєчасним виконанням.

Суть планування і його значення у практичній діяльності дуже точно й образно висловив один із основоположників системології (науки про складні технічні системи), американський професор Рассел Акофф: «Планування — це проектування бажаного майбутнього та ефективних шляхів його досягнення».

Таке розуміння планування точно і повно відображає суть СФА та його цілей. Справді, СФА — це, фактично, проектування моделі та структурно-функціональних основ бажаного майбутнього об'єкта, необхідні властивості якого визначено вимогами ТЗ. У процесі СФА оцінюють можливість виконання заданих вимог, аналізують варіанти реалізації системи, обґрунтовують доцільність певного варіанта її структури і загального функціонального вигляду.

8.3.3. Структура узагальненого алгоритму СФА

Розглянемо суть наведених прийомів і підходів до реалізації стратегії розв'язання задачі СФА. Структуру узагальненого алгоритму СФА подано на рис. 8.1. Алгоритм відображає загальну послідовність основних процедур стратегії СФА. Слід звернути увагу на деякі особливості основних процедур.

1. Алгоритм не ставить за мету одержати всі параметри усіх функціональних елементів створюваної системи. Мета інша: показати, що за заданими вимогами принципово можливо чи неможливо реалізувати систему з відповідними властивостями за наявних технологій промислового виробництва або у разі впровадження апробованих нових технологій.
2. Мета алгоритму — виявити раціональний структурно-функціональний вигляд майбутньої системи та одержати дані, що підтверджують доцільність чи недоцільність її реалізації за заданою вимогою. Тому він передбачає аналіз причин можливих недоліків системи та можливих шляхів їх усунення (процедури 21–29 схеми алгоритму).
3. Структуру алгоритму зорієнтовано на раціональне використання зазначених прийомів та підходів до реалізації стратегії. Зокрема, багатоконтурну процедуру ітераційного пошуку розв'язків основних задач СФА зображено структурною схемою алгоритму. Доцільність організації режиму реалізації алгоритму впливає з необхідності прийняття рішень ОПР на багатьох етапах розв'язання задач. Крім того, інтерактивний режим надає можливість постійного контролю за виконанням основних процедур алгоритму і є певним гарантом виходу з нескінченних циклів (зациклення).

Слід звернути увагу на наявність в алгоритмі двох видів нумерації рівнів: у процедурах 5–11 нумерація йде від верхнього рівня до нижнього, причому $i = 1$ відповідає об'єкту в цілому, а $i = I$ — найнижчому рівню (зокрема, рівню модулів), а в процедурах 12–18 нумерація йде від найнижчого рівня до верхнього, причому $q = 1$ відповідає найнижчому рівню (зокрема, рівню модулів), а $q = Q$ — найвищому рівню — об'єкту у цілому.

Потребу в такій нумерації зумовлено тим, що вимоги до ієрархічних рівнів задають зверху донизу, а проектування (зокрема, розрахунок) виконують знизу вгору. Тут прийнято $I = Q$, і ці величини визначають загальну кількість ієрархічних рівнів у системі.

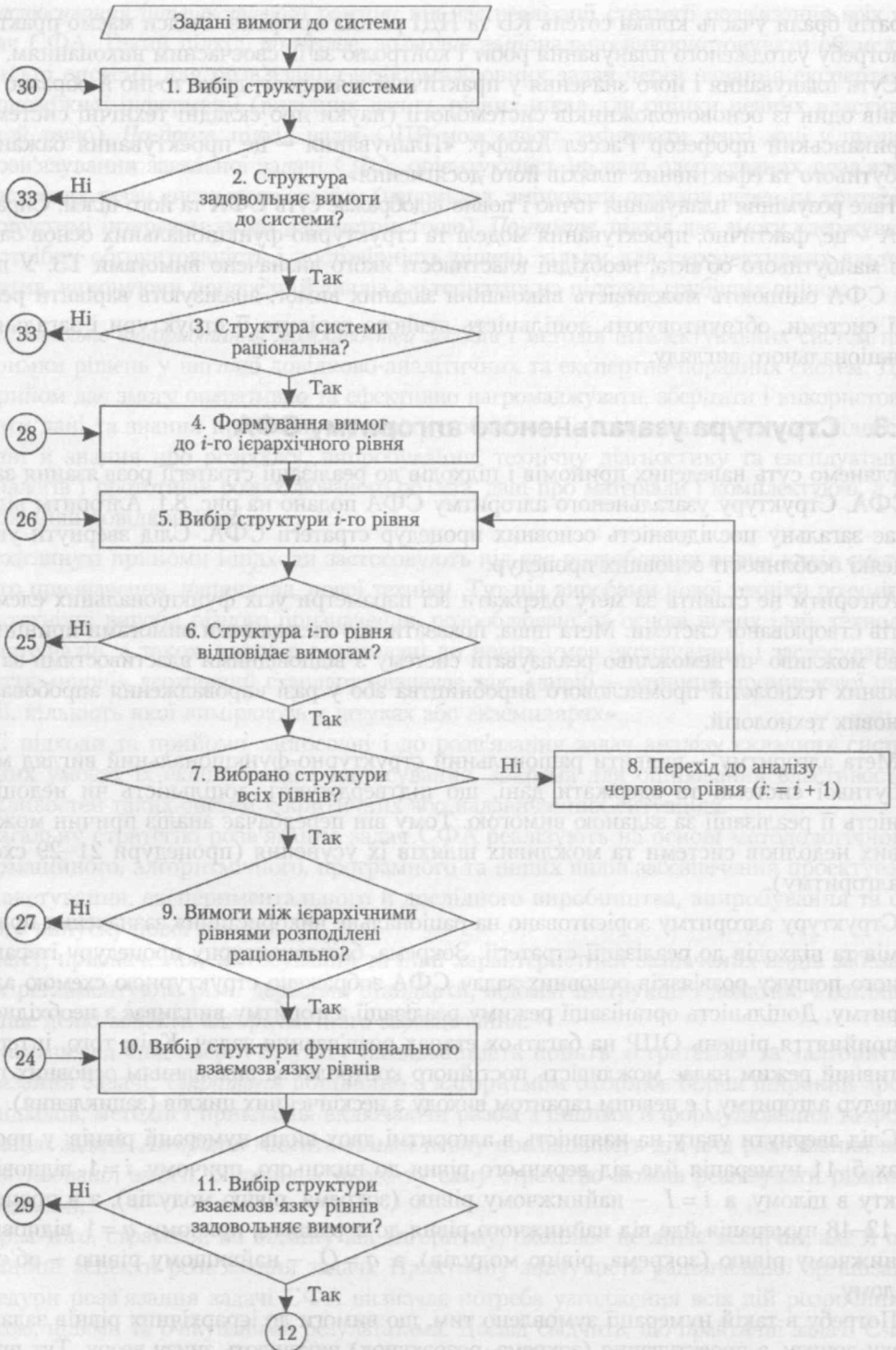


Рис. 8.1. Структура узагальненого алгоритму СФА

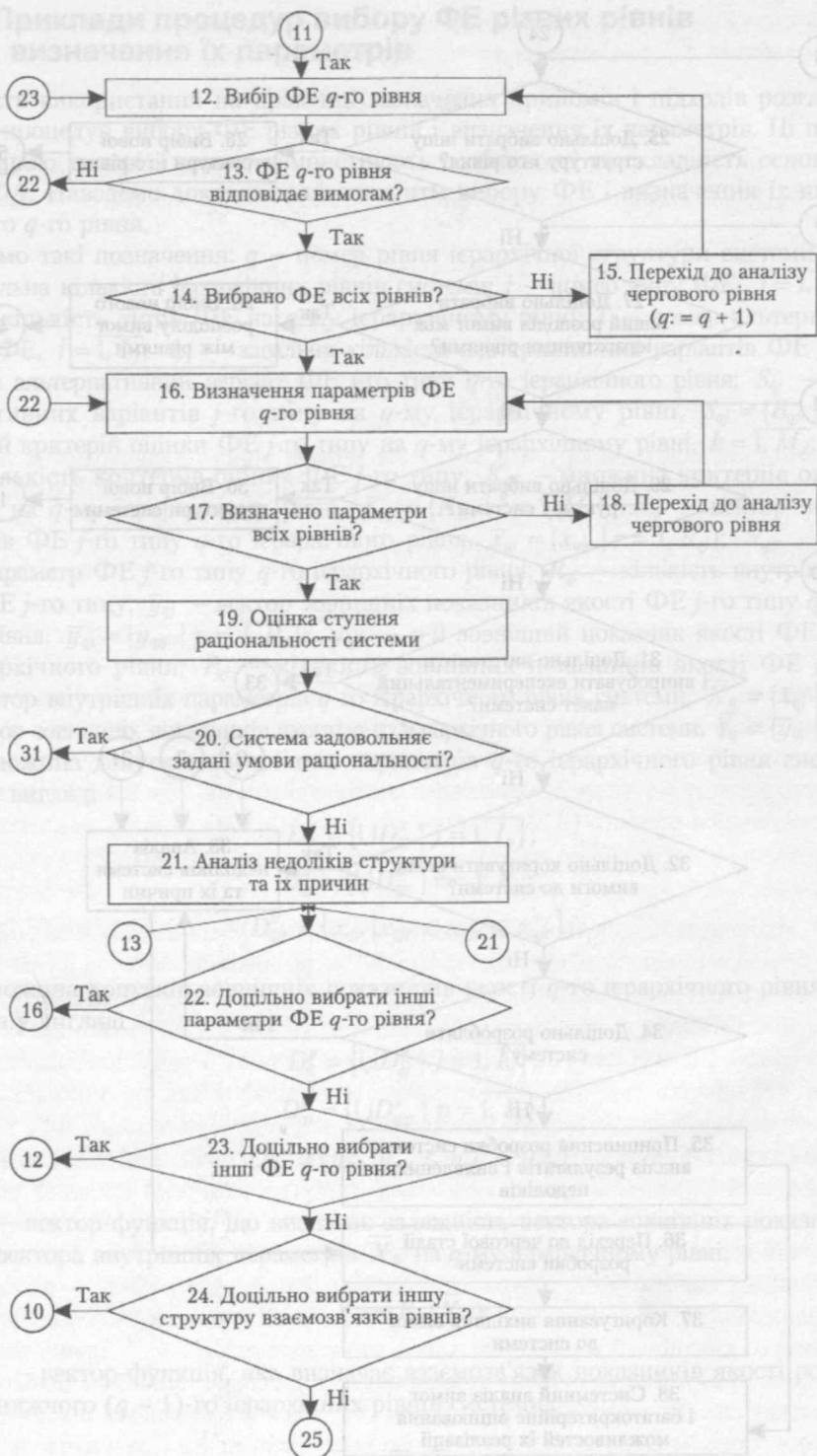


Рис. 8.1 (продовження). Структура узагальненого алгоритму СФА

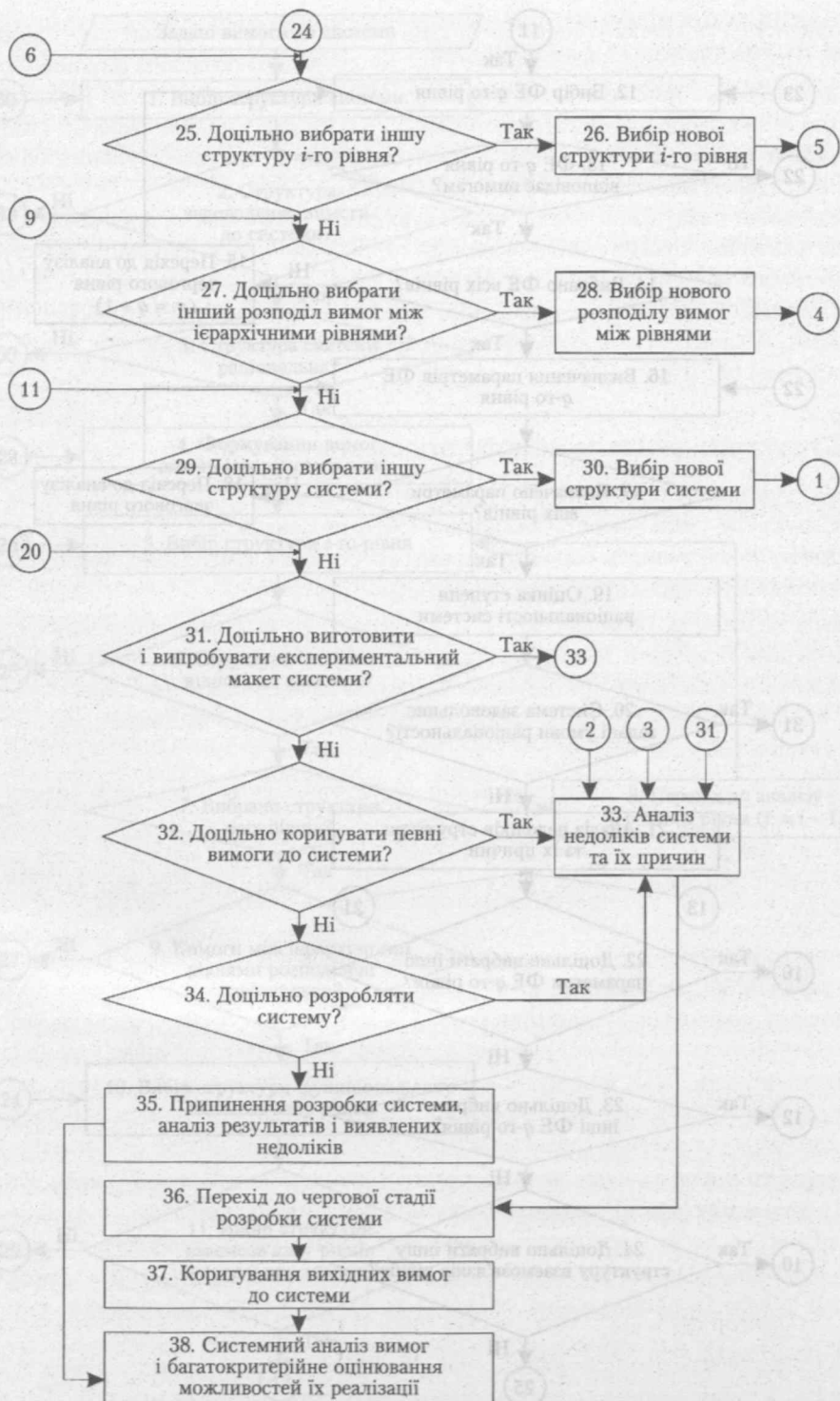


Рис. 8.1 (закінчення). Структура узагальненого алгоритму СФА

8.3.4. Приклади процедур вибору ФЕ різних рівнів і визначення їх параметрів

Доцільність використання на практиці зазначених прийомів і підходів розглянемо на прикладі процедур вибору ФЕ різних рівнів і визначення їх параметрів. Ці процедури певною мірою типові і наочно демонструють особливості та складність основних процедур СФА. Наведемо докладніший алгоритм вибору ФЕ і визначення їх параметрів для одного q -го рівня.

Уведемо такі позначення: q – номер рівня ієрархічної структури системи, $q = \overline{1, Q}$; Q – загальна кількість ієрархічних рівнів системи; j – номер типу ФЕ, $j = \overline{1, J_q}$; J_q – загальна кількість типів ФЕ на q -му ієрархічному рівні; l – номер альтернативного варіанта ФЕ, $l = \overline{1, L_j}$; L_j – загальна кількість альтернативних варіантів ФЕ j -го типу; B_{qjl} – l -й альтернативний варіант ФЕ j -го типу q -го ієрархічного рівня; S_{qj} – множина альтернативних варіантів j -го типу на q -му ієрархічному рівні, $S_{qj} = \{B_{qjl} \mid l = \overline{1, L_j}\}$; K_{qjk} – k -й критерій оцінки ФЕ j -го типу на q -му ієрархічному рівні, $k = \overline{1, M_j}$; M_j – загальна кількість критеріїв оцінки ФЕ j -го типу; K_{qj} – множина критеріїв оцінки ФЕ j -го типу на q -му ієрархічному рівні, $K_{qj} = \{K_{qjk} \mid k = \overline{1, M_j}\}$; $\bar{x}_{qj}$ – вектор внутрішніх параметрів ФЕ j -го типу q -го ієрархічного рівня, $\bar{x}_{qj} = \{x_{qjr} \mid r = \overline{1, R_j}\}$; x_{qjr} – r -й внутрішній параметр ФЕ j -го типу q -го ієрархічного рівня; R_j – кількість внутрішніх параметрів ФЕ j -го типу; $\bar{y}_{qj}$ – вектор зовнішніх показників якості ФЕ j -го типу q -го ієрархічного рівня, $\bar{y}_{qj} = \{y_{qjp} \mid p = \overline{1, P_j}\}$; y_{qjp} – p -й зовнішній показник якості ФЕ j -го типу q -го ієрархічного рівня; P_j – кількість зовнішніх показників якості ФЕ j -го типу; $\bar{X}_q$ – вектор внутрішніх параметрів q -го ієрархічного рівня системи, $\bar{X}_q = \{\bar{x}_{qj} \mid j = \overline{1, J_q}\}$; $\bar{Y}_q$ – вектор зовнішніх показників якості q -го ієрархічного рівня системи, $\bar{Y}_q = \{\bar{y}_{qj} \mid j = \overline{1, J_q}\}$; D_q^x – множина допусків внутрішніх параметрів q -го ієрархічного рівня системи, визначена у вигляді

$$\begin{aligned} D_q^x &= \{\cup D_{qj}^x \mid j = \overline{1, J_q}\}; \\ D_{qj}^x &= \{\cup D_{qjr}^x \mid r = \overline{1, R_j}\}; \end{aligned} \quad (8.17)$$

$$D_{qjr}^x = \{x_{qjr} \mid x_{qjr}^- \leq x_{qjr} \leq x_{qjr}^+\};$$

D_q^y – множина допусків зовнішніх показників якості q -го ієрархічного рівня системи, визначена у вигляді

$$\begin{aligned} D_q^y &= \{\cup D_{qj}^y \mid j = \overline{1, J_q}\}; \\ D_{qj}^y &= \{\cup D_{qjp}^y \mid p = \overline{1, P_j}\}; \\ D_{qjp}^y &= \{y_{qjp} \mid y_{qjp}^- \leq y_{qjp} \leq y_{qjp}^+\}; \end{aligned} \quad (8.18)$$

$\bar{F}_q(\bar{X}_q)$ – вектор-функція, що визначає залежність вектора зовнішніх показників якості $\bar{Y}_q$ і вектора внутрішніх параметрів $\bar{X}_q$ на q -му ієрархічному рівні,

$$\bar{Y}_q = \bar{F}_q(\bar{X}_q); \quad (8.19)$$

$\bar{\Phi}_q(\bar{Y}_{q-1})$ – вектор-функція, яка визначає взаємозв'язок показників якості розглянутого q -го і нижчого $(q-1)$ -го ієрархічних рівнів системи,

$$\bar{Y}_q = \bar{\Phi}_q(\bar{Y}_{q-1}); \quad (8.20)$$

$\bar{f}_q(\bar{F}_q(\bar{X}_q), \bar{\Phi}_q(\bar{Y}_{q-1}))$ — вектор-функція, яка визначає загальну залежність вектора зовнішніх показників $\bar{Y}_q$ у комплексі як від $\bar{X}_q$, так і від $\bar{Y}_{q-1}$,

$$\bar{Y}_q = \bar{f}_q(\bar{F}_q(\bar{X}_q), \bar{\Phi}_q(\bar{Y}_{q-1})). \quad (8.21)$$

Зокрема, $\bar{f}_q$ може бути адитивною або мультиплікативною функцією складових $\bar{F}_q(\bar{X}_q)$ і $\bar{\Phi}_q(\bar{Y}_{q-1})$. Наприклад, співвідношення (8.21) можна зобразити у вигляді

$$\bar{Y}_q = a_q \bar{F}_q(\bar{X}_q) \bar{\Phi}_q(\bar{Y}_{q-1}), \quad (8.22)$$

або

$$\bar{Y}_q = [\bar{F}_q(\bar{X}_q)]^{a_F} [\bar{\Phi}_q(\bar{Y}_{q-1})]^{a_\Phi}; \quad (8.23)$$

$$\bar{Y}_q = a_F \bar{F}_q(\bar{X}_q) + b_\Phi \bar{\Phi}_q(\bar{Y}_{q-1}). \quad (8.24)$$

Пояснимо суть задачі вибору ФЕ q -го ієрархічного рівня і визначення їх параметрів. Спочатку розглянемо найпростіший варіант цієї задачі для найнижчого рівня, для якого $q = 1$. У цьому разі немає ще нижчих рівнів, і тому слід покласти $\bar{Y}_0 = 0$ і $\bar{\Phi}_1(\bar{Y}_0) = 0$.

Тоді вираз (8.21) можна зобразити у вигляді

$$\bar{Y}_1 = \bar{F}_1(\bar{X}_1), \quad (8.25)$$

що безпосередньо впливає з фізичного змісту (немає залежності $\bar{Y}_1$ від показників якості нижчого рівня через його відсутність) і співвідношень (8.21). При цьому співвідношення (8.22) і (8.23) (якщо $\Phi_1(Y_0) = 0$) втрачають фізичний зміст.

За цих умов задача вибору ФЕ і відповідних параметрів полягає у знаходженні таких ФЕ для рівня $q = 1$ (а це еквівалентно знаходженню $\bar{Y}_1$, $\bar{X}_1$ і $\bar{F}_1(\bar{X}_1)$), щоб одночасно виконувалися рівність (8.25) і умова

$$\bar{Y}_1 \in D_1^y; \quad \bar{X}_1 \in D_1^x, \quad (8.26)$$

де D_1^y , D_1^x визначено заданими вимогами (8.17), (8.18) і фізичними обмеженнями.

Складність задачі полягає в тому, що вибір ФЕ не визначає однозначно функції $\bar{F}_1(\bar{X}_1)$. Залежно від структурного взаємозв'язку, зокрема від різних видів прямого і зворотнього зв'язків між ФЕ, змінюється функціональний зв'язок $\bar{Y}_1$ і $\bar{X}_1$, тобто вигляд $\bar{F}_1(\bar{X}_1)$ у формулі (8.25). Інакше кажучи, складність задачі полягає в тому, що заданій структурі ФЕ певного ієрархічного рівня однозначно відповідає певна функціональна залежність між зовнішніми показниками якості і внутрішніми параметрами ФЕ. При цьому обернена відповідність не виконується: будь-якій певній функціональній залежності $\bar{F}_q(\bar{X}_q)$ може відповідати зліченна множина можливих структур. Наочний приклад: різні радіоприймачі одного класу мають однакові показники якості (чутливість, якість звучання тощо), визначені державним стандартом, але суттєво різняться ФЕ, з яких вони виготовлені. Звідси випливає, що вибір структури відповідного ієрархічного рівня — це творча, неформалізована задача, і її розв'язання залежить від індивідуальних особливостей ОПР.

Розглянемо складніший варіант цієї задачі, що відповідає $q > 1$. У цьому разі, як видно з формули (8.21), задача суттєво ускладнюється, оскільки зовнішні показники якості $\bar{Y}_q$ залежать як від внутрішніх параметрів $\bar{X}_q$, так і від зовнішніх показників якості нижчого $(q - 1)$ -го ієрархічного рівня. У свою чергу, вектор $\bar{Y}_{q-1}$ залежить як від $\bar{X}_{q-1}$, так і від $\bar{Y}_{q-2}$ і т. д.

Складність цієї задачі полягає не тільки у тому, що ефективних методів її розв'язання у прямій постановці немає, але й у тому, що одночасно потрібно знайти усі функції у послідовності (8.27). Потреба виконання останньої умови впливає безпосередньо із ТЗ: відомі вимоги тільки до показників якості системи у цілому, тобто тільки D_Q^Y . Звідси маємо, що необхідно одночасно цілеспрямовано та узгоджено розв'язувати дві задачі: задачу вибору функцій $\bar{F}_q(\cdot), \bar{\Phi}_q(\cdot), \bar{f}_q(\cdot)$ та задачу вибору обмежень $D_q^Y \forall q \in [1, Q-1]$ і $D_q^X \forall q \in [1, Q]$.

На практиці для розв'язання зазначеної суперечності та одержання розв'язків наведених двох задач використовують інтуїцію та досвід людини-експерта у методі спроб і помилок. На підставі експертних оцінок вибирають певну ієрархічну структуру системи, задають вимоги до ФЕ кожного ієрархічного рівня та обмеження на внутрішні параметри, тобто $D_q^Y \forall q \in [1; Q-1]$ і $D_q^X \forall q \in [1, Q]$.

Далі для найнижчого рівня ($q=1$) вибирають певні ФЕ і задають певний функціональний взаємозв'язок ФЕ і структури цього рівня. Це дає змогу побудувати деяку математичну модель рівня і цим встановити функціональну залежність $\bar{Y}_1$ і $\bar{X}_1$ у вигляді (8.25). Тоді перевіряють виконання умов (8.26). Якщо вони виконуються, то вибирають ФЕ наступного рівня ($q=2$), інакше — нові ФЕ або нові види взаємозв'язку. Процедуру повторюють до виконання необхідних умов для вищого рівня ($q=Q$), тобто системи у цілому. Розв'язки задачі для всіх рівнів визначає відповідна множина Парето для $\bar{Y}_q(\cdot), \bar{X}_q(\cdot)$ у вигляді D_Q^Y .

Уводячи відповідно до принципу доповнюваності Геделя певні критерії, можна розв'язати таку задачу: визначити, чи раціонально вибрано ФЕ всіх рівнів і чи раціонально визначено $D_q^Y, D_q^X \forall q \in [1, Q]$. Цю задачу можна звести до розглянутої загальної задачі розкриття невизначеностей цілей (див. розд. 4). Її математичне формулювання полягає у розв'язанні системи рівнянь

$$\begin{aligned}\bar{F}_1(\bar{X}_1) - \bar{Y}_1^* &= 0, \\ \bar{f}_2(\bar{F}_2(\bar{X}_2), \bar{\Phi}_2(\bar{Y}_1^*)) - \bar{Y}_2^* &= 0, \\ &\dots \dots \dots \\ \bar{f}_Q(\bar{F}_Q(\bar{X}_Q), \bar{\Phi}_Q(\bar{Y}_{Q-1}^*)) - \bar{Y}_Q^* &= 0,\end{aligned}\tag{8.28}$$

де $\bar{Y}_1^*, \bar{Y}_2^*, \dots, \bar{Y}_Q^*$ — бажані значення показників якості ФЕ відповідних ієрархічних рівнів, які задані експертно або з використанням імітаційного моделювання якісних характеристик системи на підставі (8.27) і задовольняють умови

$$\bar{Y}_q^* \in D_q^Y \quad \forall q = 1, Q-1.\tag{8.29}$$

Області допусків $D_q^Y \forall q \in [1, Q-1]$ для $\bar{Y}_q^*$ можна коригувати у процесі розв'язання цієї задачі, тобто вимоги до ФЕ різних ієрархічних рівнів, крім рівня «система у цілому» ($q=Q$), коригують з умови (8.29), яка визначає досягнення раціональної якості системи у цілому. Як додаткову умову вводять також обмеження

$$\bar{X}_q \in D_q^X \quad \forall q = 1, Q.$$

На першому етапі розв'язання системи (8.28) зводять до розв'язання чебишевської задачі наближення, що полягає у знаходженні таких значень

$$\bar{X}_q^* \in D_q^X \quad \forall q = \overline{1, Q},$$

для яких величина

$$\Delta_q = v_q \left| \bar{Y}_q^* - \bar{f}_q(\cdot) \right|,$$

яку взято за міру чебишевського наближення, була б мінімально можливою:

$$\Delta_q^0 = \min_{\bar{X}_q \in D_q^X} \Delta_q; \quad \bar{X}_q^* = \arg \min_{\bar{X}_q \in D_q^X} \Delta_q,$$

де v_q — коефіцієнт важливості показників якості q -го ієрархічного рівня, який задовольняє умову $0 < v_q \leq 1$. Значення v_q зменшується зі зменшенням ступеня важливості.

На другому етапі за критерій чебишевської задачі слід узяти величину

$$\Delta_Q = \left| \bar{Y}_Q^* - \bar{f}_Q(\cdot) \right|$$

і розв'язати систему (8.28) з умови

$$\Delta_Q^0 = \min_{\bar{X}_q \in \hat{D}_q^X} \min_{\bar{Y}_q \in \hat{D}_q^Y} \Delta_Q. \quad (8.30)$$

У співвідношенні (8.30) покладають, що для $\bar{Y}_q$ величина q задовольняє умові $q \in [1; Q-1]$ і для $\bar{X}_q \Rightarrow q \in [1; Q]$. Тут $\hat{D}_q^X$ і $\hat{D}_q^Y$ визначають області допусків у δ -околі значень $\bar{X}_q^*$ та $\bar{Y}_q^*$, відповідно, та їх описують співвідношеннями вигляду (8.17) і (8.18), у яких беруть

$$\begin{aligned} \hat{D}_{qjr}^x &= \{x_{qjr}^* \mid x_{qjr}^*(1 - \delta_{qjr}) \leq x_{qjr}^* \leq x_{qjr}^*(1 + \delta_{qjr})\}; \\ \hat{D}_{qjp}^y &= \{y_{qjp}^* \mid y_{qjp}^*(1 - \delta_{qjp}) \leq y_{qjp}^* \leq y_{qjp}^*(1 + \delta_{qjp})\}. \end{aligned}$$

Загальну структурну схему алгоритму вибору ФЕ і визначення їх параметрів зображено на рис. 8.2.

Зазначимо, що задача СФА діючої системи у певному сенсі — це окремий випадок розглянутої задачі СФА розроблюваної системи. Справді, для діючої системи визначено всі ієрархічні рівні, усі функціональні залежності показників якості системи від внутрішніх параметрів ФЕ. У цьому разі задачу СФА зводять до перевірки раціональності прийнятих рішень, їх реалізованості на практиці — під час випробування та експериментального відпрацювання системи.

Задача СФА діючої системи може полягати в оцінюванні її здатності функціонувати у критичних або надзвичайних ситуаціях. Вона актуальна для техногенно та екологічно небезпечних об'єктів. Математично такі задачі зводять до системи (8.28), у якій $\bar{F}_q(\bar{X}_q)$, $\bar{\Phi}_q(\bar{Y}_q)$, $\bar{f}_q(\bar{F}_q(\bar{X}_q))$, $\bar{\Phi}_q(\bar{Y}_{q-1})$ можна визначити безпосередньо за даними вимірів показників якості і параметрів системи.

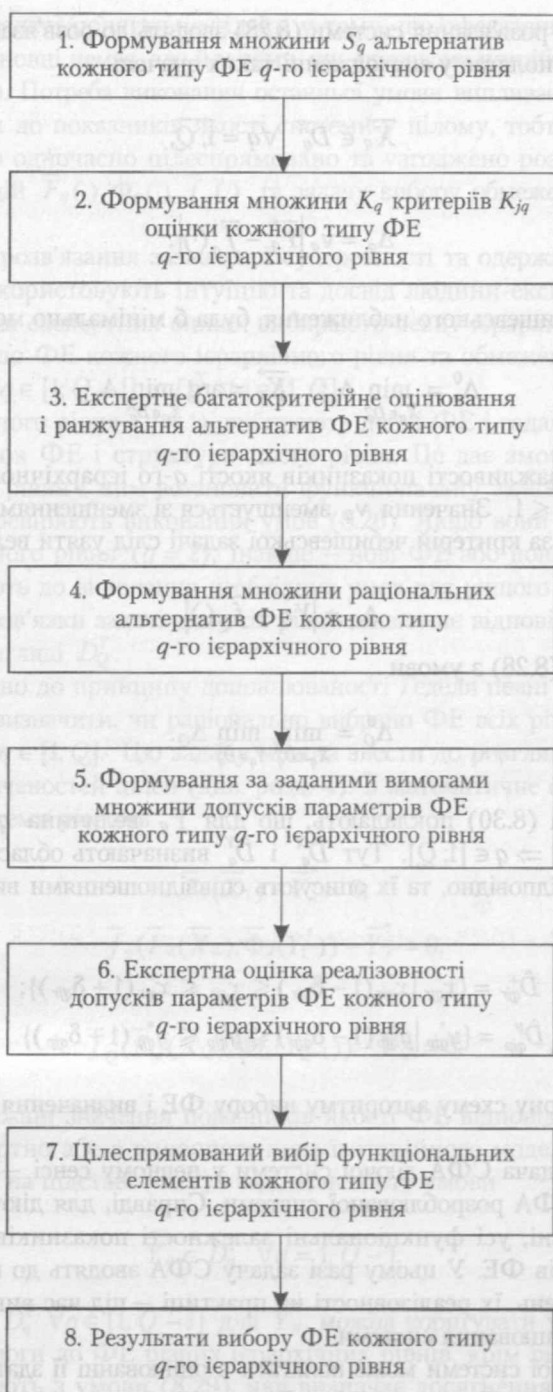


Рис. 8.2. Структурна схема алгоритму вибору ФЕ і визначення їх параметрів

Розв'язок задачі СФА — основа для решти задач системного аналізу другого концептуального функціонального простору властивостей складної ієрархічної системи.

8.4. Системна оптимізація складних конструктивних елементів сучасної техніки

Загальна тенденція підвищення вимог до функціональності, міцності, надійності, економічності, безпеки та інших характеристик сучасної техніки веде до ускладнення конструкцій та умов їх функціонування. Це ставить низку нових системних задач проектування, експериментального відпрацювання, випробувань і технічної діагностики конструкцій [46, 105, 172, 176]. До них належать різні оптимізаційні задачі [160], зокрема задача пошуку раціонального компромісу суперечливих вимог до міцності, надійності, технологічності, техніко-економічної ефективності конструкцій з урахуванням штатних умов експлуатації і факторів ризику можливих позаштатних ситуацій [43, 108, 166, 167, 224]. Один із підходів до розв'язання такої задачі для штатних режимів, який дає змогу знайти раціональний компроміс вимог до міцності, надійності, техніко-економічної ефективності та інших показників якості конструкції, а також системно оптимізувати її параметри, запропоновано у працях [121, 240, 243, 244].

Потреба неперервного підвищення ефективності та безпеки техніки зумовлює потребу більш повного і достовірного врахування факторів ризику позаштатних ситуацій експлуатації на етапі проектування складних об'єктів. У цьому розділі запропоновано новий підхід до розв'язання багатокритерійних задач структурної і параметричної оптимізації неоднорідних анізотропних конструктивних елементів складних технічних об'єктів. Він ґрунтується на раціональному виборі ієрархічної структури складної конструкції в сенсі раціонального розподілу вимог до функціональних конструктивних елементів кожного ієрархічного рівня і раціонального компромісу суперечливих вимог до міцності, надійності, технологічності, техніко-економічної ефективності конструкції з урахуванням ризику позаштатних ситуацій функціонування. Для розв'язання таких задач застосовують нові системні прийоми оцінювання факторів ризику в умовах позаштатних і критичних ситуацій [246, 247].

8.4.1. Системна структурна оптимізація складних об'єктів

На етапі проектування складних об'єктів сучасної техніки найвідповідальнішою і найскладнішою є системна задача формалізованого подання розроблюваного виробу як багаторівневої ієрархічної системи. Міра деталізації цього подання має дозволяти раціонально організовувати послідовно-паралельну розробку функціональних елементів кожного ієрархічного рівня. На практиці ця задача має такі особливості [121].

- ♦ Вибір структури розроблюваного об'єкта — це неформалізована задача. Структуру формують як суб'єктивне розуміння розробником певних видів взаємозв'язків між функціональними елементами розроблюваного об'єкта, який подають у вигляді деякої багаторівневої ієрархічної системи.
 - ♦ Вибір кількості ієрархічних рівнів і функціональних елементів на кожному рівні, формування та обґрунтування критеріїв вибору функціональних елементів кожного рівня — неформалізовані задачі. Особа, яка приймає рішення, здійснює цей вибір, керуючись досвідом, інтуїцією та набутими знаннями.
- На кожному ієрархічному рівні є велика кількість можливих альтернативних рішень. Тому прямий перебір усіх можливих варіантів структури приводить до задачі трансобчислювальної складності, точне розв'язання якої принципово неможливе [66].

- ♦ Вихідна інформація має значний рівень невизначеності та неповноти. Зокрема, відомі тільки задані вимоги до властивостей і характеристик проєктованого об'єкта у цілому, а вимоги до функціональних елементів кожного ієрархічного рівня потрібно формувати у процесі розроблення.

Для уникнення прямого перебору варіантів успішно використовують і розвивають *метод послідовного аналізу* [21, 25, 35, 160]. Водночас системна задача формування раціональної ієрархічної структури, що містить раціональний вибір кількості ієрархічних рівнів, раціональне формування вимог до функціональних елементів усіх рівнів, раціональний вибір функціональних елементів кожного ієрархічного рівня, не має ефективних методів розв'язання.

Тому розробка і вдосконалення прийомів та методів, що дозволяють суттєво зменшити обсяг обчислень і вибрати раціональну структуру об'єкта, виключаючи прямий перебір усіх можливих альтернативних варіантів структури, — важлива для практики задача.

Задачу *структурної оптимізації* складних об'єктів розв'язують, використовуючи *метод цілеспрямованого вибору раціональної ієрархічної структури* за заданими вимогами Q_0 до об'єкта у цілому [121, 127]:

$$Q_0 = \{K_r^0 \mid K_r^- \leq K_r^0 \leq K_r^+; r = \overline{1, R_0}\}, \quad (8.31)$$

де K_r^0 — r -й показник якості об'єкта.

Вихідну задачу подамо як послідовність задач:

- ♦ вибору раціональної кількості ієрархічних рівнів;
- ♦ формування раціональних вимог до функціональних елементів ієрархічної структури за заданими вимогами до об'єкта;
- ♦ цілеспрямованого вибору раціональної ієрархічної структури об'єкта.

Розглянемо ці задачі.

8.4.2. Вибір раціональної кількості ієрархічних рівнів

Наведемо формалізований опис ієрархічної структури, використовуючи теоретико-множинні поняття загальної теорії систем [103]. Враховуючи, що кількість ієрархічних рівнів m скінченна, зобразимо модель проєктованого об'єкта у вигляді декартового добутку:

$$S_0 = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_i \times \dots \times S_m, \quad (8.32)$$

де S_0 — ієрархічний рівень, що відповідає об'єкту у цілому; S_i — i -й ієрархічний рівень, що формується у вигляді

$$S_i = \langle M_i, f_i, \phi_i, X_i, Y_i \rangle; \quad M_i = \{\Phi_{ij} \mid j \in \hat{N}_i, \hat{N}_i = \overline{1, N_i}\}; \quad (8.33)$$

$$\phi_i : X_i \rightarrow Y_i; \quad f_i : Y_i \rightarrow Y_{i-1}, \quad (8.34)$$

де M_i — множина функціональних елементів i -го рівня; Φ_{ij} — функціональний елемент j -го типу на i -му рівні; ϕ_i, f_i — функціонали, що визначають взаємозв'язок відповідних параметрів; N_i — кількість типів функціональних елементів на i -му ієрархічному рівні; X_i, Y_i — множини, відповідно, внутрішніх і зовнішніх параметрів функціональних елементів i -го рівня, визначені співвідношеннями

$$Y_i = \{Y_{ij} \mid j \in \hat{N}_i; \hat{N}_i = \overline{1, N_i}\}; \quad X_i = \{X_{ij} \mid j \in \hat{N}_i; \hat{N}_i = \overline{1, N_i}\}.$$

На основі цих співвідношень сформулюємо задачу знаходження кількості $\hat{m}$ раціональних рівнів структури.

Нехай цільову функцію $g(m, \omega, u) = G(m, \omega, u, P(m, \omega))$ визначено на основі функції перетворення $P: Q_0 \times M_v \rightarrow S_{0v}$, оцінної функції $G: Q_0 \times \Omega \times S_{0v} \rightarrow C_v$ і функції обмеження витрат $\tau: Q_0 \times \Omega \rightarrow C$. Потрібно знайти таке $\hat{m} \in [m^-; m^+]$, щоб для всіх $\omega \in \Omega$ у разі реалізації заданих вимог витрати не перевищували допустимих значень $g(\hat{m}, \omega, \hat{u}) \leq \tau(\omega)$. У наведених виразах S_{0v} — структура (8.32), що складається з m_v рівнів; M_v — множина всіх функціональних елементів структури S_{0v} , $M_v = \{M_i \mid i = \overline{1, m_v}\}$; u_v — вектор управління; Ω — множина невизначених факторів, що впливають на якість і витрати об'єкта; C_v — множина витрат на життєвий цикл об'єкта за вибраної структури S_{0v} ; $C_v = \{c_v \mid v = \overline{1, \chi_v}\}$; C — множина допустимих витрат на життєвий цикл об'єкта.

8.4.3. Формування раціональних вимог до функціональних елементів ієрархічної структури

Для формування вимог до функціональних елементів структури S_{0v} встановимо взаємозв'язок зовнішніх параметрів різних рівнів [136]. Із формули (8.34) випливає

$$Y_0 = f_0(Y_1), \dots, Y_i = f_i(Y_{i+1}), \dots, Y_{m-1} = f_{m-1}(Y_m). \quad (8.35)$$

Для всіх $i = \overline{1, \hat{m}}$, покладаючи $Y_i = \{Y_{ir} \mid r_i = \overline{1, R_i}\}$ і враховуючи, що відповідно до формули (8.32) $Y_0 = Q_0$, з формули (8.33), (8.35) і (8.31) з метою визначення вимог до рівня $i = 1$ одержуємо системи рівнянь:

$$K_r^- = f_{0r}(Y_{1r}^-); \quad K_r^+ = f_{0r}(Y_{1r}^+); \quad r = \overline{1, R_0}; \quad r_1 = \overline{1, R_1}.$$

Розв'язки цих систем $\hat{Y}_1^- = \{\hat{Y}_{1r}^- \mid r_1 = \overline{1, R_1}\}$; $\hat{Y}_1^+ = \{\hat{Y}_{1r}^+ \mid r_1 = \overline{1, R_1}\}$ — це вихідні дані для визначення $\hat{Y}_2^-, \hat{Y}_2^+$. У загальному випадку для $i \in [1; m]$ маємо такі системи рівнянь:

$$\hat{Y}_{ir}^- = f_{ir}(Y_{(i+1)r_{i+1}}^-); \quad \hat{Y}_{ir}^+ = f_{ir}(Y_{(i+1)r_{i+1}}^+); \quad r_i = \overline{1, R_i}; \quad r_{i+1} = \overline{1, R_{i+1}}. \quad (8.36)$$

Отже, визначення вимог до функціональних елементів структури зводиться до формулювання послідовності систем рівнянь (8.36). На підставі значень $\hat{Y}_i^-, \hat{Y}_i^+$, одержаних із формули (8.36), визначають вимоги до зовнішніх показників k_{ijq} кожного типу функціональних елементів Φ_{ij} :

$$\hat{K}_{ij} = \{k_{ijq} \mid k_{ijq}^- \leq k_{ijq} \leq k_{ijq}^+; q = \overline{1, \hat{q}_{ij}}\}, \quad (8.37)$$

які є вихідними даними для задачі вибору функціональних елементів S_0 .

Сформулюємо задачу вибору структури об'єкта [127, 241]. Нехай структура $\hat{S}_0$ проєктованого об'єкта складається з $\hat{m}$ ієрархічних рівнів S_i , $i = \overline{1, \hat{m}}$. Кожний рівень S_i складається з n_i типів функціональних елементів Φ_{ij} , $j = \overline{1, n_i}$. Кожний функціональний елемент Φ_{ij} характеризують параметри k_{ijq} , $q = \overline{1, \hat{q}_{ij}}$. Альтернативні варіанти функціонального елементу Φ_{ij} визначає множина $M\Phi_{ij}$. Потрібно: вибрати по одному функціональному елементу кожного j -го типу на кожному i -му ієрархічному рівні з умови (8.37); побудувати множину Парето Π_S раціональних структур $\hat{S}_{0v}$ об'єкта.

Для всіх $i = \overline{1, \hat{m}}$, $j = \overline{1, n_i}$ вважають відомими множини $M\Phi_{ij}$, що складаються з альтернативних варіантів функціональних елементів Φ_{ij} . Кожна множина $M\Phi_{ij}$ складається з підмножин $M\Phi_{ij}^-$ і $M\Phi_{ij}^+$, $M\Phi_{ij} = M\Phi_{ij}^+ \cup M\Phi_{ij}^-$;

$$M\Phi_{ij}^+ \cap M\Phi_{ij}^- = \emptyset;$$

$$M\Phi_{ij}^+ = \{\Phi_{ij\beta}^+ \Leftrightarrow k_{ij\beta} \mid k_{ij\beta} \in \hat{K}_{ij}; \beta = \overline{1, n_{ij}^+}\};$$

$$M\Phi_{ij}^- = \{\Phi_{ij\beta}^- \Leftrightarrow k_{ij\beta} \mid k_{ij\beta} \notin \hat{K}_{ij}; \beta = \overline{1, n_{ij}^-}\}.$$

Елементи множин $M\Phi_{ij}^-$ і $M\Phi_{ij}^+$ розміщені у множині $M\Phi_{ij}$ неупорядковано, випадково. Відомі числові значення $n_{ij}^- > 0$; $n_{ij}^+ > 0$, але невідомо, якій множині — $M\Phi_{ij}^-$ чи $M\Phi_{ij}^+$ — належить конкретний елемент Φ_{ij} множини $M\Phi_{ij}$.

8.4.4. Цілеспрямований вибір раціональної ієрархічної структури

Суть методу цілеспрямованого вибору раціональної ієрархічної структури конструкції полягає у наступному [121, 127, 138, 225]. Із множини $M\Phi_{ij}$ елементи вибирають послідовно. Якщо за чергової спроби α виявляють, що $\Phi_{ij\alpha} \in M\Phi_{ij}^-$, то $\Phi_{ij\alpha}$ виключають із $M\Phi_{ij}$. Наступний вибір виконують з отриманої множини $\bar{M}_{ij}$. Вибір елемента j -го типу на i -му ієрархічному рівні припиняють, якщо за чергової спроби γ обраний елемент $\Phi_{ij\gamma}$ належить множині $M\Phi_{ij}^+$. Виконання цієї процедури для всіх $i = \overline{1, \hat{m}}$, $j = \overline{1, n_i}$ дає змогу одержати одну структуру об'єкта, всі елементи якої задовольняють умові (8.37).

Для забезпечення раціонального вибору структури складної системи формують скінченну множину структур. У цьому разі другу і наступну структури системи шукають, вибираючи елементи з множин $\bar{M}_{ij}$, $i = \overline{1, \hat{m}}$, $j = \overline{1, n_i}$, одержаних під час вибору попередньої структури. Множина таких структур задовольняє умові (8.37) і є множиною Парето.

Зазначений метод реалізовано у вигляді обчислювального алгоритму. Обчислювальну складність для алгоритмів вибору структури системи можна визначити через кількість спроб вибору, які потрібно виконати для вибору функціонального елемента $\Phi_{ij}^+ \in M\Phi_{ij}^+$ для всіх $i = \overline{1, \hat{m}}$, $j = \overline{1, n_i}$.

Визначимо кількість спроб вибору за пропонуванням методом. Ці спроби треба виконати, щоб гарантувати вибір функціонального елемента j -го типу на i -му ієрархічному рівні з умови (8.37).

Одержимо співвідношення для ймовірності *гарантованого вибору функціонального елемента* $\Phi_{ij} \in M\Phi_{ij}^+$, якщо $j = \text{const}$ і $i = \text{const}$. Врахуємо, що в послідовності спроб вибору функціональних елементів із $M\Phi_{ij}$ спроби k і $(k+1)$ — незалежні. Тоді ймовірність вибору $\Phi_{ij} \in M\Phi_{ij}^+$ із першої спроби ($k=1$) визначає співвідношення

$$P_1(\Phi_{ij} \in M\Phi_{ij}^+) = 1 - (1 - n_{ij}^+/n_{ij})^{n_{ij}}. \quad (8.38)$$

Тут враховано, що ймовірність вибору одного певного варіанта функціонального елемента з $M\Phi_{ij}^+$ дорівнює n_{ij}^+/n_{ij} . Тому вибір будь-якого функціонального елемента з $M\Phi_{ij}^+$ визначатиме формула (8.38). Якщо перша спроба невдала, вибраний елемент виключають із $M\Phi_{ij}$ і загальну кількість елементів множини $M\Phi_{ij}$ зменшують на 1. Тому для другої спроби ймовірність вибору будь-якого функціонального елемента з $M\Phi_{ij}$ визначає співвідношення

$$P_2(\Phi_{ij} \in M\Phi_{ij}^+) = 1 - (1 - n_{ij}^+/(n_{ij} - 1))^{(n_{ij}-1)}.$$

Для k -ї спроби маємо

$$P_k(\Phi_{ij} \in M\Phi_{ij}^+) = 1 - (1 - n_{ij}^+ / (n_{ij} - (k-1)))^{(n_{ij} - (k-1))},$$

для $k = n_{ij}^- + 1$:

$$P_k(\Phi_{ij} \in M\Phi_{ij}^+) = 1 - (1 - n_{ij}^+ / n_{ij}^+)^{n_{ij}^+} = 1. \quad (8.39)$$

Тут враховано, що $n_{ij} = n_{ij}^- + n_{ij}^+$. Отже, з формули (8.39) одержуємо, що вибір $\Phi_{ij} \in M\Phi_{ij}^+$, якщо $j = \text{const}$ і $i = \text{const}$, гарантовано за умов, що кількість спроб вибору визначено співвідношенням

$$k_{ij}^+ = n_{ij}^- + 1. \quad (8.40)$$

Отже, у разі вибору j -го функціонального елемента на i -му ієрархічному рівні з умови (8.37) для формування множини $M_{ij}^+ = \{\Phi_{ij}^+ \in M\Phi_{ij}^+ \mid i \in [1, \hat{m}]; j = \overline{1, n_i}\}$ достатньо переглянути k_{ij}^+ функціональних елементів із множини $M\Phi_{ij}$.

Загальну кількість функціональних елементів на i -му рівні визначає співвідношення

$$N_i = \sum_{j=1}^{n_i} n_{ij}.$$

Беручи до уваги, що для різних $j = 1, \dots, n_i$ кількість спроб вибору k_i^+ — незалежна, одержуємо, що $k_i^+ = k_{i1}^+ + \dots + k_{in_i}^+$ або, з огляду на формулу (8.40),

$$k_i^+ = \sum_{j=1}^{n_i} (n_{ij}^- + 1),$$

де k_i^+ — кількість спроб, потрібних для вибору всіх типів функціональних елементів i -го рівня з умови (8.37).

Врахуємо, що функціональні елементи на кожному ієрархічному рівні вибирають незалежно. У цьому разі загальну кількість спроб k^+ для вибору всіх функціональних елементів для всіх рівнів структури визначають за формулою

$$k^+ = \sum_{i=1}^{\hat{m}} k_i^+.$$

Розв'язавши сукупність задач структурної оптимізації, потрібно перейти до задачі параметричної оптимізації складної системи. Розглянемо її.

8.4.5. Системна параметрична оптимізація

Параметричну оптимізацію виконують для досягнення таких системних взаємозалежних цілей:

- забезпечення раціонального компромісу суперечливих вимог до міцності, надійності, технологічності, техніко-економічної ефективності конструкції у штатному режимі функціонування;
- забезпечення потрібного рівня безпеки на основі мінімізації ступеня і рівня ризику потенційно можливих позаштатних ситуацій [62, 245–247].

Розглянемо цю задачу на прикладі складної механічної конструкції.

У загальному випадку задача формулюється таким чином. Для конструкції, з неоднорідного анізотропного матеріалу, яка працює у складних умовах нерівномірних силових і температурних впливів, потрібно:

- ♦ знайти раціональний компроміс між суперечливими вимогами до міцності, надійності, технологічності і техніко-економічних показників конструкції;
- ♦ визначити оптимальні значення параметрів конструкції і матеріалів з умови раціонального компромісу вимог до міцності, надійності, технологічності, техніко-економічної ефективності у штатних режимах експлуатації і за допустимих обмежень ризику позаштатних ситуацій.

Для розв'язання цієї задачі потрібно:

- ♦ побудувати математичні моделі, які описують залежність показників міцності y_s , надійності y_r , технологічності y_t і техніко-економічної ефективності y_{te} від геометричних та фізико-механічних параметрів конструкції і матеріалів у вигляді:

$$\bar{y}_s = \bar{f}_s(\bar{x}); \quad \bar{y}_r = \bar{f}_r(\bar{x}); \quad \bar{y}_t = \bar{f}_t(\bar{x}); \quad \bar{y}_{te} = \bar{f}_{te}(\bar{x}); \quad (8.41)$$

- ♦ знайти такі значення показників

$$\bar{y}_s = \bar{b}_s^*; \quad \bar{y}_r = \bar{b}_r^*; \quad \bar{y}_t = \bar{b}_t^*; \quad \bar{y}_{te} = \bar{b}_{te}^*, \quad (8.42)$$

які б забезпечували раціональний компроміс між суперечливими вимогами до міцності, надійності, технологічності і техніко-економічних характеристик конструкції;

- ♦ увести показники ризику позаштатних ситуацій і визначити для них допустимі обмеження;
- ♦ побудувати математичні моделі, які описують залежність показників ризику позаштатних ситуацій від геометричних та фізико-механічних параметрів конструкції і параметрів факторів ризику;
- ♦ знайти такі значення $\bar{x}^0$ вектора $\bar{x} = \{x_j \mid j = \overline{1, n}\}$, які забезпечують виконання умови (8.42) у штатних режимах експлуатації і за допустимих обмежень показників ризику позаштатних ситуацій.

Підходи до побудови математичних моделей (8.41) розглянуто в [32, 69–71, 233–235, 238, 239, 242, 244]. Тому обґрунтуємо обмеження штатних режимів експлуатації та обмеження ризику позаштатних ситуацій, які слід враховувати під час вибору раціонального компромісу [121]. На практиці величини $b_s^*, b_r^*, b_t^*, b_{te}^*$ в умові (8.42) потрібно вибирати в межах певних інтервалів, що зумовлено впливом фізичних, технологічних, експлуатаційних та інших обмежень.

Для штатних режимів функціонування конструкції такі інтервали зазвичай задають у вигляді:

$$b_i \in B_i, \quad B_i = [b_i^-, b_i^+], \quad (8.43)$$

де b_i — компоненти векторів $\bar{b}_s, \bar{b}_r, \bar{b}_t, \bar{b}_{te}$, що складають вектор $\bar{b} = \{b_i \mid i = \overline{1, m}\}$ потрібних показників якості конструкції; m — загальна кількість показників. Кожний інтервал B_i визначає допустимі межі зміни відповідного показника у разі впливу неконтрольованих факторів виробництва та експлуатації конструкції. Найважливіші цілі вибору B_i — це, *по-перше*, збереження певного рівня працездатності конструкції у разі довільних змін неконтрольованих факторів; *по-друге*, введення умови, яка полягає в тому, що випадкові

зміни кожного неконтрольованого фактора відбуваються в заздалегідь заданих допустимих межах. Зокрема, міжнародні і національні стандарти на кожен вид техніки визначають допустимі інтервали зміни параметрів зовнішнього середовища: температури, вологості тощо. Отже, штатні умови функціонування конструкції визначають апіорно відомі інтервали допустимих змін як якісних показників конструкції, так і неконтрольованих факторів. Тому будь-який штатний режим функціонування в загальному розумінні можна характеризувати як детермінований режим, оскільки його узагальнено описують відомі дані.

Принципово інший підхід застосовують для аналізу функціонування конструкції в позаштатній ситуації. Зумовлено це кількома причинами. *По-перше*, у позаштатній ситуації можливі не лише випадкові відхилення якісних показників і неконтрольованих факторів за межі допустимих інтервалів, але й випадкові специфічні структурні зміни у конструктивних елементах. Наприклад, в авіаційних газотурбінних двигунах (АГТД) можливі такі структурні зміни: пластичне деформування, термовтомленісне розтріскування, руйнування спеціальних покриттів, тріщини втоми від внутрішніх дефектів (ливарні тріщини, газові бульбашки, дефекти термічного відпрацювання) тощо. *По-друге*, позаштатні ситуації можуть виникати внаслідок впливу побічних факторів експлуатації. Наприклад, в АГТД — поява ударних навантажень через потрапляння різних сторонніх предметів, поява нерівномірного поля температур унаслідок порушення процесів горіння тощо. Ці фактори можуть призвести не лише до недопустимого зниження показників якості конструкції, але й до руйнування конструктивних елементів із катастрофічними наслідками. Отже, режим функціонування конструкції у позаштатній ситуації — принципово недетермінований режим. Звідси випливає потреба аналізувати позаштатні ситуації з погляду теорії ризику.

Ризик позаштатної ситуації враховуватимемо двома показниками: *ступенем ризику* ρ_{os} — імовірністю появи позаштатної ситуації, і *рівнем ризику* W_{os} — величиною можливого збитку від наслідків позаштатної ситуації, нормованою до одного з економічних показників, наприклад, до прибутку. Для врахування факторів позаштатних ситуацій у задачі системної оптимізації складних конструкцій, зокрема конструктивних елементів авіаційної і ракетної техніки, доцільно умови (8.41) і (8.43) раціонального компромісу вимог для штатних ситуацій узгодити з допустимим значенням ризику позаштатних ситуацій. Для цього сформуємо інтервал допустимого ризику. *Інтервалом допустимого ризику* називатимемо такий інтервал w_{a_0} , який визначає допустимі зміни вектора $\bar{b}$ з умови, що ступінь та рівень ризику будь-якої ситуації S_v з множини S_{ps} прогнозованих позаштатних ситуацій не перевищуватимуть апіорно заданих значень ρ_{a_0}, w_{a_0} . Зобразимо цей інтервал у вигляді

$$w_{a_0} = \{\bar{b} \mid \rho_{os}^+(\bar{b}, \bar{\xi}) \leq \rho_{a_0}; W_{os}^+(\bar{b}, \bar{\xi}) \leq W_{a_0}; \bar{b} \in B_{ps}, \bar{\xi} \in \Xi_{ps}\}, \quad (8.44)$$

$$S_{ps} = \{S_v \Rightarrow \langle \bar{b}_v, \bar{x}_v, \bar{\xi}_v \rangle \mid \bar{b}_v \in B_{ps}; \bar{x}_v \in X_{ps}; \bar{\xi}_v \in \Xi_{ps}; v = \overline{1, N_{ps}}\},$$

де $\rho_{os}^+(S_v)$ і $W_{os}^+(S_v)$ — відповідно максимально допустимі ступінь та рівень ризику довільної ситуації $S_v \in S_{ps}$; B_{ps} , X_{ps} і Ξ_{ps} — відповідно допустимі інтервали зміни векторів $\bar{b}$, $\bar{x}$ і $\bar{\xi}$ для множини прогнозованих ситуацій S_{ps} . Ці інтервали визначені співвідношеннями

$$B_{ps} = \{B_{pi} \mid i = \overline{1, m}\}; \quad B_{pi} = \{b_i \mid b_{pi}^- \leq b_i \leq b_{pi}^+\}; \quad (8.45)$$

$$X_{ps} = \{X_{pj} \mid j = \overline{1, n}\}; \quad X_{pj} = \{\bar{x}_j \mid \bar{x}_{pj}^- \leq \bar{x}_j \leq \bar{x}_{pj}^+\}; \quad (8.46)$$

$$\Xi_{ps} = \{\Xi_{pq} \mid q = \overline{1, Q}\}; \quad \Xi_{pq} = \{\xi_q \mid \xi_{pq}^- \leq \xi_q \leq \xi_{pq}^+\}. \quad (8.47)$$

Отже, співвідношення (8.43) і (8.44) з урахуванням обмежень (8.45)–(8.47) дають змогу описувати допустимі інтервали зміни показників якості конструкції для заданих допусків у штатних режимах експлуатації і для відомих обмежень на ступінь та рівень ризику прогнозованих позаштатних ситуацій.

8.4.6. Алгоритм розв'язання задачі параметричної оптимізації

Алгоритм базується на комплексному використанні сучасних можливостей: теорії системного аналізу і методів проектування [46, 121]; засобів та методів експертних процедур [117] і штучного інтелекту, зокрема нечітких ситуаційних алгоритмів обробки інформації [102]; методу узагальненої послідовної лінеаризації та адаптивних алгоритмів чебишевського наближення несумісної системи нелінійних рівнянь [86, 152]. Він визначає структуру і взаємозв'язок процедур системного моделювання і параметричної оптимізації конструкції на основі системи рівнянь

$$f_i(\bar{x}) - b_i = 0; \quad \bar{x} = \{x_j \mid j = \overline{1, n}\}, \quad i = \overline{1, m}; \quad m > n.$$

Алгоритм розв'язання задачі параметричної оптимізації реалізований в інтерактивному режимі і містить такі узагальнені процедури.

1. Вибір варіанта конструкції.
2. Побудова математичних моделей (8.41) для прийнятого варіанта конструкції.
3. Вибір раціонального компромісу вимог (8.42).
4. Системне моделювання позаштатних ситуацій.
5. Розв'язання задачі системної оптимізації конструкції для вибраних вимог з урахуванням обмежень (8.43) і (8.44).
6. Оцінка відповідності якості конструкції бажаному рівню. Прийняття рішення про перехід до процедури 7 або 9.
7. Уточнення вимог до конструкції. Прийняття рішення про перехід до процедури 3 або 8.
8. Пошук нового варіанта конструкції. Перехід до процедури 2.
9. Припинення діалогу. Одержання розв'язків задачі.

Потребу використання інтерактивного режиму зумовлено тим, що для реалізації процедур 1–3 і 6–8 застосовують експертне оцінювання деяких показників і прийняття рішення про вибір певної альтернативи.

Найскладнішою є комплексна процедура 4. Її реалізують у вигляді такої послідовності часткових процедур.

- 4.1. Експертне прогнозування множини позаштатних ситуацій S_{ps} .
- 4.2. Побудова математичних моделей показників ризику $\rho_{os}(\bar{b}, \bar{\xi})$, $W_{os}(\bar{b}, \bar{\xi})$ для множини S_{ps} .
- 4.3. Експертне визначення допустимого рівня ризику $\rho_{\alpha o}^+$, $W_{\alpha o}^+$.
- 4.4. Формування інтервалу допустимого рівня ризику (8.44).
- 4.5. Оцінювання показників ризику для інтервалу (8.43).
- 4.6. Прийняття рішення про доцільність реалізації прийнятої конструкції за результатами процедури 4.5. Перехід до процедури 5, 7 або 3.

Мета процедури 4 — забезпечити необхідні *точність, достовірність та обґрунтованість* оцінки ступеня і рівня ризику позаштатних ситуацій для системної оптимізації конструкції. У цій процедурі найскладнішою є побудова математичних моделей показників ризику, які повинні відображати процеси втомленісного, термічного та інших видів механізмів старіння й руйнування конструкції за впливу неконтрольованих і побічних факторів експлуатації.

Математичні моделі показників ризику зобразимо у вигляді:

$$\rho_{os}(S_v) = F_p(\tilde{\xi}_v, \tilde{\chi}_v, \tilde{\xi}_v); \quad W_{os}(S_v) = F_w(\tilde{\xi}_v, \tilde{\chi}_v, \tilde{\xi}_v), \quad (8.48)$$

де $\tilde{\xi}_v, \tilde{\chi}_v, \tilde{\xi}_v$ — вектори нечітких індикаторів, що відображають ступінь належності ситуації S_v до множини S_{ps} за рівнем відхилення, відповідно, $\tilde{b}, \tilde{x}, \tilde{\xi}$ в інтервалах B_{ps}, X_{ps}, Ξ_{ps} від граничних умов.

Моделі (8.48) будують на базі узагальненої функціонально-імітаційної моделі:

$$\tilde{y} = \tilde{\Phi}(\tilde{x}, \tilde{\xi}),$$

де нечіткі вихідні $\tilde{y}$, вхідні $\tilde{x}$ і зовнішні некеровані показники $\tilde{\xi}$ описують співвідношення:

$$\tilde{y} = \{\tilde{y}_i | i = \overline{1, m}\}; \quad \tilde{x} = \{\tilde{x}_j | j = \overline{1, n}\}; \quad \tilde{\xi} = \{\tilde{\xi}_q | q = \overline{1, Q}\};$$

$$\tilde{y}_i \in \tilde{Y}_i; \quad \tilde{Y}_i = \{\mu_{Y_i}(y_i) | y_i \in Y_i; \mu_{Y_i}(y_i) \in [0; 1]\};$$

$$\tilde{x}_j \in \tilde{X}_j; \quad \tilde{X}_j = \{\mu_{X_j}(x_j) | x_j \in X_j; \mu_{X_j}(x_j) \in [0; 1]\};$$

$$\tilde{\xi}_q \in \tilde{\Xi}_q; \quad \tilde{\Xi}_q = \{\mu_{\Xi_q}(\xi_q) | \xi_q \in \Xi_q; \mu_{\Xi_q}(\xi_q) \in [0; 1]\}.$$

Вихідна інформація для побудови моделей — результати випробувань різних матеріалів, дані експериментального відпрацювання та випробувань конструктивних елементів, результати технічного діагностування конструкцій у процесі експлуатації, а також апріорні дані, обмеження та закономірності теорії механічних, фізичних та інших процесів.

Задачі побудови моделей і багатокритерійної оптимізації конструкції зводять до послідовності чебишевських задач наближення, описуваних несумісними системами нелінійних рівнянь. Такий підхід до розв'язання задачі багатокритерійної оптимізації конструкції для штатного режиму функціонування докладно розглянуто у [240].

8.5. Приклади розв'язання задач структурної оптимізації

Розглянемо розв'язання задачі структурної оптимізації з урахуванням цілеспрямованого вибору раціональної структури [127, 225] на деяких практичних прикладах.

8.5.1. Вибір раціональної структури мобільного телефону

Використаємо метод цілеспрямованого вибору ФЕ для створення раціональної структури мобільного телефону, ієрархічну структуру якого наведено на рис. 8.3.

Опишемо альтернативи варіантів вибору функціональних елементів $\Phi_{j\beta}$ та їх параметрів $k_{j\beta}$ для побудови раціональної структури мобільного телефону.

Визначимо вимоги Q_0 до об'єкта у цілому:

- ♦ вага телефону — не більше 100 г;
- ♦ вартість — не більше 100 ум. од.

Вимоги до функціональних елементів Φ_{ij} мобільного телефону наведено на рис. 8.4. Альтернативи варіантів функціональних елементів $\Phi_{j\bar{v}}$ та їх параметрів $k_{j\bar{v}}$ для вибору раціональної структури мобільного телефону визначено множиною $M\Phi_{ij}$ і наведено в табл. 8.1.



Рис. 8.3. Ієрархічна структура мобільного телефону

Вимоги до функціональних елементів			
Зовнішній вигляд			
К-сть точок дисплея:	від	0	до 192
К-сть кольорів:	від	0	до 200000
Рівень оформлення:	від	120	до 200
Тип корпусу:	Моноблок		
Тип дисплея:	STN		
Акумулятор			
Тип акумулятора:	Li-Ion		
Ємність, мА/год.:	від	800	до 1000
Загальна вартість, \$:	від	0	до 78
Загальна вага, г:	від	0	до 100
Приймо-передача			
Випромєгована потужність, мВт:	від	0	до 40
Рівень прийому, мВт/м:	від	50	до 200
К-сть підтримуваних пристроїв:	від	3	до 10
Вартість розробки ПО, \$:	від	0	до 400000
Тип антени:	Внутрішня		
Обробка звуку			
Потужність, спожив. кодуем, мВт:	від	0	до 50
Потужність, внутр. динамком:	від	20	до 100
Співвідношення сигнал/шум, дБ:	від	50	до 100
Чутливість динаміка, дБ/В:	від	50	до 100
Чутливість мікрофона, дБ/В:	від	80	до 200

Рис. 8.4. Вимоги до функціональних елементів мобільного телефону

Таблиця 8.1. Альтернативи варіантів функціональних елементів $\Phi_{j\bar{v}}$ раціональних структур мобільного телефону

Варіанти реалізації доступних акумуляторів

Акумулятор	Тип	Ємність, мА/год	Вага, г	Ціна
Vatra Mob Li2	Li-on	750	10	15
GP 950 ML	Li-on	950	12	17
Vatra Mob Ni	Ni-Mh	700	20	8
GP 1000 MP	Li-Po	1000	10	20

Варіанти антен

Антенa	Тип	Рівень приймання, мВт/м	Вага, г	Ціна
Nokia Pat. V100	Внутрішня	110	4	12
Siemens-Bosh Aext	Внутрішня	100	4	10
Motorola int2	Внутрішня	150	5	12
Motorola Ext2	Зовнішня	150	7	8

Варіанти реалізації корпусу телефону

Корпус	Тип	Вага, г	Дизайн	Ціна
Heekko 2	Моноблок	15	100	5
Slim 2x	Розкладний	20	150	7
Raggie 100	Розкладний	40	180	8
Voodoo XL	Моноблок	30	200	10

Варіанти реалізації дисплея телефону

Дисплей	Тип	Кількість точок	Кількість кольорів	Ціна
Canyon zx128	STN	128	4096	10
Canyon zx96	STN	96	4096	5
Canyon cv128	TFT	128	65 000	14
Samsung TF1	TFT	192	65 000	18

Варіанти реалізації динаміка

Динамік	Чутливість, дБ/В	Ціна	Потужність, мВт
Beghrinder A100	50	5	50
Sony MDM-201	30	2	40
Sony MDM-202	40	3	40
Siemens AOOS	30	3	50

Варіанти реалізації кодека мови

Кодек	Потужність, мВ	Сигнал/шум	Ціна
Nat Semiconductor 800-324	10	50	7
Samsung EHA	10	40	5
Texas Instruments 510-RS	20	60	12
Texas Instruments 512-IS	105	500	50

Варіанти реалізації мікрофона

Мікрофон	Чутливість, дБ	Ціна
Beghrinder MZ	100	12
Siemens mM-10	80	8
Yuan 412	60	5
Sony MZM-305	80	10

Варіанти реалізації керуючої мікросхеми

Керуюча мікросхема	Ціна	Вартість ПЗ	Додаткові пристрої
Texas Instruments 901-32S	10	300 000	2
Texas Instruments 901-30F	8	200 000	0
Samsung TR121-00	8	400 000	2
Motorola M7812	6	400 000	3

Варіанти реалізації прийомо-передавача

Прийомо-передавач	Потужність, мВт	Рівень приймання, мВт/м	Ціна
Motorola Tr-v200	15	150	15
Siemens 506xT	15	100	10
Dell DF-23	20	150	15
Motorola Tr-a300	20	200	20

Для розв'язання задачі вибору раціональної ієрархічної структури мобільного телефону покладають, що структура $\hat{S}_0$ проєктованого об'єкта складається з $\hat{m} = 3$ ієрархічних рівнів $S_i, i = 1, \hat{m}$, а кожний рівень S_i — з $n_i = 3$ типів функціональних елементів $\Phi_{ij}, j = 1, n_i$. Кожний функціональний елемент Φ_{ij} характеризують параметри k_{ijq} .

Потрібно: вибрати по одному функціональному елементові кожного j -го типу на кожному i -му ієрархічному рівні; побудувати множину Парето Π_s у вигляді раціональних структур $\hat{S}_{0v}$ об'єкта.

Отриману з використанням методу цілеспрямованого вибору функціональних елементів шукану множину Парето Π_s раціональних структур мобільного телефону наведено в табл. 8.2.

Таблиця 8.2. Множина Парето Π_s раціональних структур $\hat{S}_{0v}$ мобільного телефону

Антенa	Керуюча мікросхема	Прийомо-передавач	Мікрофон	Кодек
Siemens-Bosh AexT	Motorola M7812	Siemens 506xT	Siemens mM-10	Nat Semiconductor 800-324
Siemens-Bosh AexT	Motorola M7812	Siemens 506xT	Siemens mM-10	Texas Instruments 512-IS
Siemens-Bosh AexT	Motorola M7812	Siemens 506xT	Sony MZM-305	Texas Instruments 512-IS

Динамік	Дисплей	Корпус	Акумулятор	Вага, г	Ціна
Beghringer A100	Canyon zx96	Voodoo XL	GP 950ML	46	78
Beghringer A100	Canyon zx96	Voodoo XL	GP 950ML	46	76
Beghringer A100	Canyon zx96	Voodoo XL	GP 950ML	46	78

Отже, використовуючи метод випадкового пошуку, якщо $k = 3$, $n = 9$, для забезпечення гарантованого вибору структури, що задовольняє задані вимоги, потрібно виконати $K_{as} = 3^9 = 262\,144$ спроб вибору. У разі використання методу цілеспрямованого вибору функціональних елементів розглянуту задачу розв'язано за 3 спроби.

8.5.2. Вибір раціональної структури вітрової турбіни

Потрібно вибрати раціональну структуру складної системи вітрової турбіни. Загальний вигляд вітрової турбіни показано на рис. 8.5. Відповідно до постановки задачі вітрову турбіну умовно можна розглядати як нульовий рівень СБІС. Вставка і перо утворюють порожнину. Модуль вітрової турбіни і порожнина — це елементи СБІС першого і другого рівнів, відповідно.

Задано вимоги Q_0 до модуля вітрової турбіни:

- ♦ ціна — не більше 1510 ум. од.; маса — не більше 413 кг;
- ♦ габарити за довжиною, висотою, шириною — не більше 1510 мм, 4034 мм, 4034 мм відповідно.

Вимоги до порожнини: довжина — не більше 9.128 мм; діаметр — не більше 20 мм; маса — не більше 163 кг.

Внутрішню конструкцію модуля вітрової турбіни показано на рис. 8.6. Ієрархічна структура модуля вітрової турбіни складається з трьох рівнів і 39 типів функціональних елементів (рис. 8.7). Кожен тип описують певним набором параметрів. Кількість

альтернативних варіантів для різних типів функціональних елементів неоднакова і змінюється в межах від 3 до 7. Варіанти вибору раціональної структури трансмісії модуля турбіни наведено на рис. 8.8.

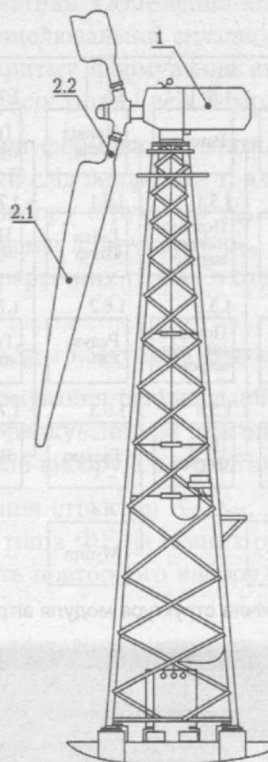


Рис. 8.5. Вітрова турбіна: 1 — модуль; 2 — перо; 3 — вставка

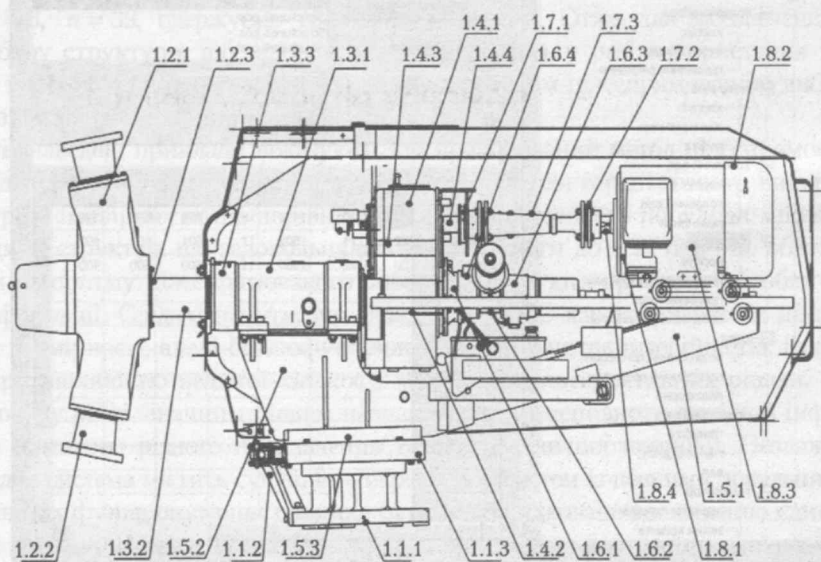


Рис. 8.6. Внутрішня конструкція модуля вітрової турбіни

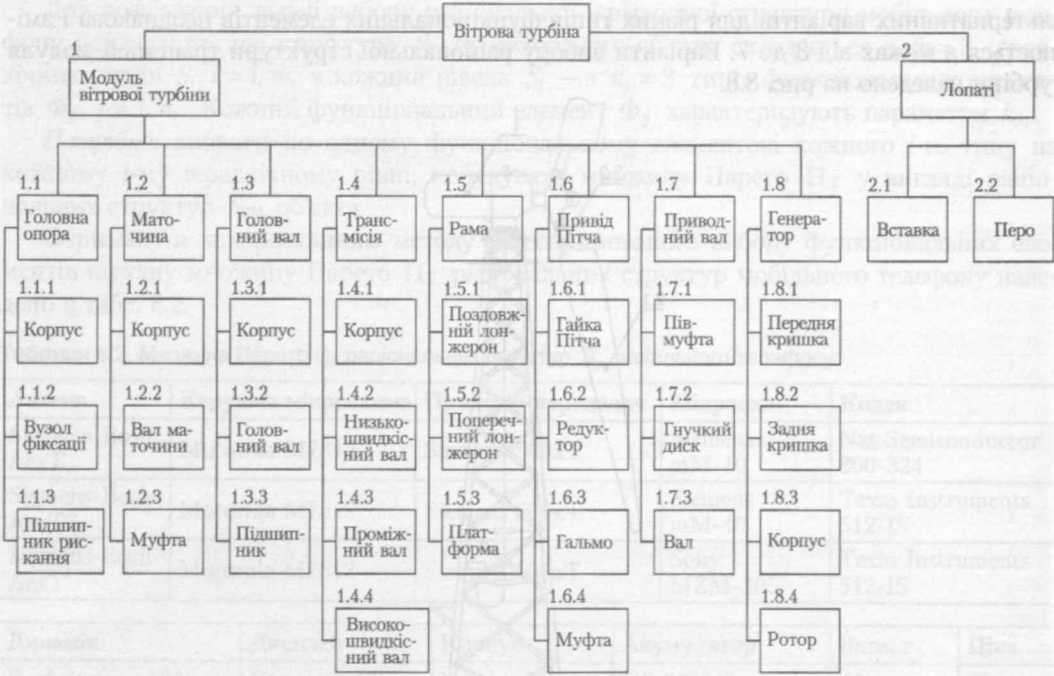


Рис. 8.7. Ієрархічна структура модуля вітрової турбіни

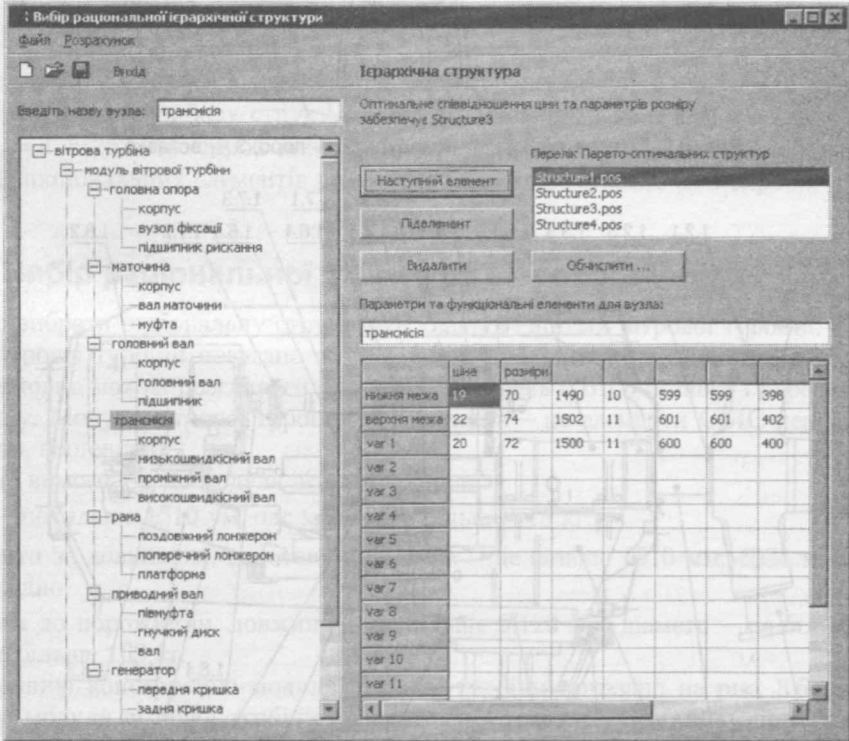


Рис. 8.8. Приклад вибору раціональної структури трансмісії

Під час виконання алгоритму враховано такі особливості [225].

1. Вибір альтернатив усіх типів ФЕ на всіх ієрархічних рівнях здійснено за умови, що кожен тип містить 3 альтернативи. Обмеження кількості альтернатив кожного типу прийнято для зниження обчислювальної складності процедури порівняння пропонуваного алгоритму та алгоритму формування структури на підставі випадкового вибору альтернатив ФЕ для всіх типів і всіх ієрархічних рівнів.
2. Під час виконання процедури формування множини Парето з множини альтернатив $\hat{M}_j$ для кожного типу ФЕ слід виключати ті альтернативи, що ввійшли у попередню структуру. Так, під час вибору структури S_{0v} при $v = 2$ з кожної множини $\hat{M}_j$ було виключено ФЕ, що ввійшли в структуру S_{0v} при $v = 1$. Потім повторюють вибір ФЕ усіх типів на всіх ієрархічних рівнях з отриманої множини $\hat{M}_j$ і формують структуру S_{02} .
3. Для формування структури S_{03} і наступних структур процедуру 2 повторюють.
4. Передбачено можливість формування раціональної структури за допомогою двох різних прийомів: на основі впорядкування за важливістю заданих критеріїв; на основі введення додаткових критеріїв вибору альтернатив із множини Парето.
5. У процедурі 2 для формування структур $S_{02}, S_{03}, \dots$ передбачено можливість виключення альтернатив окремих типів ФЕ на певних рівнях, прийнятих у структурі S_{01} , але не виключено можливість повторного вибору альтернатив для інших типів ФЕ, що ввійшли у структуру S_{01} .

Виконання цього алгоритму дозволило визначити раціональну структуру за 97 спроб вибору альтернатив ФЕ. Для алгоритму випадкового пошуку загальну кількість можливих альтернатив структур конструкції за однакової кількості альтернатив для всіх типів ФЕ визначають як $K_{as} = k^n$, де k — кількість альтернатив ФЕ кожного типу; n — загальна кількість типів ФЕ у структурі конструкції, $n = \sum_{i=1}^m n_i$. Для розглянутого прикладу, якщо $k = 3$, $n = 39$, одержуємо $K_{as} = 3^{39} = 4,06 \cdot 10^{18}$. Отже, для забезпечення гарантованого вибору структури, що задовольняє умову (8.31), у разі використання випадкового пошуку потрібно виконати $4,06 \cdot 10^{18}$ спроб, а методом цілеспрямованого вибору таку задачу розв'язано за 97 спроб.

Отже, наведені приклади показують, що пропонуваний метод цілеспрямованого вибору ФЕ дає змогу суттєво скоротити обсяг вибірки для гарантованого вибору потрібної структури з імовірністю, що дорівнює 1, і надає можливість побудови множини Парето допустимих структур, що задовольняють задані вимоги до всіх ФЕ і до об'єкта у цілому. Завдяки алгоритму цілеспрямованого вибору розв'язують проблему обробки значних обсягів інформації. Слід зазначити, що складність СБІС характеризується не тільки збільшенням розмірності, але й багатофункціональністю, багатокритерійністю, ієрархічністю її структури, наявністю великої кількості можливих альтернативних рішень на кожному ієрархічному рівні, значним рівнем невизначеності і неповноти вихідної інформації, наявністю підсистем різного призначення та різної фізичної природи. Незважаючи на те, що складна система містить сукупність окремих підсистем із певними локальними засобами керування, їх функціонування повинне бути підпорядковане досягненню єдиної мети для системи в цілому. Усе це зумовлює потребу застосування системного підходу для проектування і дослідження СБІС з урахуванням структурної, функціональної та інформаційної

складових. Застосування системного підходу зумовлює гарантованість розгляду всіх можливих альтернативних варіантів побудови системи і прийняття такого обґрунтованого рішення, яке щонайбільше задовольняло б поставлені вимоги до об'єкта.

Висновки

- ♦ Обґрунтовано, що задачі СФА за ступенем складності належать до класу задач організованої складності. Наведено функціональні та конструктивно-технологічні властивості різних типів і видів систем.
- ♦ Дано змістовне формулювання загальної задачі системного аналізу СБІС. Розроблено формалізацію задачі СФА на підставі структуризації і формалізованого опису властивостей системи та вимог до неї. Наведено математичний формалізований опис задачі.
- ♦ Розроблено загальну стратегію розв'язання задачі СФА, що забезпечує: побудову ієрархічної структури системи; розподіл вимог та функцій між різними ієрархічними рівнями; раціональний вибір елементів і структури функціонального взаємозв'язку ФЕ різних ієрархічних рівнів; раціональний вибір елементів і структури кожного ієрархічного рівня; раціональний вибір функцій і параметрів ФЕ на кожному ієрархічному рівні. Таку стратегію реалізують, ґрунтуючись на методичному, інформаційному, алгоритмічному, програмному та інших видах забезпечення проектування, макетування, експериментального і дослідного виробництва, випробування та серійного випуску нової техніки.
- ♦ Наведено структуру узагальненого алгоритму СФА, що відображає загальну послідовність основних процедур стратегії СФА. Мета алгоритму — показати, що за заданими вимогами принципово можливо або неможливо реалізувати систему з певними властивостями за існуючих технологій промислового виробництва або у разі впровадження апробованих нових технологій. Алгоритм має виявити раціональний структурно-функціональний вигляд майбутньої системи та одержати дані, що підтверджують доцільність чи недоцільність її реалізації за заданою вимогою.
- ♦ Запропоновано новий підхід до розв'язання системної задачі структурної оптимізації складних об'єктів, що дозволяє раціонально організувати послідовно-паралельну розробку ФЕ кожного ієрархічного рівня. Формалізовані процедури вибору раціональної кількості ієрархічних рівнів, формування раціональних вимог до ФЕ ієрархічної структури на основі запропонованого методу цілеспрямованого вибору раціональної ієрархічної структури.
- ♦ Наведено загальну постановку задачі системної параметричної оптимізації, розв'язання якої дозволяє знайти раціональний компроміс між суперечливими вимогами до міцності, надійності, технологічності і техніко-економічних показників конструкції і визначити оптимальні значення параметрів конструкції за штатних режимів експлуатації і допустимих обмежень ризику позаштатних ситуацій. Подано алгоритм розв'язання задачі параметричної оптимізації, що базується на комплексному застосуванні можливостей теорії системного аналізу і сучасних методів проектування, засобів та методів експертних процедур і штучного інтелекту, а також методу узагальненої послідовної лінеаризації та адаптивних алгоритмів чебишевського наближення несумісної системи нелінійних рівнянь.

- Подано розв'язання задачі структурної оптимізації складних об'єктів, що базується на розробленому методі цілеспрямованого вибору раціональної ієрархічної структури. Задачу структурної оптимізації подано у вигляді послідовності задач: вибору раціональної кількості ієрархічних рівнів; формування раціональних вимог до ФЕ кожного ієрархічного рівня за заданими вимогами до об'єкта; раціонального вибору ФЕ кожного ієрархічного рівня за прийнятими вимогами. Наведені приклади показують, що застосування пропонованого метода цілеспрямованого вибору ФЕ дає змогу суттєво скоротити обсяг вибірки для гарантованого вибору потрібної структури об'єкта.

Розділ 9

Задачі і методи системного аналізу багатofакторних ризиків

- ♦ Загальна задача системного аналізу багатofакторних ризиків
- ♦ Декомпозиція загальної задачі аналізу багатofакторних ризиків у послідовність системно узгоджених задач
- ♦ Властивості та особливості функціонування складних технічних систем за умов багатofакторних ризиків
- ♦ Аналіз багатofакторних ризиків виникнення аварій і катастроф
- ♦ Основні принципи та особливості управління безпекою складних систем
- ♦ Основи стратегії гарантованої безпеки: основні підходи і принципи
- ♦ Системний аналіз властивостей та особливостей задач багатofакторних ризиків

У цьому розділі розглянемо загальну задачу системного аналізу багатofакторних ризиків, проаналізуємо умови, причини появи та особливості виявлення критичних, надзвичайних та інших ситуацій ризику, дослідимо джерела та причини виникнення критичних і катастрофічних ризиків, шляхи своєчасного запобігання їх переходу в аварію або катастрофу, запропонуємо принципи розв'язання системних задач, які безпосередньо належать до аналізу аварій і катастроф СТС.

9.1. Розробка методології забезпечення безпеки складних систем

Практичну потребу створення якісно нових методів і засобів забезпечення безпеки складних систем зумовлюють багато причин. Зокрема, для складних систем різної природи актуальне достовірне і своєчасне передбачення, прогнозування і запобігання критичним, надзвичайним та іншим небажаним ситуаціям і впливам, що можуть призвести до позаштатного режиму, аварії, катастрофи або суттєво вплинути на працездатність, живучість, безпеку, ефективність та інші властивості таких об'єктів. Можливість появи і наслідки від впливу таких ситуацій, умов і факторів зумовлені випадковими і хаотичними процесами, які за механізмами впливу можна охарактеризувати як ризики. Ризики зумовлені багатьма різноманітними внутрішніми і зовнішніми причинами та факторами, тому механізми їхніх впливів на СТС є багатofакторними.

9.1.1. Загальна задача системного аналізу багатofакторних ризиків

Сформулюємо в узагальненій формі основну задачу системного аналізу багатofакторних ризиків [129, 247].

Відомо: за даними випробувань складної системи та іншими апіорними відомостями множина M_0 факторів ризику ρ_q у вигляді

$$M_0 = \{\rho_q \mid q = \overline{1, n_0}\}. \quad (9.1)$$

Кожний фактор ризику $\rho_q \in M_0$ характеризує множина L_q ознак l_{qj} :

$$L_q = \{l_{qj} \mid q \in N_0; j = \overline{1, n_q}\}, \quad N_0 = [1, n_0]. \quad (9.2)$$

Кожну ознаку $l_{qj} \in L_q$ визначає інформаційний вектор

$$I_{qj} = \{x_{qj} \mid x_{qj} = \langle x_{qjp} \mid p = \overline{1, n_q} \rangle; x_{qjp} \in H_{qjp}; q \in N_0; j \in N_q\}; \quad (9.3)$$

$$H_{qjp} = \{x_{qjp} \mid x_{qjp}^- \leq x_{qjp} \leq x_{qjp}^+\}; \quad N_q = [1, n_q]. \quad (9.4)$$

На основі множин L_q для кожного фактора ризику ρ_q формують інформаційний вектор

$$I_q = \{I_{qj} \mid q \in N_0, j = \overline{1, n_q}\}; \quad (9.5)$$

$$I_q = \{x_{qj} \mid x_{qj} = \langle x_{qjp} \mid p = \overline{1, n_q} \rangle; x_{qjp} \in H_{qjp}; q \in N_0; j = \overline{1, n_q}\}. \quad (9.6)$$

Множина M_0 відповідає певній апіорно прогнозованій множині S_0 ситуацій ризику.

У процесі функціонування складної системи на неї впливають і виявляють себе нові фактори ризику, змінюються в часі властивості і показники апіорно відомих факторів ризику $\rho_q \in M_0$. Це зумовлює кількісну та якісну зміну множини факторів ризику, а отже, потребу формування послідовності вкладених множин вигляду

$$M_0 \subset M_1 \subset \dots \subset M_\tau \subset \dots; \quad (9.7)$$

$$S_0 \subset S_1 \subset \dots \subset S_\tau \subset \dots,$$

де M_τ , S_τ — множина факторів ризику і множина ситуацій ризику відповідно в момент $T_\tau \in T^+$; T^+ — заданий або прогнозований час функціонування складної системи. Множини M_τ , S_τ визначають у формі

$$M_\tau = \{\rho_q^\tau \mid q = \overline{1, n_\tau}\}; \quad S_\tau = \{S_k^\tau \mid k = \overline{1, K_\tau}\}.$$

Кожну ситуацію $S_k^\tau \in S_\tau$ характеризує множина $M_k^\tau \in M_\tau$ факторів ризику ρ_{qk}^τ :

$$M_k^\tau = \{\rho_{qk}^\tau \mid q_k = \overline{1, n_k^\tau}\}. \quad (9.8)$$

Кожний фактор $\rho_{qk}^\tau \in M_k^\tau$ характеризує множина L_{qk}^τ ознак l_{qkj}^τ :

$$L_{qk}^\tau = \{l_{qkj}^\tau \mid q_k \in N_k^\tau; j_k = \overline{1, n_{qk}^\tau}\}, \quad N_k^\tau = [1, n_k^\tau] \quad (9.9)$$

Кожну ознаку $I_{q_k j_k}^\tau \in L_{q_k}^\tau$ виявляють на підставі інформації, отриманої та обробленої системою діагностування. Інформація на момент вимірювання T_τ характеризується неповнотою, невизначеністю, неточністю. Інформаційний вектор $I_{q_k j_k}^\tau$ для кожної ознаки $I_{q_k j_k}$ формують, використовуючи інформацію діагностування, у вигляді нечіткої множини

$$I_{q_k j_k}^\tau = \{ \tilde{x}_{q_k j_k}^\tau \mid \tilde{x}_{q_k j_k}^\tau = \langle \tilde{x}_{q_k j_k p_k}^\tau \mid p_k = \overline{1, n_{q_k j_k}} \rangle; q_k \in N_k^\tau; j_k \in N_{q_k}^\tau \}; N_{q_k}^0 = [1, n_{q_k}^\tau] \quad (9.10)$$

$$\tilde{x}_{q_k j_k p_k}^\tau = \langle x_{q_k j_k p_k}^\tau, \mu_{H_{q_k j_k p_k}}(x_{q_k j_k p_k}^\tau) \rangle; x_{q_k j_k p_k}^\tau \in H_{q_k j_k p_k}^\tau; \mu_{H_{q_k j_k p_k}} \in [0, 1]; \quad (9.11)$$

$$H_{q_k j_k p_k}^\tau = \langle x_{q_k j_k p_k}^\tau \mid x_{q_k j_k p_k}^- \leq x_{q_k j_k p_k}^\tau \leq x_{q_k j_k p_k}^+ \rangle. \quad (9.12)$$

На основі інформаційної бази множин $I_{q_k j_k}^\tau$; $q_k = \overline{1, n_k^\tau}$; $j_k = \overline{1, n_{q_k}^\tau}$ для кожного фактора $\rho_{q_k}^\tau$; $q_k = \overline{1, n_k^\tau}$ формують інформаційний вектор у вигляді

$$I_{q_k}^\tau = \{ I_{q_k j_k}^\tau \mid q_k \in N_k^\tau; j_k = \overline{1, n_{q_k}^\tau} \}; \quad (9.13)$$

$$I_{q_k j_k}^\tau = \{ \tilde{x}_{q_k j_k p_k}^\tau \mid q_k \in N_k^\tau; j_k = \overline{1, n_{q_k}^\tau}; p_k = \overline{1, n_{q_k j_k}^\tau} \}. \quad (9.14)$$

Аналогічно для кожної ситуації $S_k^\tau \in S_\tau$ формують інформаційний вектор

$$I_k^\tau = \{ I_{q_k}^\tau \mid q_k = \overline{1, n_k^\tau}; k = \overline{1, K_\tau} \}; \quad (9.15)$$

$$I_{q_k}^\tau = \{ \tilde{x}_{q_k j_k p_k}^\tau \mid q_k = \overline{1, n_k^\tau}; j_k = \overline{1, n_{q_k}^\tau}; p_k = \overline{1, n_{q_k j_k}^\tau} \}. \quad (9.16)$$

Інформацію про фактори ризику можна доповнити й уточнити у процесі формування рішення, зорієнтованого на запобігання небажаним впливам досліджуваних факторів ризику. Час формування рішення обмежений, оскільки множина M_τ містить підмножину $\tilde{M}_k^\tau$ факторів із пороговим механізмом дії. У разі досягнення одним або кількома факторами $\rho_{q_k}^\tau \in \tilde{M}_k^\tau$ порогового рівня у деякий, апріорно невідомий, критичний момент часу T_{cr} виявляються небажані наслідки у вигляді аварій, катастроф чи екологічних лих.

Потрібно: у процесі управління функціонуванням складної системи в реальному масштабі часу для заданих моментів T_τ або з певним інтервалом моментів $\tilde{T}_\tau \in T_\tau^\pm$, де $T_\tau^\pm = \{ \tilde{T}_\tau \mid T_\tau < \tilde{T}_\tau < T_{\tau+1} \}$ виконати багатофакторну оцінку ризику появи будь-якої ситуації $S_k^\tau \in S_\tau$ і на підставі одержаних результатів сформулювати й реалізувати рішення щодо запобігання і (або) мінімізації ризику небажаних наслідків до настання критичного моменту T_{cr} .

Особливу увагу звернімо на кілька принципово важливих особливостей сформульованої задачі. У ній, на відміну від типових задач оптимізації і розпізнавання, враховано, що *множини факторів ризику і множини ситуацій є принципово необмеженими*. Вони кількісно та якісно змінюються у процесі функціонування складних технічних об'єктів, утворюючи відповідні послідовності вкладених множин у формі (9.7). Найважливішою особливістю наведеної задачі є якісно новий вид обмеження, а саме *порогове обмеження часу формування рішення*. Це обмеження принципово відрізняється за своєю значущістю і властивостями від обмежень типових задач системного аналізу та оптимізації. Воно абсолютно пріоритетне й неусувне, а його порушення принципо-

во неприпустиме на практиці, оскільки призводить до необоротних катастрофічних наслідків. Слід також наголосити, що *задача не повністю формалізована, у ній не визначені показники багатофакторної оцінки ризику та критерії багатоцільової мінімізації ризику*. Цей прийом формалізації прийнято навмисно з таких причин. Вибір зазначених показників і критеріїв – неформалізована задача, що залежить від багатьох об'єктивних та суб'єктивних факторів і насамперед від умов та особливостей забезпечення безпеки певної складної системи та суб'єктивної оцінки ОПР її потреб і можливостей. Власне кажучи, задачу подано у такій узагальненій постановці, яка дає певну свободу дій ОПР щодо її адаптації до практичних потреб у певній предметній області через конкретизацію зазначених показників і критеріїв.

9.1.2. Декомпозиція загальної задачі аналізу багатофакторних ризиків у послідовність системно узгоджених задач

На підставі принципу декомпозиції подамо загальну задачу аналізу багатофакторних ризиків у вигляді послідовності таких системно узгоджених, інформаційно взаємопов'язаних задач [129].

1. Системної багатофакторної класифікації виявлених і прогнозованих ситуацій ризиків.
2. Системного багатофакторного розпізнавання виявлених і прогнозованих ситуацій ризиків.
3. Системного багатокритерійного ранжування ситуацій.
4. Багатоцільової мінімізації ризиків прогнозованої множини позаштатних ситуацій.
5. Рациональної багатоцільової оптимізації рівня інформованості під час розпізнавання позаштатних ситуацій у процесі функціонування складної системи.
6. Рационального узгодження ресурсів допустимого ризику прогнозованої множини позаштатних ситуацій.
7. Визначення рационального рівня інформованості для порогового обмеження часу у процесі функціонування складної системи.
8. Системного оцінювання ресурсів допустимого ризику у динаміці позаштатного режиму.

Такий підхід зумовлений складністю загальної задачі системного аналізу та орієнтацією на комп'ютерну реалізацію основних процедур системного аналізу ризиків, що, у свою чергу, визначає потребу, можливість і доцільність використання модульного принципу організації процесу розв'язання задачі.

Розглянемо особливості двох важливих задач: *задачі класифікації множини факторів ризику і задачі розпізнавання ситуацій ризику*. Покажемо, що вони принципово відрізняються від задач класифікації і розпізнавання в теорії розпізнавання образів, що зумовлено принциповою відмінністю їхніх властивостей [30, 44, 94, 173].

Справді, аналіз різних класів типових задач теорії розпізнавання свідчить, що вони мають такі загальні властивості:

- ♦ множина M аналізованих об'єктів ω_j може бути відображена у вигляді об'єднання скінченної кількості класів Ω_i , які не перетинаються;
- ♦ кожен елемент $\omega_j \in M$ характеризується таким набором ознак, який містить їхню скінченну кількість;
- ♦ кожний клас Ω_i характеризується скінченним набором значень ознак;

- ♦ апіорну навчаючу інформацію J задають у вигляді деякого опису ознак скінченної кількості об'єктів кожного класу.

Звідси впливають найважливіші особливості традиційних задач розпізнавання.

- ♦ Усі властивості об'єктів визначені скінченною кількістю відповідних показників або елементів.
 - ♦ Усі класи $\Omega_i \in M, i = \overline{1, m}$ і всі досліджувані об'єкти характеризуються тим самим скінченим набором ознак, а відмінність класів та об'єктів визначає лише відмінність числових значень ознак.
 - ♦ Необхідна умова застосовності традиційних методів та алгоритмів розпізнавання – наявність стандартної навчаючої інформації J про ознаки кожного класу Ω_i . При цьому важливе те, що для навчання потрібен доволі значний обсяг навчаючої інформації, а процес навчання є досить тривалим.
 - ♦ Розпізнавання і класифікацію здійснюють на підставі чіткої оцінки і характеризують такими умовами та обмеженнями: $\alpha_{ij} = 1 \Rightarrow \omega_j \in \Omega_i$; $\alpha_{ij} = 0 \Rightarrow \omega_j \notin \Omega_i$. Усі інші варіанти описують у вигляді $\alpha_{ij} = \Delta$, де символ Δ означає «невідомо».
 - ♦ Алгоритми розв'язання задач розпізнавання ґрунтуються на неформальних моделях, сформованих у процесі навчання на основі стандартної навчаючої інформації. При цьому питання вибору та обґрунтування повноти і достатності навчаючої інформації не вирішено. На практиці навчаючу інформацію вибирають суб'єктивно, а рівень повноти і достовірності інформації залежить від досвіду, знань та інтуїції дослідника. Такий підхід не виключає випадків, коли розпізнавання досліджуваного об'єкта неможливе, і розв'язок кодують символом Δ .
- Задачі розпізнавання ситуацій ризику у процесі функціонування складних систем мають принципово інші властивості та особливості.

- ♦ Множина ознак ситуацій ризику є принципово необмеженою. Ця особливість безпосередньо впливає з необмеженості множини факторів ризику, вплив яких спричинює появу позаштатних ситуацій.
- ♦ Різні позаштатні ситуації характеризуються різними множинами ознак. При цьому не існує двох ситуацій, що мають однакові ознаки. Наприклад, для технічних систем такий стан зумовлений відмінностями властивостей матеріалів, дефектів та особливостей реальних матеріалів, механізмів старіння і руйнування, впливів зовнішнього середовища.
- ♦ Множину позаштатних ситуацій принципово неможливо відобразити у вигляді такої скінченної множини класів, у якій кожен клас характеризує певна множина ознак або певний індивідуальний набір числових значень ознак. Це зумовлено необмеженістю множини ознак позаштатних ситуацій.
- ♦ Для задач розпізнавання позаштатних ситуацій принципово неможливо створити стандартну навчаючу інформацію у вигляді скінченного набору даних про ознаки кожного класу прийнятої класифікації, що зумовлено необмеженістю і змінністю в часі множини ознак позаштатних ситуацій.
- ♦ Наявне порогове обмеження часу на розпізнавання позаштатних ситуацій у процесі діагностування, що зумовлено високим динамізмом розвитку позаштатних ситуацій і можливістю послідовного переходу за обмежений період часу зі штатного режиму в надзвичайну ситуацію, аварію або катастрофу. Тому розпізнавання повинно бути виконане за такий час, який дає можливість здійснити процедури формування і реалізації рішення до настання критичного моменту часу T_{cr} .

Аналіз цих властивостей та особливостей дає змогу зробити такі практично важливі висновки.

- ♦ У задачах розпізнавання позаштатних ситуацій принципово неможливе виконання обмежень і припущень, прийнятих у типових задачах розпізнавання образів.
- ♦ Традиційні прийоми класифікації на підставі єдиного скінченного набору ознак для всіх класів незастосовні для класифікації позаштатних ситуацій, оскільки множина ознак позаштатних ситуацій принципово необмежена, і кожна позаштатна ситуація має унікальний, неповторний набір ознак.
- ♦ Типові методи, моделі та алгоритми теорії розпізнавання не можна безпосередньо застосовувати для розпізнавання позаштатних ситуацій, оскільки принципово неможливе формування необхідної стандартної навчаючої інформації.

Отже, задачі класифікації та розпізнавання ситуацій ризику у процесі управління функціонуванням і безпекою складних систем принципово нерозв'язні на основі моделей, методів та алгоритмів теорії розпізнавання образів, оскільки належать до класу задач, для яких не виконуються припущення теорії розпізнавання образів. З цього випливає практична потреба розробки нової методології і стратегії класифікації та розпізнавання, що адекватно відповідатимуть цілям і задачам, реальним умовам і обмеженням сучасних складних систем. Розробка такої стратегії особливо актуальна для технічних систем підвищеного ризику, до яких насамперед належить авіація. Специфіка експлуатації авіаційної техніки виключає можливість усунення у процесі польоту майже всіх видів несправностей та відмов, які спричиняють катастрофічні наслідки. Звідси випливає практична важливість задачі своєчасного виявлення причин і факторів, що можуть призвести до катастрофи, і своєчасного їх усунення з метою запобігання катастрофічному ризику.

Процедура формалізації наведеної вище послідовності задач має певні складності. Так, у задачі системної багатофакторної класифікації ризиків та задачі системного багатофакторного розпізнавання ситуацій ризиків визначальним є вибір такої кількості, складу факторів ризику та ознак кожного фактора ризику, які б забезпечили потрібну точність і достовірність класифікації та розпізнавання. Проте множина факторів ризику і множина ознак для кожного фактора ризику принципово необмежені, що зумовлено неповнотою і невизначеністю вихідної інформації. Отже, принципово неможливо забезпечити абсолютну точність і абсолютну достовірність розпізнавання, тому треба виконувати раціональний вибір кількості та складу факторів ризику.

Формалізуємо зазначені задачі із певними припущеннями, що реалізуються на практиці. Так, покладатимемо, що для деякої складної системи є принципова можливість для кожного $T_i \in T^{\pm}$ вибрати скінченну множину факторів ризику, охарактеризувати кожен фактор скінченною множиною ознак, описати кожен фактор скінченним нечітким інформаційним вектором з умови практично прийнятної достовірності і точності розв'язку загальної задачі системного аналізу ризиків. Такий підхід реалізують виключенням з аналізу факторів несуттєвих ризиків.

Задача 1. Системна багатофакторна класифікація ситуацій ризиків

Відомо: апіорно інформаційні вектори I_q у формі (9.6) для всіх факторів ризику ρ_q множини M_0 , визначеної формулою (9.1); значення ступеня ризику η_q і рівня ризику W_q для значень компонент I_{qj} інформаційного вектора I_q кожного фактора ризику $\rho_q \in M_0$. У процесі функціонування складної системи для кожної множини $M_k^{\pm} \in M_T$

визначають нечіткі інформаційні вектори I_k^r , їхні компоненти у формі (9.15), (9.16) і числові значення ступеня ризику η_{qk}^r та рівня ризику W_{qk}^r для певних значень компонент вектора I_k^r .

Потрібно: на основі відомої апіорної інформації:

- ♦ на множині M_0 побудувати таке апіорне розбиття на скінченну кількість k_i класів (підмножин) Ω_i , що не перетинаються, у якому кожний клас Ω_i характеризує деяка множина $M_i \in M_0$ факторів ризику і певних півінтервалів допустимих значень η_i і W_i ,

$$\eta_i^- < \eta_i \leq \eta_i^+, \quad W_i^- < W_i \leq W_i^+; \quad (9.17)$$

- ♦ у процесі функціонування складної системи за інформацією про множину M_r факторів ризику на підставі апіорної класифікації побудувати таке розбиття на скінченну кількість k_i^r класів (підмножин) Ω_i^r , що не перетинаються, у якому кожний клас Ω_i^r характеризується деякою множиною $M_i^r \in M_r$ факторів ризику і має напівінтервали допустимих значень η_i^r і W_i^r , які визначає апіорна класифікація для $k_i^r = k_i$, а для $k_i^r > k_i$ — співвідношення

$$\eta_i^- \leq \eta_{ir}^- < \eta_i^r \leq \eta_{ir}^+ < \eta_i^+; \quad W_i^- \leq W_{ir}^- < W_i^r \leq W_{ir}^+ < W_i^+.$$

Виділимо принципи відмінності пропонованої системи класифікації ризиків від типових. Прийняті системи класифікації ризику мають малу кількість градацій з вербальним описом кожної градації, що не містить кількісної оцінки ризику і не дає для кожної градації взаємозв'язку ознак ризику і певної кількісної оцінки ризику. Наприклад, в економіці прийнято класифікувати ризики на чотири зони: безризикову, допустимого ризику, критичного ризику, катастрофічного ризику. У техніці аналогічно класифікують відмови, наприклад, в авіації виділяють такі категорії відмов: катастрофічна, критична, суттєва, несуттєва. Така класифікація ризиків неприйнятна для складних систем довільної природи. У пропонованій класифікації кожен клас характеризують апіорно визначені напівінтервали значень ступеня ризику η_i і рівня ризику W_i , а взаємозв'язок ознак ризику і конкретної кількісної оцінки ризику для кожного класу забезпечується через інформаційні вектори I_k^r та їхні компоненти.

Формулювання цієї задачі відрізняється від формулювання типових задач класифікації, наприклад задач теорії розпізнавання образів, у яких передбачено загальну структуру класифікації, оскільки структура, кількість і склад ознак кожного класу незмінні. У цьому ж формулюванні задачі класифікації кількість класів у загальній структурі класифікації, а також склад і кількість ознак, межі напівінтервалів значень η_i і W_i кожного класу змінюються у процесі функціонування складної системи. Зокрема, будь-який клас можна задати у вигляді деякої структури підкласів. Звідси можемо реалізувати багаторівневу ієрархічну структуру класифікації з необхідною дискретністю градацій на кожному рівні і, як наслідок, забезпечити потрібну точність і достовірність класифікації та розпізнавання ситуацій ризику. Це дає змогу адаптувати класифікацію до певних умов функціонування складної системи і, отже, суттєво підвищити ефективність управління нею.

Задача 2. Багатофакторне розпізнавання ситуацій ризиків

Відомо: для ситуації $S_k \in S_r$ множина M_k^r факторів ризику у формі (9.8), яка містить підмножину $\hat{M}_k^r$ факторів ризику $\tilde{p}_k^r$, що не є елементами множини M_0 і нечіткий інформаційний вектор I_k^r та його компоненти у вигляді (9.15), (9.16) для кожного фактора ризику множини M_k^r .

Потрібно: визначити ступінь та рівень ризику ситуації S_k^i і клас Ω_i^i , до якого належить ця ситуація.

Розв'язання задачі дасть змогу для конкретної ситуації $S_k \in S_\tau$ встановити клас ризику Ω_i^i за класифікацією, яку утворить поділ на класи Ω_i^i множини M_k^i . Прогнозуючи ризики, розглядають деяку множину S_τ ситуацій ризику і для кожної із них визначають множину M_k^i факторів ризику. Тому постає практично важлива задача ранжування ситуацій $S_i^i \in S_\tau$ множини S_τ за ступенем і рівнем ризику. Таку задачу слід розглядати як продовження задачі розпізнавання у вигляді її узагальнення на множину S_τ . Сформулюємо цю задачу з тими самими умовами, що й для задачі розпізнавання ризиків.

Задача 3. Ранжування ситуацій за ступенем і рівнем ризику

Відомо: для кожної ситуації $S_k^i \in S_\tau$ множина M_k^i факторів ризику у формі (9.8). Усі множини $M_k^i, k = \overline{1, K_\tau}$, містять підмножини $\hat{M}_k^i$, елементи яких не належать множині M_0 . Відомі також нечіткі інформаційні вектори $I_k^i, k = \overline{1, K_\tau}$, їхні компоненти та залежності ступеня ризику $\eta_{q_k}^i$ і рівня ризику $W_{q_k}^i$ від компонент вектора I_k^i .

Потрібно: ранжувати за класами Ω_i^i ситуації $S_k^i \in S_\tau$ за ступенем і рівнем ризику на момент спостереження.

Природним продовженням і розвитком задачі ранжування ситуацій за ступенем і рівнем ризику є задача багатоцільової мінімізації ризиків. Практична значущість цієї задачі очевидна, оскільки кінцевою метою системного аналізу багатофакторних ризиків слід вважати мінімізацію ступеня і рівня ризику. На перший погляд може здатися, що мінімізацію ризиків можна забезпечити у процесі ранжування ситуацій за ступенем і рівнем ризику. Але процедура ранжування дає змогу виявити лише такі ситуації, які у певному розумінні практично еквівалентні або мають деяку перевагу перед іншими. Цю процедуру можна розглядати як відшукування деякого еквівалента множини Парето. Але об'єкти, що входять у множину Парето, не є адекватними за всією множиною показників. Тому, вводячи відповідно до принципу доповнюваності Геделя додатковий критерій, серед елементів множини Парето можна знайти єдиний елемент, найкращий за введеним додатковим критерієм. За цим підходом сформулюємо задачу багатоцільової мінімізації ризиків за умов, прийнятих на етапі формалізації задачі ранжування ситуацій за ступенем і рівнем ризику.

Задача 4. Багатоцільова раціональна мінімізація ризиків

Відомо: для кожної ситуації $S_k^i \in S_\tau$ інформаційний вектор I_k^i та його компоненти у формі (9.15), (9.16), а також числові значення ступеня $\eta_{q_k}^i$ і рівня $W_{q_k}^i$ ризику за певних числових значень компонент вектора I_k^i для всіх факторів ризику $\rho_{q_k}^i \in M_k^i$ та характеристика зміни компонент усіх векторів I_k^i за певний період часу.

Потрібно: визначити клас Ω_i^i , до якого належить кожна ситуація S_k^i , виявити функціональні залежності ступеня ризику $\eta_{q_k}^i$ і рівня ризику $W_{q_k}^i$ кожного фактора ризику $\rho_{q_k}^i \in M_k^i$ від компонент вектора I_k^i , вибрати й обґрунтувати систему критеріїв мінімізації ризиків та мінімізувати ступінь і рівень ризику ситуацій $S_k^i \in S_\tau$, ризик яких може перевищити допустимий рівень.

Формулювання цієї задачі відрізняється від формулювання традиційної багатоцільової задачі мінімізації тим, що систему критеріїв не задають апіорно, а обґрунтовують

у процесі розв'язання. Це, з одного боку, дає певну свободу дій не тільки у фізичному трактуванні критеріїв мінімізації, але й у виборі методу розв'язання оптимізаційної задачі. Однак, з іншого боку, ускладнює задачу, оскільки вибір критеріїв є неформалізованою операцією у формулюванні оптимізаційної задачі.

Слід зазначити, що таке формулювання є спрощеним варіантом задачі мінімізації ризиків у тому сенсі, що розв'язок знаходять для наперед визначеного рівня інформованості ОПР. Але відомо, що кількісні та якісні показники інформованості ОПР змінюються в динаміці формування рішення.

Тому виникає актуальна практична задача визначення раціональних кількісних та якісних показників інформованості ОПР. Сформулюємо кілька альтернатив цієї задачі.

Задача 5. Вибір раціонального рівня інформованості ОПР для розпізнавання ситуації

Відомо: для кожної ситуації $S_k^t \in S_t$ множина M_k^t факторів ризику ρ_{qk}^t у формі (9.8) – (9.14). Кожна множина M_k^t містить підмножину $\tilde{M}_k^t$, елементи якої не належать множині M_0 . Деякі компоненти векторів I_k^t для $\rho_{qk}^t \in \tilde{M}_k^t$, $k = 1, \tilde{K}_t$, значення ступеня η_{qk}^t і рівня W_{qk}^t ризику за деяких значень компонент векторів I_k^t для тих факторів ризику кожної множини M_k^t , які не є елементами підмножини $\tilde{M}_k^t$. Достовірність розпізнавання ситуації $S_k^t \in S_t$ і достовірність оцінки ступеня та рівня ризику є зростаючими функціями інтегрального показника інформованості $\bar{U}_t$. Невизначеність інформації про фактори ризику $\rho_{qk}^t \in \tilde{M}_k^t$ створює умова $\bar{U}_t < U^-$, за виконання якої виключено можливість розпізнавання $S_k^t \in S_t$ і визначення ступеня та рівня ризику ситуації $S_k^t \in S_t$.

Потрібно: визначити раціональний для ОПР рівень $\bar{U}_t^*$ інтегрального показника інформованості $\bar{U}_t$, за якого із практично допустимим рівнем достовірності забезпечено розпізнавання кожної ситуації $S_k^t \in S_t$ і визначення ступеня η_{qk}^t і рівня W_{qk}^t ризику ситуації $S_k^t \in S_t$.

Задача 6. Визначення ресурсів допустимого ризику позаштатного режиму складної системи

Відомо: послідовність вкладених множин (9.7) за певний період діагностування $T_r^{\pm} = [T_r^-, T_r^+]$ складної системи. У кожний момент діагностування $T_t \in T_r^{\pm}$, $t = 1, n_t$, для кожної ситуації $S_k^t \in S_t$ відома множина M_k^t факторів ризику у формі (9.8). Всі множини M_k^t , $k = 1, K_t$ містять підмножини $\tilde{M}_k^t$, елементи яких не належать множині M_0 , нечіткі інформаційні вектори I_k^t , $k = 1, K_t$ та їхні компоненти для всіх факторів множин M_k^t , $k = 1, K_t$, числові значення ступеня η_{qk}^t і рівня W_{qk}^t ризику за відомих значень компонент вектора I_k^t .

Потрібно: визначити і забезпечити раціональне узгодження ресурсів допустимого ризику позаштатних, критичних, надзвичайних, аварійних і катастрофічних ситуацій на прогнозований період експлуатації складної системи $T_{r+1}^{\pm} = [T_{r+1}^-, T_{r+1}^+]$, коли $T_{r+1}^- \geq T_r^+$, $T_{r+1}^+ > T_r^+$.

Сформульовані задачі дають змогу аналізувати ризики у процесі зміни рівня інформованості ОПР. Цей рівень характеризують інтегральним показником інформованості, що є функцією окремих показників, а саме: повноти, достовірності та своєчасності інформованості. У свою чергу, часткові показники є функціями інформаційних векто-

рів і часу. Однак у наведених формулюваннях задач не враховано залежність інтегрального показника інформованості ОПР від часу. Цей показник має складну залежність від часу, оскільки показники повноти і достовірності є зростаючими функціями часу, а показник своєчасності — спадною функцією часу з пороговим обмеженням. Порогове обмеження принципово неусувне, що зумовлено наявністю у процесі зміни ситуацій ризику критичного моменту часу T_{σ} , у який настає аварійна або катастрофічна ситуація. Звідси випливає, що рішення щодо запобігання небажаним наслідкам слід формувати, приймати і реалізовувати вчасно, до критичного моменту. Інакше будь-який, навіть найкращий розв'язок (наприклад, глобальний екстремум, що суттєво переважає більшість локальних екстремумів) буде непотрібний.

Зазначені обставини зумовлюють актуальність і практичну значущість дослідження ситуацій ризиків із пороговим обмеженням часу на формування і реалізацію рішення. Розглянемо деякі задачі цього класу.

Задача 7. Визначення раціонального рівня інформованості у випадку порогового обмеження часу

Відомо: математичне формулювання цієї задачі відповідає задачі 5 з додатковими умовами, які полягають у тому, що для T_0 виконується порогове обмеження $\bar{U}_{\tau}(T_0) < U^-$ й інтегральний показник інформованості $\bar{U}_{\tau}$ є пороговою функцією часу, яку визначає умова

$$\bar{U} = \begin{cases} \bar{U}_{\tau}(T_k), & \text{якщо } T_k \leq \hat{T}_k^* < T_{\sigma}; \\ 0, & \text{якщо } T_k > \hat{T}_k^* \geq T_{\sigma}, \end{cases}$$

де T_0, T_k — відповідно момент початку і момент закінчення пошуку додаткової інформації під час розв'язання задачі; $\hat{T}_k$ — тривалість пошуку додаткової інформації, $\hat{T}_k^* = T_k - T_0$; $\hat{T}_k^*, \bar{U}_k^*$ — відповідно раціональне значення $\hat{T}_k$ і $\bar{U}_{\tau}(T_k)$.

Потрібно: визначити раціональний компроміс між рівнем інформованості $\bar{U}_k^*$ і тривалістю $\hat{T}_k^*$ пошуку додаткової інформації, для якого з допустимим рівнем достовірності до настання критичного моменту часу T_{σ} забезпечено розпізнавання кожної ситуації $S_k^{\tau} \in S_{\tau}$ і визначення ступеня і рівня ризику кожної ситуації $S_k^{\tau} \in S_{\tau}$.

Задача 8. Системне оцінювання ресурсів допустимого ризику в динаміці позаштатного режиму

Відомі: послідовність вкладених множин (9.7) за певний період $T_r^{\pm} = [T_r^-, T_r^+]$ технічного діагностування складної системи; у кожний момент діагностування $T_i \in T_r^{\pm}$, $\tau = \overline{1, n_{\tau}}$ для кожної ситуації $S_k^{\tau} \in S_{\tau}$ множина M_k^{τ} факторів ризику у формі (9.8). Усі множини M_k^{τ} , $k = \overline{1, K_{\tau}}$ містять підмножини $\tilde{M}_k^{\tau}$, елементи яких не є елементами множини M_0 . Нечіткі інформаційні вектори I_k^{τ} , $k = \overline{1, K_{\tau}}$ та їхні компоненти для тих факторів ризику кожної множини M_k^{τ} , що не є елементами підмножини $\tilde{M}_k^{\tau}$ та числові значення ступеня η_{qk}^{τ} і рівня W_{qk}^{τ} ризику за відомих значень компонент вектора I_k^{τ} для тих факторів ризику кожної множини M_k^{τ} , що не належать підмножині $\tilde{M}_k^{\tau}$. Розпізнавання ситуації $S_k^{\tau} \in S_{\tau}$ та оцінка ступеня і рівня ризику залежать від значення інтегрального показника інформованості $\bar{U}_{\tau}$ і можливі за умови, якщо $\bar{U}_{\tau} > U^-$, де

U^- — поріг виявлення. Невизначеність інформації про фактори ризику $\rho_k^t \in \tilde{M}_k^t$ створює для $T_0 \in T_r^\pm$, $T_0 > T_r^-$ умова $\bar{U}_t < U^-$, у разі виконання якої виключено можливість розпізнавання і визначення ступеня та рівня ризику ситуації $S_k^t \in S_t$.

Потрібно: на підставі апріорної інформації і даних поточної технічної діагностики встановити принципову можливість появи критичної і (або) надзвичайної ситуації і визначити до настання критичного моменту часу T_σ :

- ♦ раціональний рівень $\bar{U}_t$ інтегрального показника інформованості $\bar{U}_t$, за якого із практично допустимим рівнем достовірності забезпечено розпізнавання кожної ситуації $S_k^t \in S_t$, визначення її ступеня η_k^t і рівня W_k^t ризику та критичного моменту часу T_σ ;
- ♦ ресурси допустимого ризику позаштатних, критичних, надзвичайних, аварійних і катастрофічних ситуацій до настання критичного моменту T_σ і на прогнозований період експлуатації $T_{r+1}^\pm = [T_{r+1}^-, T_{r+1}^+]$ для $T_{r+1} \geq T_r^+$.

Зазначимо, що пропонований методологічний апарат системного аналізу і багато-критерійної мінімізації ступеня і рівня ризику дає можливість принципового підвищення безпеки, живучості, ефективності функціонування складних технічних систем завдяки своєчасному виявленню причин і факторів критичних і катастрофічних ризиків та оперативному, своєчасному запобіганню їхньому переходу в аварії або катастрофи.

9.2. Властивості та особливості функціонування складних технічних систем в умовах багатфакторних ризиків

Практика останніх десятиліть минулого століття свідчить, що ризики виникнення техногенних і природних катастроф із наслідками регіонального, національного та глобального масштабу непинно зростають [97, 99, 105, 172], що зумовлено різними об'єктивними та суб'єктивними умовами і факторами [167]. Поміж них визначальне значення мають принципи, підходи і методи управління техногенно та екологічно небезпечними об'єктами і способи забезпечення їхньої безпеки за наявності багатфакторних ризиків [64, 82, 108, 175]. Серед таких об'єктів особливе місце за вимогами до безпеки належить АЕС.

В основу сучасних методів забезпечення безпеки АЕС, відображених у відповідній нормативно-технічній документації, покладено імовірнісний підхід. Головною концепцією забезпечення безпеки АЕС і недопущення аварії з викидом радіоактивних речовин є ешелонований захист. Водночас аналіз Чорнобильської катастрофи свідчить, що методологічні положення ймовірнісного підходу суперечать головній меті концепції забезпечення безпеки АЕС [259]. Пояснити це можна специфікою ймовірнісного аналізу, який доцільно застосовувати тільки за певної статистичної стійкості процесів, коли наявна деяка закономірність частоти позаштатних ситуацій як індикаторів можливої аварії. Тому ймовірнісну модель можна і доцільно використовувати тільки для аналізу позаштатних ситуацій із метою своєчасного формування, прийняття і реалізації рішень щодо запобігання аваріям. Цього можна досягти лише за умови, що система технічного діагностування повною мірою відповідатиме вимогам до своєчасності та оперативності дій персоналу в разі виникнення позаштатних ситуацій. А саме: діагностика повинна забезпечити такий рівень повноти, достовірності та своєчасності

інформації про стан і зміни техногенно небезпечних процесів, який дасть змогу персоналу вчасно запобігти переходу позаштатної ситуації в аварійну або катастрофічну.

Слід зазначити, що вимога своєчасності є пріоритетною, оскільки найточніша, найдостовірніша інформація стає непотрібною, якщо вона надходить до персоналу після аварії або катастрофи. Звідси постає практична потреба системної узгодженості темпів діагностування з темпами робочих процесів у різних режимах функціонування складної технічної системи. Така узгодженість може бути однією з найважливіших умов забезпечення гарантованої безпеки об'єктів підвищеного ризику, до яких належать АЕС.

Аналогічні потреби характерні й для інших великих виробничих об'єднань, складних технологічних і технічних систем різного призначення. Зокрема, узгодженість діагностування і управління вкрай важлива для транспортних систем, у яких принципово неможливий аварійний зупин за умов несподіваного впливу факторів катастрофічного ризику. До таких систем належать всі категорії і всі типи авіаційної техніки. Отже, потрібно розробити якісно новий підхід до розв'язання проблем безпеки сучасних СТС різного призначення.

Такий підхід досліджено у цьому розділі. Він базується на пропонованих концептуальних засадах системного аналізу, багатокритерійної оцінки і прогнозування ситуацій ризиків. Суть пропонованої концепції полягає в заміні типового принципу виявлення переходу працездатного стану об'єкта в непрацездатний на підставі виявлення відмов, несправностей, дефектів і прогнозування надійності об'єкта на якісно новий принцип [128, 129].

Суть цього принципу — своєчасне виявлення та усунення причин можливого переходу працездатного стану об'єкта в непрацездатний на основі системного аналізу багатфакторних ризиків позаштатних ситуацій, достовірного оцінювання ресурсів допустимого ризику різних режимів функціонування складного технічного об'єкта і прогнозування основних показників живучості об'єкта упродовж заданого періоду його експлуатації.

Для досягнення поставленої мети потрібно конкретизувати базові поняття та означення основних об'єктів дослідження.

Наведемо описи, що характеризують властивості та особливості складної системи за умов штатного і позаштатного режимів функціонування [128, 246].

Режим функціонування R — послідовність $E_1, E_2, \dots, E_k, \dots$ станів складної системи, у якій кожний стан E_k характеризують деякі показники (Y_k, X_k, U_k) процесів функціонування системи і деякі показники Ξ_k впливу зовнішнього середовища і факторів ризику:

$$\begin{aligned} E_k &= \{(Y_k \in Y) \wedge (X_k \in X) \wedge (U_k \in U) \wedge (\Xi_k \in \Xi)\}; \\ Y_k &= \hat{Y}[T_k], \quad X_k = \hat{X}[T_k], \\ U_k &= \hat{U}[T_k], \quad \Xi_k = \hat{\Xi}[T_k]; \\ T_k &= \{t_k | t_k > t_{k-1}\}, \quad T_k \in T^{\pm}, \quad T_0 = \{t_0 | t_0 = t^-\}, \quad T^{\pm} = \{t | t^- \leq t \leq t^+\}; \\ Y &= (\dot{Y}_i | i = \overline{1, m}), \quad X = (\dot{X}_j | j = \overline{1, n}), \\ U &= (\dot{U}_q | q = \overline{1, Q}), \quad \Xi = (\dot{\Xi}_p | p = \overline{1, P}), \end{aligned} \quad (9.18)$$

де Y — множина зовнішніх параметрів $\dot{Y}_i$ (технічних, економічних та інших показників якості функціонування системи); U — множина керуючих параметрів $\dot{U}_q$;

X — множина внутрішніх параметрів $\dot{X}_j$ (конструктивних, технологічних та інших показників); Ξ — множина параметрів $\dot{\Xi}_p$ впливу зовнішнього середовища і факторів ризику; $\hat{Y}[T_k]$, $\hat{X}[T_k]$, $\hat{U}[T_k]$, $\hat{\Xi}[T_k]$ — множини значень відповідних параметрів у момент часу T_k , $T^\pm$ — заданий або прогнозований період функціонування складної технічної системи.

Штатний режим R_{sd} — режим функціонування об'єкта, для якого $\forall T_k \in T_{sd}^+$, всі показники Y_k, X_k, U_k, Ξ_k лежать в апіорно заданих інтервалах $D_Y^\pm, D_X^\pm, D_U^\pm, \bar{D}_\Xi^\pm$,

$$\forall T_k \in T_{sd}^+ \Rightarrow R_{sd} = \{(Y_k \in D_Y^\pm) \wedge (X_k \in D_X^\pm) \wedge (U_k \in D_U^\pm) \wedge (\Xi_k \in \bar{D}_\Xi^\pm)\};$$

$$T_{sd}^+ = \{t | t_{sd}^- \leq t \leq t_{sd}^+\}, \quad T_{sd}^+ \in T^+;$$

$$D_Y^\pm = (D_i^\pm | i = \overline{1, m}), \quad D_i^\pm = (\dot{Y}_i | \dot{Y}_i^- < \dot{Y}_i < \dot{Y}_i^+, i = \overline{1, m});$$

$$D_X^\pm = (D_j^\pm | j = \overline{1, n}), \quad D_j^\pm = (\dot{X}_j | \dot{X}_j^- < \dot{X}_j < \dot{X}_j^+, j = \overline{1, n});$$

$$D_U^\pm = (D_q^\pm | q = \overline{1, Q}), \quad D_q^\pm = (U_q | \dot{U}_q^- < \dot{U}_q < \dot{U}_q^+, q = \overline{1, Q});$$

$$\bar{D}_\Xi^\pm = (\bar{D}_p^\pm | p = \overline{1, P}), \quad \bar{D}_p^\pm = (\dot{\Xi}_p | \dot{\Xi}_p^- < M \dot{\Xi}_p < \dot{\Xi}_p^+, p = \overline{1, P}).$$

Позаштатний режим R_{os} — режим функціонування об'єкта, для якого $\forall T_k \in T_{os}^\pm$, окремі показники або деякі поєднання показників, або всі показники Y_k, X_k, U_k, Ξ_k не лежать в апіорно заданих інтервалах $D_Y^\pm, D_X^\pm, D_U^\pm, \bar{D}_\Xi^\pm$. У загальному випадку режим R_{os} описують співвідношення:

$$\forall T_k \in T_{os}^\pm \Rightarrow A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee A_4 \vee A_5 \vee \dots \vee A_N;$$

$$T_{os}^\pm = \{t | t_{os}^- \leq t \leq t_{os}^+\}, \quad T_{os}^\pm \in T^\pm;$$

$$A_1 = \{(Y_k \notin D_Y^\pm) \wedge [(X_k \in D_X^\pm) \wedge (U_k \in D_U^\pm) \wedge (\Xi_k \in \bar{D}_\Xi^\pm)]\};$$

$$A_2 = \{(X_k \notin D_X^\pm) \wedge [(Y_k \in D_Y^\pm) \wedge (U_k \in D_U^\pm) \wedge (\Xi_k \in \bar{D}_\Xi^\pm)]\};$$

$$A_3 = \{(U_k \notin D_U^\pm) \wedge [(Y_k \in D_Y^\pm) \wedge (X_k \in D_X^\pm) \wedge (\Xi_k \in \bar{D}_\Xi^\pm)]\};$$

$$A_4 = \{(\Xi_k \notin \bar{D}_\Xi^\pm) \wedge [(Y_k \in D_Y^\pm) \wedge (X_k \in D_X^\pm) \wedge (U_k \in D_U^\pm)]\};$$

$$A_5 = \{[(Y_k \notin D_Y^\pm) \wedge (X_k \notin D_X^\pm)] \wedge [(U_k \in D_U^\pm) \wedge (\Xi_k \in \bar{D}_\Xi^\pm)]\};$$

.....

$$A_N = \{(X_k \notin D_X^\pm) \wedge (Y_k \notin D_Y^\pm) \wedge (U_k \notin D_U^\pm) \wedge (\Xi_k \notin \bar{D}_\Xi^\pm)\}.$$

Перехідний режим $\hat{R}_{tr}^-$ — некерований режим функціонування, який зумовлений впливом множини $\hat{M}_{tr}$ факторів ризику ρ_k , $k \in \bar{K}^-$ і упродовж періоду часу $\hat{T}_{tr}^\pm \in T^\pm$ призводить до переходу штатного R_{sd} у позаштатний R_{os} режим. Режим $\hat{R}_{tr}^-$ визначають співвідношення

$$\hat{R}_{tr}^-: R_{sd} \xrightarrow{\hat{M}_{tr}} R_{os};$$

$$\forall T \in T_{tr}^\pm \Rightarrow R_{tr}^- = R_{tr}^b \vee \hat{R}_{tr}^- \vee R_{tr}^e; \quad T = \{t | t \in T^\pm\}; \quad \hat{T}_{tr}^\pm = \{t | \hat{t}_{tr}^- < t < \hat{t}_{tr}^+\};$$

$$\hat{R}_{tr}^b = \{(\exists! T = T_{tr}^- = \hat{T}_{sd}^+) \wedge (\exists! E_T = E_{tr}^- = \hat{E}_{sd}^+) \wedge (\exists! \mu_{R_{tr}^-}(E_T) = \mu_{R_{sd}}(E_T) = 1)\};$$

$$E_T = E[T]; \quad E_{tr}^- = E[T_{tr}^-], \quad \hat{E}_{sd}^+ = E[\hat{T}_{sd}^+],$$

$$\hat{T}_{tr}^- = \{t | t = \hat{t}_{tr}^-\},$$

$$\hat{T}_{sd}^+ = \{t | t = \hat{t}_{sd}^+ \leq t_{sd}^+ \in T^\pm\};$$

$$\begin{aligned}
\tilde{R}_{tr} &= \{(\forall T \in \hat{T}_{tr}^{\pm} \Rightarrow \\
&\Rightarrow (\tilde{E}_{tr}[T] = (E_T, \mu_{R_{sd}}(E_T)) \vee (E_T, \mu_{R_{os}}(E_T))) \wedge (\mu_{R_{sd}}(E_T) + \mu_{R_{os}}(E_T) = 1)\}; \\
R_{tr}^e &= \{(\exists! T = \hat{T}_{tr}^+ \wedge (\exists! E_T = \tilde{E}_{tr}^+ = \tilde{E}_{os}^+) \wedge (\exists! \mu_{R_{os}}(E_T) = \mu_{R_{os}}(E_T) = 1))\}; \\
\tilde{E}_{os}^+ &= E[\hat{T}_{tr}^+], \\
\hat{T}_{tr}^+ &= \{t | t = \tilde{t}_{tr}^+\}.
\end{aligned}$$

Перехідний режим $\tilde{R}_{tr}^+$ — керований режим функціонування, зумовлений керуючим впливом U_{tr} системи управління безпекою і упродовж періоду $\tilde{T}_{tr}^{\pm}$ призводить до переходу позаштатного R_{os} у штатний R_{sd} режим. Режим $\tilde{R}_{tr}^+$ визначають співвідношеннями:

$$\tilde{R}_{tr}^+: R_{os} \xrightarrow{U_{tr}} R_{sd}; \quad (9.22)$$

$$\begin{aligned}
\forall T \in \tilde{T}_{tr}^{\pm} &\Rightarrow \tilde{R}_{tr}^+ = \tilde{R}_{tr}^b \vee \tilde{R}_{tr} \vee \tilde{R}_{tr}^e, \quad T = \{t | t \in T^{\pm}\}, \quad \tilde{T}_{tr}^{\pm} = \{t | \tilde{t}_{tr}^- < t < \tilde{t}_{tr}^+\}; \\
\tilde{R}_{tr}^b &= \{(\exists! T = \tilde{T}_{tr}^- = \hat{T}_{tr}^+) \wedge (\exists! E_T = \tilde{E}_{tr}^- = \tilde{E}_{tr}^+) \wedge (\exists! \mu_{R_{os}}(E_T) = \mu_{R_{os}}(E_T) = 1)\}; \\
E_T &= E[T], \quad \tilde{E}_{tr}^- = E[\tilde{T}_{tr}^-] = \tilde{E}_{os}^+[\tilde{T}_{tr}^+], \\
\tilde{T}_{tr}^- &= \{t | t = \tilde{t}_{tr}^- = \tilde{t}_{tr}^+\}, \quad \tilde{T}_{sd}^+ = \{t | t = \tilde{t}_{sd}^+ \leq t_{sd}^+\}; \\
\tilde{R}_{tr} &= \{(\forall T \in \tilde{T}_{tr}^{\pm} \Rightarrow
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\Rightarrow (\tilde{E}_{tr}[T] = (E_T, \mu_{R_{sd}}(E_T)) \vee (E_T, \mu_{R_{os}}(E_T))) \wedge (\mu_{R_{sd}}(E_T) + \mu_{R_{os}}(E_T) = 1)\}; \\
R_{tr}^e &= \{(\exists! T = \tilde{T}_{tr}^+ = \tilde{T}_{sd}^-) \wedge (\exists! E_T = \tilde{E}_{sd}^-) \wedge (\exists! \mu_{R_{os}}(E_T) = \mu_{R_{sd}}(E_T) = 1)\}; \\
\tilde{E}_{sd}^- &= E[\tilde{T}_{tr}^+] = E[\tilde{T}_{sd}^-], \\
\tilde{T}_{tr}^+ &= \{t | t = \tilde{t}_{tr}^+ = \tilde{t}_{sd}^-\}.
\end{aligned}$$

Позаштатна ситуація S_{os} — позаштатний режим функціонування, за якого окремі показники якості системи або показники зовнішнього середовища лежать поза інтервалами штатного режиму в таких межах, що немає загрози аварії або катастрофи.

Критична ситуація S_{cs} — позаштатний режим функціонування, за якого показники якості системи або показники зовнішнього середовища лежать поза інтервалами штатного режиму в таких межах, що виникає реальна загроза аварії або катастрофи.

Надзвичайна ситуація S_{es} — позаштатний режим функціонування, за якого показники якості системи або показники зовнішнього середовища лежать поза інтервалами штатного режиму в таких межах, що майже неминуче трапляється аварія або катастрофа.

Аварійна ситуація S_{as} — позаштатний режим функціонування, за якого технічна система переходить із працездатного стану в такий непрацездатний, аварійний стан, що для переходу у вихідний стан необхідно виконати ремонт.

Аварія — кінцевий результат аварійної ситуації.

Катастрофічна ситуація S_{ds} — позаштатний режим функціонування, за якого технічна система переходить із працездатного стану в такий непрацездатний, катастрофічний стан, що перехід у працездатний стан принципово виключений.

Катастрофа — кінцевий результат катастрофічної ситуації.

Управління безпекою — спеціальний вид управління складною системою, реалізований у динаміці функціонування складної системи у вигляді комплексу рішень і дій

для забезпечення її живучості та запобігання критичним і надзвичайним ситуаціям, аваріям і катастрофам.

Живучість — властивість складної системи, що полягає в її здатності зберігати штатний режим функціонування і виключати можливість аварії або катастрофи у прогнозованих і непередбачуваних умовах впливу дестабілізуючих, неруйнівних факторів ризику.

Працездатність — властивість складної системи, що полягає в її здатності виконувати у штатному режимі покладені функції із заданими показниками якості та ефективності.

Ступінь ризику η_i — імовірність появи небажаних наслідків впливу будь-яких факторів ризику в будь-який момент часу $T_i \in T^{\pm}$ у процесі функціонування складної системи.

Рівень ризику W_i — розмір збитку від небажаних наслідків впливу будь-яких факторів ризику в будь-який момент часу $T_i \in T^{\pm}$ у процесі функціонування складної системи.

Ресурс допустимого ризику T_o — тривалість періоду функціонування складної системи у певному режимі, упродовж якого ступінь та рівень ризику внаслідок можливо-го впливу факторів ризику не перевищують апріорно задані допустимі значення.

Ресурс допустимого ризику позаштатної ситуації T_{os} — тривалість періоду функціонування складної системи у штатному режимі, упродовж якого ступінь та рівень ризику позаштатної ситуації не перевищують апріорно задані значення.

Ресурс допустимого ризику критичної ситуації T_{cs} — тривалість періоду функціонування складної системи у штатному режимі, упродовж якого ступінь та рівень ризику критичної ситуації не перевищують апріорно задані значення.

Ресурс допустимого ризику надзвичайної ситуації T_{es} — тривалість часу функціонування складної системи у штатному режимі, упродовж якого ступінь та рівень ризику надзвичайної ситуації не перевищують апріорно заданих значень.

Ресурс допустимого ризику аварійної ситуації T_{as} — тривалість періоду функціонування складної системи у штатному режимі, упродовж якого ступінь та рівень ризику аварійної ситуації не перевищують апріорно задані значення.

Ресурс допустимого ризику катастрофічної ситуації T_{ds} — тривалість періоду функціонування складної системи у штатному режимі, упродовж якого ступінь та рівень ризику катастрофічної ситуації не перевищують апріорно задані значення.

Ресурс допустимого ризику позаштатного режиму T_{ar} — тривалість періоду функціонування складної системи у штатному режимі, упродовж якого ступінь та рівень ризику критичних, надзвичайних, аварійних і катастрофічних ситуацій не перевищують апріорно задані значення.

Слід зазначити, що основні показники ризику такі: ступінь, рівень ризику і ресурс допустимого ризику позаштатного режиму. Останній показник визначає таку тривалість періоду функціонування СТС, упродовж якої ступінь і (або) рівень ризику будь-якої позаштатної ситуації не повинні перевищити допустимі значення, задані нормативними документами. При цьому він є ресурсом, який визначають не простим підсумовуванням тривалості періоду функціонування упродовж певного терміну, а станом працездатності, живучості та безпеки упродовж певного періоду з урахуванням реальних умов експлуатації. Отже, враховують реальні впливи різних факторів, зокрема впливи умов функціонування і факторів ризику. Це дає змогу, зокрема, відрізнити часовий наліт як витрату ресурсу літаків коротких рейсів від ресурсу літаків далеких рейсів.

9.3. Аналіз багатofакторних ризиків виникнення аварій і катастроф

9.3.1. Основні поняття аварій і катастроф

Наведемо описи основних понять аварій і катастроф, а також умов гарантованої безпеки, що випливають із цих понять.

Твердження 1. Будь-яка аварія або катастрофа є кінцевим результатом послідовного переходу штатного режиму функціонування складної системи відповідно в аварійну або катастрофічну ситуацію. Перехід здійснюється через реалізацію таких взаємозалежних стадій позаштатного режиму. *Стадія 1* — перехідний режим зі штатного стану в позаштатну ситуацію. *Стадія 2* — перехідний режим із позаштатної ситуації в критичну. *Стадія 3* — перехідний режим із критичної ситуації в надзвичайну. *Стадія 4* — перехідний режим із надзвичайної ситуації в аварійну або катастрофічну. Тривалість кожної стадії залежить від величини ресурсу допустимого ризику відповідної ситуації позаштатного режиму. Стадії можуть бути оборотними і необоротними, еволюційними і пороговими. Еволюційні процеси є повільні й швидкі, прискорені й сповільнені.

Твердження 2. Ризик виникнення аварії чи катастрофи підвищується в міру переходу позаштатного режиму зі стадії 1 у стадію 4. Темпи підвищення ризику на кожній стадії прямо пропорційні темпам зменшення *ресурсу допустимого ризику* в режимі відповідної стадії. Ресурс допустимого ризику виникнення аварії чи катастрофи має максимальне значення за штатного режиму, зменшується в міру настання стадій позаштатного режиму і дорівнює нулю у стадії 4.

Твердження 3. Ступінь ризику аварії чи катастрофи є зростаючою функцією часу у процесі переходу штатного режиму функціонування складної системи послідовно в позаштатну, критичну і надзвичайну ситуації, досягає граничних значень в аварійній або катастрофічній ситуації. Властивості функцій на кожній стадії визначені властивостями перехідного режиму відповідної стадії. Максимальні темпи підвищення ступеня ризику відповідають пороговим процесам стадій, а мінімальні — оборотним процесам стадій, що сповільнюються. Ступінь ризику мінімальний у стадії 1 і досягає максимального значення у стадії 4.

Твердження 4. Рівень ризику аварії чи катастрофи у межах ресурсу допустимого ризику може залишатися сталим на всіх стадіях або зростати в міру переходу від стадії 1 до стадії 4.

Твердження 5. Необхідними умовами забезпечення гарантованої безпеки складної системи є виконання системою управління безпекою таких основних вимог і функцій:

- ♦ виявлення, розпізнавання і прогнозування ризиків позаштатних, критичних, надзвичайних, аварійних і катастрофічних ситуацій з необхідним рівнем достовірності в реальному масштабі часу;
- ♦ прогнозування і реалізація необхідного ресурсу допустимого ризику позаштатного режиму для заданих допустимих значень ступеня і рівня ризику позаштатних, критичних, надзвичайних, аварійних і катастрофічних ситуацій;
- ♦ обґрунтування і реалізація таких необхідних показників перехідного режиму $\tilde{R}_r^+$, за яких позаштатний режим переходить у штатний у межах ресурсу допустимого ризику позаштатних, критичних чи надзвичайних ситуацій.

Із наведених тверджень випливає практична потреба виконання системного аналізу основних особливостей і властивостей позаштатного режиму та його складових як інформаційної основи формування та обґрунтування засобів і методів забезпечення гарантованої безпеки складних систем. Для реалізації інформаційного забезпечення потрібна кількісна міра інформації, що враховує специфіку позаштатного режиму і його компонентів.

9.3.2. Аксіома ситуацій ризику

Встановлено [128], що типова шеннонівська міра кількості інформації [190], яку застосовують у теорії зв'язку [36, 37, 78, 186, 191], теорії складних систем і процесів [46, 72, 103, 104], інформаційній теорії управління [84, 85, 114], теорії розпізнавання образів [30, 45, 173], не відповідає умовам, властивостям і особливостям позаштатного режиму, оскільки її одержано у припущенні, що аналізовані випадкові події утворюють повну групу подій. За цієї умови здійснення однієї події з групи унеможливає здійснення інших подій групи. Отже, якщо одна з подій справді настала, то ймовірність настання інших подій дорівнює нулю. Зокрема, це характерно для послідовної передачі системою зв'язку інформації по літерах [37, 190, 191].

Однак принципово інші умови та фактори виникають у позаштатних ситуаціях. Їх характеризує така аксіома.

Аксіома ситуацій ризику [128]. Множина ситуацій ризику принципово не є повною групою випадкових подій. Тому не виключено можливість одночасного здійснення кількох подій із цієї множини і, отже, принципово можуть *одночасно дорівнювати одиниці ймовірності кількох подій*. Настання однієї або кількох подій із множини ситуацій ризику не виключає можливості настання інших подій цієї множини. Отже, невизначеність появи будь-якої події з множини ситуацій ризику не дорівнюватиме нулю у разі настання однієї або кількох подій множини.

Тут і далі поняття «ситуація ризику» трактують у широкому розумінні, яке поєднує різні класи позаштатних, критичних, надзвичайних, аварійних і катастрофічних ситуацій. Твердження аксіоми безпосередньо впливають з аналізу багатьох катастроф [198], спричинених одночасною або послідовною появою кількох несправностей чи відмов. Приклад — відмова одночасно всіх двигунів літака Ан-124 «Руслан», що призвело до його катастрофи 6 грудня 1997 р. у районі селища Іркутськ-2 [198].

Відзначимо ще одну важливу особливість міри К. Шеннона: кількість інформації визначена як різниця між невизначеністю об'єкта до одержання інформації і після. Звідси впливає важлива умова, яка визначає можливість вимірювання кількості інформації єдиною числовою величиною незалежно від різноманітності інформації, що має велику вагу для систем зв'язку та деяких інших застосувань. Однак для аналізу ситуацій ризику така міра неприйнятна, оскільки має суттєвий недолік: не дає змоги одночасно з кількістю оцінювати й якість інформації. Якість інформації розглядають як характеристику корисності інформації у розв'язанні конкретних системних задач аналізу ситуацій ризику за умов порогового обмеження часу. Наявність такого порога зумовлена можливістю переходу ситуації ризику в аварію або катастрофу за дуже обмежений час. Очевидно, що рішення щодо запобігання такому переходу потрібно сформувати, прийняти і реалізувати до аварії, інакше воно стає марним. Звідси впливає потреба оперативного оцінювання таких якісних показників інформації, як повнота, достовірність, своєчасність.

З урахуванням аксіоми ситуацій ризику і зазначених якісних показників інформації постають принципово інші вимоги до кількісної міри інформації. Їхню суть коротко

можна охарактеризувати як *забезпечення системної узгодженості якості та кількості інформації* за умов порогового обмеження часу. Звідси випливає, що кількість інформації доцільно оцінювати за обсягом відомостей, корисних для формування та обґрунтування рішення, а якість — за змістовністю інформації щодо її достовірності і повноти відображення ситуацій ризику та щодо своєчасності повідомлення практично корисних відомостей ОПР. Слід зазначити, що за сучасних умов широкого застосування інформаційних технологій і комп'ютерної техніки доцільно в будь-якій сфері практичної діяльності за одиницю кількості інформації взяти *байт*.

9.3.3. Особливості процесів формування позаштатного режиму

На основі сформульованих тверджень (1–5) і введених понять кількості та якості інформації розглянемо особливості процесів формування позаштатного режиму, коротко опишемо процеси розвитку аварій і катастроф, проаналізуємо роль і місце інформаційного забезпечення у формуванні рішень під час розпізнавання та оцінювання ситуацій.

Передусім розглянемо взаємозв'язки і взаємозалежності штатного та позаштатного режимів, а також еволюцію розвитку позаштатних ситуацій в аварії та катастрофи. Враховуючи, що основою функціонування складної системи є штатний режим, візьмімо його як вихідний стан, а компоненти позаштатного режиму відображатимемо на структурній схемі (рис. 9.1) у порядку їхнього можливого переходу в аварію чи катастрофу. Під час виконання аналізу враховуватимемо інформаційну невизначеність позаштатних ситуацій. Тому послідовність переходу позаштатних ситуацій у позаштатний режим (блоки 1–4.0) доповнено процедурою аналізу можливості переходу позаштатних ситуацій у штатний режим (блок 4.1). Ця процедура призначена для формування та реалізації рішень у трьох можливих варіантах стану складних систем.

1. Перехід у штатний режим функціонування можливий. Він забезпечений процедурами аналізу умов переходу (блок 4.1), вибору стратегії переходу (блок 8.1), реалізації стратегії переходу (блок 9.1).
2. Перехід у штатний режим функціонування неможливий. Отже, діє позаштатний режим складної ситуації (блок 5.0). Тоді послідовно проводять аналіз факторів, умов і можливостей переходу позаштатного режиму в критичну, надзвичайну, аварійну, катастрофічну ситуацію або в аварію чи катастрофу (блоки 5.1 і 5.2; 6.1 і 6.2; 7.1 і 7.2).
3. Найменш визначений і найризикованіший варіант. Він виникає за умови, що в аналізований момент часу $T_k \in T^\pm$ обсяг нечіткої інформації про стан функціонування складної системи недостатній (знак «?») для прийняття рішення. У такій ситуації головною метою ОПР є запобігання аварії чи катастрофі. Рішення буде сформоване на підставі наявної апіорної і діагностичної інформації (блок 4.2) і спрямоване на розроблення та реалізацію раціональної стратегії дій (блоки 8.2; 9.2). Детальніше особливості дій ОПР у таких ситуаціях досліджено в розділі 10.

На доповнення до схеми рис. 9.1 наведемо основні показники ризику і відобразимо один із варіантів послідовного переходу штатного режиму в аварію або катастрофу (рис. 9.2). Зазначимо, що показники ризику для різних компонентів (блоки 2–8) позаштатного режиму можуть суттєво відрізнятися. Тому для кожного компонента визначають значення ступеня і рівня (блоки 2.1–8.1) та ресурсу допустимого ризику (блоки 2.2–8.2). На підставі цих результатів виконують системний аналіз ступеня і рівня (блок 9) та ресурсу допустимого ризику (блок 10), результати якого є базою (блок 11) для формування і реалізації рішення ОПР.



Рис. 9.1. Структурна схема взаємозв'язків і взаємозалежностей компонентів позаштатного режиму

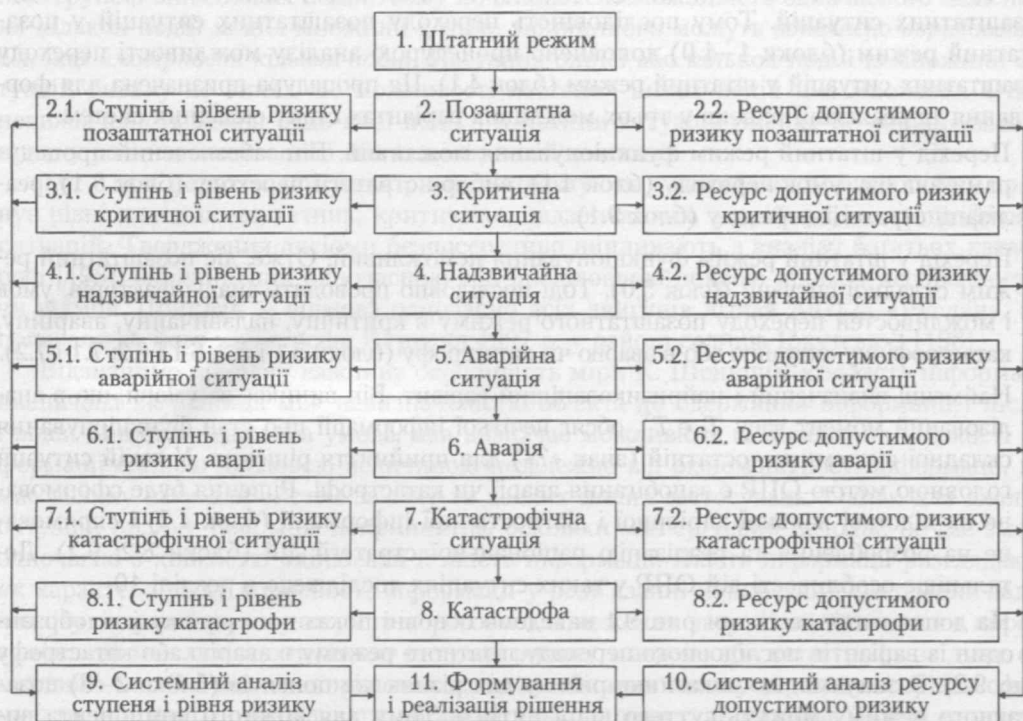


Рис. 9.2. Структурна схема взаємозв'язків показників ризику і компонентів позаштатного режиму

Слід звернути увагу, що в розглянутій схемі визначають значення показників ризику на певний момент часу $T_k \in T^{\pm}$, але не враховують їхні зміни в часі. Такий під-

хід цілком допустимий за умови, що стан об'єкта характеризує витрата ресурсу працездатності, який становить сотні тисяч відповідних одиниць, наприклад, кілометрів для наземного масового транспорту або годин нальоту для малої транспортної, санітарної, сільськогосподарської авіації.

Однак для багатьох об'єктів не можна обмежитися тільки врахуванням витрат ресурсу працездатності, потрібен більш повний аналіз технічного стану і точніше оцінювання ризику. До них належать унікальні вироби сучасної техніки: атомні і хімічні реактори, термоядерні установки, гірничодобувні комплекси, потужні повітряні, наземні, надводні, підводні транспортні засоби та інші об'єкти.

Для аналізу такого класу задач запропоновано алгоритм, схему якого показано на рис. 9.3. Її особливістю є паралельний аналіз факторів, властивостей та особливостей процесів позаштатних ситуацій (блоки 3.1; 3.3; 4.1—4.3) на підставі поточної інформації (блоки 1; 2) та апіорної інформації з бази апіорних знань (блок 3.2). Такий підхід реалізовано для скорочення часу на розпізнавання позаштатних ситуацій (блоки 4.1; 4.2; 4.3) і створення умов для оперативного оцінювання та прогнозування ситуацій ризику, ступеня і рівня ризику та ресурсу допустимого ризику (блоки 5.1—5.3; 6.1—6.3). Результати оцінювання і прогнозування використовують для формування та обґрунтування рішень (блок 7). У реальних умовах невизначеності розробляють кілька варіантів рішень, які оцінюють і ранжують за окремими показниками ризику (блоки 8.1—8.3). Потім рішення оцінюють і ранжують із позиції системно узгодженого виявлення найнебезпечніших факторів ризику і показників ризику, що змінюються у часі найшвидше (блок 9). На ґрунті цих рішень розробляють рекомендації для ОПР (блок 10).

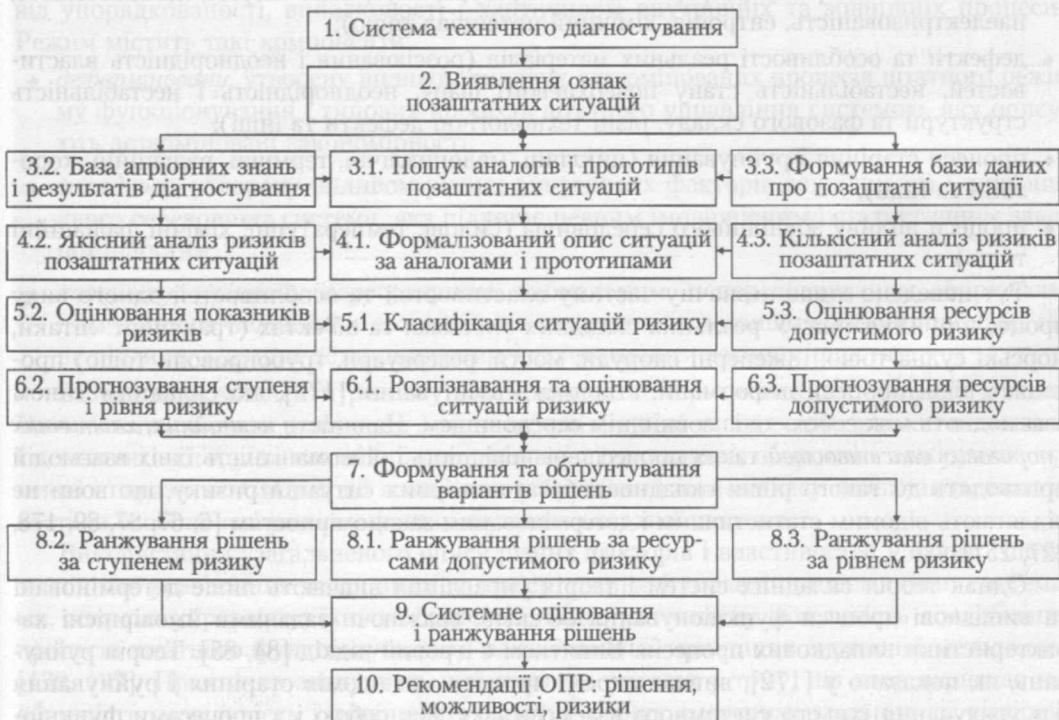


Рис. 9.3. Структурна схема алгоритму аналізу та оцінювання ризиків для позаштатних режимів складних систем

9.4. Основні принципи та особливості управління безпекою складних систем

Аналіз позаштатних режимів різних складних систем і конструкцій, дослідження причин та особливостей різних аварій і катастроф свідчать: відомі принципи і методи забезпечення безпеки складних систем не відповідають повною мірою сучасним вимогам [105] підходи і принципи оцінювання живучості не відображають усього різноманіття факторів, що впливають на руйнування матеріалів та конструкцій [172]. Це зумовлено насамперед тим, що виникнення ситуацій ризику, аварій і катастроф не враховують у традиційних моделях детермінованих і випадкових процесів, оскільки механізми старіння та руйнування матеріалів і конструкцій принципово характеризуються великою складністю і нестаціонарністю [246]. Зокрема, такі моделі не дають змоги одержати достовірне уявлення про раптові аварії і катастрофи складних систем, спричинені *нестационарними, аномальними і пороговими явищами*. Серед них велику вагу мають необоротні явища еволюційного старіння, нелінійні та порогові процеси руйнування, процеси стрибкоподібного переходу пружного матеріалу в крихкий стан під впливом критичної температури або подібних факторів, низка інших аналогічних явищ.

Слід також враховувати, що показники міцності і надійності матеріалів не є сталими, а нелінійно залежать від багатьох факторів: технологій виробництва, сфери застосування конструкцій, умов експлуатації складних систем. Особливе значення мають такі групи багатовимірних факторів ризику [172]:

- ♦ властивості матеріалу (деформація, температура, внутрішня енергія, намагніченість, наелектризованість, ентропія, хімічний потенціал тощо);
- ♦ дефекти та особливості реальних матеріалів (розсіювання і неоднорідність властивостей, нестабільність стану поверхневого шару, неоднорідність і нестабільність структури та фазового складу, різні технологічні дефекти та інші);
- ♦ процеси старіння і руйнування (циклічні, малоциклічні, термічні, радіаційні, корозійні та інші);
- ♦ процеси впливу зовнішнього середовища (силові, температурні, хімічні, радіаційні тощо).

Тут наведено лише незначну частину властивостей та особливостей одного виду процесів руйнування. У реальних складних системах та об'єктах (транспорт: літаки, морські судна тощо; інженерні споруди: мости, резервуари, трубопроводи тощо) проходять різні процеси деформації, старіння і руйнування [172], які складним чином взаємодіють між собою та із зовнішнім середовищем. Наявність *нелінійних, хаотичних і порогових властивостей* таких процесів, різноманітність і різноманітність їхніх взаємодій призводять до такого рівня складності багатовимірних ситуацій ризику, що вони не підлягають відомим статистичним і детермінованим закономірностям [6, 67, 87, 89, 178, 227, 251].

Однак теорія складних систем і теорія управління вивчають лише детерміновані та випадкові процеси функціонування об'єктів, вважаючи заданими ймовірнісні характеристики випадкових процесів. Винятком є ігровий підхід [84, 85]. Теорія руйнувань, як показано у [172], вивчає окремі процеси механізмів старіння і руйнування без урахування їхнього системного взаємозв'язку між собою і з процесами функціонування системи. Синергетика вивчає загальні властивості нелінійних процесів у відкритих системах, хаотичні процеси у відкритих нелінійних системах [67, 87, 227].

Теорія катастроф досліджує порогові процеси та інші механізми для певних класів моделей [6, 178, 251]. Низка дисциплін і наукових напрямів аналогічно досліджують інші види процесів і явищ. При цьому названі дисципліни досліджують окремі процеси та об'єкти для різних вихідних передумов і припущень, які не завжди узгоджуються між собою і не завжди виконуються на практиці. Головні причини такого становища зумовлені:

- ♦ відсутністю єдиного підходу до аналізу різних механізмів руйнувань;
- ♦ недостатнім урахуванням реальних умов і факторів позаштатних ситуацій;
- ♦ відсутністю єдиного методологічного апарату системного аналізу властивостей штатного режиму, факторів ризику, процесів і компонентів позаштатних ситуацій.

9.4.1. Гіпотеза про режим функціонування складної системи

Потрібне таке узагальнене відображення режиму функціонування реального складного об'єкта, що дасть змогу з єдиних позицій виявляти як механізми його функціонування і працездатності у штатному режимі, так і механізми появи та розвитку позаштатного режиму. Таке узагальнене відображення доцільно подати у вигляді емпіричного твердження, яке називають гіпотезою про режим складної системи [128, 246].

Гіпотеза про режим складної системи. Режим функціонування будь-якої складної системи у будь-який момент часу визначає дія множини її внутрішніх процесів та множини процесів її взаємодії із зовнішнім середовищем. Властивості режиму залежать від упорядкованості, випадковості і хаотичності внутрішніх та зовнішніх процесів. Режим містить такі компоненти:

- ♦ *детерміновану*, утворену впливом типових детермінованих процесів штатного режиму функціонування і типових процесів штатного управління системою, яку описують детерміновані закономірності;
- ♦ *випадкову*, утворену впливом різних випадкових факторів зовнішнього і внутрішнього середовища системи, яка підлягає певним імовірнісним і статистичним закономірностям;
- ♦ *хаотичну*, утворену нерегулярним, аномальним, непередбачуваним збурювальним діями нелінійних еволюційних і порогових механізмів різної природи, що не підлягає відомим детермінованим і статистичним закономірностям.

Зазначені компоненти режиму взаємопов'язані через множини процесів і явищ. Ця множина містить різні види і типи зв'язків: прямі та зворотні зв'язки, позитивні і негативні, лінійні та нелінійні, детерміновані і випадкові, оборотні і необоротні, зумисні і паразитні. Спільні дії компонент у будь-який момент часу визначають властивості та особливості режиму функціонування складної системи.

Використання узагальненого опису різних факторів і властивостей у формі гіпотези під час розв'язання задач аналізу, проектування і управління складними системами, зокрема управління їхньою безпекою, надає потенційну можливість дослідження процесів штатного функціонування з єдиної позиції принципів системної методології [128, 129]. Практична значущість цієї гіпотези полягає у тому, що вона визначає необхідність, можливість і доцільність пошуку різних експериментальних та емпіричних підходів і прийомів пізнання реальності. Подамо реалізацію основних ідей гіпотези у вигляді таких тверджень.

Твердження 6 (про обчислювальну незвідність складних систем). Реальна складна система будь-якої природи є обчислювально незвідною у тому сенсі, що її опис у вигляді будь-яких фізичних, математичних, логічних, імітаційних, інформаційних, алгоритмічних і (або) інших моделей і формальних описів, що базуються на будь-якій аксіоматичній теорії, характеризують принципово неусувна неповнота і недоказовість несуперечливості.

Твердження 7 (про обмеженість обчислювальної звідності складної системи). Реальна складна система може бути у певних межах обчислювально звідною в тому сенсі, що на основі фізичних, хімічних, механічних, обчислювальних і (або) інших експериментів та експериментально достовірних баз знань і даних можна побудувати фізичні, математичні, логічні, імітаційні, алгоритмічні і (або) інші моделі та формалізовані описи, які відображають об'єктивні закономірності процесів і властивостей системи із принципово обмеженими рівнями повноти, достовірності і точності.

Твердження 6 і 7 уточнюють суть гіпотези Уолфрема [262] і є її доведеннями. Твердження 6 впливає безпосередньо із принципу доповнюваності і теорем Геделя про неповноту і несуперечливість [112, 182]. Теорема Геделя про неповноту характеризує причини і суть принципово неусувної неповноти будь-якої аксіоматичної теорії. Відповідно до цієї теореми будь-яка аксіоматична теорія принципово є неусувно неповною в тому розумінні, що в межах кожної аксіоматичної теорії є такі осмислені твердження, які не можна ні довести, ні спростувати на підставі її аксіом [182]. Теорема Геделя про несуперечність стверджує, що не можна довести несуперечливість будь-якої аксіоматичної теорії на підставі її аксіом.

Для доведення несуперечності аксіоматичної теорії відповідно до принципу доповнюваності Геделя потрібно вибрати або побудувати таку несуперечливу аксіоматичну теорію, у якій досліджувана теорія є її частиною. Процес побудови послідовності таких теорій і доведення їхньої несуперечливості не має межі, стає нескінченним і тому є нереалізовним. Однак недоказовість несуперечності і принципово неусувна неповнота будь-якої аксіоматичної теорії призводять до принципово неусувної неповноти і недоказовості несуперечливості опису реального об'єкта.

Твердження 7 обґрунтоване такими встановленими істинами. З одного боку, будь-яка реальна складна система має надзвичайно велику кількість різноманітних процесів на різних макрорівнях та мікрорівнях структури, для опису яких потрібно опрацювання практично необмеженого обсягу інформації [217]. З іншого боку, є принципове обмеження на обсяг обробки інформації, і таке обмеження визначає межа Х. Бремермана [202]. Звідси випливає, що під час розв'язання практичної задачі аналізу або розроблення реальної складної системи за будь-яких умов можна обробити тільки скінченний, обмежений обсяг інформації. Тому рівні повноти, достовірності і точності інформаційного опису будь-якого реального об'єкта можуть бути тільки скінченними, обмеженими.

Твердження 6 і 7 дають змогу сформулювати такі важливі твердження.

Твердження 8 (про принципове обмеження достовірності опису складної системи). Реальна складна система принципово не може мати опису з абсолютною повнотою, абсолютною достовірністю та абсолютною точністю із застосуванням будь-яких методів і моделей будь-якої аксіоматичної теорії і (або) будь-яких методів і моделей, що ґрунтуються на використанні будь-яких баз знань і баз даних, отриманих і перевіреніх експериментально.

Твердження 8 є узагальненим висновком, що безпосередньо впливає із тверджень 6 і 7, гіпотези про режим складної системи та аксіоми ситуацій ризику. На його підставі сформульовано такі практично важливі твердження про властивості керованого і некерованого ризику реальної складної системи.

Твердження 9 (про принципову неусуненість ризику складних систем). Ризик позаштатного режиму будь-якої реальної складної системи є принципово неусувним у разі необмеженого терміну її функціонування.

Це твердження відображає практично відому істину: не можна створити складну систему, яка здатна нескінченно довго функціонувати у штатному режимі. Це твердження впливає із тверджень 6–8, а саме: із принципового обмеження рівня повноти і достовірності опису реальної складної системи впливає принципова неможливість виключити ситуації ризику за необмежений час. Але при цьому відповідно до тверджень 6–7 не виключено можливість обмежити ризик у межах скінченного терміну функціонування складної системи.

Твердження 10 (про обмеженість керованого ризику складної системи). Для будь-якої реальної складної системи можна за допомогою *раціонального управління* безпекою обмежити ризик будь-якого позаштатного режиму і забезпечити допустиме значення ступеня та рівня ризику в межах деякого скінченного терміну її функціонування на основі своєчасного виявлення та усунення причин появи можливих ситуацій ризику.

Твердження 11 (про необмеженість некерованого ризику складних систем). За відсутності управління безпекою реальної складної системи принципово неможливо обмежити ризик будь-якого позаштатного режиму в межах заданого скінченного періоду до рівня допустимих значень ступеня і рівня ризику.

Твердження 10 і 11 є певною конкретизацією твердження 9 і визначають суть та відмінності властивостей керованого і некерованого ризику реальної складної системи. Твердження 10 впливає із тверджень 7–9, відповідно до яких можна реалізувати систему управління безпекою у процесі функціонування реального складного об'єкта, здатну забезпечити своєчасне виявлення, розпізнавання, прогнозування ситуацій ризиків, а також їхню мінімізацію на основі своєчасного усунення причин виникнення можливих позаштатних режимів. Твердження 11 впливає із твердження 10, а саме: за відсутності управління безпекою неконтрольовано змінюються ступінь і рівень ризику і, як наслідок, у межах скінченного періоду функціонування складної системи ризик може перевищити задані допустимі значення.

Твердження 12 (про рівень ресурсу керованого ризику складної системи). Для будь-якої реальної складної системи завдяки раціональному управлінню безпекою у процесі її функціонування можна забезпечити певний ресурс допустимого ризику за необхідних допустимих значень ступеня і рівня ризику або за певних вимог до системи управління безпекою забезпечити необхідний ресурс допустимого ризику за необхідних допустимих значень ступеня і рівня ризику.

Твердження 13 (про рівень ресурсу некерованого ризику складної системи). За відсутності управління безпекою не можна у процесі функціонування будь-якої реальної складної системи забезпечити необхідний ресурс допустимого ризику за необхідних допустимих значень ступеня і рівня ризику.

Твердження 12 і 13 безпосередньо впливають із тверджень 10 і 11. Вони визначають суть і відмінності можливостей реалізації вимог до ресурсів допустимого ризику відповідно за наявності або відсутності управління безпекою складної системи.

9.4.2. Принципи формування і реалізації гарантованої безпеки складних систем

Грунтуючись на сформульованих твердженнях, запропоновано такі принципи формування і реалізації гарантованої безпеки складних систем.

Принцип 1 (системної узгодженості заходів забезпечення безпеки). Гарантовану безпеку складних систем має забезпечувати узгоджена інженерна діяльність на всіх етапах життєвого циклу виробу, а заходи всіх етапів повинні бути системно узгодженими за цілями, завданнями, термінами, ресурсами та очікуваними результатами з позиції гарантування заданих показників живучості і працездатності упродовж заданого терміну експлуатації.

Принцип 2 (системної узгодженості управління безпекою). Гарантовану безпеку у процесі функціонування складної системи повинна забезпечувати система управління безпекою, показники якості та ефективності якої мають бути системно узгоджені з відповідними показниками системи управління функціонуванням складної системи для одночасного гарантування з потрібною достовірністю заданих ресурсів допустимого ризику і заданої працездатності системи упродовж прогнозованого терміну експлуатації.

Принцип 3 (гарантування своєчасності реалізації рішення у процесі управління безпекою). Система управління безпекою повинна гарантувати з потрібною достовірністю своєчасне формування і реалізацію рішення за наявності неусувного порогового обмеження часу на цикл управління в позаштатних режимах.

Принцип 4 (системного гарантованого діагностування ситуацій ризику). Показники якості та ефективності системи технічного діагностування мають бути системно узгоджені з відповідними показниками системи управління безпекою для гарантування з потрібною достовірністю запобігання відмовам складної системи в межах ресурсів допустимого ризику різних режимів.

Принцип 5 (своєчасності і достовірності оцінювання та прогнозування ситуацій ризику). Система технічного діагностування повинна забезпечувати з потрібною достовірністю своєчасне виявлення, розпізнавання та оцінювання ризику позаштатного режиму на прогнозований термін експлуатації складної системи для гарантування своєчасного усунення причин ризику до появи відмов.

Запропоновані принципи покладено в основу стратегії управління працездатністю і безпекою складних систем, зокрема техногенно та екологічно небезпечних технічних систем і об'єктів [236, 237, 246, 247]. Ця стратегія дає змогу створити якісно новий рівень безпеки і живучості складних систем. Наприклад, для авіаційної техніки в реальних умовах польоту можна своєчасно виявити фактори суттєвого ризику, своєчасно усунути їх в передполітний період, що виключає їхній перехід у фактори критичного або катастрофічного ризику чи в режим відмов. Аналогічно досягають суттєвого підвищення рівня безпеки і живучості для інших типів складних систем.

9.5. Основи стратегії гарантованої безпеки

Загальний задум стратегії — забезпечити гарантовану безпеку складних систем завдяки узгодженій інженерній діяльності на всіх етапах життєвого циклу виробу: від формування ідеї та концепції виробу до етапу його утилізації.

9.5.1. Основні підходи і принципи

Головна мета пропонованої стратегії — гарантувати *раціонально обґрунтований ресурс живучості* складної системи в реальних умовах, які принципово не можливо усунути інформаційних і часових обмежень; забезпечити в реальних умовах функціонування складної системи своєчасне і достовірне виявлення, розпізнавання, оцінювання факторів ризику, прогнозування їхнього розвитку упродовж певного періоду експлуатації і на цій основі забезпечити своєчасне усунення причин ризиків до появи відмов та інших небажаних наслідків.

Основні підходи і принципи стратегії системного забезпечення гарантованої безпеки складних систем доцільно формувати на основі таких принципів [128]:

- ♦ системної узгодженості за цілями, задачами, ресурсами та очікуваними результатами заходів забезпечення безпеки складної системи;
- ♦ взаємної узгодженості цілей, задач, ресурсів та очікуваних результатів управління працездатністю і безпекою складної системи;
- ♦ своєчасного виявлення, гарантованого розпізнавання та системного діагностування факторів і ситуацій ризику;
- ♦ оперативного прогнозування, достовірного оцінювання позаштатних і критичних ситуацій;
- ♦ своєчасного формування, оперативної реалізації рішень щодо управління безпекою у процесі запобігання позаштатним і критичним ситуаціям.

Звідси випливає, що найважливішою, обов'язковою вимогою до стратегії є системна узгодженість рішень і заходів усіх етапів життєвого циклу виробу за цілями, задачами, термінами, ресурсами та очікуваними результатами. Узгодженість потрібно забезпечувати одночасно з позиції гарантування необхідних показників як безпеки та живучості, так і працездатності упродовж заданого терміну експлуатації [108, 128, 166].

Суть стратегії будь-яких дій ОПР визначають, як відомо, багато умов і факторів, зокрема об'єктивні та суб'єктивні фактори формування і реалізації рішень. Найважливіші об'єктивні фактори, які слід враховувати під час формування стратегії системного забезпечення гарантованої безпеки складних систем, такі: принципово неусувні інформаційні та часові обмеження і низка суперечностей, зокрема між вимогою достовірності та обґрунтованості рішення і вимогою своєчасності його формування та реалізації. Суть зазначеної суперечності полягає в тому, що для підвищення достовірності та обґрунтованості рішення потрібно збільшувати час на його формування та обґрунтування, а для забезпечення своєчасності його реалізації за часового обмеження потрібно цей час зменшувати.

Водночас слід враховувати й суб'єктивні фактори: загальні психофізичні якості та здібності людини, знання, уміння, досвід, інтуїцію, схильність до ризику чи обережності, а також багато інших якостей ОПР. Ці фактори визначають як загальну специфіку дій за умов невизначеності, так і стратегію ОПР щодо досягнення суб'єктивно сформованих інтересів і цілей за певних умов динаміки ситуацій ризику.

Аналіз позитивних і негативних результатів розроблення, виготовлення та експлуатації СТС, а також дій операторів у різних критичних і надзвичайних ситуаціях свідчить, що можна виявити певні загальні принципи раціональної стратегії дій ОПР. Коротко її суть полягає у *формуванні та реалізації раціонального рішення за практично*

прийнятний час у межах часового обмеження, яке неможливо усунути. Отже, стратегію дій ОПР доцільно формувати на основі таких принципів [128, 129]:

- ♦ раціональності та обґрунтованості рішень, своєчасності й оперативності дій;
- ♦ розумної обережності й раціонального ризику під час формування та реалізації рішень;
- ♦ раціональності рівнів повноти, достовірності і своєчасності інформаційного забезпечення в динаміці формування та обґрунтування рішень;
- ♦ раціонального компромісу між рівнем достовірності та обґрунтованості рішення і рівнем витрат часових та інших ресурсів на його формування та обґрунтування;
- ♦ раціонального використання в динаміці формування, реалізації і контролю рішень як інтуїції, досвіду та знань людини (експерта, системного аналітика, менеджера і (або) ОПР), так і обчислювальних, інтелектуальних можливостей комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень;
- ♦ раціонального використання можливостей інтерактивних та ітераційних режимів під час формування та обґрунтування рішень.

Основна мета сформульованих принципів — за наявності множини об'єктивних і суб'єктивних суперечностей на основі раціонального використання наявних ресурсів та можливостей забезпечити формування і реалізацію раціонального компромісного рішення за умов *априорно невідомого ліміту часу*. Найважливіша особливість і принципова відмінність цих принципів від типових принципів оптимального управління складними технічними системами у штатному режимі функціонування полягає в урахуванні якісно нових обмежень, а саме принципово неусувних інформаційних і часових. Особливо важливою є наявність порогового обмеження часу під час формування та реалізації рішення. У разі порушення цього обмеження можуть настати необоротні, катастрофічні наслідки — вибух об'єкта, загибель літака тощо.

Слід наголосити й на іншій практично важливій відмінності — виборі принципу раціональності рішення замість типового принципу оптимальності. Такий вибір зумовлений як зазначеними обмеженнями, так і наявністю низки суперечностей, зокрема суперечності між вимогою достовірності та обґрунтованості рішення і вимогою своєчасності його формування та реалізації. Тут раціональність (від лат. *rationalis* — розумний) вважають як певний розумно обґрунтований компроміс у досягненні суперечних цілей на множині суперечних обмежень, де порогове обмеження часу абсолютно пріоритетне.

Такі принципи в загальній формі визначають доцільні підходи і напрями дій ОПР для забезпечення гарантованої безпеки СТС і припускають свободу дій за певних умов. Тому успіх реалізації стратегії в динаміці досліджуваної позаштатної ситуації залежить як від певних умов та особливостей наявного стану, так і від знань, умінь, досвіду, інтуїції і багатьох інших інтелектуальних можливостей, психофізичних якостей ОПР. Слід особливо наголосити на практичній потребі раціонального спільного використання в динаміці позаштатної ситуації як інтелектуальних можливостей людини, так й обчислювальних та інтелектуальних можливостей комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень. Як свідчить досвід, в екстремальному стані ситуацій ризику різко зростають кількість помилкових рішень ОПР та рівень збитку від їхньої реалізації. Звідси випливає, що для забезпечення гарантованої безпеки складних систем потрібно виключити реалізацію можливих помилкових рішень конкретної ОПР, які спричиняють катастрофічні наслідки, зокрема і бездіяльність ОПР із катастрофічними наслідками. Такі завдання повинні й можуть розв'язувати інтелектуальні системи

підтримки прийняття рішень із використанням різних прийомів: від інформування ОПР про ситуації ризику до самостійного формування і реалізації рішення щодо запобігання катастрофічним наслідкам ситуації ризику. Наприклад, інтелектуальний автопілот бойового літака в ситуації загрози ракетного обстрілу може у разі бездіяльності пілота виконати протиракетний маневр.

На практиці стратегію системного забезпечення гарантованої безпеки складних систем на основі сформульованих принципів доцільно реалізувати на всіх етапах життєвого циклу виробу у вигляді послідовності таких основних системно узгоджених процедур [128–130]:

- ♦ раціональний вибір системи показників та критеріїв оцінювання умов, динаміки і наслідків впливу багатфакторних ризиків;
- ♦ розробка та реалізація методологічного інструментарію технологічного передбачення і математичного апарату багатокритерійного оцінювання динаміки та наслідків впливу багатфакторних ризиків;
- ♦ розробка багаторівневої ієрархічної системи інформаційного забезпечення системного аналізу ризиків;
- ♦ попереднє оцінювання ступеня і рівня ризику прогнозованої множини позаштатних ситуацій;
- ♦ попереднє оцінювання та оптимізація ресурсів допустимого ризику позаштатних режимів на період експлуатації складної системи за даними випробувань, фізичних та обчислювальних експериментів;
- ♦ попереднє оцінювання та оптимізація ресурсів допустимого ризику позаштатного режиму на прогнозований термін експлуатації складної системи на підставі інформації технічного діагностування і моніторингу;
- ♦ попереднє оцінювання і прогнозування показників працездатності складної системи на певний термін експлуатації;
- ♦ оцінювання і прогнозування ресурсу працездатності складної системи в динаміці певного позаштатного режиму в будь-який період експлуатації;
- ♦ попереднє оцінювання і прогнозування ресурсу безпеки складної системи на певний термін експлуатації;
- ♦ оцінювання і прогнозування ресурсу безпеки складної системи в динаміці певного позаштатного режиму в період експлуатації;
- ♦ формування і реалізація рішень щодо мінімізації ступеня і рівня ризику на певний термін експлуатації складної системи;
- ♦ формування рішень і реалізація дій щодо мінімізації ступеня і рівня ризику у динаміці позаштатного режиму в період експлуатації складної системи;
- ♦ формування рішень і реалізація дій щодо гарантованого запобігання аваріям і катастрофам у динаміці позаштатного режиму в період експлуатації складної системи.

Слід виділити кілька важливих особливостей сформульованих процедур. Ці процедури доволі складні, оскільки їхню реалізацію і практичне застосування потрібно здійснювати за умов неповноти і невизначеності інформації про ситуації ризику. Їх не можна реалізувати, використовуючи типові засоби діагностування і забезпечення безпеки, оскільки ці засоби зорієнтовані, власне кажучи, тільки на своєчасне виявлення відмов. Застосування на практиці процедур може забезпечити запропонована концепція

забезпечення безпеки, зорієнтована на своєчасне виявлення й усунення причин можливих несправностей та відмов.

Наведені процедури сформульовано в узагальненій формі. Конкретизувати кожен процедуру та взаємозв'язки між ними потрібно для кожної предметної області у формі відповідного інформаційного, математичного і програмного забезпечення. Такий підхід до реалізації стратегії зумовлений принциповими відмінностями динаміки ситуацій ризику в різних сферах практичної діяльності. Наприклад, критична ситуація на промисловому підприємстві через нестачу пального та її наслідки принципово відрізняється від критичної ситуації і спричинених нею наслідків у разі виявлення нестачі пального під час польоту літака. Звідси випливає суттєва відмінність пріоритетів в оцінюванні причин та умов впливу ситуацій ризику і, отже, відмінність формалізації та алгоритмізації однотипних процедур для різних практичних застосувань.

9.5.2. Системний аналіз властивостей та особливостей задач багатofакторних ризиків

Перейдемо до найбільш актуального і складного питання: як одержати достовірний розв'язок практично важливих задач своєчасного оцінювання і запобігання можливому впливу ситуацій ризику, що реально існують у будь-якій сфері діяльності людини. Питання відображає реальну відсутність ефективного методологічного і математичного інструментарію дослідження та відвернення аварій і катастроф. Такий інструментарій украй потрібний, про що свідчить динаміка зростання екологічних і техногенних катастроф. За останні десятиліття минулого століття кількість екологічних катастроф у світі зросла у 5 разів, а економічні втрати — у 10 разів [209]. Техногенні катастрофи характеризуються ще значнішими темпами зростання кількості і збитку від їхнього впливу та наслідків [105].

Особливість загальної задачі системного аналізу ризиків полягає в тому, що вона є основою послідовності задач кількох типів, які традиційно вивчають у різних наукових напрямках:

- ♦ задача кластерного аналізу — багатofакторна класифікація ризику;
- ♦ задача теорії розпізнавання — багатofакторне розпізнавання ризиків;
- ♦ задача ранжування ситуацій ризику — характерна для теорії прийняття рішень;
- ♦ задача багатоцільової мінімізації ризиків — головний ланцюг аналізу ризиків.

Цілісність послідовності цих задач виражається в тому, що результат розв'язання першої з них є основною інформацією для другої задачі, а результат розв'язання першої і другої задач — для третьої. Водночас вихідну інформацію для першої задачі та її призначення визначають мета і загальне призначення четвертої задачі. До того ж четверта задача є головною ланкою в системному аналізі ризиків і визначає остаточний результат аналізу.

Зазначимо, що кожна задача має певні відмінності від стандартних формулювань типових задач відповідних теорій і наукових напрямів. Найважливіші з них такі:

- ♦ задачі не є повністю формалізованими у стандартному формулюванні внаслідок неповноти, невизначеності, нечіткості вхідної інформації про ризики;
- ♦ час розв'язання задач принципово обмежений апіорно невідомим часовим порогом переходу ситуації ризику в аварію або катастрофу.

Звідси впливає потреба розроблення такого методологічного, математичного і програмного інструментарію інтелектуальної підтримки прийняття рішень, який забезпечуватиме: оперативну обробку апіорної та діагностичної інформації в динаміці ситуації ризику; можливість оперативного формування достатньо обґрунтованого рішення за відносно малий проміжок часу; практичну реалізацію рішення до настання критичного моменту часу T_{kr} переходу ситуації ризику в аварію чи катастрофу.

9.6. Приклади розв'язання задач системного аналізу багатofакторних ризиків

Розглянемо застосування на практиці деяких методів і прийомів розв'язання задач системного аналізу ризиків. Вибір задач зумовлений прагненням показати важливі особливості задач системного аналізу ризиків за умов невизначеності і неповноти вихідної інформації та можливості запропонованих підходів і методів розв'язання. Продемонструємо це на прикладах розв'язання задачі класифікації ризиків, задачі розпізнавання ситуацій ризику складної технічної системи, задачі ранжування ситуацій ризику. Ці задачі формують у процесі випробувань і подальшої експлуатації складних технологічних систем, і тому їх описують загальним математичним формулюванням.

Математична постановка задачі

Відомо: у процесі попередніх випробувань СТС виявлено ситуації ризику і сформовано стандартну множину M_{st} факторів ризику ρ_q , $q \in N_{st}$, $N_{st} = [1; n_{st}]$ у вигляді

$$M_{st} = \{\rho_q \mid q = \overline{1, n_{st}}\}. \quad (9.24)$$

Кожний фактор ρ_q характеризується множиною L_q ознак l_{qj} , яка визначена співвідношенням

$$L_q = \{l_{qj} \mid q \in N_{st}; j = \overline{1, n_q}\}; \quad (9.25)$$

Кожну ознаку l_{qj} характеризує інформаційний вектор

$$I_{qj} = \{x_{qip} \mid x_{qip} \in H_{qip}; q \in N_{st}; j \in N_q; p = \overline{1, n_{qp}}\}; \quad (9.26)$$

$$N_q = [1, n_q]; \quad H_{qip} = \{x_{qip} \mid x_{qip}^- \leq x_{qip} \leq x_{qip}^+\}. \quad (9.27)$$

Кожний фактор ρ_q характеризує інформаційний вектор

$$I_q = \{I_{qj} \mid q \in N_{st}; j = \overline{1, n_q}\}, \quad (9.28)$$

який, з огляду на (9.26) і (9.27), можна перетворити у вигляді

$$I_q = \{x_{qj} \mid x_{qj} = \langle x_{qip} \mid p = \overline{1, n_{qp}} \rangle; x_{qip} \in H_{qip}; j = \overline{1, n_q}\}. \quad (9.29)$$

Множину M_{st} характеризує стандартний інформаційний вектор

$$I_{st} = \{I_q \mid q = \overline{1, n_{st}}\}, \quad (9.30)$$

який на основі формули (9.29) зображають у формі

$$I_{st} = \{x_q | x_q = \langle x_{qj} | j = \overline{1, n_q} \rangle; q = \overline{1, n_{st}}\}. \quad (9.31)$$

У процесі подальших випробувань та експлуатації складної технічної системи з даними технічного діагностування визначають числові значення $I_{qr}^k[t_\tau]$, $t_\tau \in T_k$ інформаційних векторів I_{qr}^k факторів ризику, що впливають у період часу T_k ,

$$I_{qr}^k = \{I_{q\tau}^k = I_{qr}^k[t_\tau] | q \in N_{st}^k; r = \overline{1, n_k}; N_{st}^k \subset N_{st}\}; \quad (9.32)$$

$$M_k = \{\rho_{qr} | q \in N_{st}^k; r = \overline{1, n_k}\}; \quad (9.33)$$

$$T_k = \{t_\tau | t^- \leq t_\tau \leq t^+; \tau = \overline{1, m_k}\}, \quad (9.34)$$

де N_{st}^k описує деякий набір значень q із N_{st} , що характеризує множину M_k ; n_k — загальна кількість факторів у множині M_k ; r — порядковий номер фактора ризику ρ_{qr} у множині M_k ; T_k — дискретна множина моментів t_τ вимірів.

У процесі діагностування в кожний момент $t_\tau \in T_k$ вимірюють усі показники для всіх прогнозованих і вперше виявлених факторів ризику.

Результати вимірювань для кожного фактора ρ_{qr} оформляють у вигляді масиву кількісних значень $I_{qr}^k[t_\tau]$, $t_\tau \in T_k$ інформаційних векторів I_{qr}^k :

$$I_{qr}^k[t_\tau] = \{I_{q\tau j}^k[t_\tau] | q \in N_{st}^k; r \in [1, n_k]; j = \overline{1, n_q}\}, \quad (9.35)$$

$$I_{q\tau j}^k[t_\tau] = \{X_{q\tau p}^k[t_\tau] | X_{q\tau p}^k = \langle X_{q\tau p j}^k[t_\tau]; j \in [1, n_q]; p = \overline{1, n_{qj}}\},$$

де $X_{q\tau p}^k[t_\tau]$ визначає у момент t_τ значення p -го показника j -ї ознаки q -го фактора ризику ρ_{qr} , де q — номер фактора у множині M_{st} , а r — порядковий номер у множині M_k .

Усі значення $X_{q\tau p}^k[t_\tau]$ обмежені, їх формують на основі нечітких змінних

$$X_{qjp}^k = \{\tilde{x}_{qjp}^k | \tilde{x}_{qjp}^k = \langle x_{qjp}^k; \mu_{qjp}^k \rangle; x_{qjp}^k \in H_{qjp}; \mu_{qjp}^k \in [0; 1]\}; \quad (9.36)$$

$$H_{qjp} = \{x_{qjp}^k | \langle x_{qjp}^k \leq x_{qjp}^k \leq x_{qjp}^+ \rangle; q = \overline{1, n}; j = \overline{1, n_q}; p = \overline{1, n_{qj}}\};$$

Для кожної ситуації $S_k^\tau \in S_\tau$ за результатами оцінювання $\hat{Q}_k = [1; Q_k]$ факторів ризику ρ_q на момент t_τ формують нечіткий інформаційний вектор

$$I_k^\tau = \left\{ X_k^\tau | X_k^\tau = \bigcup_{q=1}^{Q_k} X_q^k; X_q^k = \langle \tilde{x}_{qjp}^k | q \in N_{st}^k; j \in [1; n_q]; p \in [1; n_{qj}] \rangle; \tilde{x}_{qjp}^k = \langle x_{qjp}^k; \mu_{qjp}^k \rangle \right\}. \quad (9.37)$$

Потрібно: сформувати на основі множини M_k скінченну множину Ω_0 класів $\Omega_{i_1 i_2}$, які не перетинаються і кожен з яких характеризується деякими півінтервалами допустимих значень ступеня η_{i_1} та рівня W_{i_2} ризику:

$$\eta_{i_1}^- < \eta_{i_1} \leq \eta_{i_1}^+; \quad W_{i_2}^- < W_{i_2} \leq W_{i_2}^+. \quad (9.38)$$

Також на підставі числових значень $I_{qr}^k[t_\tau]$, $t_\tau \in T_k$ інформаційних векторів I_{qr}^k множини S_τ ситуацій ризику оцінювання для кожної ситуації $S_k^i \in S_\tau$ ступеня та рівня ризику *потрібно* визначити клас Ω_{ik} , до якого належить ця ситуація і виконати ранжування усіх $S_k^i \in S_\tau$ за ступенем та рівнем ризику.

Дамо деякі пояснення до постановки задачі.

- У формулі (9.36) множина H_{qjp} визначає потенційно можливі значення x_{qjp} . Показник x_{qjp} кількісно характеризує p -й прояв ознаки l_{qj} . Кожну ознаку l_{qj} можна описати n_{qj} показниками x_{qjp} , $p = \overline{1, n_{qj}}$. Ці особливості відповідають реальним умовам позаштатних ситуацій. Найпростіший приклад: витікання бензину автомашини на стоянці характеризується наявністю запаху, мокрої плями на місці ушкодження, а також розміром плями. У співвідношенні (9.24) множина N_{st}^k описує деякий набір значень q із N_{st} , який характеризує множину M_k . Наприклад, множину M_k утворено з факторів, що в множині M_{st} мають порядкові номери 1, 3, 6, 8, 11, а у множині M_k відповідно — 1, 2, 3, 4, 5; їхня кількість $n_k = 5$. Звідси одержуємо $M_k = \{p_{1,1}, p_{3,2}, p_{6,3}, p_{8,4}, p_{11,5}\}$; $N_{st}^k = \{1, 3, 6, 8, 11\}$. У співвідношеннях (9.35), (9.36) кількісні значення p -го показника j -ї ознаки q_r -го фактора ризику p_{qr} у момент t_τ подає у вигляді $x_{qjp}^k[t_\tau]$ і можуть бути визначені нечіткими величинами.
- Ступінь η_k і рівень W_k ризику позаштатної ситуації S_k визначені впливом факторів ризику множини M_k . Величини η_k і W_k визначають на підставі даних двох категорій: апіорно відомих умов і прогнозованого впливу факторів ризику на досліджувану складну технічну систему; результатів її технічного діагностування в період експлуатації, що залежать від властивостей та особливостей системи й умов її експлуатації. Ступінь η_k і рівень W_k ризику можна спрогнозувати на певний термін експлуатації системи на підставі результатів технічного діагностування.
- Відповідно до принципів функціонування реальних систем технічного діагностування слід враховувати, що в досліджуваній період часу T_k результати технічного діагностування відомі для кожного моменту $t_\tau \in T_k$.
- Ураховуючи досвід експлуатації реальних складних технічних систем, покладімо, що прогнозовані умови і впливи факторів ризику характеризуються такими особливостями і властивостями:
 - Ступінь ризику впливу кожного фактора p_{qr} мінімальний у середині інтервалу (9.38) і збільшується в міру наближення до його меж.
 - Впливи факторів ризику взаємно незалежні за ймовірністю, але не виключено їхню залежність від результатів впливу та їх наслідків.
 - Множина факторів ризику M_k складається з двох підмножин M_k^+ і M_k^- , які мають такі властивості:

$$M_k^+ \cup M_k^- = M_k; \quad M_k^+ \cap M_k^- = \emptyset.$$
 - Множина M_k^+ складається з таких динамічно синхронних факторів ризику, максимальні значення ризику яких досягаються на межах x_{qjp}^+ .
 - Множина M_k^- складається з таких динамічно синхронних факторів ризику, максимальні значення ризику яких досягаються на межах x_{qjp}^- .
 - Ситуація S_k має ступінь ризику $\eta_k = 1$, якщо одночасно всі фактори множини M_k^+ досягають меж x_{qjp}^+ або всі фактори множини M_k^- досягають меж x_{qjp}^- .

- ♦ Імовірність впливу кожного фактора ризику ρ_{qr} підвищується в міру збільшення кількості ознак і наближення значень $X_{q\eta p}[t_\tau]$ до меж $x_{q\eta p}^+$, якщо $\rho_{qr} \in M_k^+$, або до меж $x_{q\eta p}^-$, якщо $\rho_{qr} \in M_k^-$.
- ♦ Ступінь ризику, який визначає ознака $l_{q\eta}$ фактора ризику ρ_{qr} , що характеризується співвідношеннями:

$$\eta_{q\eta}[t_\tau] = 1 - \prod_{p=1}^{n_{q\eta}} (1 - \eta_{q\eta p}), \quad (9.39)$$

де

$$\eta_{q\eta p} = \eta_{q\eta p}^+[t_\tau] = \left(\frac{X_{q\eta p}[t_\tau] - x_{q\eta p}^0}{x_{q\eta p}^+ - x_{q\eta p}^0} \right)^{v_{q\eta p}}, \quad \forall \rho_{qr} \in M_k^+; \quad (9.40)$$

$$\eta_{q\eta p} = \eta_{q\eta p}^-[t_\tau] = \left(\frac{x_{q\eta p}^0 - X_{q\eta p}[t_\tau]}{x_{q\eta p}^0 - x_{q\eta p}^-} \right)^{v_{q\eta p}}, \quad \forall \rho_{qr} \in M_k^-; \quad (9.41)$$

$$x_{q\eta p}^0 = \frac{x_{q\eta p}^+ + x_{q\eta p}^-}{2}.$$

Показники $v_{q\eta p}$ повинні відповідати певним обмеженням, наприклад, умовам $0,5 \leq v_{q\eta p} \leq 4$.

- ♦ Ступінь ризику, зумовлений впливом фактора ρ_{qr} , описує формула

$$\eta_{qr}[t_\tau] = 1 - \prod_{j=1}^{n_q} (1 - \eta_{q\eta j}[t_\tau]). \quad (9.42)$$

- ♦ Ступінь ризику, зумовлений впливом факторів ризику множини M_k^+ , описує співвідношення

$$\eta^+[t_\tau] = 1 - \prod_{k_1=1}^{k^+} (1 - \eta_{q\eta}^{k_1}[t_\tau]). \quad (9.43)$$

Аналогічно для множини M_k^- маємо

$$\eta^-[t_\tau] = 1 - \prod_{k_2=1}^{k^-} (1 - \eta_{q\eta}^{k_2}[t_\tau]), \quad (9.44)$$

де k^+ , k^- — кількість елементів відповідно множин M_k^+ і M_k^- на момент t_τ виників.

- ♦ Ступінь ризику η_k ситуації S_k , зумовлений впливом усіх факторів ризику множини M_k , визначається співвідношенням

$$\eta_k[t_\tau] = 1 - (1 - \eta^+[t_\tau])(1 - \eta^-[t_\tau]). \quad (9.45)$$

- ♦ Показник рівня ризику W_k ситуації S_k , зумовлений впливом усіх факторів ризику множини M_k , у загальному випадку не задовольняє умову, що впливи факторів ризику взаємно незалежні за ймовірністю. Величина W_k визначає загальний збиток, якого завдано від одночасного або послідовного впливу факторів ризику.

Такі збитки можуть додаватися або збільшуватися за принципом ланцюгової реакції. Характерний приклад — ланцюгова реакція дорожньо-транспортних випадків, коли помилкові дії одного водія призводять до ушкоджень кількох автомашин і завдають не лише матеріальних збитків, але й шкоди здоров'ю учасників події. Тому для оцінювання рівня ризику застосуємо формули

$$W_{qrp} [t_\tau] = \sum_{p=1}^{n_{qj}} (\beta_{qrp} W_{qrp}), \quad (9.46)$$

де

$$W_{qrp} = W_{qrp}^+ [t_\tau] = \left(\frac{X_{qrp} [t_\tau] - x_{qrp}^0}{x_{qrp}^+ - x_{qrp}^0} \right)^{\chi_{qrp}}, \quad \forall p_{qr} \in M_k^+; \quad (9.47)$$

$$W_{qrp} = W_{qrp}^- [t_\tau] = \left(\frac{x_{qrp}^0 - X_{qrp} [t_\tau]}{x_{qrp}^0 - x_{qrp}^-} \right)^{\chi_{qrp}}, \quad \forall p_{qr} \in M_k^-; \quad (9.48)$$

$$x_{qrp}^0 = \frac{x_{qrp}^+ + x_{qrp}^-}{2}.$$

У формулах (9.47) і (9.48) показники χ_{qrp} визначають на підставі експериментальних та прогнозованих значень збитку.

- ♦ Значення x_{φ}^k і $\mu_{\varphi}^k(x_{qrp})$ залежать від рівня інформованості U і визначаються апіорно відомими функціональними залежностями $x_{\varphi}^k = \Phi_1(U)$; $\mu_{\varphi}^k(x_j) = \Phi_2(U)$. Відомі функціональні залежності ступеня $\eta = F_\eta(I_k^r)$ і рівня $W = F_W(I_k^r)$ ризику, де нечіткий інформаційний вектор I_k^r визначають за формулою (9.37).
- ♦ У системі класифікації за ступенем і рівнем ризику кожний клас Ω_i характеризується деяким інтервалом зміни ступеня і рівня ризику. Загальні властивості та описи класів визначаються такими співвідношеннями:

$$\Omega_{i_1 i_2} = \{ \langle \eta_{i_1}, W_{i_2} \rangle \mid \eta_{i_1} \in [\eta_{i_1}^-, \eta_{i_1}^+], W_{i_2} \in [W_{i_2}^-, W_{i_2}^+] \};$$

$$i_1 \in N_1; \quad i_2 \in N_2; \quad N_1 = [1, n_1]; \quad N_2 = [1, n_2]; \quad \eta_1^- = 0; \quad \eta_m^+ = 1;$$

$$w_1^- = 0; \quad w_{n_2}^+ = 1; \quad N_0 = N_1 \cup N_2; \quad N_0 = [i \mid i = \langle i_1; i_2 \rangle], \quad n_0 = n_1 n_2;$$

$$\Omega_i \cap \Omega_{i+1} = 0, \quad \bigcup_{i=1; N_0} \Omega_i = \Omega_0.$$

Кількість класів та вимоги до інтервалу кожного класу визначають з умов конкретної задачі.

Припустимо, що інформаційні вектори ситуацій S_k ризику мають такий вигляд:

$$S_1 : I_1 = \{ \langle x_1; 0, 2 \rangle; \langle x_2; 0, 9 \rangle; \langle x_3; 0, 4 \rangle; \langle x_4; 0, 2 \rangle; \langle x_5; 0, 4 \rangle; \langle x_6; 0, 4 \rangle \};$$

$$S_2 : I_2 = \{ \langle x_1; 0, 1 \rangle; \langle x_2; 0, 2 \rangle; \langle x_3; 0, 7 \rangle; \langle x_4; 0, 3 \rangle; \langle x_5; 0, 1 \rangle; \langle x_6; 0, 25 \rangle \};$$

$$S_3 : I_3 = \{ \langle x_1; 0, 3 \rangle; \langle x_2; 0, 1 \rangle; \langle x_3; 0, 43 \rangle; \langle x_4; 0, 12 \rangle; \langle x_5; 0, 6 \rangle; \langle x_6; 0, 9 \rangle \}.$$

Вигляд залежностей ступеня і рівня ризику та вихідних характеристик інформаційних векторів ситуацій S_1, S_2, S_3 наведено на рис. 9.4.

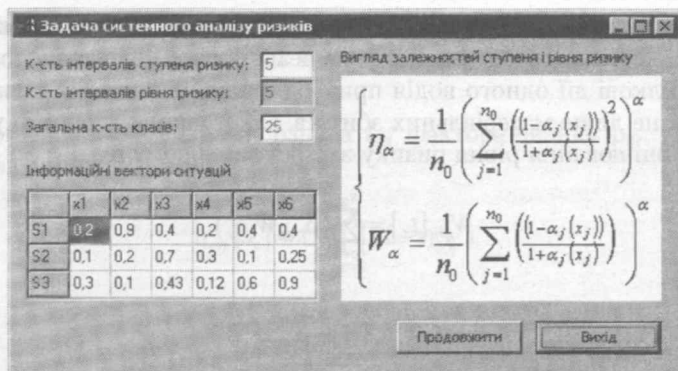


Рис. 9.4. Задання вигляду залежностей ступеня і рівня ризику та вихідних характеристик інформаційних векторів ситуацій S_1, S_2, S_3

Кількість інтервалів для ступеня і рівня ризику відповідно $n_1 = 5, n_2 = 5$. Інтервали для ступеня і рівня ризику визначають, поділивши вихідний інтервал $[0;1]$ на рівні півінтервали.

Загальна кількість класів $n_0 = n_1 n_2 = 25$.

Для розв'язання задачі виконують таку послідовність кроків.

1. Формують інтервали для ступеня і рівня ризику послідовним поділом вихідного інтервалу $[0;1]$ на 5 рівних півінтервалів. Унаслідок одержують такі значення півінтервалів:

- ♦ для ступеня ризику:

$$I_{\eta}^1 = [0; 0,2); \quad I_{\eta}^2 = [0,2; 0,4); \quad I_{\eta}^3 = [0,4; 0,6); \quad I_{\eta}^4 = [0,6; 0,8); \quad I_{\eta}^5 = [0,8; 1,0];$$

- ♦ для рівня ризику:

$$I_W^1 = [0; 0,2); \quad I_W^2 = [0,2; 0,4); \quad I_W^3 = [0,4; 0,6); \quad I_W^4 = [0,6; 0,8); \quad I_W^5 = [0,8; 1].$$

2. Формують класи $\Omega_{i_1 i_2}, i_1 = \overline{1,5}, i_2 = \overline{1,5}$ послідовним перебором усіх можливих поєднань індексів i_1, i_2 в інтервалах $I_{\eta}^{i_1}, W_W^{i_2}$.
3. Визначають відповідність інтервалів класів ступеня і рівня ризику інтервалам значень x_j та α_j для $\eta_{\alpha}, W_{\alpha}$ згідно із заданими функціональними залежностями. Результати визначення такої відповідності наведено на рис. 9.5.
4. Встановлюють відповідність інтервалів класів ступеня і рівня ризику заданим значенням інформаційних векторів. Результати визначення такої відповідності наведено на рис. 9.6.
5. Для розв'язання задачі багатофакторної класифікації ситуацій ризику виконують оцінювання *ступеня нечіткої однорідності опису факторів ризику* в кожному класі. Реалізують це за таким алгоритмом.

- ♦ Кожний клас розбивають на дві множини K_1 і K_2 , що не перетинаються. Визначають ступінь нечіткого включення K_1 в K_2 і K_2 в K_1 у вигляді

$$v(K_1, K_2) \text{ і } v(K_2, K_1).$$

Ступінь нечіткого включення класу Ω_j у клас Ω_i визначають за формулою

$$\nu(\Omega_j, \Omega_i) = \bigcap_{x \in f} \max(1 - \mu_{\Omega_j}(x); \mu_{\Omega_i}(x)).$$

- Кожний інформаційний вектор розбивають на два вектори I_{iq}^1, I_{iq}^2 , що не перетинаються. Визначають ступінь нечіткої неоднорідності в інтервалі від θ^- до θ^+ для нижньої і верхньої меж інтервалів відповідно. Нижня межа нечіткої неоднорідності: $\theta^- = [\nu(I_{iq}^1, I_{iq}^2)] \cap [\nu(I_{iq}^2, I_{iq}^1)]$. Верхня межа нечіткої неоднорідності: $\theta^+ = [\nu(I_{iq}^1, I_{iq}^2)] \cup [\nu(I_{iq}^2, I_{iq}^1)]$.

Задача системного аналізу ризиків

Визначення інф. векторів, які відповідають інтервалам ступеня ризику

		x1	x2	x3	x4	x5	x6	a
Перший інтервал [0,0.2]	поч.зн.	0.103	0.348	0.211	0.74	0	0	1
	к.зн.	0.9229	0.7815	0.6290	0.7604	0	0	
Другий інтервал [0.2,0.4]	поч.зн.	0	0	0	0.333	0.567	0.693	2
	к.зн.	0.8958	0	0	0.4894	0.5088	0.6977	
Третій інтервал [0.4,0.6]	поч.зн.	0	0.713	0.863	0	0.389	0	3
	к.зн.	0	0.7277	0.8643	0	0.3981	0	
Четвертий інтервал [0.6,0.8]	поч.зн.	0	0.729	0	0.37	0.637	0	4
	к.зн.	0	0.7753	0	0.4386	0.6425	0	
П'ятий інтервал [0.8,1]	поч.зн.	0.202	0	0.851	0	0.66	0.361	5
	к.зн.	0.8787	0	0.8613	0	0.6681	0.3983	

Визначення інф. векторів, які відповідають інтервалам рівня ризику

		x1	x2	x3	x4	x5	x6	a
Перший інтервал [0,0.2]	поч.зн.	0.074	0	0.189	0	0.932	0.564	1
	к.зн.	0.7049	0	0.4007	0	0.9320	0.5643	
Другий інтервал [0.2,0.4]	поч.зн.	0	0.256	0.385	0.073	0	0.346	2
	к.зн.	0	0.5052	0.4365	0.2967	0	0.3497	
Третій інтервал [0.4,0.6]	поч.зн.	0.068	0.256	0.792	0	0.2	0.148	3
	к.зн.	0.7206	0.5572	0.7932	0	0.2783	0.2286	
Четвертий інтервал [0.6,0.8]	поч.зн.	0.048	0.71	0	0.997	0	0.523	4
	к.зн.	0.6869	0.7247	0	0.9970	0	0.5235	
П'ятий інтервал [0.8,1]	поч.зн.	0.062	0	0	0.476	0.363	0	5
	к.зн.	0.6871	0	0	0.4831	0.3770	0	

Обчислити Продовжити

Рис. 9.5. Результати визначення відповідності інтервалів класів ступеня і рівня ризику інтервалам значень x_j та a_j для η_a, W_a

Задача системного аналізу ризиків

Інформаційні вектори, які відп. інтервалам ступеня ризику

інт.	н.гр.	в.гр.	x1	x2	x3	x4	x5	x6
ін1	0	0.2	0.103	0.348	0.211	0.7604	0	0
ін2	0.2	0.4	0	0	0	0.4894	0.5880	0.6977
ін3	0.4	0.6	0	0.7272	0.8643	0	0.3981	0
ін4	0.6	0.8	0	0.7753	0	0.4386	0.6425	0
ін5	0.8	1	0.202	0	0.8613	0	0.6681	0.3983

Інформаційні вектори, які відп. інтервалам рівня ризику

інт.	н.гр.	в.гр.	x1	x2	x3	x4	x5	x6
ін1	0	0.2	0.074	0	0.189	0	0.9320	0.5643
ін2	0.2	0.4	0	0.256	0.385	0.073	0	0.3497
ін3	0.4	0.6	0.068	0.256	0.792	0	0.2783	0.2286
ін4	0.6	0.8	0.048	0.71	0	0.9970	0	0.5235
ін5	0.8	1	0.062	0	0	0.476	0.363	0

Відповідність інтервалів ступеня та рівня ризику

Інформаційні вектори класів

інт.	н.гр.	в.гр.	x1	x2	x3	x4	x5	x6
ін1	0	0.2	0.074	0	0.189	0	0.9320	0.5643
ін2	0.2	0.4	0	0.256	0.385	0.073	0	0.3497
ін3	0.4	0.6	0.068	0.256	0.792	0	0.2783	0.2286
ін4	0.6	0.8	0.048	0.71	0	0.9970	0	0.5235
ін5	0.8	1	0.062	0	0	0.476	0.363	0

Модель Продовжити

Рис. 9.6. Результати визначення відповідності інтервалів класів ступеня і рівня ризику заданим значенням інформаційних векторів

Шукані результати за ступенем нечіткого включення класу Ω_j у клас Ω_i , а також за ступенем нечіткої неоднорідності інформаційних векторів I_{iq}^1, I_{iq}^2 зображено на рис. 9.7.

Завдання системного аналізу ризику

V_K1K2	V_K2K1	Ksi-	Ksi+	TetaDown	TetaUp
11 0.29508	11 1	11 0.29508	11 1	11 0	11 0.70491
12 0.49476	12 0.70325	12 0.49476	12 0.70325	12 0.29674	12 0.50523
13 0.27932	13 1	13 0.27932	13 1	13 0	13 0.72067
14 0.27529	14 0.23950	14 0.23950	14 0.27529	14 0.72470	14 0.76049
15 0.31287	15 0.51686	15 0.31287	15 0.51686	15 0.48313	15 0.68712
21 0.29508	21 0.41119	21 0.29508	21 0.41119	21 0.58880	21 0.70491
22 1	22 0.65028	22 0.65028	22 1	22 0	22 0.34971
23 0.27932	23 0.72164	23 0.27932	23 0.72164	23 0.27835	23 0.72067
24 0.31308	24 0.47645	24 0.31308	24 0.47645	24 0.52354	24 0.68691
25 0.31287	25 0.51686	25 0.31287	25 0.51686	25 0.48313	25 0.68712
31 0.59925	31 0.60183	31 0.59925	31 0.60183	31 0.39816	31 0.40074
32 0.49476	32 1	32 0.49476	32 1	32 0	32 0.50523
33 0.20678	33 0.72164	33 0.20678	33 0.72164	33 0.27835	33 0.79321
34 0.27529	34 1	34 0.27529	34 1	34 0	34 0.72470
35 1	35 0.62295	35 0.62295	35 1	35 0	35 0.37704
41 1	41 0.35743	41 0.35743	41 1	41 0	41 0.64256
42 0.49476	42 0.70325	42 0.49476	42 0.70325	42 0.29674	42 0.50523
43 0.44274	43 0.72164	43 0.44274	43 0.72164	43 0.27835	43 0.55725
44 0.27529	44 0.56135	44 0.27529	44 0.56135	44 0.43864	44 0.72470
45 1	45 0.56135	45 0.56135	45 1	45 0	45 0.43864
51 0.29508	51 0.33185	51 0.29508	51 0.33185	51 0.66814	51 0.70491
52 0.56348	52 0.65028	52 0.56348	52 0.65028	52 0.34971	52 0.43651
53 0.20678	53 0.72164	53 0.20678	53 0.72164	53 0.27835	53 0.79321
54 0.31308	54 0.60168	54 0.31308	54 0.60168	54 0.39831	54 0.68691
55 0.31287	55 0.62295	55 0.31287	55 0.62295	55 0.37704	55 0.68712

Кси-/+ TetaDown/Up Інший вигляд Назад Продовжити

Рис. 9.7. Результати оцінювання ступеня нечіткої однорідності опису факторів ризику

Для більшості класів, наведених на рис. 9.7, різниця між нижньою та верхньою межами інтервалів значна, для 12 % усіх класів верхня і нижня межі збігаються, отже, достатньо проаналізувати лише нижню. У 60 % випадків вона дорівнює 0, отже, для цих класів інформаційна множина не забезпечує однорідності опису властивостей факторів ризику. Це свідчить про необхідність задання раціональнішої класифікації, тобто переформування інформаційних векторів так, щоб вони задавали однорідність в описі властивостей факторів ризику.

6. Визначають ступінь спільності властивостей елементів класу:

$$\mu_c(I_{iq}) = \min\{\mu_{I_{iq}}(x_1), \mu_{I_{iq}}(x_2), \dots, \mu_{I_{iq}}(x_{q_0})\}.$$

Якщо цей ступінь більший або дорівнює 0,5, то вважають, що є спільність властивостей, характерних для всіх x із розглядуваної множини X . Одержані результати наведено в табл. 9.1. Як бачимо, у розглянутому випадку тільки 40 % класів не мають спільності властивостей.

Таблиця 9.1. Результати визначення ступеня спільності властивостей елементів класів

Номер класів за η/W	1	2	3	4	5
1	0,74	0,73	0,211	0,348	0,74
2	0,74	0,73	0,148	0,333	0,333
3	0,89	0,65	0,792	0,71	0,389
4	0,637	0,73	1	0,37	0,37
5	0,74	0,346	0,148	0,361	0,66

7. Перевіряють задані вимоги щодо однозначного розпізнавання ситуації S_k у класі Ω_{ij} . Розглядають множину класів $D(\alpha)$, враховуючи рівень $\alpha = 0,1$. Визначають ступінь нечіткого включення ситуації S_k у кожен із класів Ω_{ij} . Одержані результати подано в табл. 9.2.

Таблиця 9.2. Результати визначення ступеня нечіткого включення ситуацій S_1, S_2, S_3 у класи Ω_{ij}

Номер класів за η/W	1	2	3	4	5
$v(S_1, \Omega_{ij})$					
1	0,1	0,265	0,1	0,348	0,1
2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3	0,1	0,265	0,1	0,6	0,1
4	0,1	0,265	0,1	0,6	0,1
5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$v(S_2, \Omega_{ij})$					
1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
3	0,3	0,385	0,7	0,3	0,3
4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
5	0,3	0,385	0,7	0,3	0,3
$v(S_3, \Omega_{ij})$					
1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,564	0,346	0,148	0,4	0,1
3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,361
5	0,346	0,148	0,361	0,1	0,1

Як впливає з наведених у табл. 9.2 результатів, ситуація S_1 нечітко включена у класи $I_{3,4}, I_{4,4}$; ситуація S_2 — у класи $I_{3,3}, I_{5,3}$; ситуація S_3 — у клас $I_{2,1}$.

Результати аналізу нечіткого включення ситуацій S_1, S_2, S_3 у класи $\Omega_{11}, \dots, \Omega_{55}$ дають змогу зробити такі висновки. Значення деяких показників включення ситуацій S_1, S_2, S_3 у класи $\Omega_{11}, \dots, \Omega_{55}$ перевищують пороговий рівень 0,5. Отже, ситуації S_1, S_2, S_3 розпізнавані в зазначених класах однозначно і є ситуаціями ризику. При цьому найбільше значення 0,7 показника включення має ситуація S_2 , що входить до складу двох класів — $I_{33} \subset \Omega_{33}; I_{53} \subset \Omega_{53}$; найменше значення 0,564 — ситуація S_3 , включена до складу класу $I_{21} \subset \Omega_{21}$; середнє значення 0,6 — ситуація S_1 , включена до складу класів $I_{34} \subset \Omega_{34}; I_{44} \subset \Omega_{44}$.

Висновки

- ♦ Сформульовано загальну задачу системного аналізу багатofакторних ризиків, у якій, на відміну від типових задач оптимізації і розпізнавання, враховано, що множини факторів ризиків і множини ситуацій є принципово необмеженими, а також введено порогове обмеження на час формування рішення. Задача не повністю формалізована, у ній не визначено показники багатofакторної оцінки ризиків та критеріїв багатocільової мінімізації ризиків. На основі принципу декомпозиції загальну задачу аналізу багатofакторних ризиків зведено до послідовності формалізованих системно узгоджених, інформаційно взаємопов'язаних задач. Для врахування принципово інших умов і факторів ризиків, що виникають у позаштатних ситуаціях, сформульовано аксіому ситуацій ризику.
- ♦ Запропоновано новий підхід до розв'язання проблеми безпеки сучасних складних технічних систем різного призначення. Він ґрунтується на новому принципі — своєчасному виявленні та усуненні причин можливого переходу працездатного стану об'єкта в непрацездатний на основі системного аналізу багатofакторних ризиків позаштатних ситуацій, достовірного оцінювання ресурсів допустимого ризику різних режимів функціонування складного технічного об'єкта і прогнозування основних показників його живучості упродовж заданого терміну експлуатації.
- ♦ Введено базові поняття та означення, що характеризують властивості та особливості складної системи за умов штатного і позаштатного режимів функціонування, подано формалізовані описи основних понять аварій і катастроф, умов гарантованої безпеки.
- ♦ Сформульовано гіпотезу про режим складної системи, яка стверджує, що на основі узагальненого подання режиму функціонування реального складного об'єкта можна з єдиних позицій виявляти як механізми його функціонування і працездатності у штатному режимі, так і механізми появи та розвитку позаштатного режиму.
- ♦ Наведено принципи формування та реалізації гарантованої безпеки складних систем, що є основою стратегії управління працездатністю і безпекою складних систем. Розроблена стратегія дає змогу забезпечити якісно новий рівень гарантованої безпеки і живучості складних систем через системно узгоджену інженерну діяльність на всіх етапах життєвого циклу виробу: від формування ідеї та концепції виробу до етапу його утилізації. Узгодженість має забезпечуватися одночасним гарантуванням як потрібних показників безпеки та живучості, так і необхідних показників працездатності упродовж заданого терміну експлуатації. Подано загальні принципи раціональної стратегії дій ОПР, суть якої полягає у формуванні та реалізації раціонального рішення за практично прийнятний час у межах часового обмеження.
- ♦ На основі системного аналізу властивостей та особливостей задач багатofакторних ризиків розглянуто питання про одержання достовірного розв'язку практично важливих задач своєчасного оцінювання і запобігання можливому впливу ситуацій ризику, що реально існують у будь-якій сфері діяльності людини.

Розділ 10

Системне управління складними об'єктами

- ♦ Аналіз і класифікація задач системного управління
- ♦ Змістовне визначення поняття «системне управління»
- ♦ Задачі системного управління працездатністю і безпекою складних об'єктів
- ♦ Математичне формулювання задачі системного управління складними об'єктами
- ♦ Стратегія розв'язання задачі системного управління складними об'єктами
- ♦ Задачі системного управління структурою і властивостями складних об'єктів
- ♦ Техніко-економічний аналіз системного управління складними об'єктами

У цьому розділі розглянемо системні задачі узгодженого управління працездатністю і безпекою складних ієрархічних систем (СІС) у реальних умовах їхнього функціонування, що характеризуються наявністю невизначеностей та ризиків. Особливість цих задач полягає в тому, що як на рівні СФА, так і на рівні управління раціональний розв'язок потрібно шукати за умов концептуальної невизначеності вигляду, структури та властивостей виробу. Крім того, слід враховувати і низку інших факторів [34, 46, 52, 54, 56, 57, 84, 85, 92, 98, 161, 170]. Зокрема, відсутня апіорна інформація, що забезпечує достовірне оцінювання конструктивних і технологічних можливостей і заданих вимог до основних властивостей, показників та умов експлуатації СІС. Ці умови залежно від призначення СІС визначають різні фактори. Однак сьогодні майже для всіх типів СІС переважного значення набули ризики аварій і катастроф [105, 172].

Дослідження специфіки і розроблення основних принципів розв'язання задач системного управління за умов невизначеностей і ризиків є метою цього розділу.

10.1. Аналіз і класифікація задач системного управління

10.1.1. Особливості задач системного управління

У практичній діяльності людині потрібно розв'язувати досить велику кількість задач управління, у яких оцінювання та оптимізацію якості управління об'єктом виконують за єдиним критерієм. До них належать деякі найпростіші задачі: про максимальну швидкість; максимальну точність відтворення сигналів; оптимізацію кінцевого стану для вертикального запуску ракет; мінімізацію витрати пального під час виведення ракет на задану траєкторію; мінімізацію енергетичних витрат під час виконання певної роботи тощо. Такі задачі управління можна звести до такого загального формулювання.

Змістовне формулювання задачі

Відомо: множина допустимих станів об'єкта і множину допустимих управлінь, визначено початкові та граничні умови.

Потрібно: знайти таке допустиме управління, за якого заданий показник якості управління досягне екстремального значення, а керований об'єкт перейде із початкового стану у кінцевий, залишаючись в області допустимих станів.

Відзначимо деякі особливості і властивості розглянутих задач. Вони різняться не лише складністю, але й практичною значущістю. Потреба розв'язання класу задач про максимальну швидкодію постала одночасно із впровадженням найпростіших механічних регуляторів, зокрема регулятора Уатта в 40-х роках XIX століття. І ця обставина на ціле століття визначила назву дисципліни про управління як теорії регулювання.

Упродовж 40–60-х роках XX століття якісно змінилася проблематика, що зумовлено насамперед швидким розвитком авіаційної, ракетної та космічної техніки.

Принципова відмінність цієї проблематики від традиційних задач регулювання полягала в такому. У традиційній постановці задачі досліджували якість управління повільно змінними процесами. Так, досліджували якість компенсації автопілотом випадкових збурювальних впливів зовнішнього середовища на літак у реальних умовах польоту, тривалість якого на багато порядків перевищувала час перехідного процесу компенсації випадкових збурень. Водночас політ ракети із працюючим двигуном є прикладом перехідного процесу, оскільки постійно змінюється маса ракети через витрату пального. Задачу управління ускладнюють також деякі інші фактори. Зокрема, висока вартість пального і високе відношення витрат пального до маси корисного вантажу зумовлюють необхідність мінімізації витрати пального під час вибору траєкторії польоту. Усі ці фактори призвели до формулювання якісно нових задач управління, що принципово відрізняються від традиційних задач регулювання. До відмінностей слід віднести такі: наявність множини суперечливих цілей оптимізації управління; неповнота, невизначеність і нечіткість вихідної інформації про можливі умови експлуатації і застосування керованого об'єкта; необхідність оптимальної узгодженості управління на всіх етапах життєвого циклу об'єкта — від розробки проекту до утилізації об'єкта.

Всі ці обставини потребували нових принципів, прийомів та методів прийняття рішень і стимулювали розвиток теорії управління і теорії дослідження операцій. У свою чергу, теорія управління і теорія дослідження операцій, як слушно зазначив академік М. М. Моїсєєв [111], стали джерелом нових ідей та методів, на основі яких було сформувано системний підхід, як основу системного аналізу. Такий процес зумовлений тим, що концептуальних засад теорії управління і теорії дослідження операцій було явно недостатньо для розв'язання нових класів практичних задач, що потребувало розширення і розвитку прикладних аспектів теорії. Насамперед виникла нагальна потреба у забезпеченні єдності, цілісності поглядів, принципів та прийомів прийняття рішень на різних етапах життєвого циклу особливо складних, якісно нових об'єктів, до яких, зокрема, належать комплекси ракетної і космічної техніки. Це спричинено багатьма факторами, серед яких визначальні є фактори ризику позаштатних і критичних ситуацій. Складність, неформалізованість, різноманітність концептуальних взаємозв'язків організаційних, технічних, технологічних, економічних та інших задач різних етапів життєвого циклу виробів і надзвичайно висока ціна можливої помилки рішень стимулювали появу нових класів задач системного управління, становлення і розвиток яких відбувається сьогодні у межах системного аналізу.

Важливість та особливості розв'язання прикладних системних задач управління сучасною складною технікою на різних етапах життєвого циклу визначають багато фак-

торів. Серед них особливо слід виділити фактори невизначеності і ризику у процесі функціонування складної ієрархічної системи, що є основними причинами багатьох аварій і катастроф із багатомільярдними збитками і загибеллю людей [105, 172]. Звідси випливає практична необхідність пошуку нових принципів та підходів до управління сучасними складними ієрархічними системами різного призначення, і передусім складними техногенно та екологічно небезпечними технічними системами. Під час розв'язання цих задач крім факторів ризику слід враховувати, що результативність функціонування і можливість виникнення аварій та катастроф безпосередньо залежать від властивостей і структури управління досліджуваної системи. Отже, потрібно враховувати, що керованість, адаптивність, стійкість, координованість, живучість, ефективність сучасних систем різного призначення багато в чому визначають властивості, можливості і результативність управління.

Серед інших факторів слід виділити безперервне зростання обсягу та рівня вимог до сучасних технічних систем різного призначення, що стимулює широке впровадження наукомістких технологій на всіх етапах їхнього життєвого циклу. Звідси випливає практична потреба вдосконалювання процесів формування, обґрунтування і раціонального вибору рішень у стратегічному плануванні, проектуванні і виробництві інноваційних та інших перспективних виробів нової техніки, а також у розподілі ресурсів і капіталів на їхню розробку та виробництво. Однак задачі формування і прийняття рішень на різних рівнях ієрархічних систем управління є доволі складними щодо оцінювання практичної необхідності, технологічної можливості та економічної перспективності складних систем на різних етапах їхнього життєвого циклу.

Внаслідок цього з'явилися численні класи неформалізованих або важко формалізованих задач управління, для розв'язання яких потрібно забезпечити системну єдність принципів, підходів та критеріїв управління.

10.1.2. Види управління складними системами

У наш час класичне вінерівське визначення управління дістало два принципово різних трактування. У *першому* трактуванні управління визначено як загальну категорію, що містить усі форми та види зміни властивостей і поведінку керованих систем. У такому розумінні управління поєднує такі процеси, як перетворення структури, напрямів, цілей, критеріїв певних перспективних чи неперспективних видів практичної діяльності, а також формування і прийняття рішень з оцінювання, планування і реалізації нових перспективних напрямів практичної діяльності. *Друге* трактування відводить управлінню досить вузьку, спеціалізовану роль цілеспрямованої зміни дій, властивостей систем у заздалегідь визначених межах.

Перше трактування характерне для управління промисловою, економічною, соціальною та іншими сферами діяльності. Друге — для більш спеціалізованих видів діяльності, наприклад, для середнього і малого бізнесу, зокрема для різних фірм-розробників засобів малої автоматизації, автоматичних регуляторів і спеціалізованих технологічних пристроїв управління. До названого класу спеціалізованих технологічних пристроїв управління належать бортові комп'ютери літаків, комп'ютери на автомобілях та аналогічні спецобчислювачі, кожен з яких керує заданим технологічним процесом у певній ситуації (наприклад, комп'ютер на легковому автомобілі може забезпечувати раціональну подачу бензину за різних режимів їзди).

Очевидно, що друге трактування не повною мірою відповідає загальним цілям, задачам і принципам системного управління. Тому надалі задачі системного управління доцільно розглядати з погляду першого трактування як загальнішого і базованого на більш широкому розумінні суті, принципів і задач системного управління. Відповідно до такого підходу запропоновано таке формулювання терміна «управління»: будь-які цілеспрямовані дії для досягнення певних корисних змін або перетворень у керованій складній системі.

Дії за різними напрямками практичної діяльності можуть відрізнятися багатьма властивостями і показниками, зокрема за принципами і характером впливу на властивості і можливості керованого об'єкта. Орієнтуючись на це широке розуміння управління, доцільно ввести такі означення.

Управління поведінкою (У1) — вид управління, що забезпечує перехід об'єкта з одного стану в інший на обмеженій множині можливих станів. У1 здійснюють у процесі простих взаємодій керованого об'єкта із зовнішнім середовищем і реалізують у формі певної реакції об'єкта на зовнішні впливи.

Управління властивостями (У2) — вид управління, за якого змінюються форми і способи формування реакції на зовнішні впливи залежно від наявної ситуації. У2 забезпечує адаптацію об'єкта до наявної ситуації через зміну властивостей реакції на зовнішні впливи залежно від їх особливостей.

Управління структурою (У3) — вид управління, за якого змінюються склад, структуру і взаємозв'язки. Адаптацію об'єкта до наявної ситуації забезпечують через структурну зміну об'єкта відповідно до новосформованих цілей.

Управління розвитком (У4) — вид управління, що забезпечує цілеспрямовану зміну цілей, властивостей, структури і форм діяльності об'єкта відповідно до змін умов і взаємодії із зовнішнім середовищем. У4 є основним видом управління у плануванні розвитку складних виробничих комплексів, космічних систем (наприклад, космічного комплексу «Мир», супутникових навігаційних систем тощо), видів озброєння і військової техніки (наприклад, авіаносців, підводних човнів та інших).

Управління призначенням (У5) — вид управління, що забезпечує зміну цілей і завдань функціонування об'єкта за виниклих умов. У5 характерне для таких ситуацій, коли заздалегідь прогнозовані умови функціонування об'єкта змінюються настільки принципово, що жодні з наведених видів управління не забезпечать адаптації об'єкта до нових умов.

Класичним прикладом такого виду управління слід вважати управління конверсією промислових підприємств військово-промислового комплексу в соціально-політичних та економічних умовах, що склалися у світі після розпаду СРСР. Справді, призначення і цілі таких підприємств та їхніх суміжників мали змінитися принципово, що потребувало розв'язання багатьох системно взаємопов'язаних організаційних, структурних, технологічних, соціальних, економічних та інших задач. Досвіду розв'язання цих задач за умов одночасної перебудови механізму управління і переходу до ринкової економіки не було і накопичувався він у процесі становлення ринкової економіки в нових незалежних державах.

Слід звернути увагу на те, що практична значущість і складність задач управління підвищується із переходом від класу У1 до класу У5. Це зумовлено багатьма причинами і факторами, серед яких варто насамперед виділити збільшення масштабів і складності людської діяльності. Таке збільшення безпосередньо зумовлене впровадженням наукомістких технологій та суттєвим розширенням можливостей і сфери застосування сучасних систем різного призначення.

Основні цілі управління полягають у підвищенні ефективності діяльності керованого об'єкта і забезпеченні його адаптації до вищого рівня невизначеності та складності зовнішніх впливів. Справді, клас У1 забезпечує оптимальне управління тільки в межах наперед визначеної множини дій за апріорно відомих обмежень зовнішніх впливів. Якщо ж наявна ситуація в реальних умовах експлуатації об'єкта суттєво відрізняється від прийнятих можливих умов прикладення зовнішніх впливів, то управління буде таким малоефективним, що об'єкт виявиться майже некерованим. Наслідки від такого стану можуть бути дуже серйозними. Зокрема, приблизно за такої ситуації сталася катастрофа на Чорнобильській АЕС (1986 р.). Водночас управління класу У2 і вищого рівня дають змогу більш адекватно і вчасно реагувати на непередбачені ситуації через зміну відповідно властивостей У2 або структури У3 об'єкта у процесі швидкоплинних змін штатного режиму або несподіваної зміни зовнішніх факторів (швидкості вітру, температури, рівня опадів тощо).

Інші принципи реалізовано у разі здійснення управління класів У4 і У5, оскільки їхні цілі і задачі якісно відрізняються від управлінь класів У1, У2 чи У3. Крім того, вони зорієнтовані на досить тривалий час діяльності. Справді, принципова зміна на пряму розвитку об'єкта управління за впливу У4 або призначення під впливом У5 потребує значного обсягу попередніх досліджень та розробок, подальшого втілення їх у конкретні вироби і технології. Тому управління класів У4 і У5 виконують у процесі повільно змінних стратегічних ситуацій. Про це свідчить досвід розвитку різноманітних складних систем, зокрема досвід створення, експлуатації і розвитку космічних систем різного призначення (супутникових системи зв'язку, навігації, дистанційного зондування Землі, метеоспостережень тощо).

Класичним прикладом тривалого розвитку та цілеспрямованого розширення можливостей складної системи є космічний комплекс «Мир», який експлуатували і розвивали у СРСР упродовж 15 років.

Звернімо увагу на ще одну важливу особливість розглянутих видів управління, а саме: із переходом від класу У1 до класу У5 принципово підвищується складність задач управління. Визначальним фактором підвищення складності є перехід від доволі обмеженого обсягу ФЗ управління класу У1 до широкої номенклатури задач класу У5, під час якого лавиноподібно зростає кількість неформалізованих або важкоформалізованих задач у загальному обсязі задач управління.

Слід також врахувати ще один важливий фактор розвитку методології системного аналізу, суть якого полягає в тому, що одночасно з розвитком методології відбувається якісна зміна трактування поняття «управління». Від вузького трактування цього поняття, що випливало з цілей і задач управління класу У1, поступово перейшли до більш широкого, системного розуміння задач управління класу У5. Однак ці класи фактично залишаються у межах лише незначного розширення типового розуміння управління і тому не охоплюють деяких практично важливих аспектів поведінки складних систем різного призначення. Зокрема, є нагальна потреба створення єдиної методології системного дослідження та оптимізації управління сучасними складними системами в реальних умовах невизначеностей і ризиків. Тому доцільно не обмежувати класифікацію введеними раніше класами і доповнити її класом системного управління.

Системне управління (У6) — вид управління, що забезпечує цілеспрямовану зміну цілей і (або) інших властивостей функціонування досліджуваного об'єкта для системно узгодженого забезпечення необхідних рівнів його працездатності, безпеки та ефективності в реальних умовах концептуальної невизначеності і багатфакторних ризиків.

З огляду на те, що немає змістовного означення поняття «системне управління», введемо таке означення.

Системне управління — необмежена послідовність процедур формування, обґрунтування, вибору і реалізації системно взаємопов'язаних та функціонально взаємозалежних рішень і дій, узгоджених за цілями, задачами, термінами, ресурсами та очікуваними результатами для забезпечення необхідних рівнів працездатності, безпеки та ефективності керованого об'єкта і (або) досягнення певних змін у керованому об'єкті за наявності багатofакторних ризиків і невизначеностей зовнішніх впливів.

Тут поняття «необмежена послідовність» слід розуміти як послідовність процедур, які виконують у міру потреби відповідно до виниклих обставин, умов і цілей функціонування керованого об'єкта, і тому кількість процедур апіорно не обмежена.

Розглянемо детальніше властивості та особливості задач управління складними об'єктами.

10.1.3. Задачі оптимального управління складними об'єктами

Передусім розглянемо задачі класу У1 на прикладі розв'язання задачі оптимального управління динамічними об'єктами. Метою такого підходу є виявлення властивостей та особливостей формалізації і розв'язання задач управління цього класу. Це дасть змогу не лише наочніше виявити подібність і відмінності підходів до розв'язання задач управління, прийняті в теорії управління та системному аналізі, але й проаналізувати можливості, переваги і недоліки типового апарату системного аналізу. Для реалізації цієї мети необхідно проаналізувати специфіку та умови формалізації задачі. Тому розглянемо особливості формалізованого формулювання задачі оптимального управління [109].

Формалізована постановка задачі

Нехай рух динамічного об'єкта описує система диференціальних рівнянь, що зображена у векторній формі:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{f}(\bar{x}, \bar{u}, t), \quad (10.1)$$

де $\bar{x}, \bar{u}, \bar{f}$ — вектори з компонентами x_i, u_i, f_i відповідно; $\bar{x}(t)$ — вектор станів об'єкта (фазових координат), який визначає стан об'єкта в момент часу t ; $\bar{u}(t)$ — вектор управління. Вектори $\bar{x}(t), \bar{u}(t)$ можуть змінюватися в деякій допустимій області:

$$\bar{x}(t) \in G_x; \quad (10.2)$$

$$\bar{u}(t) \in G_u \quad (10.3)$$

або скорочено

$$(\bar{x}, \bar{u}) \in G; \quad G = G_x \times G_u. \quad (10.4)$$

Умову (10.2) прийнято називати обмеженням на стан (або фазовим обмеженням), а (10.3) — обмеженням на управління. Крім обмежень задають також початкові та кінцеві стани керованого об'єкта у вигляді:

$$\bar{x}(t_0) \in E_0, \quad \bar{x}(T) \in E_T, \quad (10.5)$$

де t_0, T — час відповідно початкового і кінцевого стану керованого об'єкта; E_0, E_T — множини допустимих значень відповідно початкового і кінцевого станів, які вважають заданими.

Як приклад покажемо систему (10.1) у явній формі, яка описує рух космічного апарата під час виведення на орбіту.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_3; & \dot{x}_2 &= x_4; & \dot{x}_3 &= \frac{1}{m}(\varphi_1 + u_1 \cos u_2); \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{m}(\varphi_2 + u_1 \sin u_2); & \dot{m} &= -F(u_1),\end{aligned}\quad (10.6)$$

де x_1, x_2 — поточні координати космічного апарата; x_3, x_4 — координати швидкості; m — загальна маса космічного апарата і ракети-носія у процесі виведення апарата на орбіту; u_1 — тяга; u_2 — кут між напрямом тяги і віссю x_1 ; $F(u_1)$ — витрата маси пального за секунду і, як наслідок, зміна загальної маси через витрату пального. Дію сили ваги, опору атмосфери та інших гальмівних факторів враховують через φ_1 і φ_2 — проєкції зазначених сил на координатні осі x_1 та x_2 . Множина G є декартовим добутком множин G_x та G_u . Множина G_x — це деяка ділянка простору поблизу Землі, у межах якої повинна проходити траєкторія польоту космічного апарата.

Зокрема, під час запуску пілотованого космічного апарата очевидні такі обмеження траєкторії: вона не повинна заходити в зону радіаційних поясів Землі чи перетинати її поверхню. Множину G_u визначають із міркувань, що керують польотом космічного апарата через регулювання величини і напрямку вектора тяги двигуна ракети. Вектор управління визначений тягою u_1 і кутом u_2 . Тому G_u — це множина допустимих значень u_1 і u_2 , визначених конструктивними, технологічними та іншими обмеженнями, зокрема допустимими параметрами перевантаження людини.

Відповідно до мети запуску космічного апарата повинні бути визначені його початковий і кінцевий стани у формі (10.5). Для розв'язання задачі (10.6) потрібно задати відповідні умови для кожного рівняння. Отже, мають бути задані початкове положення космічного апарата, стартові значення його швидкості і маси. У цьому разі початковий стан можна описати у вигляді:

$$\begin{aligned}x_1(t_0) &= x_{01}; & x_3(t_0) &= x_{03}; \\ x_2(t_0) &= x_{02}; & x_4(t_0) &= x_{04}; & m(t_0) &= m_0,\end{aligned}\quad (10.7)$$

де $x_{01}, x_{02}, x_{03}, x_{04}, m_0$ — задані фіксовані значення; m_0 — загальна маса космічного апарата і ракети-носія на старті.

Кінцевий стан під час виведення космічного апарата на орбіту визначають на вибраній орбіті. У разі виведення на колову орбіту із заданим радіусом R кінцевий стан апарата визначатимуть співвідношеннями

$$\begin{aligned}x_1^2(T) + x_2^2(T) &= R^2; \\ x_3(T)x_1(T) + x_4(T)x_2(T) &= 0; & x_3^2(T) + x_4^2(T) &= V_R^2,\end{aligned}\quad (10.8)$$

де V_R — задана швидкість руху космічного апарата на орбіті. Перша умова (10.8) означає, що точка з координатами (x_1, x_2) у момент $t = T$ лежить на колі із заданим радіусом R . Друга умова означає, що вектори $\vec{r}$ і $\vec{V}$, які мають відповідно компоненти (x_1, x_2) і (x_3, x_4) , є ортогональними, тобто вектор швидкості $\vec{V}$ космічного апарата в момент $t = T$ спрямований по дотичній до кола із заданим радіусом й ортогональний

до вектора $\bar{r}$. Третя умова свідчить, що швидкість руху космічного апарата на орбіті має дорівнювати заданому значенню. Отже, умова (10.8) гарантує, що космічний апарат вільно рухатиметься коловою орбітою радіусом R зі швидкістю V_R , якщо двигун вимкнута в момент $t = T$.

Тепер потрібно формалізувати критерій ефективності управління. Очевидно, що процес виведення космічного апарата на задану орбіту, тобто процес переходу апарата з початкового стану (10.7) у кінцевий (10.8), можна реалізувати різними способами, кожен з яких характеризує своя програма управління. На практиці застосовують різні критерії оцінювання ефективності програми. Як зазначено вище, однією з найважливіших задач є мінімізація витрати пального. Математичне зображення цієї задачі можна одержати на основі четвертого рівняння в (10.6). Оскільки величина $F(u_1)$ визначає витрату пального за секунду, то загальну витрату пального за час виведення космічного апарата на орбіту визначатиме інтеграл

$$I(\bar{u}) = \int_{t_0}^T F(u_1) dt. \quad (10.9)$$

Звідси випливає, що оптимальна програма $\bar{u}^*$ виведення космічного апарата відповідає умові

$$I(\bar{u}^*) = \min_{\bar{u} \in G_u} I(\bar{u}), \quad \bar{u}^* = \arg \min_{\bar{u} \in G_u} I(\bar{u}). \quad (10.10)$$

Для стислості умову (10.10) подамо у вигляді

$$I(\bar{u}) \rightarrow \min \quad (10.11)$$

або, у разі максимізації критерію, у формі

$$I(\bar{u}) \rightarrow \max. \quad (10.12)$$

У цій задачі оптимізації управління досягають вибором тільки вектор-функції управління. У більш загальній постановці оптимізація може бути ускладнена. Зокрема, її можна забезпечити вибором як вектор-функції управління, так і вектор-функції стану, тобто вибором $\bar{u}(t)$ і $\bar{x}(t)$ з виразів (10.11) або (10.12).

Наведені умови формалізації задачі оптимального управління дають змогу подати її математичне формулювання в такому досить загальному вигляді.

Математична постановка задачі

Потрібно: знайти такі вектор-функції $\bar{x}^*(t) \in R^n$ і $\bar{u}^*(t) \in R^m$, для $t \in [t_0, T]$, що забезпечують мінімум (максимум) функціонала

$$I = I(\bar{x}, \bar{u}), \quad (10.13)$$

як умову

$$I(\bar{x}, \bar{u}) \rightarrow \min \quad \text{або} \quad I(\bar{x}, \bar{u}) \rightarrow \max \quad (10.14)$$

за диференціальних зв'язків

$$\dot{x} = \bar{f}(\bar{x}, \bar{u}, t), \quad (10.15)$$

обмежень

$$(\bar{x}, \bar{u}) \in G; \quad t \in [t_0, T] \quad (10.16)$$

і граничних умов

$$(\bar{x}, t_0) \in E_0; \quad (\bar{x}, T) \in E_T, \quad (10.17)$$

де G — деяка задана область простору $R^n \times R^m$, а E_0 і E_T — області, задані у просторі $R^n \times R^1$.

Співвідношення (10.13)–(10.17) визначають різні типи задач оптимального управління. Ці задачі можна поділити на три групи, виходячи зі способів, якими задають певні властивості та особливості задачі. Наведемо ці групи.

Група 1 характеризується відмінністю форми задання функціонала (10.13) і складається із задач таких типів:

- ♦ Задача Лагранжа.
- ♦ Задача Майєра.
- ♦ Задача Больца.
- ♦ Задача на швидкодію.

Група 2 має відмінності виду обмежень (10.16) і складається із задач таких типів:

- ♦ Задача з обмеженням на управління.
- ♦ Задача з обмеженням на стан.
- ♦ Задача зі спільними обмеженнями на управління і стан.
- ♦ Задача з інтегральними обмеженнями (ізопериметрична задача).

Група 3 характеризується відмінністю способів задання граничних умов (10.17) і містить задачі таких типів:

- ♦ Задача з фіксованими кінцями траєкторії.
- ♦ Задача з вільним кінцем траєкторії.
- ♦ Задача з рухомими кінцями.

Методи розв'язання задач оптимального управління детально описано М. М. Моїсєєвим у праці [109].

10.2. Задачі системного управління працездатністю і безпекою складних об'єктів

Нові підходи до створення сучасної техніки визначають якісно нові вимоги до забезпечення техногенної та екологічної безпеки. Така потреба зумовлена не лише тим, що втрати від часткового або повного руйнування машин або конструкцій можуть у десятки разів перевищувати вартість їхнього створення, але й тим, що катастрофи можуть мати національні або глобальні масштаби впливу на населення і навколишнє середовище. Більше того, катастрофи з багатомільйонними і мільярдними втратами, які упродовж двох-трьох останніх десятиліть минулого століття сталися майже в усіх промислово розвинених країнах, доводять, що теперішні принципи та механізми управління безпекою складних об'єктів не відповідають сучасним вимогам [105, 172]. Звідси випливає практична потреба принципової зміни підходів та принципів управління безпекою складних об'єктів і, зокрема, об'єктів сучасної техніки.

10.2.1. Системна узгодженість управління працездатністю і безпекою складних об'єктів

Для поліпшення управління складними об'єктами слід з'ясувати причини і фактори, через які не можна забезпечити потрібний рівень безпеки функціонування цих об'єктів. Таких причин за умов високих темпів оновлення сучасної техніки і виробничих технологій може бути досить багато, оскільки їх появу зумовлюють не лише загальні тенденції розвитку техніки, але й власні традиції та задуми певних виробників продукції. Водночас аналіз аварій і катастроф дає змогу виявити найважливіші причини і недоліки сформованих принципів управління безпекою сучасної техніки. Про одну з таких причин йшлося в розділі 9: вона полягає в особливості функціонування систем діагностування, зорієнтованих на виявлення відмов та несправностей. Такий підхід до забезпечення безпеки виключає можливість *апріорного запобігання позаштатному режиму* і, як наслідок, є можливість його подальшого переходу в аварію або катастрофу. Для запобігання такому переходу в розділі 9 запропоновано нову концепцію забезпечення безпеки.

Процеси функціонування складних технічних систем і процеси забезпечення їхньої безпеки мають принципові відмінності. Перші зорієнтовані на досягнення головної, виробничої мети складної технічної системи, тому їм приділяють особливу увагу на всіх етапах життєвого циклу виробу. Другі певна категорія фахівців вважає другорядними, оскільки, на їх погляд, усі основні проблеми працездатності і надійності, а отже, і безпеки виробу розв'язані на етапах його розроблення, доведення, доопрацювання, випробувань. Внаслідок цього виникають прецеденти, коли розроблення цілей, задач, вимог до системи безпеки і насамперед до системи технічного діагностування (СТД) не має належного обґрунтування. І, як наслідок, виявляється, що показники і властивості створеної системи безпеки не відповідають реально необхідним потребам складних об'єктів, які вони мають задовольняти. Такий випадок трапився в ході проведення експерименту з екстреного зупину реактора Чорнобильської АЕС, який закінчився катастрофою [259].

Отже, постає практична потреба якісної зміни принципів і структури управління працездатністю та безпекою сучасних складних технічних систем у реальних умовах впливу багатофакторних ризиків. Насамперед управління складними об'єктами має бути системним, що слід трактувати як системну узгодженість управління працездатністю та управління безпекою не тільки за відповідними цілями, задачами, ресурсами та очікуваними результатами, але й, що особливо важливо, за оперативністю і результативністю взаємодії в реальних умовах позаштатної ситуації. Така узгодженість повинна забезпечити оперативну і результативну взаємодію зазначених систем управління. З одного боку, потрібно забезпечити оперативність і результативність системи безпеки щодо своєчасного виявлення позаштатної ситуації, оцінювання її ступеня і рівня ризику, визначення ресурсу допустимого ризику у процесі формування рекомендацій щодо оперативних дій ОПР. З іншого боку, система управління працездатністю після одержання сигналу про позаштатну ситуацію повинна оперативно і результативно діяти для забезпечення готовності складного об'єкта до екстреного переходу в неробочий стан і забезпечення можливості реалізації таких дій у межах ресурсу допустимого ризику. Звідси випливають основні цілі задачі системного управління складними об'єктами.

10.2.2. Математична постановка задачі системного управління складними об'єктами

Наведемо математичну постановку цієї задачі для апріорно заданих інтервалів зміни основних показників системи у штатному режимі її функціонування і за певних допустимих меж зміни факторів зовнішнього впливу.

Відомо: функціонування системи характеризує така послідовність станів складної системи $E_1, E_2, \dots, E_k, \dots$, у якій кожний стан E_k характеризується певними показниками процесів функціонування системи (Y_k, X_k, U_k) , впливу зовнішнього середовища та факторів ризику Ξ_k :

$$E_k = \{(Y_k \in Y) \wedge (X_k \in X) \wedge (U_k \in U) \wedge (\Xi_k \in \Xi)\}, \quad (10.18)$$

де значення показників у момент часу $T_k \in T^\pm$ визначають співвідношення:

$$\begin{aligned} Y_k &= \hat{Y}[T_k]; \quad X_k = \hat{X}[T_k]; \quad U_k = \hat{U}[T_k]; \quad \Xi_k = \hat{\Xi}[T_k]; \\ T_k &= \{t_k | t_k > t_{k-1}\}; \quad T_k \in T^\pm; \quad T^\pm = \{t | t^- \leq t \leq t^+\}; \\ Y &= (Y_i | i = \overline{1, m}); \quad X = (X_j | j = \overline{1, n}); \\ U &= (U_q | q = \overline{1, Q}); \quad \Xi = (\Xi_p | p = \overline{1, P}), \end{aligned} \quad (10.19)$$

де Y — множина зовнішніх параметрів Y_i , яка містить технічні, економічні та інші показники якості функціонування системи; X — множина внутрішніх параметрів X_j , до складу якої входять конструктивні, технологічні та інші показники; U — множина керуючих параметрів U_q ; Ξ — множина параметрів впливу зовнішнього середовища Ξ_p і факторів ризику; $\hat{Y}[T_k], \hat{X}[T_k], \hat{U}[T_k], \hat{\Xi}[T_k]$ — множини значень відповідних параметрів у момент часу T_k ; $T^\pm$ — заданий або прогнозований термін функціонування складного об'єкта.

Потрібно: визначити в момент $T_i \in T^\pm$ такі значення показників ступенів η_i і рівнів W_i ризику, а також ресурс допустимого ризику T_{ar} , які забезпечать за позаштатного режиму можливість переходу з режиму $\bar{R}_{tr}^+$ за період $\bar{T}_{tr}^+$ у штатний режим до настання критичного моменту T_{cr} переходу позаштатного режиму в аварію або катастрофу.

Режим $\bar{R}_{tr}^+$ — керований режим функціонування, зумовлений впливом U_{tr} системи управління безпекою, який упродовж періоду $\bar{T}_{tr}^+$ приводить до переходу позаштатного режиму R_{os} у штатний режим R_{sd} . Режим $\bar{R}_{tr}^+$ характеризується функціоналом

$$\bar{R}_{tr}^+: R_{os} \xrightarrow{U_{tr}} R_{sd}, \quad (10.20)$$

який визначає процес переходу позаштатного режиму R_{os} у штатний режим R_{sd} під впливом системи управління U_{tr} .

Основна властивість системи — працездатність, яка характеризується заданими показниками якості, визначеними множиною Y .

Безпеку системи розглядатимемо як здатність вчасно запобігати послідовному переходу штатного режиму в аварію чи катастрофу на основі своєчасного виявлення факторів суттєвого ризику та відвернення їхнього перетворення на фактори катастрофічного ризику. Безпеку характеризують такі показники: ступінь η_i і рівень W_i ризику;

ресурс допустимого ризику позаштатного режиму T_{ar} ; ресурс допустимого ризику аварії T_{as} або катастрофи T_{ds} .

Кількісні значення показників безпеки визначають розв'язанням загальної задачі аналізу багатofакторних ризиків, математичне формулювання якої наведено в цьому розділі.

10.2.3. Стратегія розв'язання задачі системного управління складними об'єктами

Передусім слід звернути увагу на принципові відмінності цієї задачі від типових задач управління. Найважливіша відмінність полягає в тому, що вихідна інформація про складний об'єкт містить лише незначну частину відомостей про його стан, властивості, процеси функціонування, характеристики працездатності. Ці відомості характеризують лише функціонування таких об'єктів у штатному режимі. Безумовно, цих відомостей може бути достатньо для прийняття рішень під час управління складними об'єктами за умови, що штатний режим зберігається протягом тривалого часу. Однак у реальних об'єктах за існуючих систем технічного діагностування, зорієнтованих на виявлення відмов і несправностей, не можна гарантувати, що відмова чи несправність не трапиться упродовж найближчих 5–10 хв. І апіорно невідомо, який час потрібний на усунення несправності: кілька хвилин, кілька годин чи кілька місяців. А отже, апіорно невідомий можливий збиток, і тому система управління безпекою є, власне кажучи, реєстратором інформації про факти, що здійснилися, і нагромаджувачем відомостей про збитки.

Принципово інший підхід до управління безпекою можна запровадити на основі системного управління складними об'єктами, суть якого полягає в системно узгодженому оцінюванні та коригуванні працездатності і безпеки у процесі функціонування таких об'єктів.

Загальну стратегію цього підходу схематично зображено на рис. 10.1. Інформація про стан функціонування об'єкта в момент $T_k \in T^{\pm}$ є неповною й нечіткою. Цієї інформації недостатньо для прийняття рішення. Звідси випливає принципово важлива властивість пропонованого підходу, яка полягає в тому, що аналіз ситуації та прийняття рішення забезпечено не лише за типових умов чіткого розпізнавання штатного або позаштатного режиму системи, але й за умов, коли наявна тільки нечітка, неповна інформація про ситуацію. Слід звернути увагу, що цей підхід за умов нечіткої інформації про ситуацію дає змогу в разі потреби вчасно прийняти рішення про екстрений зупин функціонування системи. За цієї стратегії управління в блоках 1–3 реалізовано процедури діагностування та аналізу режиму функціонування складного об'єкта. У блоці 4 на підставі результатів, одержаних після виконання процедур блоків 2 і 3, відбувається розпізнавання стану штатного режиму функціонування. При цьому аналізують три можливі варіанти стану складного об'єкта: зберігається штатний режим функціонування (перехід управління до блоку 5.0); виявлено ознаки порушень штатного режиму, на підставі яких можна зробити висновок, що в момент $T_k \in T^{\pm}$ ситуація позаштатна (перехід управління до блоку 5.1) або стає невизначеною (перехід управління до блоку 5.2).

За першого варіанта система функціонує у штатному режимі, і виконується контроль якості функціонування (блоки 6.0–10.0).

За другого варіанта на основі послідовності позаштатних ситуацій реалізують такі дії: аналізують ступінь і рівень ризику послідовності позаштатних ситуацій, оцінюють безпеку та працездатність складного об'єкта (блоки 6.1–7.1) і формують рішення про технологічний зупин його функціонування (перехід управління до блоків 8.1–10.1) або рішення про продовження функціонування об'єкта у разі допустимих значень ступеня і рівня ризику (перехід управління до блоку 8.0).

За третього варіанта проводять оцінювання живучості та безпеки функціонування системи за умов невизначеності інформації про позаштатні ситуації. Для цього виконують такі дії: аналізують фактори ризику в послідовності позаштатних ситуацій, на підставі цього оцінюють живучість і безпеку складного об'єкта (блоки 6.2–7.2). Якщо рівень невизначеності і неповноти інформації допустимий, то приймають рішення про продовження його функціонування (перехід управління до блоку 8.0). Якщо інакше приймають рішення про екстрений зупин функціонування об'єкта (перехід управління до блоків 9.2, 10.2).

Розроблений алгоритм системного управління працездатністю і безпекою складних об'єктів за умов багатфакторних ризиків більш детально показано в наведених далі схемах. Спочатку розглянемо структурну схему алгоритму управління безпекою в позаштатних ситуаціях (рис. 10.2), що деталізує процедури блоків 5.1–8.1 (див. рис. 10.1). У цій схемі блоками 3.0, 5.0 реалізовано процедури діагностування та оцінювання позаштатних ситуацій у процесі переходу штатного режиму функціонування складної системи в послідовність позаштатних ситуацій. Використовуючи результати цих процедур, формують бази даних і сценарій виникнення послідовності позаштатних ситуацій (блоки 4.0 і 6.0). На підставі одержаної інформації приймають рішення щодо подальших дій (блок 7). У цьому блоці визначають можливість переходу складного об'єкта з позаштатних ситуацій у штатний режим.

Проаналізовано три варіанти: перехід можливий (варіант 1); перехід неможливий (варіант 2); інформації про позаштатні ситуації недостатньо для прийняття рішення (варіант 3). Якщо перехід у штатний режим можливий, то виконують процедуру оцінювання ступеня і рівня живучості об'єкта (блок 8.1). Якщо перехід у штатний режим неможливий, то виконують процедуру оцінювання ступеня і рівня ризику послідовності позаштатних ситуацій для об'єкта (блок 8.0). Якщо інформації про позаштатні ситуації недостатньо для прийняття рішення про можливість або неможливість переходу у штатний режим, то виконують процедуру оцінювання ступеня і рівня безпеки об'єкта (блок 8.2).

Подальші дії системи управління за умов позаштатних ситуацій орієнтовані на виключення можливості аварії чи катастрофи. У варіанті 1 вживають заходи для переходу позаштатних ситуацій у штатний режим на основі послідовного виконання процедур, визначених блоками від 8.1 до 2.1 з послідовним переходом до блоків 6.1, 2.2, 3.2. У варіанті 2 виконують заходи для оцінювання ступеня і рівня ризику, ліміту часу на формування і реалізацію рішення про технологічну зупинку функціонування об'єкта на основі послідовного виконання процедур, визначених блоками 8.0, 9.0, 10.0–12.0. У варіанті 3 виконують заходи для оцінювання ступеня і рівня безпеки, ресурсу допустимого ризику, ліміту часу на формування і реалізацію рішення про технологічну зупинку функціонування об'єкта на основі послідовного виконання процедур, визначених блоками від 8.2 до 4.2 та 8.0, 9.0, 10.0. Усі варіанти орієнтовані на запобігання аварії до моменту T_{α} .

Далі розглянемо структуру баз знань і даних (рис. 10.3). Ця структура є деталізацією змісту блоку 4.0 алгоритму управління безпекою в позаштатних ситуаціях (див. рис. 10.2)

і блоків 7.0–8.0, 7.1–8.1, 7.2–8.2 алгоритму системного управління працездатністю і безпекою складних об'єктів (див. рис. 10.1).

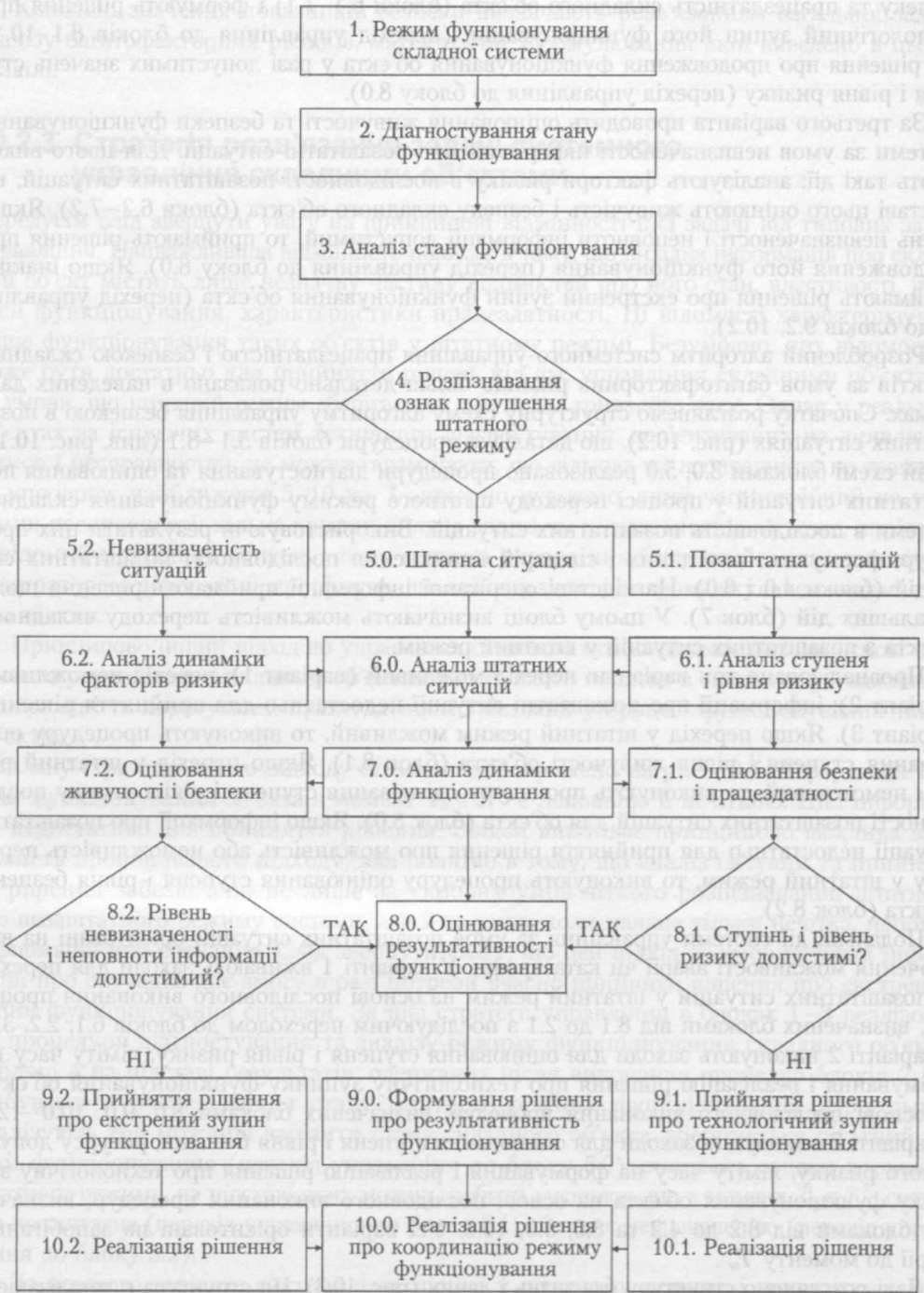


Рис. 10.1. Стратегія системного управління працездатністю і безпекою складних об'єктів

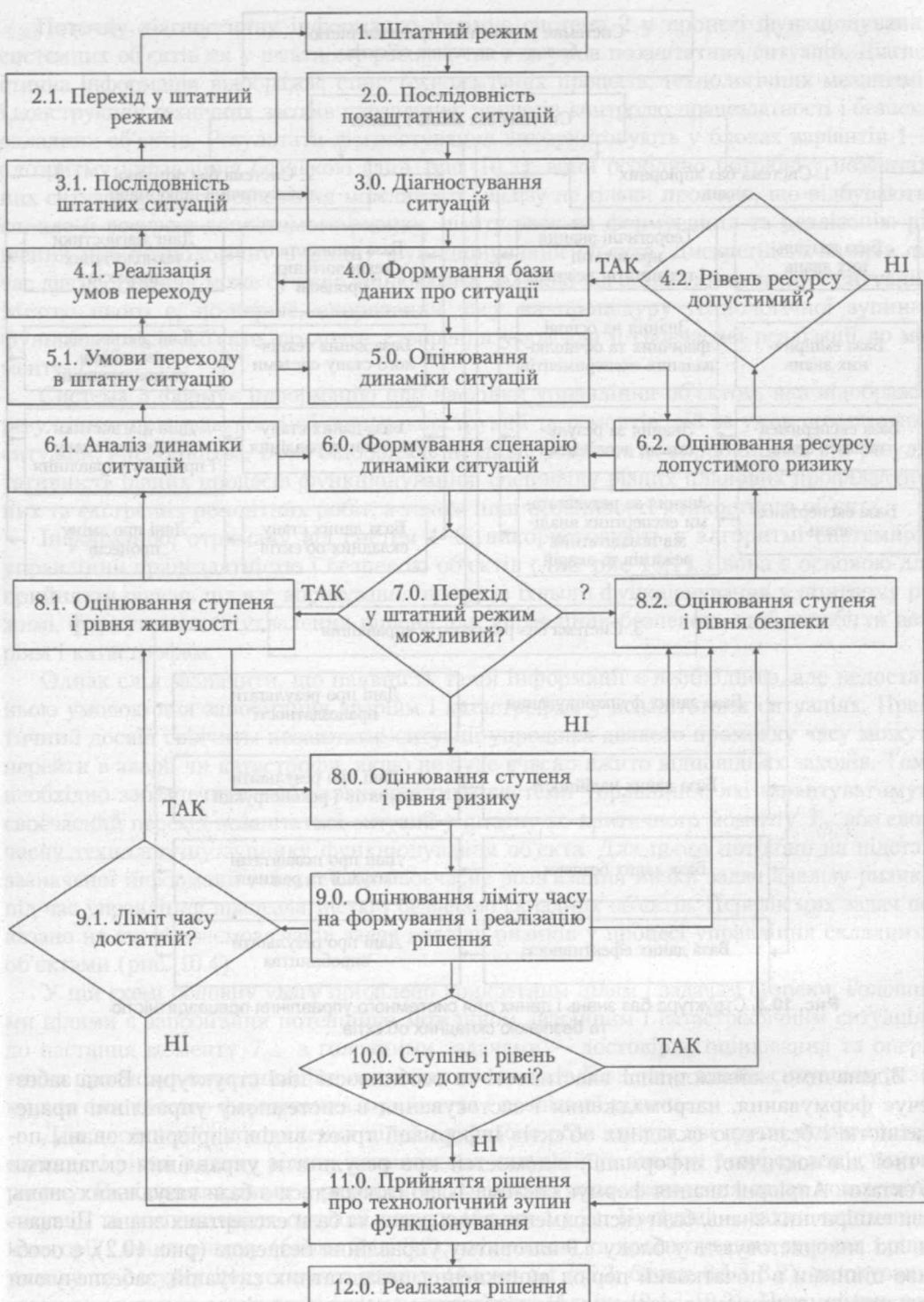


Рис. 10.2. Структурна схема алгоритму управління безпекою складних об'єктів у позаштатних ситуаціях

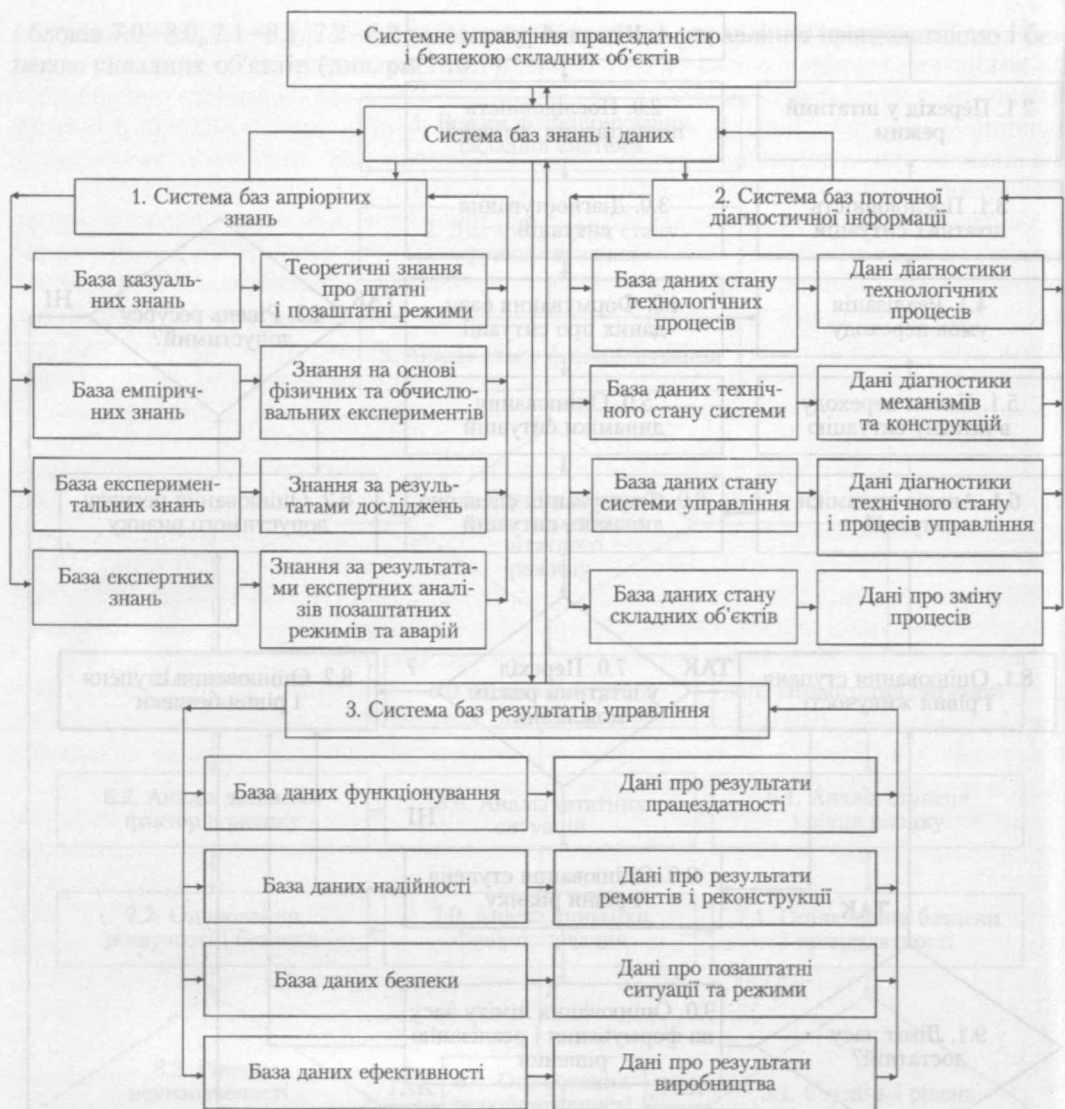


Рис. 10.3. Структура баз знань і даних для системного управління працездатністю та безпекою складних об'єктів

Відзначимо найважливіші властивості та особливості цієї структури. Вона забезпечує формування, нагромадження і застосування в системному управлінні працездатністю і безпекою складних об'єктів інформації трьох видів: апіорних знань; поточної діагностичної інформації; відомостей про результати управління складними об'єктами. Апіорні знання формує система 1, що складається з бази казуальних знань, бази емпіричних знань, бази експериментальних знань та бази експертних знань. Ці знання, які використовують у блоку 4.0 алгоритму управління безпекою (рис. 10.2), є особливо цінними в початковий період виникнення позаштатних ситуацій, забезпечуючи можливість порівняння процесів, що відбуваються, з раніше відомими аналогами чи прототипами.

Поточну діагностичну інформацію формує система 2 у процесі функціонування системних об'єктів як у штатному режимі, так і за умов позаштатних ситуацій. Діагностична інформація відображає стан: технологічних процесів; технологічних механізмів і конструкцій; технічних засобів управління; процесів контролю працездатності і безпеки складних об'єктів. Результати діагностування використовують у блоках варіантів 1–3 алгоритму управління безпекою (див. рис. 10.2), вони особливо потрібні у позаштатних ситуаціях для забезпечення можливості аналізу не тільки процесів, що відбуваються, але й ресурсів допустимого ризику, ліміту часу на формування та реалізацію рішення про технологічну зупинку функціонування об'єкта. Дискретність вимірів під час діагностування може суттєво змінюватися залежно від зміни позаштатних ситуацій. Метою цього є, по-перше, скорочення часу на процедуру технологічної зупинки функціонування об'єкта, по-друге, створення умов для її своєчасної реалізації до моменту T_{σ} .

Система 3 формує інформацію про наслідки управління об'єктом, яка відображає результати: працездатності об'єкта; реконструкції та ремонтів; дій за умов позаштатних ситуацій; виробництва. Вона відображає не лише результати виробництва, а й результативність різних процесів функціонування, специфіку різних планових профілактичних та екстрених ремонтних робіт, а також інші особливості конкретного об'єкта.

Інформацію, отриману від систем 1–3, використовують в алгоритмі системного управління працездатністю і безпекою об'єктів (див. рис. 10.1), і вона є основою для прийняття рішень під час коригування процесів їхнього функціонування у штатному режимі, формування та ухвалення рішень для управління безпекою, щоб запобігти аваріям і катастрофам.

Однак слід зазначити, що наявність такої інформації є необхідною, але недостатньою умовою для запобігання аваріям і катастрофам у позаштатних ситуаціях. Практичний досвід свідчить: позаштатні ситуації упродовж деякого проміжку часу можуть перейти в аварії чи катастрофи, якщо не буде вчасно вжито відповідних заходів. Тому необхідно забезпечити такі характеристики системи управління, які гарантуватимуть своєчасний перехід позаштатної ситуації у штатну до критичного моменту T_{σ} або своєчасну технологічну зупинку функціонування об'єкта. Для цього потрібно на підставі зазначеної інформації забезпечити своєчасне розв'язання низки задач аналізу ризиків під час управління працездатністю і безпекою складних об'єктів. Перелік цих задач показано на схемі взаємозв'язків задач аналізу ризиків у процесі управління складними об'єктами (рис. 10.4).

У цій схемі основну увагу приділено конкретним цілям і задачам безпеки. Головними цілями є запобігання потенційно можливим аварійним і катастрофічним ситуаціям до настання моменту T_{σ} , а головними задачами — достовірне оцінювання та оперативне прогнозування динаміки основних показників безпеки у різних ситуаціях ризику для своєчасного формування, прийняття і реалізації рішень.

Для досягнення поставлених цілей одночасно розв'язують дві групи задач: аналізу ступеня і рівня ризику різних позаштатних ситуацій та аналізу ресурсу допустимого ризику. Вихідними даними є результати розв'язання задач виявлення ознак позаштатної ситуації та розпізнавання ситуації ризику (блоки 1 і 2). Наступні — задачі оцінювання категорії і зміни ризику (блоки 3.1 і 3.2), оцінювання та прогнозування ступеня і рівня ризику та ресурсу допустимого ризику (блоки 5.1 і 5.2; блоки 8.1 і 8.2), ранжування задач за ступенем важливості і рівнем складності (блоки 10.1 і 10.2). Насамкінець розв'язують задачу ранжування варіантів рішень за ризиком та можливостями реалізації

і задачу розроблення рекомендацій для ОПР (блоки 11, 12). Інші задачі (блоки 4, 6, 7, 9) використовують як «точки опори», у яких синтезують та узагальнюють результати розв'язання наведених задач.

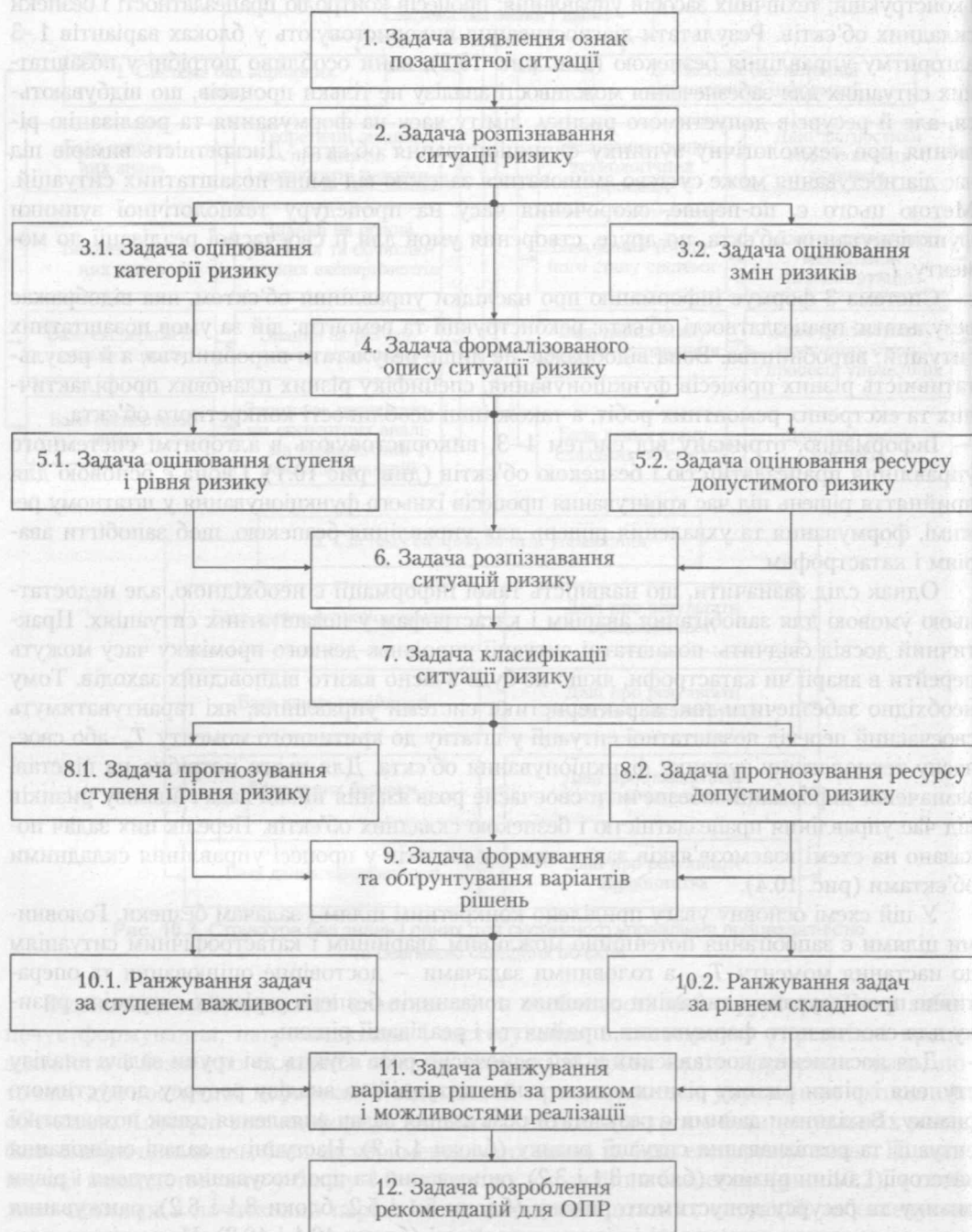


Рис. 10.4. Схема взаємозв'язку задач аналізу ризиків у процесі управління складними об'єктами

10.3. Задачі системного управління структурою і властивостями складних об'єктів

10.3.1. Особливості задач управління структурою і властивостями складних об'єктів

Перейдемо до вивчення властивостей та особливостей задач управління структурою і властивостями складних об'єктів. Передусім потрібно виявити фактори, що зумовлюють потребу створення і використання складніших класів задач управління об'єктами.

До розглянутих вище задач управління працездатністю і безпекою належать задачі управління складними об'єктами різного призначення за умов штатного режиму функціонування. Але водночас цей клас задач має певні обмеження. Ці обмеження випливають з математичного формулювання задач оптимального управління, в якій не враховано цілу низку практично важливих факторів, що належать до реальних умов функціонування сучасних складних систем. Зокрема, недостатньо враховано реальні взаємодії об'єкта і зовнішнього середовища, наприклад, такі важливі особливості, як неповнота, невизначеність і неточність вихідної інформації, запізнення інформації, інерційність і запізнення управління, немарковість процесу зміни стану об'єкта.

У математичному формулюванні задачі трактування терміна «оптимальний» є досить вузьким і не враховує реальну множинність, невизначеність і суперечливість цілей. Не враховано можливості таких змін умов функціонування об'єкта, що призводять до позаштатної або критичної ситуації. Зокрема, не враховано зовнішні нестационарні збурювальні сили, які впливають на рухомий об'єкт в атмосфері і зумовлені непрогнозованими значними варіаціями густини і температури атмосфери, потужними турбулентними рухами повітря, особливо на межі атмосферних фронтів циклону й антициклону, а також відмінністю аеродинамічних реальних властивостей від розрахункових. Ці фактори вносять невизначеність у характеристики сил, які реально впливають на керований об'єкт. Математично ця невизначеність виражається невизначеністю правих частин диференціальних рівнянь (10.1), що описують рух керованого об'єкта. Така невизначеність не гарантує можливості виконання обмежень на стан і управління, визначених співвідношеннями (10.2)–(10.4), а отже, не дає змоги гарантувати у складних умовах штатний режим функціонування об'єкта, визначений співвідношенням (10.1). Отже, математичний і методичний апарат, який використовують для розв'язання задач управління класу У1, орієнтований на досить вузький клас детермінованих вихідних даних і не враховує багато реальних умов і ситуацій, характерних для прикладних задач управління.

Ці недоліки враховано у класах задач управління вищих рівнів, зокрема в задачах, пов'язаних із необхідністю управління властивостями і структурою складних об'єктів. Насамперед розглянемо деякі прийоми усунення неповноти, невизначеності і неточності вихідної інформації в системах управління. У реальних умовах проектування систем управління складними об'єктами недостатній рівень інформованості ОПР може бути зумовлений різними причинами. Найхарактернішими є такі ситуації.

Ситуація 1. На етапі проектування системи управління може виявитися, що частково або повністю невідомо властивості і показники зовнішніх впливів на керований об'єкт, і тому практично невідомо багато показників системи управління. Подібні ситуації були характерні під час створення космічних апаратів різного призначення. Зокрема, під час створення місяцехода відомості про зовнішнє середовище практично були відсутні. Відомою, власне кажучи, була тільки одна властивість — відсутність атмосфери. А головних відомостей — якими є місячний ґрунт, які його механічні, фізичні,

хімічні та інші властивості і показники — не було. За таких умов до системи управління ставлять вимоги, що принципово відрізняються від прийнятих під час розробки систем управління класу У1.

Зокрема, система управління повинна відповідати принципово новій вимозі, відсутній у системах управління класу У1. Суть її полягає в тому, що у процесі функціонування система управління повинна заповнити відсутню інформацію про зовнішнє середовище і на цій основі здійснити рішення про адекватну зміну параметрів, властивостей і структури керованого об'єкта. Отже, від системи управління в цьому випадку потрібно, щоб вона могла у процесі функціонування одночасно виконувати функції управління класу У1 (зміни параметрів стану), класу У2 (зміни властивостей) і класу У3 (зміни структури). При цьому процедури зміни властивостей і структури можуть бути одноразовими і багаторазовими.

У випадку реалізації одноразової процедури система управління працює в такому режимі: заповнює відсутню інформацію, виконує корекцію властивостей і структури об'єкта. Таку процедуру виконують за умови, що характеристики зовнішнього середовища залишаються практично незмінними упродовж всього терміну функціонування керованого об'єкта. Цей варіант процедури характерний, зокрема, для використання певних типів всюдиходів у складних кліматичних умовах (болото, пісок, твердий ґрунт, в'язкий ґрунт тощо). Як приклад можна навести роботу всюдиходів у різні пори року у Заполяр'ї.

Ситуація 2. Є досить точні первинні відомості про властивості навколишнього середовища і про керований об'єкт, на підставі яких можна створити систему управління. Однак у процесі функціонування керованого об'єкта властивості середовища або об'єкта можуть змінюватися у досить широкому діапазоні внаслідок впливу різних факторів. Наприклад, у літальному апараті у процесі польоту в міру витрати пального змінюється його маса і розташування центра ваги. Одночасно зі зміною висоти польоту змінюється густина атмосфери і, як наслідок, — аеродинамічні властивості. Зазначені зміни властивостей об'єкта, а також нестаціонарні турбулентні процеси в атмосфері можуть призвести до того, що система управління, спроектована на підставі вихідної інформації, не забезпечить у процесі зміни властивостей керованого об'єкта і навколишнього середовища необхідних якісних показників функціонування об'єкта. За таких умов виникає необхідність забезпечити постійну зміну його властивостей і структури, адекватну зміні зовнішніх впливів. Така система управління повинна забезпечити необхідні якісні показники функціонування об'єкта у будь-який момент наявної ситуації.

Ситуація 3. Ця ситуація є узагальненням двох попередніх. Для неї характерні як недостатня інформованість про зовнішні умови і фактори на етапі розробки керованого об'єкта, так і можливість непрогнозованих, нестаціонарних змін зовнішніх умов у процесі функціонування об'єкта.

Спільною властивістю розглянутих ситуацій є необхідність пристосування до нових умов у процесі їхніх змін. Принципово його реалізують різними способами: зміною тільки властивостей, зміною тільки структури, або одночасною зміною властивостей і структури керованого об'єкта. Здатність нестаціонарної системи пристосовуватися до змін зовнішнього середовища або характеристик об'єкта називають *адаптацією*. Системи, що мають здатність адаптуватися до мінливих умов, прийнято називати адаптивними. Тут під нестаціонарною системою розуміють цілісний об'єкт, що складається з керованого об'єкта і системи управління, які є структурно взаємопов'язаними і функціонально взаємодіють для досягнення заданих цілей.

Отже, цей короткий аналіз показує, що в реальних умовах неповноти, неточності і суперечливості вихідної інформації ефективне функціонування сучасних складних систем можливе лише за наявності здатності до адаптації у процесі зміни наявних умов. Адаптація можлива тільки за необхідного рівня інформованості про властивості зовнішнього середовища і керованого об'єкта у процесі його функціонування. Звідси випливає, що задачі адаптації та оптимізації управління тісно взаємопов'язані із задачами адаптивного оптимального опрацювання інформації у разі зміни наявної ситуації. Такі задачі виходять за рамки підходів теорії управління класу У1. Розглянуті фактори стимулювали розвиток різних засобів та методів адаптивного управління і сприяли появі методів управління класів У2 і У3.

Водночас невпинне зростання обсягу і підвищення рівня вимог до сучасного виробництва ставить принципово нові, суттєво складніші теоретичні і практичні задачі управління. Поки що зроблено тільки перші кроки в теоретичному дослідженні найактуальніших проблем управління класів У4 і У5. Однак практичні задачі класу У4, зокрема задачі управління розвитком складних багаторівневих, багатопрофільних систем, розв'язують багато в чому інтуїтивно та емпірично вже кілька десятиліть. Класичним прикладом задач цього класу можна вважати розробку програм розвитку різних видів збройних сил. Такі задачі розв'язують у кожній незалежній державі, що приділяє належну увагу забезпеченню національної безпеки. В економіці подібні задачі виникають у будівництві та модернізації великих промислових підприємств із багатопрофільним виробництвом. Як приклад можна назвати хімічні комбінати, комбінати кольорової металургії тощо.

Задачі управління класу У5 є подальшим принциповим ускладненням задач класу У4. Воно полягає в тому, що під час розвитку керованого об'єкта принципово змінюється його зовнішня властивість — призначення, а отже, і цілі об'єкта. За таких умов задача виявляється принципово складнішою, ніж розробка самого об'єкта. Справді, розробник нового об'єкта має можливість вибору вигляду, структури, функцій, елементів кожного ієрархічного рівня й об'єкта загалом. У випадку управління призначенням ситуація, у якій розв'язують задачу, є принципово іншою. Об'єкт вже існує, має відлагоджені технології, систему постачання і збуту продукції, а також сформований колектив робітників та службовців із певним досвідом практичної діяльності у певному середовищі та профілі спеціальної професійної підготовки. Потрібно змінити в об'єкті головну властивість — його призначення, але водночас максимально зберегти всю наявну виробничу інфраструктуру і забезпечити її максимально ефективне використання у новій сфері практичної діяльності. Очевидно, що забезпечити ефективне і своєчасне розв'язання широкого кола організаційних, технологічних, економічних, науково-технічних, соціальних і багатьох інших проблем, що виникають у цій ситуації, можна лише за наявності їхнього системного узгодження за цілями, задачами, термінами, ресурсами, очікуваними результатами, а також за наявності багаторівневого управління.

10.3.2. Задача раціонального управління складною ієрархічною системою

Щоб оцінити всю складність задач системного управління класів У3, У4, У5, коротко розглянемо одну із задач класу У3. Вона належить до найпростіших, але має важливе практичне значення в реальних умовах експлуатації техногенно та екологічно

небезпечних об'єктів. Її розв'язують на етапі створення та випробування систем управління складними ієрархічними об'єктами.

Формулювання задачі раціонального управління складною ієрархічною системою за умов багатофакторних ризиків ґрунтується на результатах структурно-функціонального аналізу, розглянутого в розділі 8. Наведемо змістовне і математичне формулювання розглянутої задачі.

Змістовне формулювання задачі

Відомо: для складної ієрархічної системи визначені структури всіх рівнів, проектні рішення ФЕ всіх ієрархічних рівнів згідно з технічним завданням та вимоги до основних властивостей і показників управління процесами функціонування системи в заданих умовах, що визначені неповно і нечітко.

Потрібно: визначити вигляд і структуру системи управління, розробити проектні рішення ФЕ всіх ієрархічних рівнів з умов досягнення необхідної якості управління системою у прогнозованих штатних, позаштатних і критичних ситуаціях.

Математична постановка задачі

Відомо: для складної багаторівневої системи структурний взаємозв'язок ФЕ різних ієрархічних рівнів визначений у вигляді

$$f_q: V_Q \rightarrow \bigcup_{q=1}^Q V_q; \quad f_{qp}: V_q \rightarrow \bigcup_{p=1}^{P_q} V_{qp}, \quad (10.21)$$

$$f_{qp}^{-1}: \bigcup_{p=1}^{P_q} V_{qp} \rightarrow V_q; \quad f_q^{-1}: \bigcup_{q=1}^Q V_q \rightarrow V_Q, \quad (10.22)$$

де V_Q — множина ФЕ об'єкта загалом; V_q — множина ФЕ q -го ієрархічного рівня; V_{qp} — p -й ФЕ q -го ієрархічного рівня. Функціональний взаємозв'язок показників якості функціонування об'єкта загалом із параметрами ФЕ визначений у вигляді функції з монотонним включенням змінних:

$$\bar{K}_Q = \tilde{F}_Q(\bar{X}_Q, \tilde{F}_{Q-1}(\bar{X}_{Q-1}, \tilde{F}_{Q-2}(\dots \tilde{F}_l(\bar{X}_l, \tilde{F}_{l-1}(\dots \tilde{F}_1(\bar{X}_1 \dots)) \dots))), \quad (10.23)$$

де $\bar{K}_Q$ — вектор показників якості об'єкта; $\bar{X}_Q$ — вектор параметрів ФЕ вищого рівня ієрархічної структури системи (рівень об'єкта загалом); $\bar{X}_q$ — вектор параметрів ФЕ довільного q -го ієрархічного рівня, $q = 1, 2, \dots, l, \dots, Q$; $\bar{X}_1$ — вектор параметрів ФЕ нижнього ієрархічного рівня (наприклад, рівня модулів), $\tilde{F}_Q, \dots, \tilde{F}_l, \dots, \tilde{F}_1$ — функції взаємозв'язку показників ФЕ ієрархічних рівнів. Ці функції визначені неточно, нечітко, неповно.

Потрібно: побудувати таку послідовність перетворень

$$\Phi_q: W_Q \rightarrow \bigcup_{q=1}^{Q_q} W_q; \quad \Phi_{qp}: W_q \rightarrow \bigcup_{p=1}^{P_q} W_{qp}; \quad (10.24)$$

$$\Phi_{qp}^{-1}: \bigcup_{p=1}^{P_q} W_{qp} \rightarrow W_q; \quad \Phi_q^{-1}: \bigcup_{q=1}^{Q_q} W_q \rightarrow W_Q, \quad (10.25)$$

яка визначить структуру системи управління і параметри її функціональних елементів з умови досягнення необхідного рівня якості роботи об'єкта в будь-який момент часу $t \in [0, T]$ у прогнозованих ситуаціях ризику $S_k \in S_0, k = \overline{1, N}$.

У цьому формулюванні слід звернути увагу на взаємозв'язок співвідношень (10.21) і (10.22), а також (10.24) і (10.25). Виникає природне запитання: чому необхідно мати два види взаємозв'язку ФЕ ієрархічної структури. Перший вид взаємозв'язку визначають співвідношення (10.21) і (10.24), а другий — співвідношення (10.22) і (10.25). Практична необхідність випливає з реальних умов і прийомів розробки складних систем. Справа в тому, що в технічному завданні на розробку задають вимоги до об'єкта загалом. Замовника не цікавить, за якою структурою і з яких ФЕ буде побудовано об'єкт. Йому важливо, щоб виконувалися всі задані вимоги до об'єкта. Водночас конструктор повинен раціонально трансформувати загальні вимоги до об'єкта у вимоги до ФЕ кожного ієрархічного рівня проектованої системи. Для цього необхідно мати опис взаємозв'язку ФЕ у формі (10.21). Отже, співвідношення (10.21) є основою для реалізації процедури декомпозиції.

Необхідність взаємозв'язку ФЕ у формі (10.22) випливає з технології проектування реальних складних ієрархічних систем. Проектування системи починається з розробки ФЕ нижнього рівня (модулів або деталей) із подальшим переходом до проектування ФЕ вищого рівня та остаточного компонування об'єкта в цілому. Наприклад, для радіотехнічних систем різного призначення процедуру проектування виконують у такій послідовності: функціональний модуль (мікросхема) $\Rightarrow$ функціональний блок (підсилювач високої частоти) $\Rightarrow$ функціональний пристрій (приймач) $\Rightarrow$ функціональна система (приймний тракт як сукупність N приймачів, N приймальних антен та інших функціональних пристроїв) $\Rightarrow$ об'єкт загалом (радіорелейна станція). Отже, формула (10.22) є основою для реалізації процедури агрегування у системному аналізі.

Для системи управління співвідношення (10.24) аналогічне за призначенням до формули (10.21), а (10.25) — до формули (10.22). Ще одне зауваження: формули (10.21), (10.22) визначають структурний взаємозв'язок ФЕ об'єкта, а формула (10.23) — функціональний взаємозв'язок ФЕ через показники якості.

Загальна стратегія розв'язання задачі

Принципова особливість цієї задачі полягає в тому, що вона має одночасно властивості задачі СФА (вибір структури системи управління) і задачі системного аналізу багатofакторних ризиків (аналіз і мінімізація ризиків ситуації, забезпечення потрібної якості системи в заданих ситуаціях ризику). Цю особливість слід враховувати під час формування стратегії її розв'язання. Насамперед врахуємо, що ця задача у питаннях вибору структури системи і параметрів її ФЕ аналогічна задачі СФА, прийоми розв'язання якої описано у розділі 8. Тому розглянемо стратегію оптимізації керуючих впливів за умов багатofакторних ризиків.

За основу візьмемо співвідношення (10.23), що визначає взаємозв'язок показників якості об'єкта $\bar{K}_Q$ і параметрів $\bar{X}_q, q = 1, 2, \dots, l, \dots, Q$ ФЕ всіх ієрархічних рівнів. Потрібно перетворити це співвідношення для врахування факторів ризику і керуючого впливу. Для цього зобразимо зв'язок вектора показників якості з векторами параметрів ФЕ, факторів ризику і керуючого впливу в узагальненому вигляді:

$$\bar{K}_Q = \tilde{F}_Q(\bar{X}_Q, \tilde{F}_{Q-1}(\bar{X}_{Q-1}, \tilde{F}_{Q-2}(\dots \tilde{F}_l(\bar{X}_{l-1}(\dots \tilde{F}_1(\bar{X}_1) \dots))))), \quad (10.26)$$

де $\bar{\chi}_q$ — кортеж для q -го ієрархічного рівня складної ієрархічної системи, визначений співвідношенням

$$\bar{\chi}_q = \langle \bar{X}_q, \bar{u}_q, \bar{p}_q \rangle, \quad (10.27)$$

де $\bar{X}_q$ — вектор параметрів ФЕ q -го ієрархічного рівня; $\bar{u}_q$ — вектор управління; $\bar{p}_q$ — вектор факторів ризику.

Врахуємо, що всі величини, визначені співвідношенням (10.27), є функціями від часу і у фіксований момент $t = t_r$ приймають значення

$$\bar{X}_q^r = \bar{X}_q(t_r); \quad \bar{u}_q^r = \bar{u}_q(t_r); \quad \bar{p}_q^r = \bar{p}_q(t_r). \quad (10.28)$$

У загальному випадку для реальних складних систем задача управління як для об'єкта в цілому, так і для кожного q -го рівня його ієрархічної структури полягає в одночасному досягненні двох умов:

- ♦ забезпечити стабільне значення деяких показників якості $\bar{K}_{1q}$ у будь-який фіксований момент часу t_r заданого інтервалу $[0, T]$;
- ♦ забезпечити зміну в часі деяких показників якості K_{2q} за заданими програмами.

Перша умова в ідеальному випадку означає $\bar{K}_{1q} = \text{const} \quad \forall t_r \in [0, T]$. У реальних умовах допускають певну зміну показників за впливом дестабілізуючих факторів ризику на q -му рівні і коригувальним впливом в заданому інтервалі. Цю умову визначає співвідношення

$$\bar{K}_{1q}(\bar{u}_q^r, \bar{p}_q^r, t_r) \in [\bar{K}_{1q}^+, \bar{K}_{1q}^-] \quad \forall t_r \in [0, T], \quad q = \overline{1, Q}, \quad (10.29)$$

де $\bar{K}_{1q}^+, \bar{K}_{1q}^-$ — задані значення показників якості.

Друга умова в ідеальному випадку означає, що кожна компонента вектора $\bar{K}_{2q}$ є заданою функцією часу. В реальних умовах за впливом дестабілізуючих факторів ризику і програмним керуючим впливом у будь-який момент часу $t_r \in [0, T]$ потрібно забезпечити виконання умови

$$\bar{K}_{2q}(\bar{u}_q^r, \bar{p}_q^r, t_r) \in [\bar{K}_{2q}^+(t_r), \bar{K}_{2q}^-(t_r)] \quad \forall t_r \in [0, T], \quad q = \overline{1, Q}, \quad (10.30)$$

де $\bar{K}_{2q}^+(t_r), \bar{K}_{2q}^-(t_r)$ — задані відповідно верхня і нижня межі допустимого інтервалу відхилень функції $\bar{K}_{2q}(t_r)$ у момент t_r .

Для обґрунтування стратегії опишемо докладніше процедуру управління на прикладі дворівневої системи. У цьому випадку показники якості $\bar{K}_Q$ визначає співвідношення

$$\bar{K}_Q = \tilde{F}_Q(\bar{\chi}_Q, \tilde{F}_1(\bar{\chi}_1)). \quad (10.31)$$

Тут на підставі (10.27) для нижчого рівня $q = 1$ і вищого рівня $q = Q$ маємо:

$$\bar{\chi}_q = \{\bar{X}_q, \bar{u}_q, \bar{p}_q\}, \quad \bar{\chi}_1 = \{\bar{X}_1, \bar{u}_1, \bar{p}_1\}. \quad (10.32)$$

Визначимо управління $\bar{u}_Q^*$ і $\bar{u}_1^*$ з умови (10.30), покладаючи відомими з розв'язання задачі СФА зміни в часі показників якості і параметрів у вигляді:

$$\bar{K}_Q = \bar{K}_Q^*(t); \quad \bar{K}_1 = \bar{K}_1^*(t); \quad (10.33)$$

$$\bar{X}_Q = \bar{X}_Q^*(t); \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_1^*(t). \quad (10.34)$$

За початковий розв'язок цієї задачі візьмемо такий розв'язок, для якого немає факторів ризику, тоді $\bar{p}_Q = 0$; $\bar{p}_1 = 0$. У цьому разі з (10.31) з урахуванням (10.32) одержуємо:

$$\bar{K}_Q = \bar{F}_Q(\bar{X}_Q, \bar{u}_Q, \bar{F}_1(\bar{X}_1, \bar{u}_1)). \quad (10.35)$$

Побудуємо на інтервалі $[0, T]$ послідовність дискретних значень

$$t_i = t_0 + i\Delta t; \quad \Delta t = \frac{T}{M_0}; \quad i = \overline{0, M_0}; \quad t_0 = 0; \quad t_{M_0} = T. \quad (10.36)$$

Тоді задача визначення структурного управління зводиться до забезпечення рівності значення $\bar{K}_Q$, визначеного співвідношенням (10.35), значенню заданої функції $K_Q^*(t)$ для кожного моменту t_i , визначеного співвідношенням (10.36). У підсумку одержуємо систему рівнянь:

$$\bar{F}_Q(\bar{X}_Q(t_i), \bar{u}_Q(t_i)), \bar{F}_1(\bar{X}_1(t_i), \bar{u}_1(t_i)) = K_Q^*(t_i), \quad i = \overline{0, M_0}. \quad (10.37)$$

Тут невідомими є компоненти векторів управління $\bar{u}_Q(t_i)$, $\bar{u}_1(t_i)$, а інші змінні відомі, оскільки відповідні функції знайдено в задачі СФА.

Розв'язання системи (10.37) визначає дискретні значення шуканих функцій управління в точках, визначених (10.36). На основі розв'язку системи (10.37) можна побудувати неперервні функції $\bar{u}_Q(t)$, $\bar{u}_1(t)$, використовуючи методи апроксимації. У системі рівнянь (10.37) кількість компонент векторів $\bar{X}_Q$, $\bar{X}_1$, а також $\bar{u}_Q$, $\bar{u}_1$ визначено, причому кількість невідомих N дорівнює сумі кількості компонент векторів $\bar{u}_Q$ і $\bar{u}_1$. Кількість рівнянь M визначає кількість дискретних значень у (10.34) і дорівнює $M = M_0 + 1$. Оскільки їх кількість вибирають у процесі розв'язання задачі, то слід враховувати такі особливості:

- ♦ кількість рівнянь M доцільно вибрати як $M \geq N$, тобто такою, що більше або дорівнює кількості невідомих;
- ♦ зі збільшенням M зменшується похибка апроксимації функцій $\bar{u}_Q(t)$ та $\bar{u}_1(t)$ за дискретними значеннями $\bar{u}_Q(t_i)$ і $\bar{u}_1(t_i)$, $i = \overline{0, M_0}$, але зростає обчислювальна складність системи (10.37).

Вибір методу розв'язання системи (10.37) залежить від розмірності задачі, співвідношення між M і N та особливостей функцій в (10.37). Далі, на підставі (10.26) у функції (10.35) потрібно врахувати фактори ризику $\bar{p}_Q(t)$, $\bar{p}_1(t)$ і звести задачу уточнення функцій управління за цих умов до однієї з відомих форм задачі розкриття невизначеності ситуацій або до задачі аналізу мінімізації ступеня і рівня багатфакторних ризиків.

Відшукування функцій управління у випадках, коли загальна кількість рівнів $Q > 2$, можна звести до розв'язання послідовності задач для дворівневої системи або безпосередньо до системи вигляду (10.37), але з кількістю змінних, яка дорівнює сумі компонент усіх вектор-функцій управління $\bar{u}_q(t)$, $q = \overline{1, Q}$.

Отже, стратегію управління складною ієрархічною системою, для якої розв'язано задачу СФА, можна звести до послідовності таких задач.

1. Розв'язання системи нелінійних рівнянь вигляду (10.37).
2. Апроксимація шуканих функцій за їхніми дискретними значеннями — результатами розв'язання попередньої задачі.

3. Врахування факторів ризику на основі прийомів розкриття невизначеності ситуацій або зведення до задачі аналізу багатфакторних ризиків.

4. Розробка проектних рішень ФЕ управління.

На практиці не завжди можна виконанням єдиної ітерації забезпечити одержання прийняттого розв'язку задачі системного управління. Отримані функції управління можуть потребувати уточнення структури і функцій деяких ФЕ для певних ієрархічних рівнів об'єкта або його системи управління. Це потребує виконання нової ітерації в задачі СФА об'єкта, а отже, уточнення розв'язків і в задачах управління досліджуваним об'єктом.

Розв'язання задач СФА і управління дає змогу перейти до наступної задачі, яка полягає в техніко-економічному аналізі функціонування і працездатності складних об'єктів.

10.4. Техніко-економічний аналіз системного управління складними об'єктами

Техніко-економічний аналіз є завершальною задачею в послідовності розв'язання системних задач дослідження властивостей, структури, працездатності і управління складними ієрархічними системами за умов багатфакторних ризиків.

У попередніх розділах розглянуто задачі, розв'язки яких визначають вигляд та структуру об'єкта і системи його управління, а також проектні рішення ФЕ всіх ієрархічних рівнів. Розв'язок розглядуваної задачі має показати, наскільки раціонально розв'язано попередні задачі через зіставлення одержуваного ефекту і витрат ресурсів на його досягнення. Практична значущість задачі очевидна: тільки зіставлення ефективності і витрат дає змогу оцінити такі найважливіші характеристики розроблюваних систем, як техніко-економічний рівень виробництва складних об'єктів чи рівень ефективності та конкурентоспроможності виробленої продукції.

Формулювання задачі техніко-економічного аналізу системного управління за умов багатфакторних ризиків визначає загальна мета системного дослідження цього класу складних об'єктів у процесі їхнього проектування, виробництва, експлуатації та управління в реальних умовах багатфакторних ризиків.

Змістовне формулювання задачі

Відомо: структура і проектні рішення ФЕ всіх рівнів складної ієрархічної системи. Визначено властивості і показники якості об'єкта, структура і проектні рішення багаторівневої системи управління об'єктом, а також проектні рішення та якісні показники ФЕ системи управління.

Потрібно: визначити техніко-економічну ефективність системного управління досліджуваним об'єктом за умов багатфакторних ризиків.

Математична постановка задачі впливає із загального функціонального взаємозв'язку показників якості об'єкта в цілому і параметрів ФЕ всіх ієрархічних рівнів, факторів ризику та керуючих впливів системи управління, а також взаємозв'язків вартості комплектуючих виробів, замовлених модулів та конструкцій ФЕ всіх ієрархічних рівнів із технічними показниками проектних рішень.

Математична постановка задачі

Відомо: для складної багаторівневої ієрархічної системи взаємозв'язки показників якості з параметрами ФЕ об'єкта із технічних засобів системи управління у вигляді

$$\bar{K}_Q = \bar{F}_Q(\bar{X}_Q, \bar{F}_{Q-1}(\bar{X}_{Q-1}, \bar{F}_{Q-2}(\dots \bar{F}_1(\bar{X}_1 \dots))), \quad (10.38)$$

де $\bar{X}_q$ — кортеж для q -го ($q = 1, 2, \dots, l, \dots, Q$) ієрархічного рівня складної системи, заданий співвідношенням:

$$\bar{X}_q = \langle \bar{X}_q, \bar{u}_q, \bar{p}_q \rangle,$$

де $\bar{X}_q$ — вектор параметрів ФЕ q -го ієрархічного рівня; $\bar{u}_q$ — вектор управління; $\bar{p}_q$ — вектор факторів ризику.

Потрібно: знайти показники, які дають змогу визначати в узагальненому вигляді результативність функціонування об'єкта; встановити їхню залежність від параметрів ФЕ; визначити взаємозв'язок загальної вартості проєктованого виробу і технічних, конструктивних та технологічних параметрів ФЕ кожного q -го ієрархічного рівня власне об'єкта і системи управління для нього; визначити техніко-економічну ефективність функціонування об'єкта в цілому за умов багатofакторних ризиків.

Стратегія розв'язання задачі

Загальна стратегія оцінювання техніко-економічної ефективності системного управління складними об'єктами за умов багатofакторних ризиків ґрунтується на прийомах і методах:

- ♦ функціонально-вартісного аналізу;
- ♦ управління функціонуванням складних об'єктів;
- ♦ аналізу і мінімізації ризиків;
- ♦ системного управління безпекою і працездатністю.

Вважаємо, що розглядати принципи, прийоми і методи функціонально-вартісного аналізу немає потреби, оскільки вони є предметом вивчення спеціальних дисциплін економічного напрямку (мікроекономіка, економічна ефективність виробництва, економічні розрахунки у проєктуванні тощо). Звернімо увагу лише на загальну ідею одержання параметрів і характеристик, які потрібно визначити відповідно до математичного формулювання задачі.

Насамперед встановлюють взаємозв'язок вектора управління $\bar{u}_q$ з параметрами ФЕ системи управління:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_Q &= \bar{f}_{u_Q}(\bar{u}_Q, \bar{Y}_{Q-1}); \\ \bar{Y}_{Q-1} &= \bar{f}_{u_{Q-1}}(\bar{u}_{Q-1}, \bar{Y}_{Q-2}); \\ &\dots \dots \dots \\ \bar{Y}_l &= \bar{f}_{u_l}(\bar{u}_l, \bar{Y}_{l-1}); \\ &\dots \dots \dots \\ \bar{Y}_2 &= \bar{f}_{u_2}(\bar{u}_2, \bar{Y}_1); \\ \bar{Y}_1 &= \bar{f}_{u_1}(\bar{u}_1), \end{aligned} \quad (10.39)$$

де $\bar{Y}_q$ ($q = 1, 2, \dots, l, \dots, Q$) — вектор параметрів ФЕ q -го ієрархічного рівня системи управління; $\bar{u}_q$ — вектор-функція керуючих впливів на q -му ієрархічному рівні.

Потім встановлюють взаємозв'язок вартості розробки, виробництва та експлуатації ФЕ q -го ієрархічного рівня, параметрів власне об'єкта і його системи управління на відповідному рівні у вигляді:

$$C_c = \tilde{f}_c(\bar{X}_Q, \tilde{f}_{cQ}(\bar{X}_{Q-1}, \tilde{f}_{cQ-1}(\dots \tilde{f}_{c1}(\bar{X}_1, \dots(\tilde{f}_{c1}, (\bar{X}_1) \dots))))); \quad (10.40)$$

$$C_u = \tilde{f}_u(\bar{Y}_Q, \tilde{f}_{uQ}(\bar{Y}_{Q-1}, \tilde{f}_{uQ-1}(\dots \tilde{f}_{u1}(\bar{Y}_1, \dots(\tilde{f}_{u1}, (\bar{Y}_1) \dots))))). \quad (10.41)$$

Співвідношення (10.40) встановлює взаємозв'язок вартості C_c і параметрів ФЕ всіх ієрархічних рівнів керованого об'єкта, а співвідношення (10.41) — аналогічний взаємозв'язок для системи управління.

Загальну вартість об'єкта C_Σ як функцію вартості ФЕ власне системи C_c і системи управління C_u в загальному випадку визначають у вигляді

$$C_\Sigma = f_\Sigma(C_c, C_u). \quad (10.42)$$

Результативність функціонування об'єкта як узагальнену оцінку результатів його працездатності за певний період визначають через деякий узагальнений показник, який у кваліметрії прийнято називати *інтегральним показником якості об'єкта*. Його виражають через показники якості у вигляді

$$K_\Sigma = F_\Sigma(\bar{K}_Q). \quad (10.43)$$

Тоді *техніко-економічну ефективність*, визначену як відношення узагальненої результативності функціонування об'єкта до загальних витрат за час життєвого циклу об'єкта, можна зобразити у формі

$$E_\Sigma = \frac{K_\Sigma}{C_\Sigma}. \quad (10.44)$$

Слід звернути увагу на одну важливу особливість визначення загальних витрат. Витрати на етапі розробки і виробництва об'єкта починають окуповуватися тільки на етапі його експлуатації. Отже, фінансові, матеріальні та інші ресурси, вкладені на етапах розробки і виробництва об'єкта, певний час, що дорівнює тривалості цих етапів, є «замороженими» і не дають доходу. Це призводить до збільшення загальних витрат на момент початку експлуатації. Таку обставину враховують, використовуючи певний коефіцієнт, який зумовлений тривалістю «заморожування» ресурсів. Наприклад, для цього можна використати наближене співвідношення

$$C_t = \frac{C_0}{(1-E)^t},$$

де C_0 — розмір витрати на початок розробки ($t=0$); C_t — розмір витрати через t років; E — нормативний коефіцієнт, який часто дорівнює 0,1, ..., 0,15.

Коротко стратегію оцінювання техніко-економічної ефективності можна сформулювати так.

1. Визначають загальну вартість виробу, що враховує витрати на розробку, виробництво та експлуатацію технічної системи разом із системою управління і системою технічного діагностування.
2. Визначають загальну результативність функціонування складного об'єкта на підставі інтегрального показника, вираженого через показники працездатності і яко-

сті функціонування об'єкта з урахуванням витрат на усунення позаштатних ситуацій, відмов і несправностей.

3. Оцінюють техніко-економічну ефективність як відношення результативності до витрат.
4. Перевіряють ступінь відповідності техніко-економічної ефективності вимогам, заданим у ТЗ.
5. Визначають ступінь і рівень ризику на основі загальних принципів системного аналізу ризику.
6. Оцінюють рівень виконання вимог за техніко-економічною ефективністю; якщо вимоги не виконуються, починають чергову ітерацію оцінювання та вибору ФЕ і розв'язання задачі СФА.

Одержання необхідних показників результативності і техніко-економічної ефективності роботи складного об'єкта за даними функціонування за апріорно встановлений термін дає змогу вважати завершеним розв'язання загальної задачі системного аналізу складної ієрархічної системи.

Слід зазначити, що розглянута вище стратегія оцінювання результативності і техніко-економічної ефективності функціонування складного об'єкта є найпростішим і не враховує цілої низки важливих факторів. Більш загальне уявлення про системне оцінювання техніко-економічної ефективності складних об'єктів можна одержати на прикладі працездатності сучасних інформаційно-телекомунікаційних систем [164, 165].

Стратегія техніко-економічного аналізу

Техніко-економічний аналіз є найважливішою складовою системного аналізу результативності функціонування складних об'єктів різного призначення.

Очевидно, що оцінювання впливу багатьох різноманітних факторів і реалізації основних принципів забезпечення техніко-економічної ефективності потребує розроблення певної стратегії оптимізації властивостей і можливостей складних об'єктів. Можна навести два найпоширеніші формулювання задачі оптимізації. Перше формулювання полягає у розробленні стратегії вибору раціонального компромісу суперечливих вимог для досягнення максимального рівня техніко-економічної ефективності за заданих обмежень на показники результативності. Друге формулювання потребує забезпечення максимальної результативності за заданих обмежень техніко-економічної ефективності.

Незважаючи на певну відмінність змісту і прийнятих цільових функцій, ці задачі мають одну практично важливу спільну властивість. Її суть полягає в тому, що тільки у разі реалізації системності техніко-економічної ефективності можна забезпечити високу достовірність одержуваної оцінки. На перший погляд міркування про системність аналізу ефективності видається абсурдним. Здавалось би, все дуже просто: потрібно збільшувати чисельник і зменшувати знаменник у формулі (10.44) — і необхідний рівень достовірності та результативності оцінки буде гарантовано. Зменшити знаменник — це означає, що треба зменшити витрати на кожному етапі життєвого циклу виробу. Однак досвід свідчить, що настільки прямолінійний підхід може призвести до абсурдних результатів. Для розуміння цього слід звернути увагу на одну особливість прийнятого показника формули (10.44). Величина E_x залишається постійною, якщо одночасно пропорційно збільшувати або зменшувати чисельник і знаменник у (10.44). І далі, якщо результативність і витрати змінюватимуться не пропорційно, то можна одержати результат, дуже цікавий математично, але парадоксальний практично. А саме: можна строго математично довести, що ефективність звичайної лопати суттєво

вища від ефективності сучасного екскаватора. Це зрозуміло й фізично: для лопати суттєво менша тривалість етапів розробки, підготовки та освоєння виробництва, значно простіше автоматизувати виробництво, і, що цілком зрозуміло, майже немає витрат на експлуатацію.

Парадокс одержаного результату полягає в тому, що в цьому разі оцінювання проводять із погляду виробника виробу і не враховують оцінювання результативності з погляду споживача. Тут не враховано так само й те, що виконання певного досить значного обсягу робіт потребуватиме від споживача непорівнянно різних часових витрат. З урахуванням цього фактора результат природно буде протилежним. У разі врахування результативності з погляду споживача також можна показати, що техніко-економічна ефективність лопати вища за техніко-економічну ефективність сучасного екскаватора. Цей результат очевидний для малих обсягів робіт. Отже, такий елементарний приклад свідчить, що для аналізу техніко-економічної ефективності суттєве значення мають умови використання виробу. Одні й ті самі вироби можуть мати суттєво різну ефективність у різних умовах.

Тепер слід звернути увагу на ще одну важливу особливість показника (10.44). Суть її полягає в тому, що значення результативності є нелінійною і заздалегідь невідомою функцією від витрат. І насамперед, як показує світовий досвід, найбільшої окупності досягають для витрат найраніших етапів життєвого циклу, і передусім для вибору вигляду, принципу дії та інших вихідних передумов проектування виробу. Аналіз цієї особливості має свої парадокси. Наприклад, автомобільні фірми Японії, вклавши незрівнянно великі кошти у технологічне обладнання автомобільного виробництва і забезпечивши його майже повну автоматизацію, випередили всі провідні автомобільні фірми світу одночасно за двома найважливішими показниками: досягли значно вищої якості і комфортності за суттєво нижчої ціни. Японія, яка до 1965 року не виготовляла жодного легкового автомобіля, до 1980 року стала абсолютним лідером автомобілебудування.

Цей приклад наочно ілюструє, що раціональне збільшення витрат може дати суттєво більший ефект, ніж недостатньо обґрунтована економіка. Звідси випливає потреба багатопланового системного аналізу врахування факторів, що визначають різні аспекти техніко-економічної ефективності виробу.

Наведемо лише ті напрями, в яких потрібно реалізувати системність у техніко-економічному аналізі.

1. Системність витрат.

- ♦ Системність витрат за структурою об'єкта.
- ♦ Системність витрат за життєвим циклом об'єкта.
- ♦ Системність аналізу причин і факторів, що зумовлюють збільшення витрат.
- ♦ Системність аналізу причин і факторів, що сприяють зниженню витрат.
- ♦ Системність оцінювання ризиків під час життєвого циклу складних об'єктів.

2. Системність аналізу результативності.

- ♦ Системність ефективності рішень за структурою об'єкта.
- ♦ Системність ефективності рішень за життєвим циклом об'єкта.
- ♦ Системність умов і факторів підвищення ефективності.
- ♦ Системність умов і факторів зниження ефективності.
- ♦ Системність умов і факторів зменшення багатofакторних ризиків.

3. Системність аналізу умов застосування.

- ♦ Системність техніко-економічної ефективності.
- ♦ Системність ефективності виробництва і управління.
- ♦ Системність аналізу можливостей ринку збуту і попиту.
- ♦ Системність аналізу розвитку конкуренції.
- ♦ Системність оцінювання розвитку виробництва.

10.5. Приклад розв'язання задачі системного управління працездатністю і безпекою авіаційного двигуна

Розглянемо розв'язання задачі управління безпекою та функціонуванням складної технічної системи у процесі переходу штатного режиму у позаштатний на прикладі авіаційного двигуна [134].

Змістовне формулювання задачі

Задачу управління безпекою доцільно розглядати як системну задачу виявлення факторів ризику, вплив яких може спричинити позаштатні ситуації. Слід враховувати, що управління безпекою і функціонуванням виконують за умов неповноти і невизначеності динаміки переходу штатного режиму у позаштатний. Штатний режим не є стаціонарним і суттєво змінюється на різних етапах робочого циклу системи. Таким є характер роботи авіаційних двигунів, режими яких на етапах зльоту, крейсерського польоту і посадки суттєво різняться. Найбільш критичними і піддатливими до впливу факторів ризику є режими зльоту і посадки. Ці режими за своєю фізичною сутністю є перехідними між двома стаціонарними режимами: перший — неробочий режим, коли літак на стоянці; другий — крейсерський режим, коли політ проходить на заданій висоті, і двигун працює в постійному режимі впродовж польоту.

Штатний режим функціонування містить кілька основних етапів. Визначальними є: основний — стаціонарний режим крейсерського польоту, перехідні — нестаціонарні режими зльоту, посадки. Параметри двигуна змінюються синхронно у процесі переходу від одного режиму до іншого та у перехідних режимах. До них належать: тяга, маса пального, тиск мастила, подача повітря тощо. Зміни цих параметрів у різних режимах як функцій часу залежать від цілеспрямованих дій системи управління і некерованих, неконтрольованих впливів зовнішніх факторів кліматичних, географічних, геологічних, технологічних та інших процесів [58, 122, 134, 196, 198, 201, 203, 244].

Загальна характеристика властивостей та особливостей досліджуваного об'єкта

Відомо: основні властивості, показники і характер штатного режиму. Режим визначають такі основні етапи:

1. $[t_0, t_1]$ — запуск і прогрів двигуна.
2. $[t_1, t_2]$ — підготовка до зльоту, ввімкнення і перевірка режиму переходу від стандартного рівня потужності до форсажу двигуна.

3. $[t_2, t_3]$ — виконання зльоту у режимі форсажу двигуна, що характеризується збільшенням його потужності в 1,2–1,3 рази порівняно зі стандартною потужністю.
4. $[t_3, t_4]$ — процес переходу від режиму форсажу до режиму крейсерського польоту, характеризується зменшенням потужності двигуна до рівня 0,75–0,85 від стандартних значень.
5. $[t_4, t_5]$ — крейсерський політ, упродовж якого основні показники функціонування двигуна становлять 0,75–0,85 від стандартних значень.

Етапи 6–8 за основними властивостями багато в чому аналогічні до етапів зльоту, тому подамо їх у дещо спрощеному вигляді.

6. Процес переходу від крейсерського режиму до режиму посадки.
7. Режим посадки.
8. Режим зупину двигунів, що завершується їхнім переходом у режим очікування і підготовки до наступного запуску.

Типові етапи функціонування авіаційного двигуна подано на рис. 10.5.

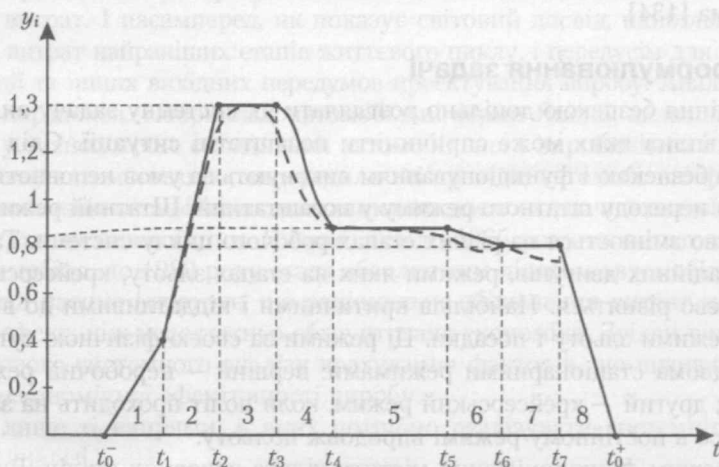


Рис. 10.5. Типові етапи функціонування авіаційного двигуна

Відомі характеристики та особливості режимів, що визначають такі властивості і практично прийнятні припущення.

1. Кожний етап характеризується певною тривалістю, початковим і кінцевим значеннями кожного показника y_i , визначеними відповідно в моменти початку і закінчення періоду. Зміни y_i в межах етапу визначає відповідна модель. Тривалість етапу, початкові та кінцеві значення кожної функції задають апріорно.
2. Усі показники y_i є синхронними і синфазними. Ці властивості полягають у тому, що під впливом різних факторів показники одночасно збільшуються або зменшуються без часової затримки.
3. Керуючий вплив $U = (U_j | j = \overline{1, m})$ безінерційний, тобто немає часової затримки між впливом управління і реакцією об'єкта.
4. Фактори ризику $\bar{p} = (p_q | q = \overline{1, n_q})$ змінюють ступінь впливу на двигуни в часі, і зі збільшенням часу впливу зростає ступінь і рівень ризику.

5. Керуючий вплив може сповільнити вплив факторів ризику або припинити їх негативний вплив на керований об'єкт за умови, що темпи керуючого впливу перевищуватимуть темпи зростання рівня впливу факторів ризику.
6. Припинити негативний вплив факторів ризику можна лише за умови, що рішення розроблене, прийняте і реалізоване до настання критичного моменту часу T_{cr} , у який вплив факторів ризику призводить до необоротних наслідків у вигляді аварії чи катастрофи.

Розпізнавання позаштатних ситуацій розглядатимемо на основі зазначених властивостей та особливостей як задачу виявлення факторів ризику, вплив яких може спричинити позаштатну ситуацію. Врахуємо основні відмінності штатного і позаштатного режимів та їхні математичні описи, наведені у розділі 9.

Математична постановка задачі

Відомо: штатний режим функціонування об'єкта характеризує множина

$$Y = \{y_i \mid y_i^- \leq y_i \leq y_i^+, i \in N_0, N_0 = \overline{1, n_0}\}. \quad (10.45)$$

Значення показників $y_i \in Y$ функціонування об'єкта обмежені впливом системи управління $\bar{U} = (U_j, j = \overline{1, J_0})$ і випадкових впливів факторів ризику $\bar{p} = (p_q \mid q = \overline{1, n_q})$. Залежність показників від впливу системи управління і випадкових впливів факторів ризику визначає співвідношення

$$y_i = f_i(\bar{U}, \bar{p}), \quad (10.46)$$

де $f_i(\bar{U}, \bar{p})$ — невідомі функції, які потрібно визначити за дискретними даними системи діагностування.

У відомі дискретні моменти часу $t_k = t_0 + k\Delta t$ вимірюють параметри y_i за відомих значень U_j і невідомих p_q . Результати вимірювання подано у вигляді скінченної вибірки спостережень за період $[t_0, t_{k_0}]$ та скінченної вибірки спостережень за період $[t_{k_1}, t_{k_0}]$, де $t_0 < t_{k_1} < t_{k_0}$. Вибірki зобразимо у вигляді масивів

$$B_0 = \{\langle \bar{y}(t_k), \bar{U}(t_k) \rangle \mid t_k = t_0 + k\Delta t; k = \overline{0, k_0}\}; \quad (10.47)$$

$$B_{k_1} = \{\langle \bar{y}(t_k), \bar{U}(t_k) \rangle \mid t_k = t_0 + \hat{k}\Delta t; \hat{k} = \overline{k_1, k_0}\}, \quad (10.48)$$

де $\bar{y} = (y_i \mid i = \overline{1, n_0})$.

Існує множина $\hat{Y}$ динамічно синхронних показників

$$\hat{Y} = \{\hat{y}_{i_1} \mid \langle U_{j_1} \uparrow, j_1 \in \hat{M}_1 \rangle \Rightarrow \langle \hat{y}_{i_1} \uparrow, i_1 \in \hat{N}_1 \rangle\}; \quad (10.49)$$

$$\hat{y}_{i_1} \subseteq Y, \quad \hat{M}_1 = \overline{1, J_0}; \quad j \leq J_0; \quad \hat{N}_1 \subseteq N_0; \quad \hat{N}_1 = \overline{1, n_1}, \quad n_1 \leq n_0.$$

Відомі в момент часу t_0 значення всіх компонент вектора управління

$$\bar{U}_0 = \{U_j^0 \mid U_j^0 = U_j(t_0)\}, \quad j = \overline{1, J_0}. \quad (10.50)$$

та значення показників штатного режиму за відсутності впливу неконтрольованих факторів ризику

$$\bar{y}_0 = \{y_i^0 \mid y_i^0 = \hat{f}(\bar{U}_0); y_i^0 \in Y; i = \overline{1, n_0}\}. \quad (10.51)$$

Для певного терміну експлуатації $\tilde{T} = [t_0; t]$ задано допустимі відхилення параметрів y_i за впливом неконтрольованих факторів у вигляді обмежень

$$y_i \leq \bar{y}_i^- < \bar{y}_i^+ \leq y_i^+.$$

Якщо ця умова одночасно не виконується для кількох синхронних показників $\hat{y}_{i_1} \in \hat{Y}$ та $\hat{y}_{i_2} \in \hat{Y}$, то ситуація позаштатна. Формальну умову для позаштатної ситуації опишемо співвідношенням

$$\begin{aligned} & \{[(\hat{y}_{i_1} \in \hat{Y})] \wedge [(\hat{y}_{i_1} < y_{i_1}^-) \vee (y_{i_1}^+ < \hat{y}_{i_1})]\} \wedge \\ & \wedge \{[(\hat{y}_{i_2} \in \hat{Y})] \wedge [(\hat{y}_{i_2} < y_{i_2}^-) \vee (y_{i_2}^+ < \hat{y}_{i_2})]\}. \end{aligned} \quad (10.52)$$

Потрібно: розпізнати позаштатну ситуацію за вибірками B_0 і B_k ; визначити у кожний момент t_k ступінь і рівень ризику та виявити момент і темпи можливого переходу штатного режиму у позаштатний.

Режими функціонування об'єкта мають такі властивості.

1. Кількість показників $\hat{y}_{i_1} \in \hat{Y}$; $\hat{y}_{i_2} \in \hat{Y}$; $\langle i_1; i_2 \rangle \in \hat{N}_1$; $N_1 = \{i \mid i = \overline{1, n_1}\}$ об'єкта обмежена: $n_0 = 2$; $i_1 = 1$; $i_2 = 2$. Показники є динамічно синхронними та залежними від часу ($\hat{y}_{i_1} = y_1(t)$, $\hat{y}_{i_2} = y_2(t)$) і відповідають умові (10.49). Максимальні зміни відбуваються за перехідних режимів етапів 1 і 8, у яких найімовірніші умови (10.52). Межі зміни показників для цих етапів задано:

$$y_1[t_0] = 0; \quad y_1[t_k] = 0,45; \quad y_2[t_0] = 0; \quad y_2[t_k] = 0,35.$$

Тут і далі окремі значення показників нормовані до їхніх загальних значень за період польоту.

2. Режими змінює система управління, показники $U_j \in \bar{U}$; $\bar{U} = (U_j, j = \overline{1, J_0})$ якої є функціями часу ($U_j = U_j(t)$). У момент часу t_0 виконуються умови (10.50) і (10.51). Задано $J_0 = 3$, функції $\langle U_1(t), U_2(t), U_3(t) \rangle \in \bar{U}$ обмежені і мають вигляд:

$$\begin{aligned} 0 & \leq U_1(t) \leq 1; \quad U_1(t) = d_{10} + d_{11}t + d_{12}t^2; \\ 0 & \leq U_2(t) \leq 0,7; \quad U_2(t) = d_{20} + d_{21}t; \\ 0 & \leq U_3(t) \leq 0,5; \quad U_3(t) = d_{30} + d_{31}t + d_{32}t^2. \end{aligned} \quad (10.53)$$

3. У системі в певні дискретні моменти часу $t_k = t_0 + k\Delta t$ вимірюють параметри $y_i = y_i[t_k]$ за відомих значень $U_j = U_j[t_k]$ і невідомих значень ρ_q . Результати вимірювань зображають і формують у вигляді (10.47) і (10.48).

Відомо, що інтервал вимірювань параметрів становить у хвилинах термін $t \in [0; 0,3]$. У межах цього інтервалу формують його дискретний аналог, який задовольняє такі умови: $k = \overline{1; 11}$, якщо $k = 1$; $t = t_0 = 0$, якщо $k = k_0 = 11$, $t = t_{k_0} = 0,3$. У процесі

технічного діагностування формують послідовність дискретних інтервалів за період польоту, яка складається з інтервалів усіх етапів від 1 до 8.

4. На основі дискретних інтервалів формують значення функцій $\langle U_1(t), U_2(t), U_3(t) \rangle \in \bar{U}$, заданих співвідношеннями (10.53). Значення функцій визначають умови

$$\begin{aligned} U_1(t_0) &= 0; & U_1(0, 3) &= 1; & U_1(0, 15) &= 0, 7; \\ U_3(t_0) &= 0; & U_3(0, 3) &= 0, 5; & U_3(0, 2) &= 0, 4; \\ U_2(t_0) &= 0; & U_2(0, 3) &= 0, 7. \end{aligned} \quad (10.54)$$

5. Під час аналізу впливу факторів ризику на досліджуваний об'єкт враховують такі їхні властивості та особливості:

- Фактори ризику $\rho = (\rho_q | q = \overline{1, n_q})$ незалежні і змінюються за випадковими законами, розподіл яких апіорно невідомий.
- Фактори ризику можуть одночасно впливати на один чи кілька показників або на всі показники y_i .
- Якщо за впливу факторів ризику одночасно синхронно і синфазно змінюються значення хоча б двох показників y_i , які система діагностування виявляє протягом кількох вимірювань, то це означає, що досліджуваний об'єкт переходить зі штатного режиму у позаштатну ситуацію.

6. На підставі зазначених умов, властивостей та особливостей враховують впливи факторів ризику на досліджуваний об'єкт. У разі впливу факторів ризику значення показника y_i визначатиме величина $\tilde{y}_i$. У момент t_k показник $\tilde{y}_i[t_k]$ визначає співвідношення

$$\tilde{y}_i[t_k] = \frac{1}{J_0} \sum_{j=1}^{J_0} \tilde{b}_{ij} \sum_{r=0}^{R_j} a_{jr} T_r^*(U_j); \quad \tilde{b}_{ij} = b_{ij} F_i(\rho_{qk}), \quad (10.55)$$

де величина $\rho_{qk} = \rho_q[t_k]$ визначає значення q -го фактора ризику в момент t_k . Показник b_{ij} характеризує рівень впливу k -го фактора ризику на показник y_i досліджуваного об'єкта в момент t_k , здійснюваний дією на показник U_j управління об'єктом. Задано також граничні значення b_{ij} : для $i = 1; j = \overline{1, 3} \Rightarrow b_{11} = 0, 2; b_{12} = 0, 3; b_{13} = 0, 5$; для $i = 2; j = \overline{1, 3} \Rightarrow b_{21} = 0, 1; b_{22} = 0, 25; b_{23} = 0, 4$. Функція $F_i(\rho_{qk})$ характеризує рівень впливу фактора ρ_{qk} на i -й показник y_i . Вона має відповідати умові, що у разі відсутності впливу факторів ризику (тобто якщо $\rho_{qk} = 0$) має виконуватися рівність $\tilde{y}_i = y_i$. На об'єкт одночасно і незалежно можуть впливати кілька факторів ризику $\rho_{n_q} = \langle \rho_{qk} | \rho_{qk} = \rho_q[t_k]; q = \overline{1, n_q} \rangle$. За цих умов функцію $F_i(\rho_{n_q})$ визначає співвідношення

$$F_i(\rho_{n_q}) = \prod_{q=1}^{n_q} (1 - c_{iq} |\rho_{qk}|); \quad (10.56)$$

$$\rho_{n_q} = \{ \rho_{qk} | \rho_{qk} = \rho_q(t_k); q = \overline{1, n_q} \}.$$

Тут задано $0 < c_{iq} \leq 1; i = \overline{1, 2}; q = \overline{1, n_q}$.

Розв'язання задачі

Розглянемо алгоритм розв'язання задачі, у якому за вихідними даними (10.47), (10.48) на підставі формул (10.53)–(10.56) потрібно виконати такі процедури.

1. Пронормувати тривалість кожного етапу до відповідної частини загальної тривалості роботи двигуна $[t_0^-; t_0^+]$ (див. рис. 10.5).

Нормована тривалість τ_1 і τ_2 етапів 1 і 2 визначена співвідношеннями

$$\tau_1 = 1 - \frac{t - t_0^-}{t_1 - t_0^-}; \quad t \in [t_0^-, t_1]; \quad \tau_2 = 1 - \frac{t - t_1}{t_2 - t_1}; \quad t \in [t_1, t_2].$$

Дискретні значення τ_1 й τ_2 обчислюють відповідно до умов п. 3 для вихідних даних. Аналогічне нормування виконують для всіх інших етапів. Для кожного етапу величина τ повинна змінюватися в інтервалі $[0, 1]$. Такий прийом дає змогу підвищити точність моделей завдяки збільшенню кількості точок для кожного інтервалу під час складання відповідної системи рівнянь.

2. Пронормувати показники функцій $y_i(t_k)$ і керуючих впливів $U_j(t_k)$ на основі співвідношень

$$\hat{y}_i(t_k) = \hat{y}_i = \frac{y_i(t_k)}{y_i^+}; \quad y_i^+ = \max_{t_k \in [t_0^-, t_0^+]} y_i(t_k);$$

$$\hat{U}_j(t_k) = \hat{U}_j = \frac{U_j(t_k)}{U_j^+}; \quad U_j^+ = \max_{t_k \in [t_0^-, t_0^+]} U_j.$$

Нормування виконувати відповідно до умов (10.54).

3. Сформувати систему моделей для показників керуючих впливів $U_j(t_k)$. Створити систему моделей відповідно до формул (10.53), (10.54) можна, визначивши коефіцієнти $d_{01}, \dots, d_{32}$ відповідних функцій. Визначення коефіцієнтів для функції $U_1(t) = d_{10} + d_{11}t + d_{12}t^2$ згідно із формулами (10.53) і (10.54) зводиться до розв'язання системи рівнянь

$$d_{10} + d_{11}t_0 + d_{12}t_0^2 = 0;$$

$$d_{10} + d_{11}0,15 + d_{12}(0,15)^2 = 0,7;$$

$$d_{10} + d_{11}0,3 + d_{12}(0,3)^2 = 1,0.$$

Примітка

Така система рівнянь має важливу особливість. Момент $t_0 = t_0^- = 0$ відповідає неактивному стану двигуна. Отже, у першому рівнянні всі доданки повинні дорівнювати нулю. Тоді два останні рівняння мають три невідомі змінні d_{10} ; d_{11} ; d_{12} , що призводить до необмеженої множини розв'язків і тому незастосовні на практиці. Вихід із цього парадокса можливий, якщо принципово змінити вихідну точку відліку, за початок якого взяти значення керуючого впливу в усталеному режимі, що характерний для крейсерського польоту. Тоді величину d_{j0} слід розглядати як показник стабільної роботи системи управління, величину d_{j1} — як швидкість зміни режиму управління, а d_{j2} — як її прискорення. За такого підходу d_{j0} не лише можна встановити априорно, а й уточнювати безпосередньо в польоті. Значення двох інших показників легко визначити із двох останніх рівнянь. Унаслідок одержимо остаточний розв'язок у вигляді функцій

$$U_2(t) = d_{20} + d_{21}t + d_{22}t^2; \quad U_3(t) = d_{30} + d_{31}t + d_{32}t^2,$$

для яких виконуються умови $d_{20} = d_{30} = \hat{d}_{05}$; $\hat{d}_{05}$ — показник стабільної роботи системи управління на етапі 5.

4. Сформувати систему моделей для показників функціонування об'єкта у штатному режимі. Базові моделі функціонування об'єкта сформуємо у штатному режимі з урахуванням рівності $\tilde{y}_i = y_i$ для всіх часових інтервалів. За цих умов виконується рівність $F_i(\rho_{n_q}) = 1$, оскільки для штатного режиму за визначенням маємо $\rho_{qk} = 0$; $q = \overline{1, n_q}$, а отже, відповідно до (10.56) одержуємо $\rho_{n_q} = 0$. Тоді моделі функціонування об'єкта згідно з обмеженнями і рекомендаціями п. 4 для вихідних даних визначає співвідношення

$$y_i = \frac{1}{J_0} \sum_{j=1}^{J_0} b_{ij} \sum_{r=0}^{R_j} a_{jr} T_r^*(U_j).$$

Системи рівнянь для визначення невідомих змінних a_{jr} , b_{ij} потрібно формувати на основі дискретної вибірки (10.47)

$$B_0 = \{(\bar{y}(t_k), \bar{U}(t_k)) \mid t_k = t_0 + k\Delta t; k = \overline{0, k_0}\}$$

спостережень за час $[t_0, t_{k_0}]$. Вибірку визначає послідовність дискретних інтервалів відповідно до вимог п. 3 для вихідних даних.

Демонстраційну версію розрахунків показано у вигляді вікон програми. Результати формування вихідних даних $Y_1(t)$ і $Y_2(t)$ зображено на рис. 10.6.

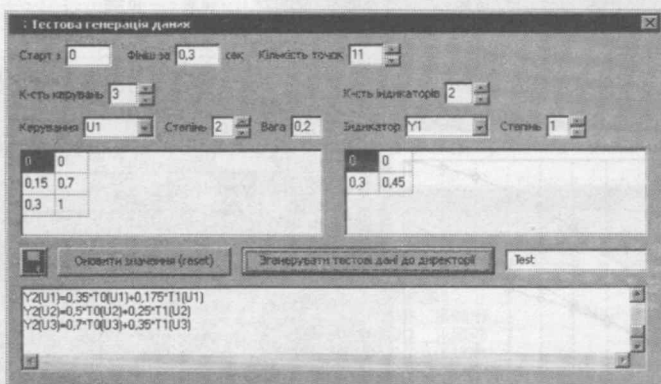


Рис. 10.6. Вихідні дані для $Y_2(U_1)$, $Y_2(U_2)$, $Y_2(U_3)$

5. Сформувати систему моделей для показників функціонування об'єкта у позаштатному режимі.

Моделі функціонування об'єкта у позаштатному режимі слід формувати для всіх часових інтервалів на підставі співвідношень (10.55) і (10.56):

$$\tilde{y}_i[t_k] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \tilde{b}_{ij} \sum_{r=0}^{R_j} a_{jr} T_r^*(U_j); \quad \tilde{b}_{ij} = b_{ij} F_i(\rho_{n_q})$$

за даними вибірки (10.48)

$$B_{k1} = \{(\bar{y}(t_k), \bar{U}(t_k)) \mid t_k = t_0 + \hat{k}\Delta t; \hat{k} = \overline{k_1, k_0}\}$$

за період $[t_{k_1}, t_{k_0}]$ відповідно до обмежень і рекомендацій пп. 4, 5, 6 для вихідних даних. Системи рівнянь для визначення невідомих змінних a_{jr} , b_{ij} і функції $F_i(\rho_{n_q})$

потрібно формувати на основі дискретної вибірки, визначеної послідовністю дискретних інтервалів відповідно до вимог п. 3.

- Виконати систему версій демонстраційної системи управління та оцінювання ризиків позаштатного режиму. На основі запропонованих моделей аналізу динаміки штатних і позаштатних режимів розроблено демонстраційну систему виявлення та оцінювання ризиків позаштатних ситуацій, послідовні етапи якої зображені у вигляді низки демонстраційних вікон комп'ютерної програми. Моделі дають змогу забезпечити визначення на кожний момент t_k значення ступеня і рівня ризику.

Задання вихідних даних для реалізації можливості автоматичного визначення необхідної точності управління функціонуванням об'єкта у штатному режимі та одержані для цього варіанти результати зображені на рис. 10.7.

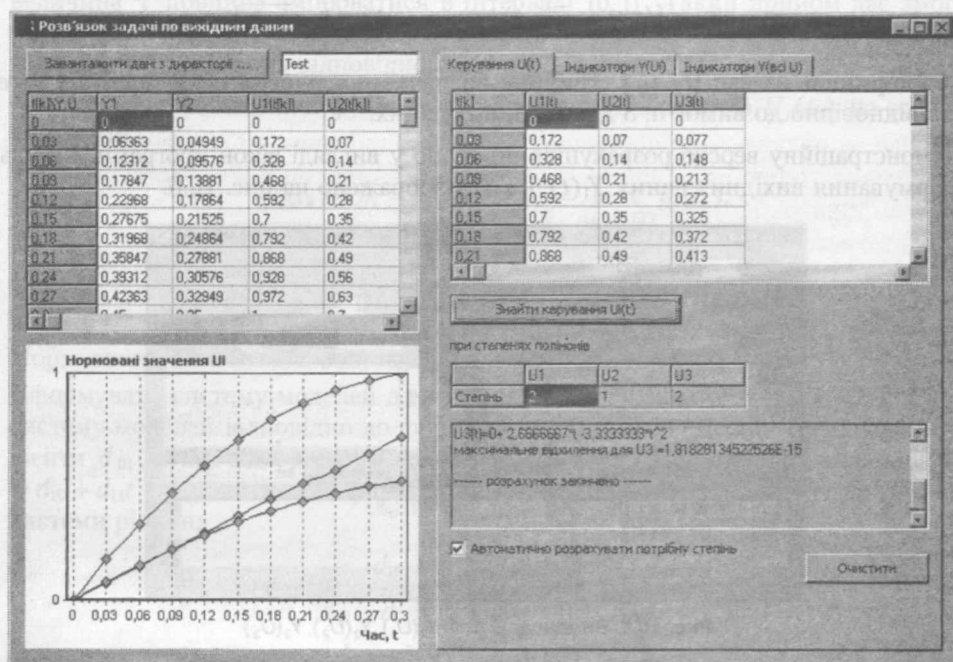


Рис. 10.7. Вихідні дані і результати управління функціонуванням об'єкта у штатному режимі

Задання вихідних даних для автоматичного визначення управління функціонуванням об'єкта у випадку зміни режимів з апіорно заданою точністю показано на рис. 10.8. Розв'язування двох наведених задач для штатного режиму функціонування об'єкта виконують з використанням симплекс-методу для несумісних систем лінійних рівнянь.

Результати коригування режимів із нульовим максимальним відхиленням і задані при цьому вихідні дані зображено на рис. 10.9.

На рис. 10.10, 10.11 зображено вихідні дані і результати розв'язування таких задач: перша — необхідно забезпечити розпізнавання позаштатної ситуації на основі вибірок B_0 та B_{k1} ; друга — визначити темпи і виявити момент можливого переходу штатного режиму у позаштатний. Вихідні дані для розв'язування цих задач за умов впливу ситуацій ризику показано на рис. 10.10, а результати розв'язування задачі розпізнавання поза-

штатної ситуації за умов впливу факторів ризику і виявлення моменту можливого переходу штатного режиму у позаштатний відображено на рис. 10.11.

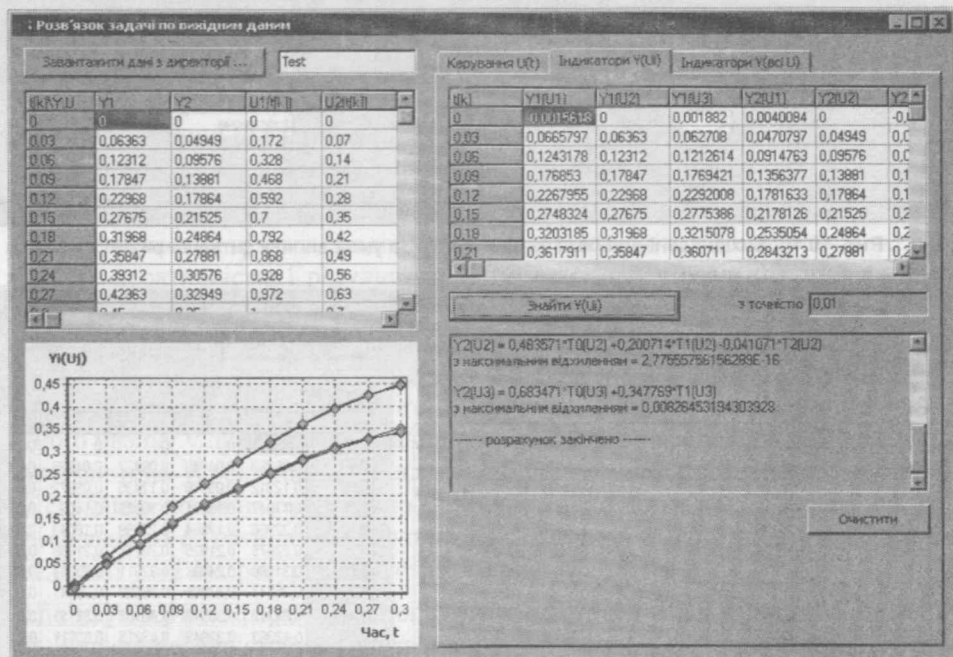


Рис. 10.8. Вихідні дані і результати зміни режимів

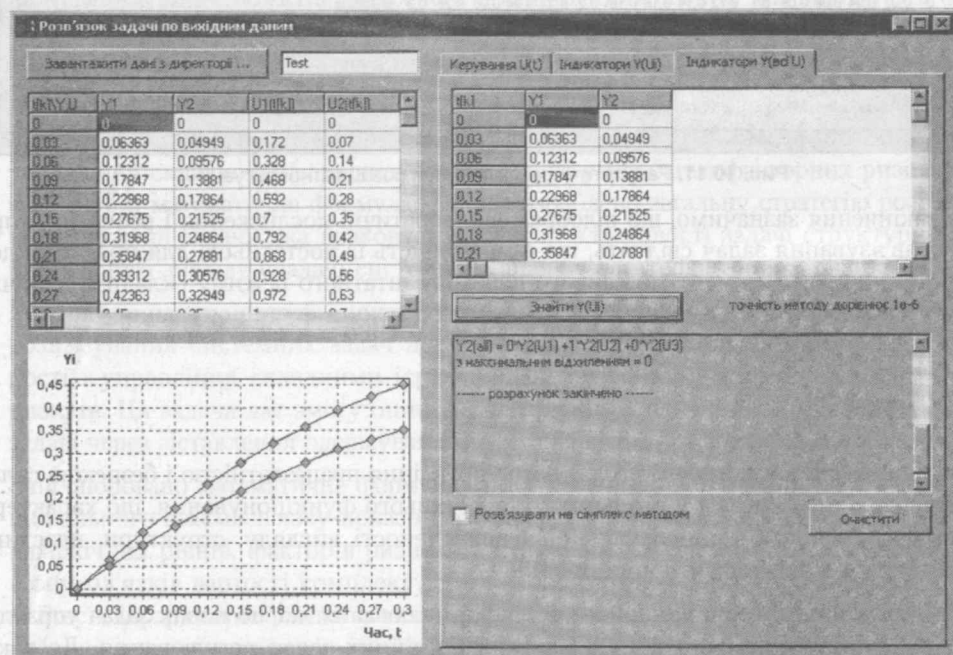


Рис. 10.9. Вихідні дані і результати коригування режим

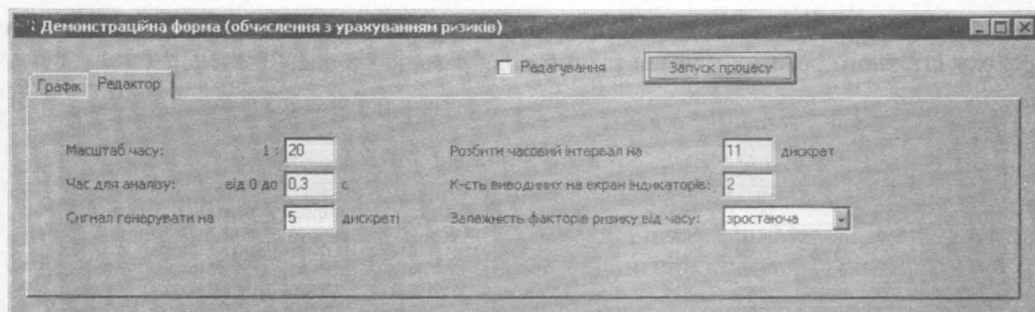


Рис. 10.10. Вихідні дані для розв'язання задачі за умов впливу ситуацій ризику

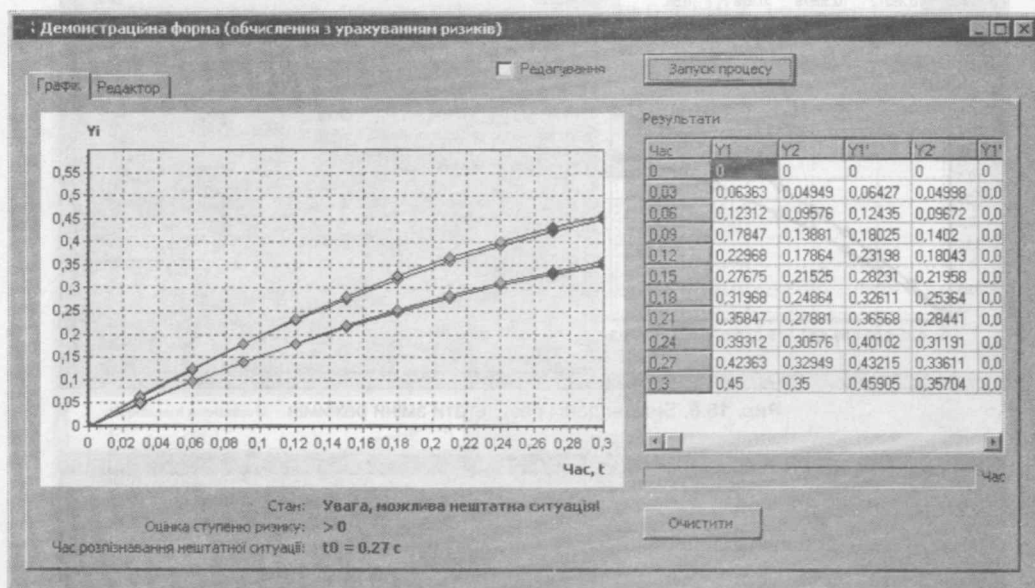


Рис. 10.11. Результати розпізнавання позаштатної ситуації

На закінчення зазначимо, що відображені теоретичні дослідження і розглянуті приклади розв'язування задач свідчать, що є можливість із достатньою для практики достовірністю виявляти момент можливого переходу штатного режиму складної технічної системи у позаштатний і вчасно забезпечувати безпеку її функціонування.

Висновки

- ♦ Розглянуто системні задачі узгодженого управління працездатністю і безпекою складних ієрархічних систем у реальних умовах їхнього функціонування, що характеризуються наявністю концептуальної невизначеності вигляду, структури, властивостей виробу і багатofакторних ризиків.
- ♦ Обґрунтовано фактори, що призвели до формулювання якісно нових задач управління, які принципово відрізняються від традиційних задач регулювання. До таких факторів належать: наявність множини суперечливих цілей оптимізації управління;

неповнота, невизначеність і нечіткість вхідної інформації про можливі умови експлуатації і застосування керованого об'єкта; необхідність оптимальної узгодженості управління на всіх етапах життєвого циклу об'єкта — від розробки проекту до утилізації об'єкта.

Розглядаючи управління як загальну категорію, що включає усі форми і види зміни властивостей і поведінки керованих систем, введено означення таких видів управління: управління поведінкою, властивостями, структурою, розвитком, призначенням і системне управління.

- ♦ Обґрунтовано необхідність системної узгодженості управління працездатністю і управління безпекою за цілями, завданнями, ресурсами, очікуваними результатами, а також за оперативністю і результативністю взаємодії у реальних умовах позаштатної ситуації. Така узгодженість повинна забезпечувати оперативну і результативну взаємодію зазначених видів управління. З одного боку, має бути забезпечена оперативність і результативність системи безпеки щодо своєчасного виявлення позаштатної ситуації, оцінювання її ступеня і рівня ризику, визначення ресурсу допустимого ризику у процесі формування рекомендацій з оперативних дій ОПР. З іншого боку, система управління працездатністю після одержання сигналу про позаштатну ситуацію повинна оперативно і результативно діяти для забезпечення готовності складного об'єкта до екстреного переходу у неробочий стан і можливості його реалізації у межах ресурсу допустимого ризику.
- ♦ Дано математичне формулювання задачі системного управління складними об'єктами. Запропоновано стратегію розв'язання цієї задачі, яка ґрунтується на системному узгодженні оцінювання та коригування працездатності і безпеки у процесі функціонування таких об'єктів. На основі послідовності певних дій виконують оцінювання живучості і безпеки функціонування системи за умов невизначеності інформації про позаштатні ситуації.
- ♦ Запропоновано формалізацію задачі системного управління структурою і властивостями складних об'єктів. Сформульовано на змістовному рівні задачу раціонального управління складною ієрархічною системою за умов багатофакторних ризиків, а також дано її математичне формулювання. Розроблено загальну стратегію розв'язування зазначеної задачі, яка враховує одночасно властивості задачі структурно-функціонального аналізу і задачі системного аналізу багатофакторних ризиків.
- ♦ Розглянуто задачу техніко-економічного аналізу, що є завершальною у послідовності розв'язування системних задач дослідження властивостей, структури, працездатності і управління складними ієрархічними системами за умов багатофакторних ризиків. Ця задача дає змогу оцінити, наскільки раціонально розв'язано попередні задачі через зіставлення одержуваного ефекту і витрат ресурсів на його досягнення.
- ♦ Запропоновано математичне формулювання задачі, що впливає із загального функціонального взаємозв'язку показників якості об'єкта загалом і параметрів ФЕ всіх ієрархічних рівнів, факторів ризику та керуючих дій системи управління, а також взаємозв'язків вартості комплектуючих виробів, замовлених модулів і конструкцій ФЕ всіх ієрархічних рівнів із технічними показниками проектних вирішень. Розроблено загальну стратегію розв'язування задачі техніко-економічного аналізу.

- ◆ Наведено приклад розв'язування задачі системного управління працездатністю і безпекою авіаційного двигуна, режими роботи якого на етапах зльоту, крейсерського польоту і посадки літака суттєво відрізняються. Дано математичне формулювання задачі та алгоритм її розв'язування. На основі запропонованих моделей аналізу динаміки штатних і позаштатних ситуацій розроблено демонстраційну систему виявлення та оцінювання ризиків нештатних ситуацій.

Розділ 11

Системна методологія передбачення

- ◆ Передбачення і прогнозування: основні сфери застосування і методологічні відмінності
- ◆ Сценарний аналіз як основа передбачення і його етапи
- ◆ Методи якісного аналізу та особливості їхнього застосування
- ◆ Місце і роль експертного оцінювання в методології передбачення
- ◆ Трикутник передбачення: співвідношення між творчою основою людини та об'єктивними знаннями
- ◆ Інформаційна платформа сценарного аналізу як інструмент передбачення для ОПР

У цьому розділі систематизовано та уніфіковано найефективніші практичні прийоми у сфері передбачення, насамперед технологічного. Їх доповнено формальними процедурами і методами експертного оцінювання об'єктів різної природи та обробки результатів експертизи, і на цій основі створено потужний інструментарій у вигляді методології сценарного аналізу і людино-машинну інформаційну платформу для розв'язання такого класу задач.

11.1. Актуальність і мета передбачення

Передбачення, насамперед технологічне, набуває ролі найважливішої методології інноваційного та соціально-економічного розвитку сучасного суспільства як на національному чи регіональному рівні, так і на рівні окремих галузей промисловості чи великих організацій і компаній. Ця методологія значною мірою відобразила ідеї В. М. Глушкова [29] щодо побудови інформаційних мереж і технологій для різних сфер людської діяльності, що ґрунтуються на знаннях, і зокрема для економіки.

Практика використання методології передбачення в багатьох країнах базується насамперед на застосуванні інтуїції, досвіду, знань, умінь експертів у різних предметних областях для розв'язання задач стратегічного планування і прийняття рішень. Застосовують різноманітні практичні прийоми, але через новизну цього напрямку їх усі характеризує недостатнє використання методів кібернетики, математики і сучасних інформаційних технологій.

Упродовж усієї історії людства багато мислителів і провидців намагалися «зазирнути» у майбутнє, щоб мати уявлення про його можливий подальший розвиток. Для цього використовували найрізноманітніші методи — від хіромантії і чаклунства до астрологічних та науково-фантастичних передбачень. Вони були суто суб'єктивними і не витримували жодної критики з боку природничих наук.

Блискучі приклади передбачення майбутнього демонстрував у своїй діяльності знаменитий Леонардо да Вінчі. Свого часу він краще від усіх розумів величезне значення взаємозв'язку між наукою і мистецтвом. Геніальний розум Леонардо породив фантастичні проекти підводних човнів, літаків, велосипедів, ріжучих верстатів і навіть танків. Через кілька століть ці ідеї стали не тільки можливими, але й дуже наближеними до реальних.

У зв'язку з викликами і загрозами, що все частіше постають перед сучасним суспільством, виникла потреба на об'єктивних засадах передбачати хоча б приблизні сценарії майбутніх подій. Це потрібно для формування раціональної і менш помилкової стратегії розвитку будь-якого організованого співтовариства (нації, країни, організації чи компанії) у світі жорстокої конкуренції.

Із часів Другої світової війни нові технології відіграють роль потужного «двигуна» економічного розвитку для всіх передових країн світу. У 80-ті роки економісти так званої школи *нової теорії зростання* показали, що наука і техніка стали найважливішими складовими суспільного прогресу.

Наприкінці ХХ століття швидкі технологічні зміни і бурхливий розвиток глобальних ринків для продуктів і товарів, створюваних за новими технологіями, призвели до появи нових ризиків та нестабільних умов для великих компаній і навіть країн, оскільки зміни такого характеру вони не могли вчасно передбачити. Наприклад, у 80–90-ті роки більшість компаній – виробників комп'ютерів колективного користування (зокрема ЕОМ ряду ЕС у СРСР) зазнали фіаско у зв'язку з тим, що не змогли вчасно передбачити «лавиноподібного» розвитку ринку персональних комп'ютерів. Відомі також великі невдачі країн, що змагаються за деякими програмами освоєння космосу і розвитку сучасних систем озброєння та колективної безпеки.

Отже, в сучасному світі прогресивні технології відіграють ключову роль у забезпеченні конкурентоздатності економіки, а їхнє передбачення на ранніх стадіях значною мірою впливає на розвиток суспільства майбутнього.

Зазначена проблема набуває ще більшої актуальності нині, на зламі тисячоліть. За умов зменшення запасів органічного палива і природних ресурсів, прискорення процесів світової економічної глобалізації з такими їхніми негативними наслідками, як втрата національної ідентичності для низки слаборозвинених країн, занепад їхніх національних економік, збільшення нерівності між супербагатством меншості і супербідністю більшості населення планети, загострення суспільних і міжетнічних відносин, людство перебуває в очікуванні нової парадигми розвитку, в основі якої лежала б інша соціальна, економічна та науково-технологічна платформа.

11.1.1. Сфери застосування методів прогнозування та передбачення і принципові відмінності між ними

Перші спроби одержати об'єктивні знання про майбутнє були пов'язані переважно з розробленням нових і застосуванням традиційних методів математики і статистики. У результаті було створено цілу групу потужних методів, як-от метод часових рядів, методи регресійного аналізу, як одновимірного, так і множинного, імітаційного моделювання, економетричні моделі тощо.

Усі вони належать до класу так званих *методів кількісного прогнозування*, і їх застосовують для приблизного «визначення» майбутньої поведінки певної змінної ве-

личини або системи взаємопов'язаних змінних величин на заздалегідь відомому часовому інтервалі.

Незважаючи на найширшу практику використання цих методів і наявність величезних обчислювальних потужностей, їхнє практичне застосування принципово обмежено лише випадками обробки ретроспективних даних кількісного характеру про монотонно змінні процеси. Інакше кажучи, у разі застосування методів прогнозування відбувається описування майбутнього, яке фактично є продовженням або екстраполяцією минулого. Ця обставина суттєво обмежує можливості зазначених методів. Передусім тому, що ми живемо у світі, де постійно відбуваються якісно нові, не властиві минулому зміни. До них насамперед належать різноманітні *зламо- та стрибкоподібні зміни*, які пов'язані з *розривами монотонності* процесів і мають характер суттєво нелінійних явищ.

Наприклад, на межі XX і XXI століть такими явищами були розпад Радянського Союзу і наступна зміна геополітичної рівноваги у світі та низка інших глобальних змін. За допомогою методів кількісного прогнозування передбачити подібні явища й організовано підготуватися до них не вдалося. Популярне у 60-х роках прогнозування з часом втрачало значення універсальної методології. Це пов'язано насамперед із тим, що його методами не вдалося передбачити світової нафтової кризи початку 70-х років з її руйнівними наслідками, вибухоподібний розвиток інформаційних технологій у 90-х роках, фінансову кризу у Південно-Східній Азії та Росії 1998 р. і багато інших глобальних змін.

Тому в сучасних умовах усе актуальнішим стає нове завдання — репрезентувати майбутнє, яке не можна інтерпретувати як звичайне продовження минулого, оскільки це майбутнє може набувати принципово відмінних форм і структур порівняно з тим, що було відомо в минулому.

Зазначена проблема дістала назву *передбачення* [232]. Цей термін ще наприкінці 50-х років XX століття використовував Гастон Бергер (Gaston Berger) у відомому журналі «Два світи», але формування передбачення як самостійної науково-практичної методології відбулося лише на початку 90-х років XX століття.

Слід зазначити, що універсальних і досконалих підходів до розв'язання цієї проблеми сьогодні немає. Є лише спроби побудови можливих сценаріїв розвитку тих чи інших явищ у майбутньому. Але принциповою відмінністю від попередньої практики розв'язання таких задач є те, що використовувані для цього методи мають не кількісний, а *якісний характер*. Причому окремі з них були відомі вже досить давно як розроблювані та використовувані для розв'язання спеціальних предметно орієнтованих задач. Наприклад, ще у 60-х роках американська компанія Rand Corporation створила метод, який дає змогу полегшити так звану *візуалізацію* сценаріїв розробки і застосування нової техніки у всіх технологічних аспектах. Цей метод одержав назву *Делфі* (на честь грецького оракула Delphos).

Сьогодні відомі й інші методи якісного характеру, що так чи інакше можна використовувати на окремих етапах передбачення явищ майбутнього. Але в повному обсязі жоден із них не розв'язує цю проблему.

Можна вважати, що передбачення — це процес прийняття рішень для складних систем із людським фактором щодо їхньої можливої поведінки в майбутньому. Такий процес зводиться до застосування окремих методів у певній послідовності із встановленням чітко визначених взаємозв'язків між ними. Він формується за допомогою більш універсальної методології, відомої як *сценарний аналіз* [50].

11.1.2. Передбачення як фундаментальний інструмент технологічного розвитку

Незважаючи на універсальний характер передбачення, у міжнародній практиці поняття «передбачення» переважно застосовують для технологічного сегмента, що зумовило широке використання терміна *«технологічне передбачення»*. Незаперечним є той факт, що технологічні зміни в суспільстві стимулюють розвиток усіх його сфер. Так, винахід парової машини, відкриття електричного струму та революційні зміни в галузі інформаційних і телекомунікаційних технологій суттєво позначилися на суспільному розвитку. Наприклад, сучасні інформаційні і телекомунікаційні технології не лише спричиняють радикальні перетворення у структурі міжнародної торгівлі, але й докорінно змінюють усю економічну діяльність суспільства.

Із класичної економічної теорії відомо, що традиційними факторами виробництва є земля, капітал і праця. У сучасних виробничих умовах великого значення набувають *нові знання*, що суттєво змінюють саму суть виробничого фактора. Зокрема, у сфері інформаційних технологій розроблення математичного і програмного забезпечення — це їхня основа (*бекбон*). Тому знання стають найважливішим виробничим фактором у створенні подібних технологій. Зазначимо, що розвиток інформаційних технологій фактично породив нову сферу економічної діяльності, створивши *економіку знань* або так звану *«невагому» економіку*.

З огляду на сучасні тенденції трансформації виробничого фактора, кожна велика компанія, галузь промисловості чи країна світу не лише може, але й повинна розвивати технологічне передбачення як фундаментальний інструмент розроблення власної політики і стратегії за умов значних змін, нових викликів і великих ризиків, які несе людству майбутнє.

Більше того, не лише країни і нації, але й окремі організації, установи, компанії, незалежно від їхніх політичних чи економічних моделей і форм власності, потребують нових знань, щоб мати хоча б приблизне уявлення про тенденції і найактуальніші напрями суспільного і науково-технологічного розвитку. Ця потреба зумовлена такими двома основними причинами:

- ♦ не відставати від наукових і технологічних досягнень, які визначатимуть розвиток майбутнього суспільства;
- ♦ мати можливість вчасно зрозуміти переваги тих досягнень, які дозволять досягти максимальної вигоди країнам, організаціям чи компаніям у конкурентній боротьбі за правилами сучасного світу.

11.1.3. Приклади регіональних і національних програм технологічного передбачення

За даними Організації Об'єднаних Націй із технологічного розвитку (ЮНІДО), головного координатора цих робіт, національні програми з технологічного передбачення сьогодні здійснюють понад 40 країн світу з групи розвинених і тих, що стали на шлях інтенсивного розвитку. Деякі з них подано у табл. 11.1. Особливої уваги заслуговують так звані регіональні програми з технологічного передбачення, спрямовані на розв'язання глобальних міжнародних проблем, актуальних для окремих регіонів світу, за участю груп країн, що належать до цих регіонів.

Проаналізуємо найхарактерніші програми технологічного передбачення, що належать до регіональних програм (на прикладі програми Європейського Союзу), програм технологічного передбачення Старого Світу (на прикладі Великобританії) та програм технологічного передбачення постсоціалістичних країн (на прикладі Угорщини).

Таблиця 11.1. Деякі приклади національних програм із технологічного передбачення

Країна (програма)	Кількість програм	Сфера застосування
Австрія	7	Технології/Суспільство
Франція (Програма КТ, 2005)	9	Суспільство/Сектори економіки/Технології
Німеччина (Програма Делфі, 1993)	15	Сектори економіки/Технології
Німеччина (Програма FUTUR)	2	Суспільство
Угорщина (Програма ТЕР)	7	Суспільство/Сектори економіки/Технології
Ірландія	8	Сектори економіки/Технології
Португалія	23	Сектори економіки
Іспанія	8	Сектори економіки
Швеція	8	Суспільство/Сектори економіки
Великобританія (Програма UK2, 1995)	15	Сектори економіки
Великобританія (Програма UK2, 2000)	15	Суспільство/Сектори економіки

Регіональна програма Європейського Союзу «Європа-2010» [201]. Її мета — побудувати стратегію розвитку Європи на початку нового століття за умов жорсткої конкуренції з іншими регіонами світу (Північноамериканським та регіоном Південно-Східної Азії) і наростання процесів світової економічної глобалізації та інтеграції. Головна ідея цієї програми — розширення Європи на схід і північ, від чого залежить її майбутнє й особливо конкурентоспроможність у глобальному оточенні.

Після поповнення Європейського Союзу новими членами Європа стане одним із найбільших у світі ринків із більш ніж 550-мільйонним населенням і найпотужнішим, майже півмільярдним середнім класом, що забезпечить дуже високу купівельну спроможність регіону. При цьому інтегральний характер зв'язків Європейського Союзу і конкурентоспроможність усього континенту залежать від стабільності економіки нових членів. Тому Східна і Північна Європа повинні стати безпечними, стабільними і процвітаючими регіонами, що є основною умовою програми «Європа-2010». Як наслідок, процес розширення ЄС потребуватиме глибинних, загальносистемних суспільно-економічних змін у Центральній, Східній і Північній Європі на доповнення до фундаментальних економічних і соціальних трансформацій, що уже відбуваються у процесі переходу постсоціалістичних країн від централізованої до ринкової економіки.

На цьому шляху як країнам ЄС, так і країнам Східної та Північної Європи слід свідомо ставитися до того, що з розвитком інтеграції вони повинні бути готові не лише до оптимістичних перспектив, але й до подолання труднощів. Насамперед нові члени ЄС відчують на собі потужний «удар» процесів економічної глобалізації, що несуть із собою

не тільки позитивні зміни, але й нові ризики і загрози (ослаблення національної ідентичності, особливо для малих країн, збільшення залежності національних економік від іноземного капіталу, звуження соціальних гарантій народам власних країн тощо).

З урахуванням складності і суперечливості явищ на шляху перетворення Європи на оновлений, найпотужніший континент планети програма «Європа-2010» ґрунтується на сукупності так званих макросценаріїв, розроблених із застосуванням методології технологічного передбачення. Головні з них такі.

- ♦ Сценарій «Тріумфальний ринок», що базується на американській моделі технологічних інновацій та організації виробництва. Ця модель передбачає швидкий економічний розвиток, але менш зорієнтована на традиційний для Європи високий рівень соціального захисту населення.
- ♦ Сценарій «Розмежована відповідальність» ґрунтується на ідеї поступового розширення ЄС, що повинно супроводжуватися розвитком економічних і суспільних відносин між країнами-сусідами, створенням пан'європейської системи безпеки та соціальних гарантій і покладанням на нових членів європейського простору повної відповідальності за дотримання його стандартів.
- ♦ Сценарій «Турбулентне сусідство», на відміну від перших двох, має досить песимістичний характер. Його суть зводиться до «захисту» і відмежування країн — членів ЄС від східних сусідів (на жаль, до них поки що належить і Україна), де, за оцінками авторів сценарію, тривають процеси нестабільності, високої корупції, є проблеми, пов'язані з організованою злочинністю, тероризмом та еміграцією. Рекомендації, що випливають із цього сценарію, зводяться до впровадження жорстких візових режимів на східних кордонах ЄС, посилення митних вимог, застосування селективності у сфері гуманітарних відносин.

Ці та інші сценарії, покладені в основу програми «Європа-2010», мають бути застосовані комбіновано і системно, з огляду на політичну доцільність і практичну реалістичність розвитку нашого континенту. Але їхній перелік і зміст вказують на те, що оновлення Європи — це складний, суперечливий і тривалий процес, який потребує розробки ефективної та безпомилкової стратегії з урахуванням усіх реалій, небезпек і викликів сучасного світу.

Програма технологічного передбачення Великобританії [228]. Започаткована в 1993 р. із бюджетом приблизно 1 млн фунтів стерлінгів. Її завданнями були: підвищення конкурентоспроможності Великобританії на світових ринках, поліпшення партнерських відносин між промисловістю, наукою та урядом, визначення перспективних технологій на найближчі 10–20 років, зосередження уваги дослідників на можливостях ринку технологій і, як наслідок, підвищення ефективності використання наукової бази.

Виконання програми доручили відділу науки і технологій при уряді Великобританії у співробітництві з іншими урядовими департаментами.

Для організації комплексу робіт із технологічного передбачення створили координаційний комітет у складі з 60–100 фахівців вищого рівня і 15 робочих груп експертів (25–30 експертів у кожній) із ключових напрямів розвитку економіки Великобританії. До складу цих органів увійшли провідні представники промисловості, наукових центрів та університетів, урядових закладів.

Програма складається з трьох головних етапів. Упродовж *першого* було проведено серію семінарів для роз'яснення представникам промисловості, науковій громадсько-

сті і державним службовцям сутності технологічного передбачення, значущості цієї методології для ефективного розвитку економіки, і обговорення з ними порядку проведення потрібного комплексу робіт.

Другий етап полягав саме в організації та виконанні комплексу робіт із технологічного передбачення. Упродовж цього етапу робочі групи експертів вивчили стан справ у своїх секторах із застосуванням методів якісного аналізу. Загалом із застосуванням методу Делфі вивчено думки 7 тис. фахівців із 15 напрямів розвитку економіки Великобританії. Робочі групи експертів із цих напрямів провели якісний аналіз одержаної від фахівців інформації, результати якого надали координаційному комітету, який синтезував, у свою чергу, 27 головних технологічних пріоритетів і згрупував їх у 6 науково-технічних програм:

- ♦ прогресивні телекомунікаційні та інформаційні технології, системний аналіз;
- ♦ здоров'я людини, генетика, біоінформатика та біотехнології;
- ♦ нові матеріали, їхній синтез і обробка (зокрема, каталіз, хімічний та біологічний синтез);
- ♦ інженерія менеджменту і бізнесу, технології безпеки бізнесу та захист конфіденційної інформації;
- ♦ екологічно чисті технології та аналіз життєвого циклу продуктів і виробництв;
- ♦ тенденції соціального розвитку і вплив на суспільні процеси нових технологій, демографічні зміни, соціальний захист населення.

Крім цього, координаційний комітет проаналізував основні «вузькі місця», здатні зашкодити впровадженню цих програм, і виділив 18 так званих інфраструктурних пріоритетів, систематизувавши їх за такими групами:

- ♦ бази навичок, комунікаційні навички, бізнес у сфері нових знань;
- ♦ наукова база, стимули для проведення міждисциплінарних досліджень і залучення промисловості;
- ♦ інфраструктура комунікацій, розвиток інформаційних суперканалів, збирання і систематизація науково-технічної інформації з усього світу;
- ♦ фінансова інфраструктура, довгострокове фінансування прогресивних досліджень і розробок;
- ♦ розширення політичного та законодавчого простору щодо прав на інтелектуальну власність і науково обґрунтованих стандартів.

Координаційний комітет виробив також понад 60 рекомендацій урядовим структурам для прийняття ними стратегічних рішень, спрямованих на розвиток економіки Великобританії. Ці рекомендації стосувалися розвитку державного і недержавного секторів економіки та вдосконалення їхньої взаємодії, розвитку фінансових мереж, поліпшення інфраструктури промисловості, підвищення ефективності діяльності країни в європейському і глобальному масштабах та інших важливих напрямів.

Третій етап програми дістав назву «постпередбачення» і стосувався особливостей її практичного застосування. Його було зведено до п'яти складових:

- ♦ формування нових пріоритетів у сфері наукових досліджень та індустріального розвитку на державному рівні (у міністерствах, дослідницьких радах і радах із вищої освіти);

- ♦ вплив технологічного передбачення на стратегію приватних компаній у сфері досліджень і розвитку;
- ♦ поліпшення зв'язків та співробітництва промисловості і науки;
- ♦ вплив технологічного передбачення на державну політику в питаннях регулювання індустріального розвитку;
- ♦ аналіз результатів виконання програми технологічного передбачення та їх врахування для майбутнього розвитку економіки та промисловості Великобританії.

Національна програма технологічного передбачення Угорщини [220]. Віддаючи належне відповідальності перед європейським співтовариством, покладений на Угорщину як одну з перших країн — кандидатів на вступ до ЄС, її уряд розпочав у 1997 р. національну програму з технологічного передбачення. У цей період спад економіки змінився економічним зростанням, який дав змогу цій країні перейти до розв'язання середньострокових і довгострокових завдань розвитку.

Угорську програму технологічного передбачення було створено для вироблення стратегії підвищення конкурентоспроможності національного сектору економіки на міжнародній арені та поліпшення якості життя її громадян. Розробляли програму з використанням досвіду Великобританії та Німеччини у сфері технологічного передбачення.

Програму фінансував уряд Угорщини, але стратегічні рішення формували робочі групи незалежних експертів. Це були провідні спеціалісти промисловості, учені й державні службовці. У підборі експертів — представників промисловості та науки — перевагу надавали кандидатам, тісно пов'язаним із бізнесом. Усього відповідно до головних напрямів розвитку угорської економіки сформували сім робочих груп експертів. Взаємодію між ними забезпечувала група інтерактивної взаємодії і системних досліджень, до якої увійшли відомі системні аналітики країни. Керував комплексом робіт із технологічного передбачення координаційний комітет у складі з 19 керівників вищого рангу, уповноважених виробляти стратегічні рішення, пов'язані з розвитком індустріального сектору та економіки країни. У результаті було розроблено і затверджено парламентом програми середньострокового та довгострокового розвитку країни, виходячи зі стратегічної мети — входження Угорщини до ЄС.

Наведені приклади свідчать, що упродовж останніх 10–15 років технологічне передбачення є обов'язковим інструментом для розвинених країн світу і найавторитетніших міжнародних організацій (ЄС, ЮНІДО тощо) у розв'язанні проблем короткострокового та довгострокового планування і прийнятті стратегічних рішень щодо індустріального та економічного розвитку як окремих країн, деяких регіонів світу, так і великих транснаціональних компаній і підприємств.

11.2. Сценарний аналіз як методологічна основа передбачення

Формально під об'єктом передбачення розумітимемо деяку складну систему з людським фактором, якою може бути компанія, підприємство, галузь промисловості або країна у цілому, що об'єднує якийсь соціум (людину чи будь-які соціальні групи) з технологічним, екологічним, економічним та іншими компонентами, характерними для таких систем.

11.2.1. Складна система з людським фактором як об'єкт передбачення

Прийняття рішень, які стосуються майбутньої поведінки складних систем із людським фактором, пов'язане з низкою особливостей, що схематично показано на рис. 11.1.

Передусім ці системи можуть бути піддані зовнішнім впливам та обмеженням різного роду — законодавчим, політичним, економічним тощо. Системи з людським фактором складаються з підсистем різної природи зі складними взаємозв'язками між ними, як кількісного, так і якісного характеру. Вони функціонують згідно з багатьма різними цілями, що здебільшого конфліктують між собою.

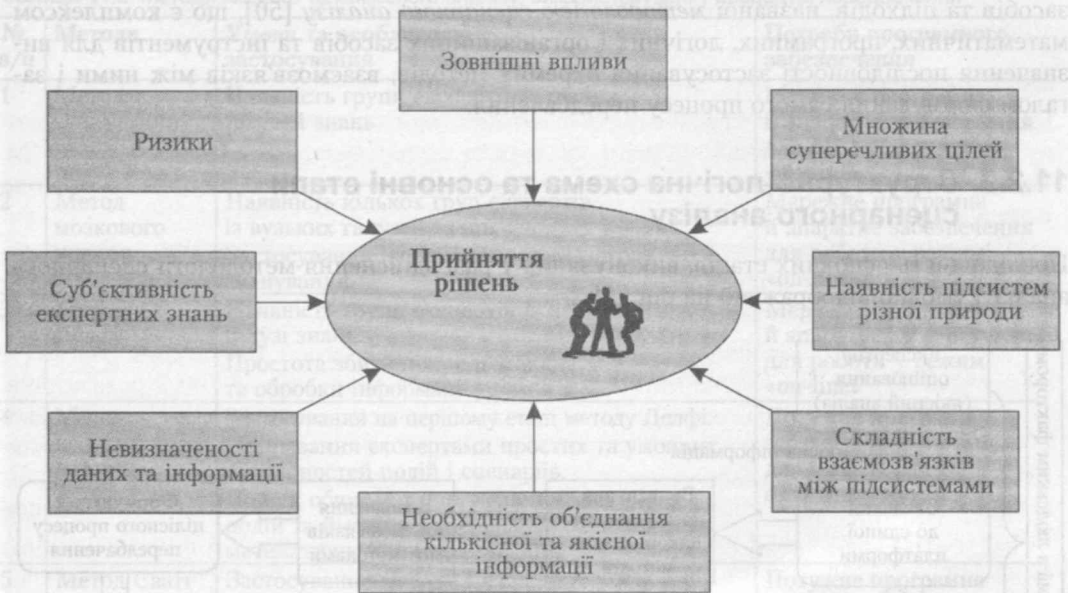


Рис. 11.1. Складні системи з людським фактором

Для складних систем із людським фактором характерні суттєві невизначеності даних та інформації, їхній поведінці властиві різного роду ризики. Експертні судження (оцінки) щодо їх якісних характеристик завжди мають суб'єктивний характер. З урахуванням усіх зазначених особливостей таких систем, щодо їхньої поведінки в майбутньому потрібно приймати певні рішення у вигляді сценаріїв і стратегій їхнього розвитку.

Сьогодні немає універсальних і всеосяжних підходів та методів для передбачення поведінки в майбутньому складних систем із людським фактором і пов'язаних із цією поведінкою подій та явищ. Є лише спроби побудови можливих сценаріїв, їхньої реалізації. Для розв'язання таких проблем використовують як якісні, так і кількісні за своєю природою методи у складній людино-машинній процедурі. При цьому часто не враховують переваг і недоліків кожного із застосовуваних методів, особливостей досліджуваної системи, топології взаємних зв'язків між її внутрішніми елементами, характеру (кількісного чи якісного) інформації, що циркулює в системі, суперечностей між критеріями і цілями, на множині яких розв'язують задачу, рівнів невизначеності інформації та інших аспектів.

Такі задачі слід розв'язувати на основі методології системного аналізу, що дає змогу враховувати всю сукупність властивостей і характеристик досліджуваних об'єктів.

Важливо зазначити, що вплив людського фактора на результати передбачення визначає значну суб'єктивність цієї процедури. Це пов'язано з поєднанням у передбаченні як об'єктивних знань, так і суб'єктивного ставлення людини до предмета дослідження. Кожний експерт, який бере участь у передбаченні, виражає свою думку як суб'єктивну оцінку, однак при цьому він повинен максимально спиратися на об'єктивні знання. Водночас погляд у майбутнє зумовлює потребу робити певні припущення, займатися творчістю. Зближення об'єктивних знань і творчих припущень експертів в інтерактивній людино-машинній процедурі дає змогу підвищити достовірність і практичну користь сценаріїв розвитку досліджуваних процесів, явищ і подій.

Побудову таких сценаріїв можна забезпечити за допомогою універсальної сукупності засобів та підходів, названої *методологією сценарного аналізу* [50], що є комплексом математичних, програмних, логічних і організаційних засобів та інструментів для визначення послідовності застосування окремих методів, взаємозв'язків між ними і загальним формуванням самого процесу передбачення.

11.2.2. Структурно-логічна схема та основні етапи сценарного аналізу

Послідовність основних етапів, виконуваних у разі здійснення методології сценарного аналізу, умовно відображено на рис. 11.2.

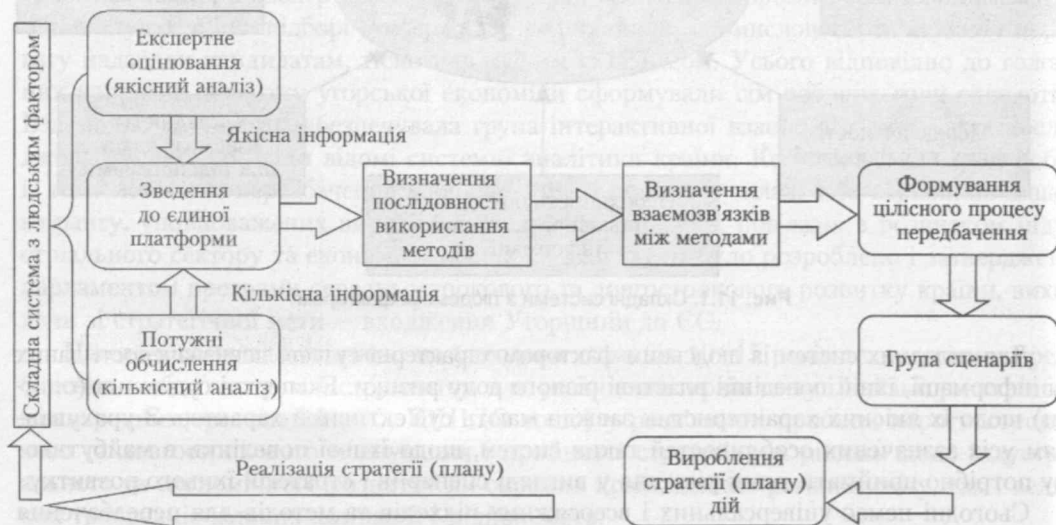


Рис. 11.2. Сценарний аналіз

На першому етапі вивчають проблему та об'єкт передбачення за допомогою методів якісного і кількісного аналізу, після чого якісну та кількісну інформацію зводять до єдиної платформи. Потім визначають послідовність використання окремих методів і встановлюють взаємозв'язки між ними. Це дозволить далі сформувати цілісний процес передбачення і розробити групу сценаріїв майбутньої поведінки об'єкта передбачення (складної системи з людським фактором).

Аналізуючи характеристики та особливості кожного з розроблених сценаріїв, група осіб, що приймають стратегічні рішення, відбирає цікаві для неї сценарії, виробляє план дій щодо об'єкта передбачення і забезпечує реалізацію цього плану.

У цій методології для розв'язання задач передбачення відібрано й адаптовано вісім методів якісного та кількісного аналізу. Їхні порівняльні характеристики наведено в табл. 11.2. Ці методи використовують на чотирьох етапах передбачення.

1. Попереднє вивчення проблеми.

2. Якісний аналіз проблеми.

3. Написання сценаріїв.

4. Аналіз і добір сценаріїв.

Розглянемо докладніше ці етапи.

Таблиця 11.2. Методи якісного та кількісного аналізу, використовувані у процедурі передбачення

№ з/п	Методи	Умови та особливості застосування	Потреби програмного забезпечення
1	Метод сканування	Наявність групи експертів із різних галузей знань	Мережне програмне й апаратне забезпечення для роботи у режимі «on-line»
2	Метод мозкового штурму	Наявність кількох груп експертів із вузьких галузей знань. Застосування на першому етапі методу сканування	Мережне програмне й апаратне забезпечення для роботи у режимі «on-line»
3	Метод Делфі	Наявність групи експертів із певної галузі знань. Простота збирання, підготовки та обробки інформації	Мережне програмне й апаратне забезпечення для роботи у режимі «on-line»
4	Метод перехресного впливу	Застосування на першому етапі методу Делфі. Оцінювання експертами простих та умовних ймовірностей подій і сценаріїв. Пошук обчислюваних величин можливих подій та ймовірності сценаріїв за допомогою математичного програмування	Потужне програмне забезпечення для моделювання складних систем
5	Метод Сааті (метод аналізу ієрархій)	Застосування методу Делфі, якщо можливі сценарії не можна описати вербально. Наявність фахівців високої кваліфікації у галузі теорії мереж. Пошук обчислювальних величин можливих подій та ймовірності сценаріїв за допомогою математичного програмування	Потужне програмне забезпечення для обробки інформації в ієрархічних мережах
6	Метод морфологічного аналізу	Наявність фахівців у галузі теорії множин. Розрахунок можливих сценаріїв, пошук перетинів морфологічних просторів характеристичних параметрів для досліджуваних систем	Потужне програмне забезпечення
7	Метод написання сценаріїв	Наявність системних аналітиків високої кваліфікації. В основу покладено методи якісного аналізу, використання емпіричних припущень і системну побудову цілісних сценаріїв	Потужне програмне забезпечення для імітаційного моделювання сценаріїв
8	Метод моделей Байеса	Наявність аналітиків у галузі теорії ймовірностей і випадкових величин. Метод застосовують на додаток до інших методів якісного аналізу для перевірки ступеня реалістичності побудованих за їхньою допомогою можливих сценаріїв	Потужне програмне забезпечення

11.2.3. Попереднє вивчення проблеми з використанням методів сканування і мозкового штурму

На першому етапі для попереднього вивчення проблеми докладніше аналізують її характерні особливості, визначають напрями (фокуси або платформи) досліджень, формують найважливіші критерії та цілі. Методи, які використовують при цьому, за своєю сутністю та організаційними формами дуже прості. Однак їх коректне застосування має суттєве значення, оскільки втрата важливої інформації на цьому етапі призведе до значних помилок і невиправданих витрат під час виконання всього комплексу робіт із технологічного передбачення.

Розглянемо два основні методи, характерних для етапу попереднього вивчення проблеми.

Метод сканування

Метод використовують під час першого «осмислення» виниклої проблеми в широкому діапазоні (фокусі) ідей і підходів, які можна застосовувати для її розв'язання. Зазвичай цей метод використовують для попереднього вивчення нових проблем, щодо яких відсутній досвід практичного розв'язання.

Процедура, покладена в основу методу сканування, полягає в такому.

1. Створення групи експертів — фахівців у широкій галузі, до якої можна віднести досліджувану проблему.
2. Кожний експерт повинен «згенерувати» ідею щодо способу розв'язання розглядуваної проблеми або принаймні охарактеризувати можливі підходи до її розв'язання. Думки експертів оформлюють у вигляді анотацій концептуального характеру. На цьому етапі ідеї, сформульовані кожним експертом, не обговорюють. Іноді перевагу надають анонімному способу висловлення і нагромадження міркувань експертів.
3. ОПР (частина з них може належати до групи експертів) розглядають усі анотації експертів. Мета цього розгляду — *кластеризація* (поділ на групи) усіх «згенерованих» експертами ідей і міркувань.
4. ОПР із усієї множини кластерів відбирають так звані *конструктивні кластери*, які вивчають і використовують на подальших етапах передбачення.

Метод мозкового штурму

Метод призначений для глибокого та інтенсивного вивчення проблеми у вузьких напрямках, діапазонах чи фокусах ідей і підходів. Спочатку визначають вузькі напрями, наприклад, кластеризацією з використанням методу сканування.

Процедуру методу мозкового штурму можна звести до таких кроків:

1. Сформулювати проблему в заданому вузькому фокусі (вузьке формулювання задачі або вузька платформа).
2. Створити групу експертів — фахівців у вузькій галузі знань відповідно до сформульованої проблеми.
3. За умов обмеженого часу і заданого переліку критеріїв експерти повинні «згенерувати» множину ідей і підходів до розв'язання проблеми для певного діапазону можливих рішень і віднести їх до часової перспективи дослідження. Сформульовані ідеї, виходячи з їхніх переваг і недоліків, не обговорюють. Іноді роботу експертів організовують в анонімному режимі, щоб забезпечити незалежність міркувань кожного з них.

4. «Згенеровані» ідеї поділяють на дві часові групи: ті, які актуальні для майбутнього (наприклад, на період не менше 5 років), і ті, що актуальні у поточний період часу, і тому не використовуються для передбачення.
5. Відібрати і задокументувати ті ідеї і підходи до розв'язання проблеми, що використовуватимуться на подальших етапах передбачення. Такий відбір може здійснювати інша група людей, відповідальних за прийняття рішень. Ця група також задає перелік критеріїв, з урахуванням яких експерти повинні «згенерувати» свої ідеї.

Наведемо приклади основних критеріїв, характерних для створення нових видів конкурентоспроможних технологій із використанням методу мозкового штурму:

- ◆ наявні та потенційні ринки для створюваної продукції і технологій, які використовують у конкурентній боротьбі;
- ◆ прямий вплив на зовнішню торгівлю;
- ◆ соціальна прийнятність створюваних технологій і найважливіші стимули;
- ◆ інтереси у підтриманні конкурентоспроможної продукції;
- ◆ вразливість і ризики індустриальної залежності продукції;
- ◆ внесок у національні потреби у сферах оборони, енергетики, екології, охорони здоров'я і культури;
- ◆ взаємозв'язки з національною промисловістю;
- ◆ можливість впровадження технологій у національну промисловість та їхнє всебічне визнання;
- ◆ стійкість за умов глобального впливу конкуренції тощо.

Отже, на етапі попереднього вивчення проблеми доцільно послідовно використовувати обидва названі методи. Під час першого ознайомлення з проблемою використовують метод сканування для формулювання і кластеризації усіх конструктивних ідей і підходів до її розв'язання в широкому діапазоні (фокусі) досліджень. Після цього для кожного з попередньо визначених напрямів досліджень, що відповідають своєму кластеру, вивчають проблему з урахуванням групи заданих критеріїв (у вузькому фокусі досліджень) за допомогою методу мозкового штурму. Відібрані і задокументовані ідеї та підходи до розв'язання сформульованої проблеми далі використовують для підготовки рішень на подальших етапах передбачення.

11.2.4. Методи якісного аналізу в задачах передбачення

На другому етапі (етапі якісного аналізу проблеми) використовують іншу групу методів. Розглянемо найвідоміші з них.

Метод Делфі

У вітчизняній літературі відомий як *метод експертних оцінок*. За більш ніж сорокарічну історію свого існування він набув значного розвитку, різноманітних інтерпретацій і широкого практичного застосування. Однак, незважаючи на довгий вік і численні модифікації, його головна ідея залишилася незмінною. Вона полягає в необхідності одержання висновку групи експертів про поведінку в майбутньому однієї чи кількох пов'язаних між собою характеристик досліджуваної системи. Отримані результати використовують для побудови можливих сценаріїв її поведінки. Для цього на першому

етапі розробляють так звані *опитувальні форми*. Їх використовують для збирання оптимальних оцінок значень досліджуваних характеристик, запропонованих експертами.

На практиці застосування методу Делфі можна звести до виконання таких дій:

1. Підбір групи експертів відповідно до характеру і теми досліджуваної проблеми.
2. Формулювання мети, якої потрібно досягти завдяки вирішенню проблеми.
3. Розроблення опитувальної форми для сформованої групи експертів.
4. Опитування експертів відповідно до розробленої форми.
5. Статистична обробка даних опитування для синтезу нових результатів.
6. Аналіз кожним експертом отриманих результатів і надання йому можливості врахувати відповіді та висновки усієї групи.
7. На випадок, якщо деякі експерти коригують свої відповіді, після пункту 6 виконують повторну обробку даних опитування згідно із пунктом 5.

Дії, зазначені в пунктах 5–7, виконують доти, поки експерти не припинять коригувати свої відповіді. Одержаний результат вважають *консенсусним*. Іноді, після багаторазового виконання дій, що перераховані у пунктах 5–7, у відповідях експертів не досягнуто стабільності. Це вказує на неможливість вирішення сформульованої проблеми або не зовсім вдалий підбір експертів. У таких випадках слід повернутися до пункту 1 і повторно виконати усі перелічені операції.

Консенсусне рішення експерти аналізують додатково для його інтерпретації і розроблення сценаріїв розвитку досліджуваної системи.

Метод перехресного впливу

На першому етапі метод також ґрунтується на використанні експертних оцінок щодо подій, які могли б охарактеризувати майбутнє на певному проміжку часу. Наприклад, намагаючись досліджувати майбутній розвиток індустрії телекомунікацій, потрібно насамперед визначити, які важливі події, що можуть статися, найповніше відображали б сценарії розвитку цього сектора промисловості.

Як тільки буде визначено найважливіші події Π_i ; $i = 1, \dots, N$, здатні адекватно охарактеризувати сценарії майбутнього в конкретному секторі промисловості, оцінюють імовірності здійснення кожної із цих подій. Їх визначають як прості або вихідні ймовірності $P_0(\Pi_1), \dots, P_0(\Pi_N)$.

Наступним кроком є побудова так званої *матриці перехресного впливу* (рис. 11.3). Вона має розмірність $N \times N$, де N — кількість вибраних подій. Ця матриця визначає взаємовплив подій.

Наприклад, передбачення здійснюють стосовно розвитку умовної галузі промисловості, для якої було визначено чотири важливі майбутні події.

На думку експертів, з якими проводили консультації, перша подія Π_1 впливає на третю подію Π_3 . Друга подія Π_2 впливає на четверту Π_4 , що у свою чергу впливає на другу Π_2 . Після цього оцінюють імовірності того, що ці події відбудуться: $(P(\Pi_i))$, $i = 1, \dots, N$.

Для цього використовують методи моделювання складних систем, зокрема імітаційного моделювання, стохастичного моделювання та деякі інші. Після того, як оцінки ймовірностей $(P(\Pi_i))$, $i = 1, \dots, N$ отримано, на етапі моделювання виконують наступні дії, застосовуючи ті самі методи одержання оцінок реалізації кожного можливого сценарію $(P_c(C_j))$, $j = 1, \dots, 2n$, кількість яких визначає число $2n$.

Результати впливу	П ₁	П ₂	П ₃	П ₄
Події			↑	
П ₁		—		—
П ₂	—			↑
П ₃	—			
П ₄	—	↑	—	

Рис. 11.3. Матриця перехресного впливу для чотирьох подій, $N = 4$

Зазначимо, що наведена методика на першому етапі фактично ґрунтується на застосуванні методу Делфі, результати якого використовують для обчислення оцінок імовірностей можливих сценаріїв розвитку майбутнього відповідно до описаної процедури. Набір найімовірніших сценаріїв і становить основу для передбачення майбутнього.

Метод Сааті

Розроблений американським математиком Томасом Л. Сааті (Thomas L. Saaty) і базується на його відомих результатах у сфері «неструктурованого прийняття рішень» (Non-structured Decision Making). У літературі цей метод також відомий як метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process). Незважаючи на те, що метод Сааті на ранніх етапах застосування (початок 90-х рр.) розглядали винятково як допоміжний інструмент для прийняття рішень, згодом його почали використовувати для розв'язання задач «візуалізації майбутнього», що робить його досить цікавим для технологічного передбачення.

На відміну від інших методів, які використовують у цій сфері знань, суть методу Сааті полягає в обов'язковій умові «фокусування» або «сходження» до чогось єдиного стосовно висновків експертів та дій численних виконавців складного передбачуваного процесу. Тобто в цьому разі метод ґрунтується на «причинній» перспективі процесів, покладених в основу розроблення сценаріїв майбутнього.

Метод ґрунтується на застосуванні так званих *ієрархічних мереж* у разі побудови моделі, призначеної для розрахунку ймовірностей виникнення кожного можливого сценарію в майбутньому. Причому на першому етапі група фахівців, що керує виконанням досліджень, повинна хоча б вербально (у словесній формі) визначити, чим є реально можливі сценарії майбутнього. Ймовірність виникнення або ступінь невизначеності кожного можливого сценарію визначають застосуванням алгоритмів цього методу і моделі ієрархічних мереж. Модель використовуваної для цього типу задач ієрархічної мережі показано на рис. 11.4.

Рівень 5
Фокусування

Рівень 4
Урахування факторів $\Phi_i, i = 1, \dots, K$,
що впливають на сценарії

Рівень 3
Урахування дій та інтересів
виконавців $B_j, j = 1, \dots, L$

Рівень 2
Інтереси виконавців $I_k, k = 1, \dots, Q$,
які можуть вплинути на реалізацію
сценаріїв

Рівень 1
Сценарії $C_n, n = 1, \dots, M$,
які можуть виникнути

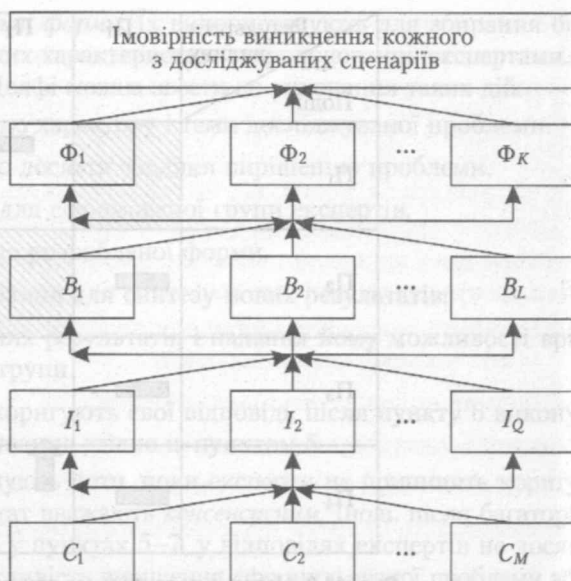


Рис. 11.4. Структура ієрархічної мережі Сааті

Метод морфологічного аналізу

Запропонований у 1969 р. швейцарським математиком і астрономом Фріцом Звіскі (Fritz Zwicky) для вивчення нових геометричних форм, яких можуть набувати створювані технологічні системи. Метод ґрунтується на застосуванні системного підходу і для цього потребує ідентифікації так званих *характеристичних параметрів* $P_i, i = 1, \dots, K$ для досліджуваних систем.

Розглянемо такий випадок. В автомобільну галузь для створення нового покоління автомобілів здійснюють інвестування. Насамперед слід визначитися з групою характерних параметрів, які найбільшою мірою впливають на досягнення нових якостей створюваного автомобіля. Наприклад, деякі з важливих характеристичних параметрів можуть бути закладені в такі блоки автомобіля: P_1 — рухома система (колена та інше); P_2 — система гальмування; P_3 — двигун; P_4 — система передач; P_5 — комп'ютерна система керування; P_6 — система електричного живлення.

Після проведення (формування) набору характеристичних параметрів потрібно визначитися з множинами значень кожного з них або із так званими *можливими морфологічними просторами*. Наприклад, для характеристичного параметра P_3 (двигун) можливий морфологічний простір має такий вигляд:

$$M\{P_3\} = \{\text{внутрішнього згорання; електричний; турбоелектричний}\}.$$

Загальний можливий морфологічний простір для створюваної системи визначають як перетин можливих морфологічних просторів для всіх характеристичних параметрів:

$$M\{\text{системи}\} = M\{P_1\} \cap M\{P_2\} \cap \dots \cap M\{P_k\}.$$

Нехай для умовного автомобіля маємо таку кількість характеристичних параметрів: $P_1 = 2$; $P_2 = 3$; $P_3 = 3$; $P_4 = 4$; $P_5 = 4$; $P_6 = 5$. Тоді морфологічний простір міститиме $2 \times 3 \times 3 \times 4 \times 4 \times 5 = 1440$ можливих розв'язків.

Із можливого морфологічного простору створюваної системи $M\{\text{системи}\}$ виділяють так званий морфологічний простір реального досягнення $M_{\text{рд}}\{\text{системи}\} \subseteq M\{\text{системи}\}$, у якому як рішення залишаються тільки ті елементи, яких можна реально досягти. Отже, вирішення проблеми технологічного передбачення із застосуванням методу морфологічного аналізу досягають тоді, коли елементи можливих морфологічних просторів для різних характеристичних параметрів сумісні, тобто перетин цих просторів не є порожнім простором $M\{\text{системи}\} \neq \emptyset$.

11.2.5. Написання сценаріїв як третій етап передбачення

Метод написання сценаріїв

На третьому етапі використовують емпіричну, дев'ятикрокову процедуру побудови сценаріїв, зображену на рис. 11.5. У літературі ця процедура відома під назвою «метод написання сценаріїв», який розробив відомий фахівець із Великої Британії (Манчестер) у галузі технологічного передбачення Деніс Лоувірідж (Denis Loveridge) [226].

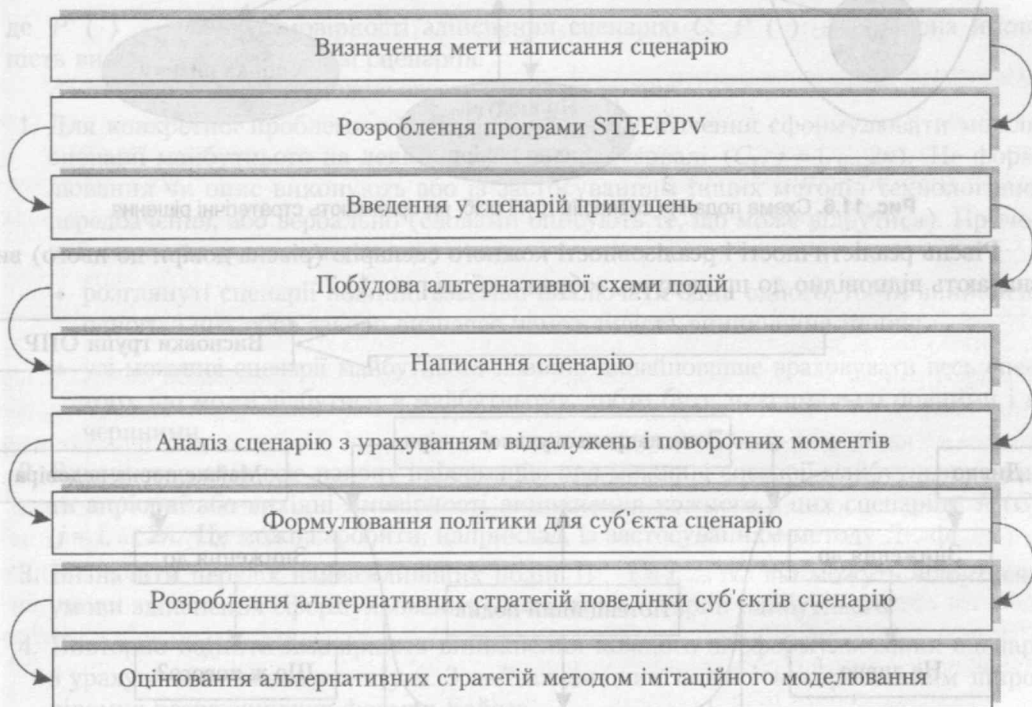


Рис. 11.5. Процедура побудови сценаріїв

11.2.6. Вивчення сценаріїв і надання їх групі ОПР

На четвертому етапі сценарії подають групі осіб, які приймають стратегічні рішення (рис. 11.6), і проводять всеосяжний аналіз цих сценаріїв згідно із такою процедурою:

- ♦ визначення рівня реалістичності і реалізованості кожного сценарію;
- ♦ оцінка ймовірностей подій, що лежать в основі сценаріїв;

- оцінка ризиків, пов'язаних із кожним сценарієм;
- імітаційне моделювання;
- вибір найприйнятніших сценаріїв із погляду зазначених вище критеріїв.

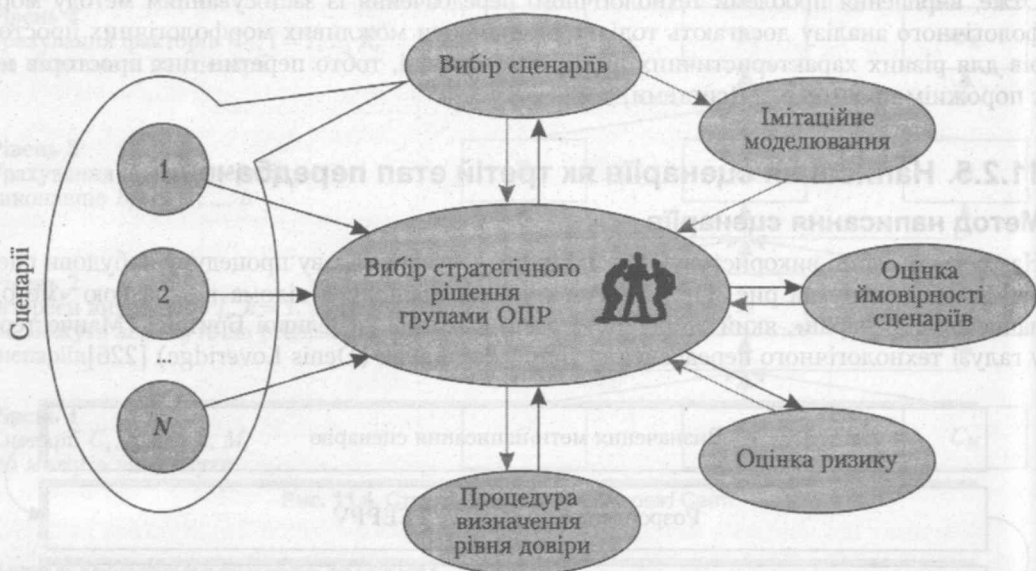


Рис. 11.6. Схема подання сценаріїв групі осіб, які приймають стратегічні рішення

Рівень реалістичності і реалізованості кожного сценарію (рівень довіри до нього) визначають відповідно до процедури, зображеної на рис. 11.7.

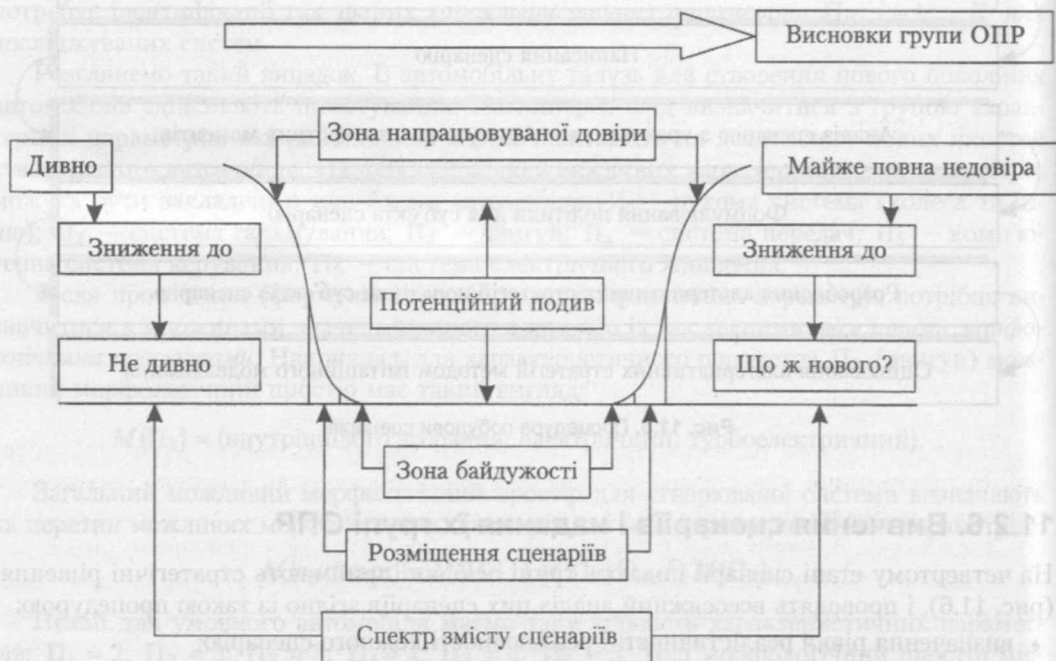


Рис. 11.7. Процедура визначення рівня довіри

Цю процедуру виконують, шукаючи до кожної події сценарію контрприклад або антиподію, що виключає можливість здійснення розглянутої події. Якщо такі антиподії вдається знайти, то рівень довіри до досліджуваного сценарію знижується. Процедuru будують на основі *методів комбінаторної математики* з метою перебирання можливих комбінацій.

Метод моделей Байєса

Імовірності подій для кожного сценарію в методології сценарного аналізу оцінюють із застосуванням методу Байєса, який полягає у визначенні умовних імовірностей здійснення тієї чи іншої події:

$$P^C\left(\frac{C_j}{\Pi_1, \dots, \Pi_N}\right) = \frac{P^0(C_j) P^C\left(\frac{\Pi_1}{C_j}\right) P^C\left(\frac{\Pi_2}{C_j, \Pi_1}\right) \times \dots \times P^C\left(\frac{\Pi_N}{C_j, \Pi_1, \dots, \Pi_{N-1}}\right)}{\sum_{i=1}^{K=2^N} P^0(C_i) P^C\left(\frac{\Pi_1}{C_i}\right) P^C\left(\frac{\Pi_2}{C_i, \Pi_1}\right) \times \dots \times P^C\left(\frac{\Pi_N}{C_i, \Pi_1, \dots, \Pi_{N-1}}\right)}, \quad (11.1)$$

де $P^C(\cdot)$ – умовні ймовірності здійснення сценарію C ; $P^0(\cdot)$ – апіорна ймовірність виникнення кожного зі сценаріїв.

Застосування методу можна звести до таких кроків.

1. Для конкретної проблеми з технологічного передбачення сформулювати можливі сценарії майбутнього на деякому часовому інтервалі ($C_j, j = 1, \dots, 2n$). Це формулювання чи опис виконують або із застосуванням інших методів технологічного передбачення, або вербально (словами описують те, що може відбутися). Причому цей опис має задовольняти дві умови:
 - ♦ розглянуті сценарії повинні взаємно виключати один одного, тобто виникнення одного з них обов'язково визначає неможливість виникнення інших;
 - ♦ усі можливі сценарії майбутнього повинні якнайповніше враховувати весь спектр того, що може відбутися в майбутньому, тобто бути максимально повними і вичерпними.
2. Використовуючи всю наявну інформацію про можливі сценарії майбутнього, оцінити апіорні або вихідні ймовірності виникнення кожного з цих сценаріїв, $P_0(C_j), j = 1, \dots, 2n$. Це можна зробити, наприклад, із застосуванням методу Делфі.
3. Визначити перелік найважливіших подій $\Pi_i, i = 1, \dots, N$, які можуть відбутися за умови здійснення сформульованих можливих сценаріїв майбутнього.
4. Повторно оцінити ймовірність виникнення кожного зі сформульованих сценаріїв з урахуванням визначених у п. 3 найважливіших подій і використанням широко відомих розрахункових формул Байєса.

Отримані ймовірності, які називають відкоригованими, мають характер умовних.

5. Для візуалізації тенденцій, пов'язаних з кожним із можливих сценаріїв майбутнього, одержані результати доцільно зобразити графічно. На підставі аналізу цих результатів із залученням експертів зробити остаточні висновки про те, які з досліджуваних сценаріїв найреалістичніші.
6. Пов'язані з кожним зі сценаріїв ризики оцінюють, використовуючи методи аналізу багатофакторних ризиків, описаних у попередніх розділах, для різних комбінацій факторів і подій, що формують сценарій.

Імітаційне моделювання

Моделювання виконують із використанням широкого арсеналу методів та алгоритмів моделювання для всебічного дослідження кожного зі сценаріїв для різних поєднань зовнішніх факторів імовірностей здійснення подій, що формують сценаріїв.

Найприйнятніші сценарії вибирає група ОПР з урахуванням наведених вище критеріїв і характеристик, а також інших міркувань, що належать до компетенції і відповідальності цих людей.

11.3. Загальна процедура експертного оцінювання в задачах передбачення

У цьому розділі формалізуємо задачу експертного оцінювання і розробимо загальну процедуру їхнього розв'язання [125].

11.3.1. Змістовне і математичне формулювання задачі

Змістовне формулювання задачі

Нехай досліджувана складна система містить скінченну множину підсистем, що різняться своїми властивостями, характеристиками, цілями і характером поведінки.

У задачах передбачення зазвичай потрібно розробити групу сценаріїв розвитку досліджуваної складної системи на основі організації раціональної поведінки кожної зі складових підсистем і узгодження взаємних зв'язків між ними.

Для розроблення цих сценаріїв і досягнення поставленої мети слід розв'язати низку задач, серед яких велике значення мають системні задачі багатокритерійного оцінювання множини станів, характеристик та інших функціональних елементів активного циклу діяльності кожної із підсистем. Особливість розглянутих задач оцінювання полягає у наявності латентних властивостей, показники яких не можна безпосередньо виміряти, обчислити чи визначити іншими інструментальними засобами. Більше того, у передбаченні оцінювання може стосуватися латентних властивостей досліджуваної системи, що характеризуються інформаційною невизначеністю і майбутніми невизначеними ситуаціями.

Оцінити латентні властивості може людина на ґрунті знань, досвіду, інтуїції та передбачення. Однак за умов невизначеності вона не здатна дати точну оцінку, а лише з певним ступенем припущення і впевненості у такій оцінці. Тому потрібно розробити потужні формальні експертні процедури оцінювання, які б значно підсилювали можливості людини у розв'язанні таких задач.

Математична постановка задачі

Відомо: досліджувана система складається зі скінченної множини O_0 об'єктів O_n , $O_0 = \{O_n \mid n = \overline{1, N}\}$. Кожний об'єкт $O_n \in O_0$ характеризує скінченна множина Q_0 показників Q_j , $Q_0 = \{Q_j \mid j = \overline{1, J}\}$. Сформовано групу E_0 експертів E_k , $E_0 = \{E_k \mid k = \overline{1, K}\}$. Кожний експерт $E_k \in E_0$ виконує у режимі онлайн експертизу на підставі наданої йому інформації у формі шкали якісного та кількісного оцінювання показників (табл. 11.3). Експерт незалежно проводить оцінювання і не має інформації про оцінки інших експертів. Оцінку j -го показника n -го об'єкта k -й експерт визначає для кожного рівня $s \in S_0$, $S_0 = [1, S]$ у вигляді нечіткої змінної $\tilde{Q}_{njs} = \langle Q_{njs}^s, \mu_{njs}^s \rangle$. Оцінку j -го показника

для всіх $s = \overline{1, S}$ формує комп'ютерна система експертного опитування в режимі онлайн у вигляді

$$\tilde{Q}_{nj}^k = \{ \{ Q_{njs}^k, \mu_{njs}^k \} \mid n \in N_0; j \in \overline{J_0}; s = \overline{1, S}; k \in K_0; K_0 = [1, K] \}; \quad (11.2)$$

$$N_0 = [1, N], \quad J_0 = [1, J],$$

де μ_{njs}^k визначається результатами оцінювання k -м експертом ступеня можливості реалізації оцінки Q_{njs}^k для $s = \overline{1, S}$ (табл. 11.4).

Таблиця 11.3. Градації s шкали для оцінювання j -го показника n -го об'єкта

Номер рівня s	Якісна характеристика s -го рівня	Кількісна характеристика s -го рівня	Оцінка експертом можливості реалізації s -го рівня
1	Надзвичайно низький	$[0 \div 0,1]$	
2	Дуже низький	$[0,1 \div 0,25]$	
3	Низький	$[0,25 \div 0,4]$	
4	Середній	$[0,4 \div 0,6]$	
5	Високий	$[0,6 \div 0,75]$	
6	Дуже високий	$[0,75 \div 0,9]$	
7	Надзвичайно високий	$[0,9 \div 1]$	

Таблиця 11.4. Результати оцінювання k -м експертом j -го показника n -го об'єкта

Номер рівня s	Якісна характеристика s -го рівня	Кількісна характеристика s -го рівня	Оцінка експертом можливості реалізації s -го рівня
1	Надзвичайно низький	$[0 \div 0,1]$	0,05
2	Дуже низький	$[0,1 \div 0,25]$	0,15
3	Низький	$[0,25 \div 0,4]$	0,35
4	Середній	$[0,4 \div 0,6]$	0,90
5	Високий	$[0,6 \div 0,75]$	0,45
6	Дуже високий	$[0,75 \div 0,9]$	0,05
7	Надзвичайно високий	$[0,9 \div 1]$	0,01

Оцінювання μ_{njs}^k для кожного значення $s \in S_0$, $S_0 = [1, S]$ виконують незалежно. Кожну оцінку вибирають з інтервалу $[0; 1]$. Підсумкову оцінку кожного j -го показника визначають нормуванням усіх оцінок для $s = \overline{1, S}$.

Оцінку k -м експертом n -го об'єкта у цілому формує система експертного опитування у вигляді масиву

$$\tilde{Q}_n^k = \{ \tilde{Q}_{nj}^k \mid n \in N_0; j = \overline{1, J}; k \in K_0 \}; \quad K_0 = [1, K]. \quad (11.3)$$

Результати експертизи для n -го об'єкта всіма експертами формує система експертного опитування у вигляді масиву:

$$\tilde{Q}_n = \{ \tilde{Q}_n^k \mid n \in N_0; k = \overline{1, K} \}. \quad (11.4)$$

Потрібно: визначити оцінки для всіх об'єктів $O_n, n = \overline{1, N}$ множини O_0 всіма $k = \overline{1, K}$ експертами.

Зазначимо, що кількість ґрадацій s у шкалі експертного оцінювання (див. табл. 11.3, 11.4) доцільно формувати відповідно до числа Міллера, яке дорівнює 7 ± 2 .

11.3.2. Метод розв'язання задачі експертного оцінювання

Для реального експертного оцінювання в задачах передбачення важливе значення має раціональний вибір метрики і критеріїв, на підставі яких слід порівнювати показники досліджуваних об'єктів. Беремо до уваги, що показники якості об'єктів зазвичай є додатними величинами. Для багатьох практичних застосувань потрібно безпосереднє зіставлення показників якості об'єктів. Наприклад, під час вибору технологічного устаткування безпосередньо порівнюють продуктивність, точність обробки та інші показники. Аналогічні порівняння виконують під час проведення експертизи складних проектів. У таких випадках для порівняння різних показників якості доцільно використовувати чебишевські критерій та метрику. Тоді міру відмінності будь-якої пари експертних оцінок j -го показника n -го об'єкта визначатиме співвідношення

$$\tilde{\rho}_{njs} = \{|\tilde{Q}_{njs}^p - \tilde{Q}_{njs}^q|, p, q \in K_0, p \neq q; s \in S_0; n \in N_0\}.$$

Відповідно до вихідної інформації (див. табл. 11.3) кількісна характеристика s -го рівня j -го показника якості, наприклад конкурентоспроможності, для n -го виду продукції залежить тільки від $j \in J_0, s \in S_0$. Тому для всіх $n \in N_0, p, q \in K_0$ виконується умова $Q_{njs}^p = Q_{njs}^q$, де p і q визначають порядкові номери експертів у групі K_0 . Отже, відмінність будь-якої пари експертних оцінок (11.2) визначається лише відмінністю оцінок експертів і характеризується співвідношенням:

$$\tilde{\rho}_{njs} = |\mu_{njs}^p - \mu_{njs}^q|.$$

На підставі наведених пояснень і введеної метрики розв'язання задачі можна звести до виконання послідовності таких процедур:

1. Сформулювати загальну оцінку j -го показника n -го об'єкта на підставі результатів експертного оцінювання всіма $k = \overline{1, K}$ експертами.
2. Знайти граничні межі інтервалу для j -го показника n -го об'єкта з використанням співвідношень

$$\tilde{\rho}_{nj}^+ = \max_{p, q \in K_0} \left\{ \max_{s=1, S} |\mu_{njs}^p - \mu_{njs}^q|, n \in N_0 \right\};$$

$$\tilde{\rho}_{nj}^- = \min_{p, q \in K_0} \left\{ \min_{s=1, S} |\mu_{njs}^p - \mu_{njs}^q|, n \in N_0 \right\}.$$

3. Знайти центр інтервалу для j -го показника n -го об'єкта у вигляді половини суми меж інтервалу

$$\hat{\rho}_{nj} = \frac{\tilde{\rho}_{nj}^+ + \tilde{\rho}_{nj}^-}{2}.$$

4. Знайти граничні межі відносно центра інтервалу для j -го показника n -го виду об'єкта за допомогою співвідношень

$$\begin{aligned}\rho_{nj}^+ &= \max_{p \in K_0} \left\{ \max_{s=1, S} |\hat{\rho}_{nj} - \mu_{njs}^p|, n \in N_0 \right\}, \\ \rho_{nj}^- &= \min_{p \in K_0} \left\{ \min_{s=1, S} |\hat{\rho}_{nj} - \mu_{njs}^p|, n \in N_0 \right\}.\end{aligned}$$

5. Виконати для n -го об'єкта процедури 1–4 для всіх показників $j \in J_0$.
6. Сформувати загальну оцінку $\tilde{Q}_n$ у вигляді співвідношення (11.4) для n -го об'єкта за результатами його оцінювання (11.3) всіма $k = 1, K$ експертами.
7. Виконати процедури 1–6 для всіх об'єктів $n \in N_0$.

Слід зазначити, що за відсутності обміну інформацією між експертами найімовірніше, що граничні межі інтервалу для кожного показника кожного об'єкта виявляться надмірно широкими. До того ж оцінки експертів можуть розподілятися по всьому інтервалу майже рівномірно або зосереджуватися у трьох областях: у центрі інтервалу і біля його двох меж (нижньої та верхньої), відображаючи відповідно думки обережних прагматиків, оптимістів та песимістів. Такі результати для прийняття реальних рішень зазвичай непридатні, що зумовлює потребу виконання коригування результатів на підставі узгодження та уточнення думок експертів.

Можливі два основні варіанти коригування: безпосереднє зменшення розмірів інтервалу концентрацією рівномірно розподілених оцінок біля центра відрізка або концентрацією нерівномірно розподілених оцінок біля центра трьох областей, визначених відповідями обережних прагматиків, оптимістів і песимістів.

Для цього на основі теорії групованої вибірки визначимо математичне сподівання і дисперсію масиву експертного опитування для j -го показника n -го об'єкта. Врахуємо низку особливостей, характерних для формування вихідних даних. Так, внаслідок незалежного оцінювання експертами j -го показника отримані результати для кожного s -го рівня утворять груповані дані, визначені співвідношенням:

$$\tilde{Q}_{njs} = \{ \langle Q_{njs}^k, \mu_{njs}^k \rangle \mid n \in N_0; j \in J_0; s \in S_0; k = \overline{1, K} \}.$$

Для обчислення параметрів оцінювання j -го показника зручно за початок відліку взяти центр $\hat{\rho}_{nj}$ інтервалу. Тоді середнє і дисперсію вибірки визначають так:

$$\begin{aligned}M\tilde{Q}_{nj} &= \hat{\xi}_{nj} = \hat{\rho}_{nj} + \frac{1}{K} \sum_{s=1}^S k_s |\hat{\rho}_{nj} - \mu_{njs}^{k_s}|; \\ D\tilde{Q}_{nj} &= \sigma_{nj}^2 = \frac{1}{K} \sum_{s=1}^S |k_s (\mu_{njs}^{k_s})^2 - \hat{\xi}_{nj}^2|,\end{aligned}$$

де k_s — кількість експертів, оцінка яких за s -ю градацією шкали входить у межі середнього інтервалу з центром $\hat{\rho}_{nj}$ і межами ρ_{nj}^+, ρ_{nj}^- .

На основі наведених співвідношень, використовуючи метод Делфі [203, 258] чи інший метод якісного аналізу, можна коригувати результати експертизи.

11.4. Інформаційна платформа сценарного аналізу

Розв'язуючи наближені до реальності задачі передбачення, на різних його етапах використовують різні методи якісного аналізу в єдиній людино-машинній процедурі. Це потрібно робити з урахуванням: недоліків і переваг кожного методу; особливостей досліджуваної системи щодо топології взаємозв'язків між її внутрішніми елементами; характеру інформації, що циркулює в системі (кількісного чи якісного); суперечливості критеріїв, на множині яких розв'язують задачу; ступеня невизначеності інформації та інших аспектів. Вирішення таких проблем можливе лише із застосуванням *системного підходу*, коли враховують всю сукупність властивостей і характеристик досліджуваних систем, як і особливостей методів та процедур, використаних для їхнього створення.

Наприклад, досить ефективним системним прийомом застосування розглянутих методів якісного аналізу є використання двох груп методів на двох етапах процесу передбачення. На першому етапі для визначення можливих сценаріїв майбутнього доцільно синхронно застосовувати метод Делфі в комбінації з методами Сааті, перехресного впливу або морфологічного аналізу, залежно від особливостей проблеми, а на другому — метод моделей Байєса для виявлення найреалістичніших сценаріїв.

На підставі порівняння характеристик методів якісного аналізу, вимог до їхнього застосування, недоліків і переваг кожного з них дослідники проблем передбачення повинні вибрати оптимальну комбінацію методів, встановити правильну послідовність їхнього використання з урахуванням усієї сукупності вимог до досліджуваних систем та особливостей розв'язуваних задач.

11.4.1. Системне застосування творчих якостей людини та об'єктивних знань у задачах передбачення

Усі розглянуті методи, незалежно від складності моделей та особливостей обчислювальних процедур, за означенням мають якісний характер. Це пов'язано із тим, що вихідними даними для них є висновки експертів чи аналітиків, залучених до розв'язання конкретних задач технологічного передбачення. До подібних висновків завжди приходять, ґрунтуючись на *знаннях, досвіді, інтуїції та здоровому глузді* професіоналів у певній галузі. Тому результати, одержані за допомогою розглянутих методів, є лише *наближеннями (апроксимаціями)* до того, що повинно відбутися реально. У зв'язку з цим методи, об'єднані у потужні людино-машинні процедури, можна розглядати як ефективний і потужний інструмент для *побудови сценаріїв*, наближених до справжніх подій і сценаріїв у майбутньому, яке ми намагаємося передбачити. У цьому розумінні жоден із одержаних у такий спосіб результатів не можна розглядати як абсолютно визначений факт у майбутньому. Водночас побудова цих сценаріїв може базуватися на системному застосуванні чотирьох груп методів на різних етапах процесу передбачення. Типовий цикл передбачення показано на рис. 11.8.

Під час розв'язання проблем передбачення надзвичайно важливим є підбір групи експертів із найкваліфікованіших фахівців у певній предметній області, а також застосування новітнього математичного забезпечення і потужних інформаційних технологій. Це має забезпечити вищу точність і адекватність можливих сценаріїв майбутнього [47–49].

Потрібно пам'ятати, що вплив людського фактора на результати передбачення вносить значний суб'єктивізм у цю процедуру. Вона стає настільки ж інтуїтивною, як і ра-

ціональною. Суть такого стану справ полягає в об'єднанні у передбаченні як об'єктивного, так і суб'єктивного ставлення до предмета досліджень. Виникнення цієї суб'єктивної складової передбачення найбільшою мірою пов'язане з припущеннями, які людина повинна робити у процесі написання сценаріїв, ґрунтуючись на певних знаннях або суто інтуїтивно.



Рис. 11.8. Типовий цикл передбачення

Методи і засоби, використовувані у передбаченні, мають відображати зв'язок між об'єктивними і суб'єктивними факторами, виходячи з того, що передбачення можуть здійснювати або окремі експерти, або невеликі групи людей через консультації із зацікавленою аудиторією чи навіть із певними верствами населення країни.

Зазначені властивості передбачення зумовлюють його *дуальність*. Справді, інтуїтивна складова передбачення майже не залежить від самого процесу. Однак різні процеси передбачення можна інтегрувати у встановлених програмах. Розглянемо так званий *трикутник передбачення* [226] (рис. 11.9), ілюстрацію співвідношення між *об'єктивними знаннями* і *суб'єктивною творчістю*, які розміщені на двох вершинах трикутника. Третя вершина трикутника пов'язана з інтерпретацією результату взаємодії між знанням і творчістю у процесі формування політики — *інтерактивним вирівнюванням*.

Кожний експерт, який бере участь у передбаченні, може висловити свої думки як суб'єктивні, однак, як видно із трикутника, процедура передбачення зобов'язує його максимально ґрунтуватися на об'єктивних знаннях. Водночас радикальний погляд у майбутнє зумовлює потребу використання припущень. Зазвичай компроміс між знаннями

і творчістю може призвести до суттєвого «коригування» поглядів, котрі важливо враховувати під час формування політики, що вплине на інтерактивне вирівнювання або «наведення мостів» між радикальними поглядами і наявними, визнаними думками щодо стратегії того чи іншого досліджуваного процесу.



Рис. 11.9. Типовий трикутник передбачення

У трикутнику показано диспозицію різних методів, які використовують у процесах передбачення. Кожен із них розташований на певній відстані від відповідних вершин. Наприклад, *Наукова фантастика*, тісно пов'язана з утопічним баченням майбутнього, розміщена найближче до вершини *Творчість*, тоді як *Всебічне випробування сценаріїв* за допомогою об'єктивних тестів і їх подання групі ОПР розташовані найближче до вершини *Об'єктивні знання*. Внутрішня область трикутника вказує на те, що будь-яку комбінацію методів можна використовувати у процесі формування експертних оцінок і подання результатів. Ці результати мають досягти інтерактивного вирівнювання з потребами зацікавленої аудиторії, організації-респондента або суспільства для того, щоб програма з передбачення набула довіри. За цих умов її можна використовувати для формування відповідної політики.

11.4.2. Інформаційна платформа сценарного аналізу як інструмент передбачення

Зближення об'єктивних знань і творчих припущень в інтерактивній людино-машинній процедурі дає змогу підвищити достовірність сценаріїв досліджуваних процесів, явищ і подій. Такий процес забезпечують із використанням свідомості та універсальної сукупності засобів і підходів, яку називають *інформаційною платформою сценарного аналізу (ІПСА)*. Ця платформа є комплексом математичних, програмних, логічних та організаційно-технічних засобів та інструментів для здійснення цілісного процесу пе-

редбачення на основі інтерактивної взаємодії людини і спеціально створеного для цього програмно-технічного середовища. Слід зазначити, що під час розв'язання практичних задач передбачення на основі ІПСА експертні оцінки зазвичай одержують через Інтернет у режимі онлайн.

Програмний продукт, покладений в основу цієї платформи, є розподіленою інформаційною системою прийняття рішень під час побудови сценаріїв майбутнього і поєднує в собі потужний математичний апарат і створений на основі сучасних технологій програмування зручний та гнучкий веб-інтерфейс користувача. Функціональну архітектуру ІПСА наведено на рис. 11.10. Ця система дає змогу за допомогою мережі Інтернет залучати до роботи експертів з усього світу, оперативно одержувати й обробляти рішення, організовувати спілкування, взаємодію та обмін інформацією між експертами. Занурення у розглянуту програмну сферу поданих вище методів аналізу та обробки експертної інформації дає змогу одержати якісні та обґрунтовані розв'язки задач кожної експертизи.

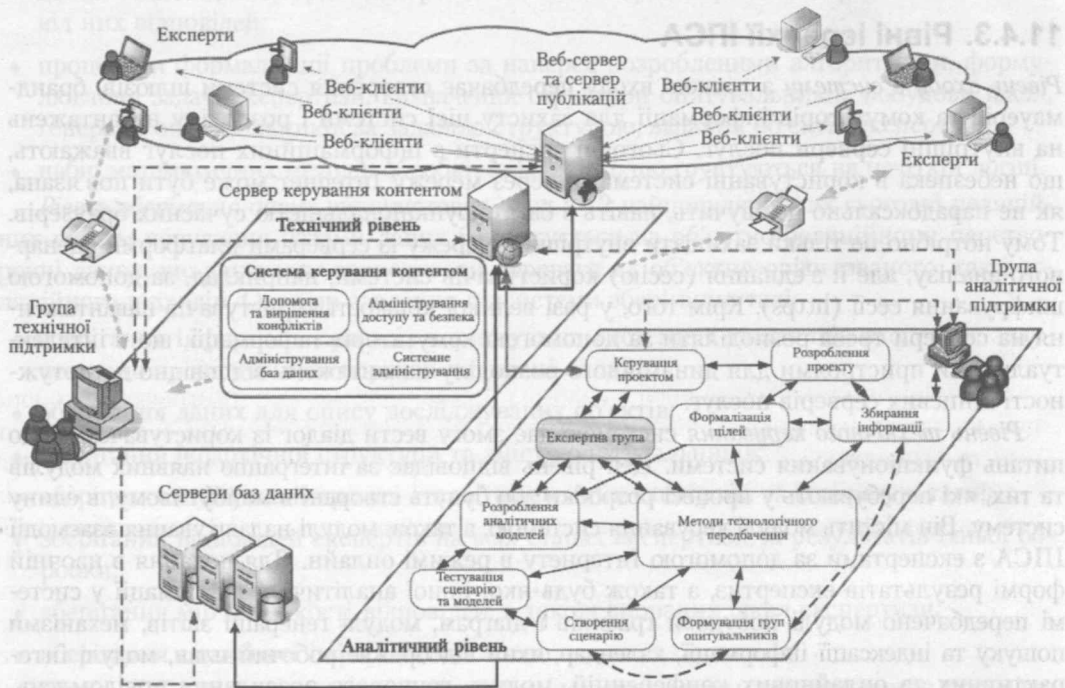


Рис. 11.10. Функціональна архітектура ІПСА

Згідно з вибраною методикою розроблення системи основні компоненти ІПСА реалізовано мовами Java та PHP. Сьогодні веб-технології використовують для розроблення корпоративних систем підтримки прийняття рішень, інтернет-систем і систем, що працюють в умовах гетерогенного середовища. Цей підхід має низку значних переваг для розроблення розподілених систем типу веб-клієнт-сервер. До них насамперед слід віднести наявність повної об'єктно-орієнтованої компонентної моделі, яка не залежить від архітектури ЕОМ і встановленої операційної системи, що дає змогу використовувати цю технологію програмування будь-якому користувачеві мережі Інтернет, не турбуючись про апаратну сумісність.

Під час розроблення цих систем значну увагу приділяють їх використанню в мережі Інтернет із можливістю залучення експертів із усього світу. Для будь-якої інформаційної системи, орієнтованої на використання в мережі Інтернет, слід враховувати специфіку роботи з користувачами, які перебувають на значній відстані один від одного. Зокрема, під час проведення опитувань серед експертів, що перебувають у різних частинах земної кулі, потрібно враховувати різницю в годинних поясах (система має бути доступна в режимі онлайн цілодобово), відмінність використовуваних мов, а також різний рівень комп'ютерної грамотності експертів. У зв'язку з цим у розробленій системі передбачено функції інтернаціоналізації та багатомовної підтримки. Використання ж веб-інтерфейсу дає змогу користувачам застосовувати добре відоме їм програмне забезпечення — браузер.

Інформаційна платформа сценарного аналізу реалізована як розподілена крос-платформна система, побудована за архітектурою *клієнт-сервер*. Компонентний підхід дає змогу подати систему у вигляді рівнів ієрархії.

11.4.3. Рівні ієрархії ІПСА

Рівень входу в систему з точкою входу передбачає створення системи шлюзів, бренд-мауерів та комутаторів інформації для захисту цієї системи і розподілу навантажень на внутрішні сервери послуг. Сьогодні експерти з інформаційних послуг вважають, що небезпека в користуванні системами через мережу Інтернет може бути пов'язана, як не парадоксально це звучить, навіть з багатофункціональністю сучасних браузерів. Тому потрібно не тільки захищати внутрішню мережу із серверами платформи сценарного аналізу, але й з'єднання (сесію) користувачів системи, наприклад, за допомогою шифрування сесії (https). Крім того, у разі великої кількості користувачів навантаження на сервери треба розподіляти за допомогою комутаторів інформації, що є інтелектуальними пристроями для динамічного розподілу навантажень відповідно до потужності кінцевих серверів послуг.

Рівень технічного керування системою дає змогу вести діалог із користувачем щодо питань функціонування системи. Цей рівень відповідає за інтеграцію наявних модулів та тих, які перебувають у процесі розробки або будуть створені в майбутньому, в єдину систему. Він містить модулі керування системою, а також модулі налаштування взаємодії ІПСА з експертами за допомогою Інтернету в режимі онлайн. Для подання в наочній формі результатів експертиз, а також будь-якої іншої аналітичної інформації у системі передбачено модулі побудови графіків і діаграм, модулі генерації звітів, механізми пошуку та індексації інформації, календар, який відображає робочий план, модулі інтерактивних та онлайн-конференцій, модуль групового розсилання повідомлень, модуль допомоги в роботі системи, модулі збирання даних щодо роботи самої системи та активності її користувачів загалом та за проектами.

Усі ці модулі об'єднано єдиним механізмом — порталом доступу до системи. До будь-якої функції користувачі порталу мають доступ згідно з централізованою політикою розподілу відповідальності та доступу адміністраторів і менеджерів системи. Топологією системи передбачено створення та інтеграцію в систему платформи відео- та аудіоконференцій за допомогою сучасних рішень у сфері телекомунікацій (інтеграції з концепціями VoIP, cisco AVVID). При цьому експерти та віддалені користувачі використовують звичну для себе операційну систему та інтернет-браузер (опціонально також інше обладнання й програмне забезпечення). Модуль багатомовної підтримки дає змогу формувати веб-інтерфейс для віддалених користувачів найкращою для них мовою.

Системно-організаційний рівень забезпечує реалізацію основних алгоритмів системи на основі деяких функціонально незалежних методів обробки даних, а саме:

- ♦ містить модулі узгодження з механізмами адміністрування системи, засоби управління проектами та експертизами, механізм опису проблемної області, інструменти реалізації методів технологічного передбачення;
- ♦ відповідає за менеджмент зв'язків типу користувачі–проекти, забезпечує потрібний рівень доступу користувачів до системи, здійснює керування проектами та узгодженнями інформаційних потоків типу ІПСА–ІПСА, ІПСА–користувачі, користувачі–користувачі.

Аналітичний рівень містить у собі всі потрібні процедури для проведення експертиз, а саме:

- ♦ процедури визначення та формалізації проблеми у предметній області, запрошення експертів у проект і визначення їхньої компетентності, призначення і проведення відповідних турів експертиз, опитування експертів та обробка одержаних від них відповідей;
- ♦ процедури формалізації проблеми за наперед розробленими алгоритмами, формулювання задачі експертизи, визначення структури опитувальників, побудови шкал, генерації опитувальників за заданою структурою, задання об'єктів експертизи;
- ♦ набір математичних методів обробки інформації, що ґрунтуються на нечіткій логіці.

Рівень зберігання даних використовує одну з 12 найпопулярніших сьогодні реляційних систем керування базами даних і ґрунтується на об'єктно-реляційному перетворенні даних, що дає змогу враховувати переваги як об'єктно-орієнтованого, так і реляційного підходів. Основні завдання підсистеми зберігання такі:

- ♦ зберігання інформації про всіх користувачів системи, а також про експертів, залучених до проведення експертизи в режимі онлайн;
- ♦ зберігання даних для опису досліджуваних об'єктів;
- ♦ зберігання ієрархічної структури та змісту опитувальників;
- ♦ зберігання інформації про всі етапи проведення експертиз та їхні результати;
- ♦ зберігання відповідей експертів на всіх етапах експертизи та результатів їхньої обробки;
- ♦ зберігання мір близькості відповідей, а також вибраних шкал експертизи;
- ♦ зберігання службової інформації.

Отже, ІПСА є потужним універсальним інструментарієм для виконання процедур передбачення в задачах прийняття рішень стратегічного планування.

11.5. Технологічне передбачення в інноваційній діяльності

Однією з найактуальніших сфер застосування методології технологічного передбачення і сценарного аналізу є інноваційна діяльність людини.

Сучасні тенденції суспільного прогресу в розвинених країнах світу пов'язані з поступовим переходом від процесів довільного, іноді спонтанного розвитку науково-технічних досліджень і технологій до концепції стратегічного планування і керування ними.

Вони ґрунтуються на *методології технологічного передбачення* і характеризують сучасні умови економічної глобалізації і домінування економіки, яка ґрунтується на знаннях.

У соціальному аспекті метою технологічного передбачення є визначення суспільно та економічно вигідних технологій майбутнього.

Зазначимо, що в історії людства одним із найяскравіших прикладів застосування методології технологічного передбачення, починаючи із середини 50-х рр., є формування і здійснення космічної програми Радянського Союзу. Її основні результати непервершені дотепер.

11.5.1. Економічні та соціальні фактори використання передбачення в інноваційній діяльності

Методологію технологічного передбачення як невіддільну складову інноваційного розвитку національних економік на постійній системній основі почали використовувати наприкінці 80-х — початку 90-х рр. насамперед такі країни, як Японія, США, Великобританія, Німеччина. Згодом її застосовують у Голландії, Франції, Австралії та інших розвинених країнах.

Це було зумовлено такими факторами.

1. Постійне зростання конкуренції за обмеження енергетичних і природних ресурсів.
2. Обмеження суспільних витрат зумовлене потребою урядів країн балансувати свої бюджети в умовах старіння населення в розвинених країнах і досягнення політично лімітованих меж податків. Тобто подальше підвищення податків у цих країнах призведе до порушення політичної рівноваги і відтоку капіталів у офшорні зони.
3. Підвищення складності суспільних систем пов'язане із посиленням зв'язків і тіснішою взаємодією соціально-політичних та економічних систем різного типу (національних і регіональних, державних і приватних тощо).
4. Підвищення ролі науково-технічної компетенції зумовлене тим, що науково-технічні знання стають стратегічним ресурсом для країн і компаній. Вони також є основним чинником підвищення якості життя.

У суспільному аспекті технологічне передбачення має такі характерні особливості.

- ◆ Передбачення — це процес, що може об'єднати учасників різних зацікавлених груп інноваційного розвитку (наукову громадськість, уряд, промисловість, недержавні організації тощо) для обговорення питання про те, який світ вони хотіли б створити упродовж найближчих десятиліть.
- ◆ Для того, щоб спроби зазирнути в майбутнє можна було вважати передбаченням, вони мають бути систематичними.
- ◆ Такі спроби повинні мати характер довгострокового передбачення (на період від 5 до 30 і більше років).
- ◆ Успіх передбачення ґрунтується на збалансованості досягнень у певній науково-технологічній сфері з економічним прогресом суспільства.
- ◆ Перевагу слід надавати виявленню так званих згенерованих технологій, тобто технологій, що перебувають на передконкурентному етапі свого розвитку, але ґрунтуються на прогресивних ідеях та нових ефектах і тому мають підстави для державного фінансування на цьому етапі.

♦ Формовані технології мають не лише сприяти розвитку промисловості та економіки, але й бути соціально запитаними з погляду екологічних, медичних, освітніх та інших запитів. Ці властивості технологічного передбачення зумовлюють зміну соціальних взаємовідносин між наукою і технікою, з одного боку, і системою державного управління — з іншого.

Так, упродовж приблизно 40 років після Другої світової війни модель «наукового прориву» відігравала домінуючу роль у політиці фінансування наукових досліджень. Відповідно до цієї моделі прогрес у фундаментальних дослідженнях надавав нові можливості для прикладних розробок, що, у свою чергу, сприяло розвитку нових технологій та інновацій. Отже, суспільство підтримувало фундаментальні дослідження, розраховуючи, що вони згодом дадуть практичні результати (підвищення матеріальних благ, поліпшення здоров'я людей, зміцнення національної безпеки тощо). Водночас, органи державного управління не дуже цікавило, у якій формі здійсняться очікувані результати і коли це відбудеться.

На новому етапі, за зростаючої конкуренції у промисловості, жорстких фінансових обмежень і вимог звітності, уряди країн очікують конкретніших результатів від науки у відповідь на капіталовкладення в цю сферу. Тому технологічне передбачення сьогодні є одним із підходів до узгодження інтересів і досягнень наукової громадськості за проведення найперспективніших досліджень із можливостями промисловості і потребами суспільства загалом щодо нових технологій та інновацій.

Це визначає ще одну обставину, відповідно до якої уряди поступово змушені «втягуватися» у процес технологічного передбачення. Вона полягає в тому, що успішне використання досягнень науки і техніки все більше залежить від створення ефективних зв'язків між промисловістю, науковими закладами та гілками влади, що відповідають за технологічний розвиток суспільства. Технологічне передбачення є основою для встановлення і зміцнення таких зв'язків, сприяючи узгодженню і реалізації національної та регіональних систем інноваційного розвитку, підвищуючи їхню ефективність.

11.5.2. Національна і регіональна системи інноваційного розвитку в ринковій економіці

Одна з причин того, що все більше країн упродовж останнього десятиліття використовують методологію технологічного передбачення, пов'язана з *концепцією національної або регіональної системи інноваційного розвитку*. До складу такої системи входить низка учасників-компаній, підприємств, наукових установ, урядових структур. Слід зазначити, що для системного аналізу дуже важливими є взаємозв'язки між цими учасниками. Наприклад, національна чи регіональна система інноваційного розвитку, до складу якої входять учасники, які не обов'язково є дуже потужними, однак мають добре налагоджені взаємозв'язки, може діяти ефективніше (з погляду генерування інновацій), ніж інша система з потужними учасниками, але слабкими взаємозв'язками. Якщо у країні чи регіоні впроваджено систему інноваційного розвитку, то найважливішим завданням є зміцнення та оптимізація зв'язків між різними компонентами цієї системи.

Технологічне передбачення пропонує механізм для досягнення такої мети. Воно сприяє спілкуванню учасників системи, обговоренню проблем, що мають довгостроковий взаємний інтерес, координації відповідних стратегій і в деяких випадках — співробітництву. Отже, технологічне передбачення стає засобом активізації національної та регіональної систем інноваційного розвитку.

Тут можна провести аналогію з розвитком мозку дитини. Мозку потрібні стимули, щоб розвивати зв'язки між нейронами і у такий спосіб активізувати свою діяльність, що надалі дасть йому змогу швидше та ефективніше сприймати нове. Аналогічно для національної системи інноваційного розвитку потрібні процеси і стимули, які сприяли б налагодженню зв'язків між окремими учасниками. Що тісніше зв'язок між окремими компонентами, то ефективніша національна система інноваційного розвитку щодо сприйняття нового й оновлення. Тому технологічне передбачення є засобом досягнення цієї мети.

Під час розробки стратегії інноваційної діяльності слід враховувати взаємозв'язки, взаємозалежності, взаємодії різних процесів, факторів та умов національного і світового ринків наукомісткої продукції, що суттєво впливають на її результативність. Складність і невизначеність властивостей зазначених процесів і факторів потребують попередніх досліджень на основі моделей, які визначають реальні взаємозв'язки процесів і практично необхідні взаємозв'язки учасників інноваційної діяльності. Розглянемо дві структурні моделі. Одна з них (рис. 11.11) визначає структуру взаємозв'язків та цілі основних суб'єктів інноваційної діяльності (виробництва, науки, бізнесу, освіти)

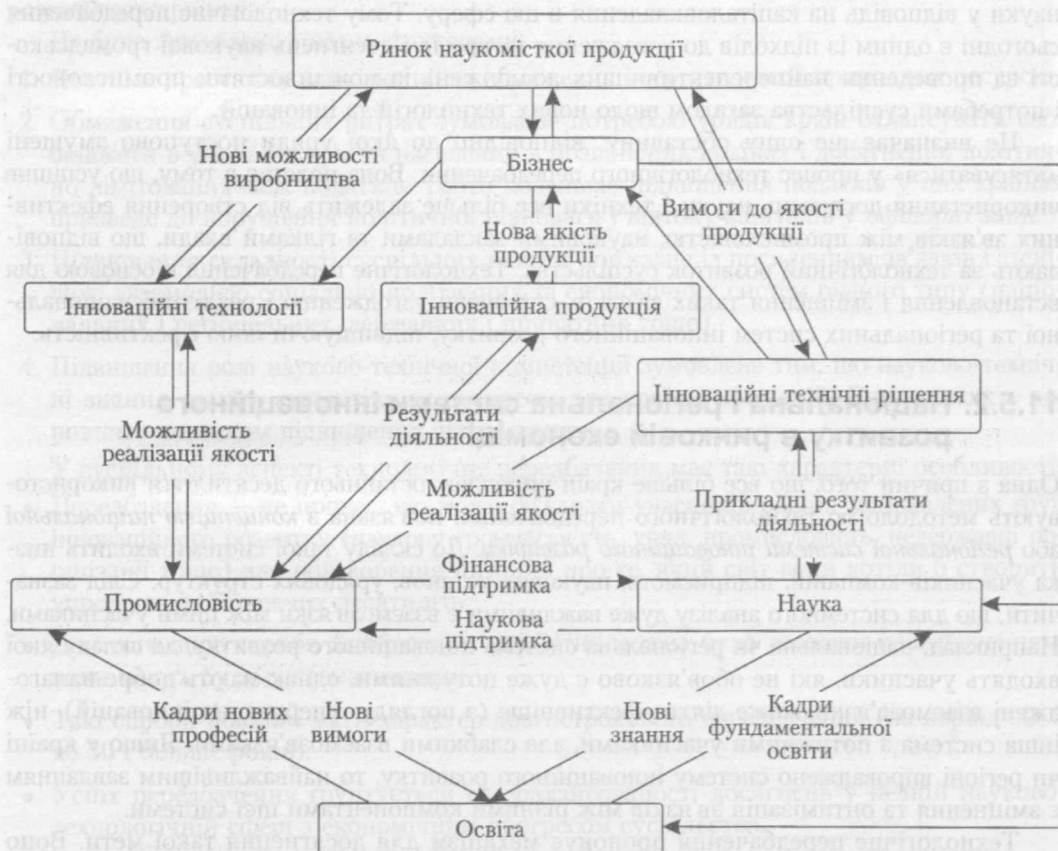


Рис. 11.11. Структура системних взаємозв'язків суб'єктів інноваційної діяльності

Інша модель (рис. 11.12) – це ієрархічна організаційна структура управління інноваційною діяльністю на національному рівні в умовах швидких змін сучасного ринку.

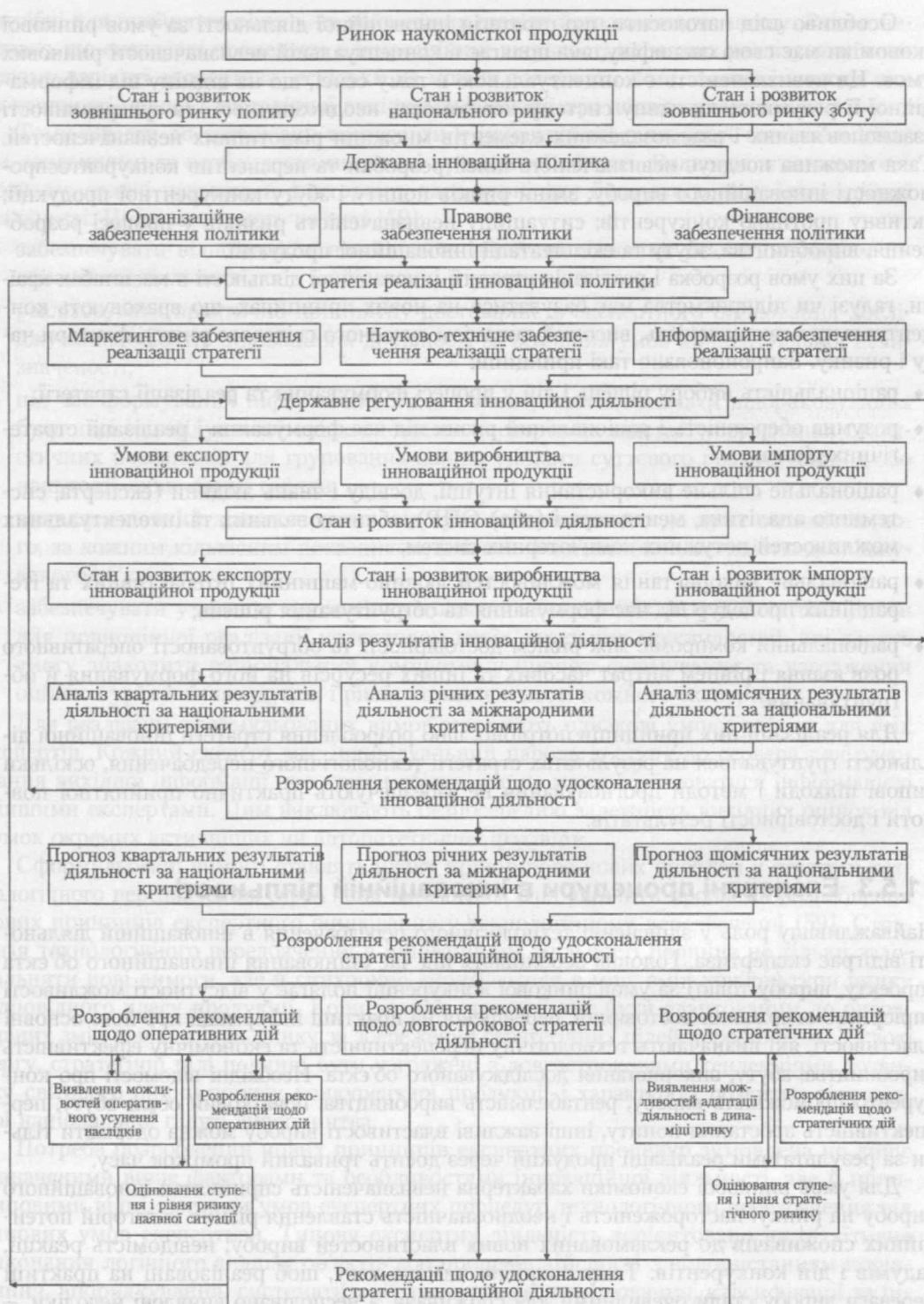


Рис. 11.12. Структура управління інноваційною діяльністю на національному рівні

Особливо слід наголосити, що стратегія інноваційної діяльності за умов ринкової економіки має свою специфіку, яка полягає в концептуальній невизначеності ринкових умов. Ця невизначеність є концептуальною в тому сенсі, що на відміну від інформаційної її розуміють як єдину систему невідомості, неоднозначності та суперечливості взаємопов'язаних і взаємозалежних елементів множини різнотипних невизначеностей. Така множина поєднує невизначеність цілей розробки та перспектив конкурентоспроможності інноваційного виробу; зміни ринків попиту і збуту конкурентної продукції; активну протидію конкурентів; ситуаційну невизначеність ризиків у процесі розроблення, виробництва, збуту та експлуатації інноваційної продукції.

За цих умов розробка і реалізація стратегії інноваційної діяльності в масштабах країни, галузі чи підприємства має базуватися на нових принципах, що враховують концептуальну невизначеність, високий динамізм сучасного світового ринку, фактори часу і ризику. Запропоновано такі принципи:

- ♦ раціональність вибору рішень і дій у процесі формування та реалізації стратегії;
- ♦ розумна обережність і раціональний ризик під час формування і реалізації стратегічних рішень;
- ♦ раціональне спільне використання інтуїції, досвіду і знань людини (експерта, системного аналітика, менеджера і (або) ОПР), обчислювальних та інтелектуальних можливостей потужних комп'ютерних систем;
- ♦ раціональне використання можливостей людино-машинних інтерактивних та ітераційних процедур під час формування та обґрунтування рішень;
- ♦ раціональний компроміс між рівнем достовірності та обґрунтованості оперативного розв'язання і рівнем витрат часових та інших ресурсів на його формування й обґрунтування.

Для реалізації цих принципів потрібно, щоб розроблення стратегії інноваційної діяльності ґрунтувалося на результатах стратегії технологічного передбачення, оскільки типові підходи і методи прогнозування не забезпечують практично прийнятної повноти і достовірності результатів.

11.5.3. Експертні процедури в інноваційній діяльності

Найважливішу роль у здійсненні технологічного передбачення в інноваційній діяльності відіграє експертиза. Головна особливість під час оцінювання інноваційного об'єкта (проекту, виробу тощо) за умов ринкової конкуренції полягає у відсутності можливості апріорного одержання достовірної, перевіреної на практиці інформації про його основні властивості, які визначають технологічну перспективність та економічну ефективність виробництва, збуту, використання досліджуваного об'єкта. Необхідні відомості про конкурентоспроможність виробу, рентабельність виробництва, початковий обсяг збуту, перспективність зростання попиту, інші важливі властивості виробу можна одержати тільки за результатами реалізації продукції через досить тривалий проміжок часу.

Для умов ринкової економіки характерна невизначеність сприйняття інноваційного виробу на ринку: настороженість і неоднозначність ставлення різних категорій потенційних споживачів до рекламованих нових властивостей виробу; невідомість реакції, задумів і дій конкурентів. Тому потрібно чимало часу, щоб реалізовані на практиці переваги виробу стали очевидними для споживача, а несподівано виявлені недоліки — для виробника. Водночас відомості про перспективність та ефективність нового виробу

потрібні для прийняття рішень на найраніших стадіях його життєвого циклу. Звідси впливає, що експертні процедури в інноваційній діяльності не можна реалізувати в типовому варіанті експертизи, оскільки не можна додержати його головної вимоги щодо наявності повної і достовірної вихідної інформації про досліджуваний об'єкт.

Тому вимоги до організації експертизи в інноваційній діяльності визначені цілями, завданнями та особливостями певної предметної області. Водночас, є загальні вимоги, зумовлені названими факторами, характерні для будь-якого виду інноваційної діяльності. Ці вимоги мають на меті [59]:

- ♦ забезпечувати відповідність поставлених цілей дослідження реальним умовам інноваційної діяльності;
- ♦ реалізовувати практично прийнятну достовірність експертного оцінювання досліджуваних об'єктів інноваційної діяльності за реальних умов концептуальної невизначеності;
- ♦ під час формування інформаційної бази експертизи виключати відбраковування будь-якої індивідуальної оцінки кожного експерта на підставі усереднення статистичних показників для групуваних даних, уникати суттєвого розкиду оцінок або наявності лише однієї оцінки;
- ♦ виявляти повний діапазон думок, від суто песимістичного до дуже оптимістичного, за кожним кількісним показником, якісною і латентною властивістю досліджуваного об'єкта;
- ♦ забезпечувати у режимі групового узгодження остаточних результатів такі умови для повноцінної реалізації колективом своїх загальних можливостей, які дадуть змогу знаходити раціональний компроміс у процесі формування та узгодження оцінок з урахуванням думок і рівня компетентності кожного експерта.

Для реалізації сформульованих вимог створюють однакові умови роботи для всіх експертів. Кожен експерт має індивідуальний пароль доступу до сервера для одержання вихідної інформації про кожен об'єкт, але не може обмінюватися інформацією з іншими експертами. Цим виключають безпосередню залежність вихідних оцінок від думок окремих активніших чи авторитетніших фахівців.

Сформульовані вимоги ставлять низку принципово нових проблем у стратегії технологічного передбачення, серед яких насамперед слід виділити проблеми розроблення нових принципів експертного оцінювання у технологічному передбаченні [59]. Стратегія технологічного передбачення в інноваційній діяльності повинна не тільки задовольняти нові вимоги, але й синхронно коригуватися в міру змін кон'юнктури ринку відповідного класу продукції. Коригування стратегії має бути адаптованим до оперативних змін кон'юнктури ринку за збереження стратегічних цілей виробництва. У свою чергу, стратегічні цілі повинні бути узгоджені з довгостроковими тенденціями розвитку світового ринку попиту конкурентної продукції і характером розвитку відповідної національної галузі виробництва.

Потреба розроблення нових принципів експертних процедур зумовлена не лише зазначеними вище факторами та особливостями інноваційної діяльності, але й принциповими відмінностями умов експертних процедур технологічного передбачення від типових умов експертизи. Типову експертну діяльність зорієнтовано на інтуїтивне виконання логічного аналізу об'єктів або процесів дійсності з використанням порівняння, впорядкування, систематизації, групування, вимірювання, класифікації та інших процедур [117, 194]. Зокрема, класифікацію можна виконувати як упорядкуван-

ня об'єктів за ступенем зростання (чи спадання) певної ознаки, кількісні (або якісні) показники якої для всіх об'єктів відомі, можуть бути виміряні або обчислені.

Аналогічно реалізують й інші експертні процедури. Власне кажучи, можливість одержання вихідної інформації з необхідним ступенем повноти означає, що дослідник (кожен експерт окремо чи експертна група загалом) апіорно має підтвердження того, що відповідна процедура експертизи обов'язково здійсненна. Більше того, за такого інформаційного забезпечення можна за результатами експертизи достовірно стверджувати про здійсненність на практиці технології, продукції чи інших досліджуваних виробів, процесів, заходів. Ці умови на практиці виконуються повністю для досить широкого класу прикладних задач. У теоретичному аспекті цей підхід відповідає *принципу потенційної здійсненності*, прийнятому в інтуїційній логіці [39]. Його суть полягає в тому, що дослідник апіорно знає, доводить або постулює, що певна процедура є потенційно реалізовною, тому він може абстрагуватися від обмеженості своїх ресурсів у просторі і часі. У разі реалізації принципу потенційної здійсненності виконуються умови для принципу збережуваності інтуїціоністської логіки.

Суть *принципу збережуваності істинності*: якщо істинність деякого твердження, думки або висновку встановлено, виявлено або доведено, то вона зберігається й надалі [39]. Слід зазначити, що наведені умови та принципи дають змогу не лише суттєво спростити розв'язання багатьох важливих теоретичних і практичних задач, але й створювати різні автоматичні системи класифікації, порівняння, вимірювання, відбраковування різної продукції, що уможлиблює виключення участі людини в експертних процедурах.

Однак принципово інші умови характерні для експертної процедури технологічного передбачення в інноваційній діяльності. Високий динамізм конкуренції на світовому ринку створив принципово інші умови інноваційної діяльності, характеризовані не лише концептуальною невизначеністю ринку, але й багатofакторними ризиками, не своєчасністю реалізації і швидким моральним старінням інноваційного виробу, пропонуваного у проекті. Зокрема, для багатьох інноваційних проектів характерні неповнота і невизначеність інформації щодо багатьох властивостей та особливостей сприйняття інноваційного виробу на ринку, наприклад про ставлення до нього потенційних споживачів і конкурентів. Звідси випливає, що експертні процедури технологічного передбачення не можна реалізувати в типовому варіанті експертизи, головною вимогою якого є наявність повноти і визначеності вихідної інформації про досліджуваний об'єкт. Отже, експертиза технологічного передбачення повинна не тільки відповідати принципово новим вимогам, але й містити принципово нові властивості і принципи організації та реалізації експертних процедур.

Експертні процедури в технологічному передбаченні повинні бути організовані та реалізовані на основі технологій, що дають змогу доповнювати недостатність і невизначеність вихідної інформації про досліджуваний інноваційний об'єкт знаннями, досвідом, інтуїцією та передбаченням людини. У цьому разі результати експертизи стають залежними від багатьох нових факторів ризику, що майже виключені в груповій стратегії типової експертизи. Серед них особливо слід виділити залежність результатів експертизи від здібностей, знань, досвіду, уміння замовника визначати цілі і завдання експертизи, а керівника експертизи — вибирати стратегію експертизи, формувати колектив експертів, і, що особливо важливо, від індивідуальних здібностей, знань, досвіду, уміння, інтуїції та передбачення кожного експерта.

Зазначимо також, що за умов невизначеності наявна залежність експертизи від зовнішніх факторів і часу, зокрема від обсягу та рівня досліджень у наукових напрямках, що мають пряме або непряме відношення до досліджуваного інноваційного об'єкта.

Суть цієї залежності полягає у принциповій можливості зміни оцінок інноваційного об'єкта упродовж відносно короткого проміжку часу. Те, що в момент вивчення є невідомим або невстановленим, необов'язково нереалізовне. Через деякий час ті чи інші факти стають відомими, реалізовними і дуже важливими для створення такого виробу. Отже, в інноваційній діяльності діють умови і фактори, що виключають апіорне постулювання потенційної реалізованості інноваційного проекту або виробу. І, як наслідок, виключено можливість реалізації принципу збережуваності в часі експертного твердження, думки або висновку.

Звідси випливає, що в інноваційній діяльності повинні діяти інші принципи, які враховують її концептуальну невизначеність і тому за своїми властивостями кардинально відрізняються від законів інтуїційної логіки — потенційної здійсненності і збережуваності [39].

11.5.4. Основні принципи організації експертизи в інноваційних системах

На підставі аналізу експертних процедур інноваційної діяльності можна запропонувати такі принципи. Замість принципу потенційної здійсненності — принцип можливої реалізованості.

Принцип можливої реалізованості

Результати первісного оцінювання експертами певних інноваційних об'єктів (наукових ідей, технічних рішень, проектів промислових виробів чи виробничих технологій) не можуть гарантувати їхньої практичної реалізованості або принципової нездійсненності.

Тому принцип можливої реалізованості постулює: для досліджуваних інноваційних об'єктів на підставі результатів експертного оцінювання поданої інформації апіорно не можна одержати достовірної оцінки, яка дала б змогу обґрунтовано гарантувати для такого об'єкта можливість його реалізованості. Оцінка інноваційного об'єкта зберігає невизначеність висновку про реалізованість доти, доки для пропонованого виробу не буде доведено теоретично або експериментально принципової можливості технічної і технологічної здійсненності.

Замість принципу збережуваності істинності, який постулює незмінність теоретичного або технічного твердження, міркування, висновку чи думки про конкретний об'єкт упродовж досить тривалого проміжку часу, на практиці необхідний якісно інший принцип. Така потреба безпосередньо випливає з попереднього принципу і досвіду інноваційної діяльності, оскільки експертні оцінки за умов концептуальної невизначеності не можуть тривалий час залишатися незмінними. У процесі науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи не лише нагромаджуються нові знання про розроблюваний виріб, але й можуть змінюватися уявлення про властивості, призначення, сфери застосування виробу, з'являтися нові винаходи, технічні вирішення та інші ноу-хау. У таких випадках важливо відображати ймовірнісні властивості збережуваності в часі результатів первісного оцінювання інноваційного об'єкта. Тому на практиці виникає потреба у застосуванні ще одного принципу, який називатимемо принципом імовірнісної збережуваності.

Принцип імовірнісної збережуваності

Результати первісного оцінювання експертами певних інноваційних ідей або технічних рішень є ймовірнісними і не гарантують їхньої збережуваності в часі. Цей принцип

постулює: отримані за умов концептуальної невизначеності результати первинної експертизи у вигляді позитивних або негативних висновків, пропозицій чи рекомендацій не є незмінними і можуть згодом принципово змінитися і бути підтвердженими або спростованими. Отже, упродовж певного часу не виключено як збережуваність істинності експертних тверджень, думок або висновків, так і можливість їхнього спростування.

Під час експертного оцінювання інноваційних об'єктів у процесі технологічного передбачення доцільно вводити латентні показники оцінки якості проекту і пропонованих у ньому інноваційних об'єктів. Зокрема, такі показники повинні характеризувати *практичну необхідність*, *технологічну можливість* та *економічну доцільність* реалізації досліджуваного об'єкта. Щоб одержати узгоджені кількісні та якісні оцінки цих показників, потрібно забезпечити однозначне розуміння кожним експертом змісту і сенсу оцінюваних властивостей об'єктів експертизи. Для цього треба забезпечити однозначність тлумачення відповідних понять. Пропонуємо такі означення латентних показників інноваційної продукції.

Практична необхідність — наявність досить високої ринкової потреби в інноваційній продукції, яка запропонована в досліджуваному проекті або має певний попит і збут на національному та зовнішньому ринках.

Технологічна можливість — можливість розроблення матеріалів і комплектуючих виробів, устаткування і технологій для серійного виробництва інноваційної продукції.

Економічна доцільність — наявність реальних умов та обґрунтованої перспективи попиту і збуту для одержання прийнятного рівня техніко-економічної ефективності інноваційної продукції.

Найважливіша особливість латентних показників інноваційних проектів і виробів — їхня взаємовиключна залежність. Вона виражена у такій взаємній системній узгодженості умов реалізації, за якої відсутність будь-якої з них виключає потребу в реалізації інших умов. Наприклад, відсутність ринкової потреби в інноваційній продукції виключає потребу і доцільність її промислового виробництва.

Особливості виконання експертизи в інноваційній діяльності полягають у досягненні практично прийнятних рівнів достовірності та обґрунтованості результатів експертного оцінювання за умов концептуальної невизначеності. Досягнення цієї мети ґрунтується на реалізації ідеї системної узгодженості математичного забезпечення експертизи з інтелектуальними здібностями і психофізичними можливостями експерта.

Тому під час виконання експертизи інноваційних об'єктів доцільно використовувати апарат нечіткого оцінювання. Враховуючи, що здатність людини розпізнавати різні властивості об'єктів обмежена числом Міллера, яке дорівнює 7 ± 2 , кількість рівнів оцінювання можна задати як середнє значення інтервалу Міллера $7 \Rightarrow [5, 9]$, що дає змогу створити раціональну структуру шкали. Для зручності роботи експерта також доцільно припустити, що кожний рівень $s \in S_0$; $S_0 = [1, S]$ цієї шкали слід оцінювати незалежно. Оцінку вибирають в інтервалі $[0, 1]$, характерному для подання нечітких величин.

11.6. Приклад розв'язання задачі передбачення для багатокритерійного оцінювання інноваційних об'єктів

Розглянемо приклад використання методології технологічного передбачення для розв'язання задачі багатокритерійного оцінювання характеристик інноваційних об'єктів.

11.6.1. Мета розв'язання задачі, її постановка та опис

Проілюстровані в підрозділі 11.3 основні принципи експертного оцінювання та узгодження оцінок на гіпотетичному прикладі (наявність одного показника для єдиного об'єкта із залученням тільки 6 експертів) демонструють основні ідеї експертної технології в задачах передбачення. Однак прийнятих умов оцінювання для розв'язання практичних задач недостатньо з кількох причин.

По-перше, на практиці потрібно забезпечити прийнятну достовірність оцінювання об'єкта (проекту чи виробу) на рівні не нижче 0,8, що потребує участі не менш ніж 16 експертів. По-друге, для аналізу властивостей і можливостей об'єкта, зокрема виробу нової техніки, недостатньо оцінювання його характеристик тільки за одним показником, оскільки реальні вироби різного призначення характеризуються багатьма кількісними та якісними показниками.

Метою розгляду цього прикладу є розкриття можливостей процедури експертного оцінювання під час розв'язання реальних практичних задач за умов ринкової конкуренції.

Вихідну інформацію для експертизи надає розробник проекту у вигляді пояснювальної записки, технічної пропозиції, ескізного проекту чи іншої документації. На підставі цього замовник формує для експертів додаткову документацію, у якій викладено цілі і завдання експертизи, основні відомості про об'єкти експертизи, показники та критерії їхнього оцінювання.

Постановка задачі багатокритерійного оцінювання

Відомо: замовнику надано пропозиції щодо розроблення низки об'єктів $O_n \in O_0$, $n = \overline{1, N}$, $\min N = 4$, $\max N = 8$. Нехай $N = 4$. Кожний об'єкт O_n оцінюють множиною Q_0 показників Q_j , склад і кількість яких залежать від призначення і властивостей досліджуваних об'єктів. У розглянутій задачі кількість показників обмежена $Q_0 = \{Q_j \mid j = \overline{1, J}, J = 4\}$.

Потрібно: оцінити властивості об'єктів, використовуючи такі латентні показники: K_1 — показник ринкової конкурентоспроможності виробу; K_2 — показник перспективності ринкового попиту на виріб; K_3 — показник технологічної складності виробництва виробу; K_4 — показник економічної ефективності збуту виробу. Надалі всім показникам присвоїмо подвійний індекс $K_{11}, K_{12}, \dots, K_{43}, K_{44}$, де перша цифра — порядковий номер досліджуваного об'єкта, а друга — порядковий номер показника.

Групу E_0 експертів E_k формують відповідно до призначення досліджуваних об'єктів, цілей і завдань експертизи. Для виконання експертизи кількість і склад експертів визначає керівник експертизи і погоджує із замовником. У нашому випадку прийнято $E_0 = \{E_k \mid k = \overline{1, K}, K = 16\}$.

Сформуємо підсумкову оцінку кожного показника $K_{11}, K_{12}, \dots, K_{43}, K_{44}$ кожного досліджуваного об'єкта за допомогою нормування результатів усіх рівнів $s = \overline{1, S}$ шкали.

Для цього прикладу розроблено раціональну класифікацію експертних оцінок. Беручи до уваги наявність досить широкого діапазону думок експертів щодо кожного показника, для забезпечення компактності розподілу всього спектра оцінок доцільно кількість класів обмежити мінімальним значенням інтервалу Міллера $s \Rightarrow [5; 9]$. За цих умов формують такі класи оцінок [49]: клас Ω_1 — суто песимістичних оцінок; клас Ω_2 — песимістично-раціональних оцінок; клас Ω_3 — раціонально-прагматичних оцінок; клас Ω_4 — раціонально-оптимістичних оцінок; клас Ω_5 — дуже оптимістичних оцінок.

оцінок. Математичний опис класів розглянемо на прикладі класу Ω_1 . Його модель зобразимо у вигляді такої послідовності співвідношень:

$$\begin{aligned}\Omega_1 &= \{\Omega_1^{n_1} | n_1 = \overline{1, N_1}\}; \\ \Omega_1^{n_1} &= \{\tilde{Q}_{n_1}^{k_1} | n_1 \in N_{01}; k_1 = \overline{1, K_1}\}; \\ \tilde{Q}_{n_1}^{k_1} &= \{\tilde{Q}_{n_1 j_1}^{k_1} | n_1 \in N_{01}; k_1 \in K_{01}; j_1 = \overline{1, J_1}\}; \\ \tilde{Q}_{n_1 j_1}^{k_1} &= \{\langle \tilde{Q}_{n_1 j_1 s_1}^{k_1}, \mu_{n_1 j_1 s_1}^{k_1} \rangle | n_1 \in N_{01}; k_1 \in K_{01}; j_1 \in J_{01}; s_1 = \overline{1, S_1}\}; \\ \tilde{Q}_{n_1 j_1 s_1}^{k_1} &= \{\langle Q_{n_1 j_1 s_1}, \mu_{n_1 j_1 s_1}^{k_1} \rangle | n_1 \in N_{01}; k_1 \in K_{01}; j_1 \in J_{01}; s_1 \in S_{01}\},\end{aligned}$$

де обмеження на основні показники $Q_{n_1 j_1 s_1}$ і $\mu_{n_1 j_1 s_1}^{k_1}$ визначено співвідношеннями:

$$\begin{aligned}Q_{s_1}^- &< Q_{n_1 j_1 s_1} \leq Q_{s_1}^+; & n_1 \in N_{01}; k_1 \in K_{01}; s_1 \in S_{01}; \\ \mu_{s_1}^- &\leq \mu_{n_1 j_1 s_1}^{k_1} \leq \mu_{s_1}^+; & n_1 \in N_{01}; k_1 \in K_{01}; s_1 \in S_{01}.\end{aligned}\quad (11.5)$$

У цій моделі множини K_{01} , N_{01} , J_{01} , S_{01} є підмножинами відповідно множин K_0 , N_0 , J_0 , S_0 і складаються зі змінних k_1 , n_1 , j_1 , s_1 , значення яких відповідають умовам (11.5). Математичний опис інших класів виконують аналогічно.

Межі інтервалів для показників $Q_{n_1 j_1 s_1}$ і $\mu_{n_1 j_1 s_1}^{k_1}$ формують, враховуючи особливості багаторівневої шкали. Для класів $\Omega_1, \dots, \Omega_5$ з урахуванням їхніх взаємозв'язків, характеризованих умовами

$$\begin{aligned}\Omega_p \cap \Omega_{p+1} &= 0; \quad \forall p \in \overline{1, 4} & (\alpha_1); \\ \Omega_p \cap \Omega_{p+1} &\neq 0; \quad \forall p \in \overline{1, 4} & (\alpha_2),\end{aligned}\quad (11.6)$$

варіанти меж для показників $Q_1, \dots, Q_5$ подано в табл. 11.5.

Таблиця 11.5. Межі класів оцінювання

Клас $\Omega(\alpha_1)$	$\Omega_p \cap \Omega_{p+1} = 0; p = \overline{1, 4}$		Клас $\Omega(\alpha_2)$	$\Omega_p \cap \Omega_{p+1} \neq 0; p = \overline{1, 4}$	
Ω_1	$Q_1^- = 0,001$	$Q_1^+ = 0,199$	Ω_1	$Q_1^- = 0,0$	$Q_1^+ = 0,25$
Ω_2	$Q_2^- = 0,2$	$Q_2^+ = 0,399$	Ω_2	$Q_2^- = 0,2$	$Q_2^+ = 0,45$
Ω_3	$Q_3^- = 0,4$	$Q_3^+ = 0,599$	Ω_3	$Q_3^- = 0,4$	$Q_3^+ = 0,65$
Ω_4	$Q_4^- = 0,6$	$Q_4^+ = 0,799$	Ω_4	$Q_4^- = 0,6$	$Q_4^+ = 0,85$
Ω_5	$Q_5^- = 0,8$	$Q_5^+ = 0,999$	Ω_5	$Q_5^- = 0,8$	$Q_5^+ = 1,0$

Граничні значення показників $\mu_{n_1 j_1 s_1}^{k_1}$ для всіх класів $\Omega_1, \dots, \Omega_5$ визначаються граничними значеннями інтервалу $[0, 1]$. Це зумовлено широким діапазоном результатів оцінювання експертами можливості реалізації досліджуваних показників на кожному рівні шкали $s \in S_0$; $S_0 = [1, S]$, зображеної у вигляді табл. 11.4. Звідси випливає, що нечітке оцінювання інноваційних об'єктів містить дві процедури: оцінювання всіма експертами кожного інноваційного об'єкта за заданими показниками; формування підсумкових оцінок кожного інноваційного об'єкта за сукупністю експертних оцінок.

11.6.2. Процедура багатокритерійного оцінювання інноваційних об'єктів

Оцінювання виконує кожен експерт незалежно для кожного j -го показника n -го проекту на основі наданого експерту запитальника у вигляді табл. 11.6. Експерт повинен у кожному вікні замість слова «ввести» дати кількісну оцінку в межах інтервалу $[0, 1]$.

Таблиця 11.6. Приклад запитальника, наданого експертам для оцінювання інноваційних об'єктів

Об'єкт	Номер рівня s	Кількісна характеристика s -го рівня	Якісна характеристика s -го рівня	Показник	Показник	Показник	Показник
				K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{14}
O_1	1	0,00 – 0,10	Надзвичайно низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	2	0,10 – 0,25	Дуже низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	3	0,25 – 0,40	Низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	4	0,40 – 0,60	Середній	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	5	0,60 – 0,75	Високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	6	0,75 – 0,90	Дуже високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	7	0,90 – 1,00	Надзвичайно високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
				K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}
O_2	1	0,00 – 0,10	Надзвичайно низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	2	0,10 – 0,25	Дуже низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	3	0,25 – 0,40	Низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	4	0,40 – 0,60	Середній	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	5	0,60 – 0,75	Високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	6	0,75 – 0,90	Дуже високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	7	0,90 – 1,00	Надзвичайно високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
				K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{34}
O_3	1	0,00 – 0,10	Надзвичайно низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	2	0,10 – 0,25	Дуже низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	3	0,25 – 0,40	Низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	4	0,40 – 0,60	Середній	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	5	0,60 – 0,75	Високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	6	0,75 – 0,90	Дуже високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	7	0,90 – 1,00	Надзвичайно високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
				K_{41}	K_{42}	K_{43}	K_{44}
O_4	1	0,00 – 0,10	Надзвичайно низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	2	0,10 – 0,25	Дуже низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	3	0,25 – 0,40	Низький	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	4	0,40 – 0,60	Середній	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	5	0,60 – 0,75	Високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	6	0,75 – 0,90	Дуже високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести
	7	0,90 – 1,00	Надзвичайно високий	Ввести	Ввести	Ввести	Ввести

На підставі одержаної інформації у першому турі експертизи всі 16 експертів сформували свої думки, заповнивши наданий їм запитальник (див. табл. 11.6).

Через великий обсяг отриманих результатів у табл. 11.7–11.11 наведено результати оцінювання всіма експертами тільки для одного об'єкта O_1 показників: K_{11} – ринкової конкурентоспроможності; K_{12} – перспективності ринкового попиту; K_{13} – технологічної складності виробництва; K_{14} – економічної ефективності збуту.

Таблиця 11.7. Експертні оцінки показника K_{11} ринкової конкурентоспроможності об'єкта O_1

Експерт k	Рівень s	1	2	3	4	5	6	7
1		0,05	0,10	0,25	0,45	0,35	0,15	0,05
2		0,15	0,35	0,65	0,45	0,35	0,25	0,10
3		0,15	0,20	0,45	0,50	0,35	0,25	0,10
4		0,15	0,25	0,45	0,55	0,50	0,35	0,25
5		0,10	0,45	0,55	0,50	0,25	0,15	0,05
6		0,20	0,35	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25
7		0,20	0,25	0,40	0,55	0,50	0,35	0,15
8		0,15	0,35	0,45	0,60	0,75	0,25	0,15
9		0,20	0,40	0,65	0,60	0,45	0,25	0,10
10		0,15	0,45	0,75	0,65	0,35	0,25	0,10
11		0,20	0,25	0,55	0,70	0,35	0,15	0,10
12		0,65	0,85	0,75	0,70	0,25	0,15	0,10
13		0,35	0,55	0,85	0,75	0,60	0,35	0,20
14		0,40	0,50	0,8	0,75	0,55	0,25	0,15
15		0,40	0,55	0,85	0,80	0,55	0,25	0,10
16		0,25	0,65	0,95	0,85	0,65	0,45	0,25

Таблиця 11.8. Експертні оцінки показника K_{12} перспективності ринкового попиту на об'єкт O_1

Експерт k	Рівень s	1	2	3	4	5	6	7
1		0,10	0,25	0,55	0,45	0,25	0,10	0,05
2		0,05	0,15	0,55	0,65	0,25	0,15	0,10
3		0,10	0,15	0,50	0,55	0,25	0,15	0,05
4		0,15	0,20	0,45	0,55	0,35	0,10	0,05
5		0,10	0,45	0,55	0,50	0,45	0,25	0,10
6		0,15	0,25	0,55	0,45	0,40	0,15	0,05
7		0,05	0,35	0,65	0,55	0,50	0,25	0,10
8		0,15	0,30	0,45	0,55	0,45	0,25	0,15
9		0,25	0,35	0,45	0,65	0,35	0,15	0,10
10		0,15	0,35	0,55	0,45	0,35	0,25	0,10
11		0,05	0,15	0,35	0,45	0,25	0,15	0,10
12		0,25	0,30	0,55	0,50	0,35	0,25	0,15
13		0,35	0,45	0,75	0,65	0,55	0,25	0,10
14		0,30	0,35	0,65	0,60	0,40	0,15	0,05
15		0,40	0,55	0,65	0,80	0,65	0,50	0,10
16		0,25	0,35	0,55	0,95	0,75	0,35	0,15

Таблиця 11.9. Експертні оцінки показника K_{13} технологічної складності виробництва об'єкта O_1

Експерт k	Рівень s	1	2	3	4	5	6	7
1		0,10	0,15	0,20	0,35	0,45	0,35	0,05
2		0,05	0,10	0,15	0,45	0,55	0,15	0,10
3		0,10	0,20	0,25	0,35	0,45	0,20	0,10
4		0,15	0,20	0,25	0,55	0,60	0,35	0,10
5		0,10	0,25	0,30	0,50	0,55	0,25	0,10
6		0,10	0,15	0,35	0,55	0,50	0,45	0,25
7		0,15	0,25	0,35	0,65	0,55	0,35	0,10
8		0,15	0,20	0,35	0,55	0,65	0,25	0,15
9		0,25	0,30	0,35	0,65	0,55	0,25	0,15
10		0,15	0,20	0,25	0,65	0,45	0,25	0,15
11		0,20	0,25	0,30	0,55	0,60	0,15	0,10
12		0,25	0,35	0,45	0,50	0,55	0,35	0,25
13		0,25	0,35	0,40	0,75	0,60	0,35	0,20
14		0,15	0,20	0,35	0,45	0,55	0,25	0,15
15		0,20	0,40	0,50	0,70	0,60	0,30	0,20
16		0,05	0,20	0,45	0,65	0,75	0,35	0,25

Таблиця 11.10. Експертні оцінки показника K_{14} економічної ефективності збуту об'єкта O_1

Експерт k	Рівень s	1	2	3	4	5	6	7
1		0,10	0,15	0,35	0,45	0,25	0,15	0,10
2		0,15	0,20	0,65	0,45	0,35	0,15	0,10
3		0,20	0,25	0,45	0,55	0,35	0,25	0,15
4		0,25	0,35	0,45	0,35	0,25	0,15	0,05
5		0,10	0,15	0,35	0,55	0,35	0,25	0,15
6		0,30	0,35	0,65	0,55	0,45	0,35	0,30
7		0,20	0,25	0,45	0,50	0,45	0,30	0,20
8		0,25	0,30	0,35	0,45	0,25	0,15	0,10
9		0,25	0,35	0,45	0,55	0,35	0,25	0,15
10		0,15	0,45	0,75	0,65	0,45	0,35	0,30
11		0,15	0,35	0,65	0,75	0,45	0,35	0,25
12		0,35	0,45	0,55	0,65	0,35	0,25	0,15
13		0,25	0,45	0,65	0,75	0,45	0,35	0,10
14		0,15	0,25	0,55	0,75	0,35	0,15	0,05
15		0,25	0,35	0,55	0,65	0,35	0,25	0,10
16		0,45	0,60	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35

У деяких випадках структуру запитальника доцільно створювати більш складною, зокрема, поряд з оцінкою можливості реалізації кожного рівня шкали додатково вводити показник ступеня впевненості експерта у своїй оцінці, прийнятій на кожному рівні шкали. Приклад такого запитальника разом із результатами оцінювання експертом 11 тільки показника перспективності ринкового попиту K_{12} на інноваційний об'єкт O_1 наведено в табл. 11.11.

Таблиця 11.11. Оцінювання показника K_{12} перспективності ринкового попиту на інноваційний об'єкт O_i експертом 11

Номер рівня s	Якісна характеристика s -го рівня	Кількісна характеристика s -го рівня	Оцінка μ_{njs}^k k -м експертом можливості реалізації якості	Ступінь упевненості v_{njs}^k k -го експерта в оцінці
1	Надзвичайно низький	[0+0,1]	0,05	0,99
2	Дуже низький	[0,1+0,25]	0,15	0,85
3	Низький	[0,25+0,4]	0,35	0,65
4	Середній	[0,4+0,6]	0,45	0,97
5	Високий	[0,6+0,75]	0,25	0,75
6	Дуже високий	[0,75+0,9]	0,15	0,85
7	Надзвичайно високий	[0,9+1]	0,10	0,95

Таку побудову шкали орієнтовано на досягнення головних цілей експертизи: систематизувати процедури оцінювання різних видів інноваційної продукції і забезпечити практично прийнятний рівень достовірності оцінок за умов концептуальної невизначеності. Запропонована структура шкали (табл. 11.4, 11.11) для опису якісних і кількісних характеристик об'єкта є уніфікованою та однаково застосовною для оцінки кількісних показників, якісних і латентних властивостей. Звідси випливає можливість нормовано формувати широкий діапазон думок про кожну властивість досліджуваного інноваційного проекту, виробу чи інших видів продукції у вигляді якісних і кількісних відомостей для кожного рівня градацій. Введення показника v_{njs}^k ступеня впевненості k -го експерта у даній ним оцінці j -го показника n -го проекту на s -му рівні шкали дає змогу враховувати індивідуальні здібності, компетентність, об'єктивність та інші якості експерта. Така шкала дає змогу за результатами експертизи визначати подальші рішення і дії ОПР, зокрема виявляти доцільність колективного обговорення результатів експертизи. Її метою може бути: системний аналіз причин і факторів, що призвели до суттєвої відмінності оцінок об'єкта за одним або всіма показниками; аналіз можливості і доцільності відшукування раціонального компромісу в оцінюванні об'єкта у разі значної розбіжності індивідуальних оцінок і ступеня впевненості експертів; інші складні ситуації експертизи з одночасним оцінюванням за заданими показниками і рангуванням за перевагою кількох об'єктів.

11.6.3. Математична та обчислювальна реалізація процедури багатокритерійного оцінювання

Комп'ютерна реалізація процедур оцінювання інноваційних об'єктів ґрунтується на такому математичному забезпеченні. Оцінку j -го показника n -го об'єкта k -й експерт формує на підставі співвідношень

$$\begin{aligned}\tilde{Q}_{nj}^k &= \left\{ \left\{ \tilde{Q}_{njs}^k \right\} \mid n \in N_0; j \in J_{0n}; k \in K_0; s = \overline{1, S} \right\}; \\ \tilde{Q}_{njs}^k &= \left\{ \left\{ Q_{njs}, \mu_{njs}^k \right\} \mid n \in N_0; j \in J_{0n}; k \in K_0; s \in S_0 \right\},\end{aligned}\quad (11.7)$$

де μ_{njs}^k визначає результат оцінювання k -м експертом j -го показника n -го об'єкта на рівні шкали $s \in S_0$. Цілочислові множини $K_0 = \{k \mid k = \overline{1, K}\}$, $N_0 = \{n \mid n = \overline{1, N}\}$, $J_{0n} = \{j \mid j = \overline{1, J_n}\}$ характеризують відповідно кількість експертів, кількість поданих об'єктів, кількість показників якості n -го об'єкта. Оцінку n -го об'єкта у цілому, яку k -й експерт формує на підставі (11.7), зображають у вигляді масиву

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_n^k &= \{ \langle \tilde{Q}_{nj}^k; v_{nj}^k \rangle \mid n \in N_0; j = \overline{1, J_n}; k \in K_0 \}; \\ v_{nj}^k &= \{ v_{njs}^k \mid n \in N_0; k \in K_0; j \in J_{0n}; s = \overline{1, S} \}, \end{aligned} \quad (11.8)$$

де v_{njs}^k визначає ступінь упевненості k -го експерта в даній оцінці j -го показника n -го об'єкта на рівні $s \in S_0$. Результати експертизи n -го об'єкта, сформовані всіма експертами на підставі (11.8), нагромаджуються в масиві

$$\tilde{Q}_n = \{ \tilde{Q}_n^k \mid n \in N_0; k = \overline{1, K} \}. \quad (11.9)$$

Послідовне нагромадження результатів експертного оцінювання у вигляді (11.9) створює базу для формування результатів оцінювання всіх об'єктів у вигляді підсумкового масиву

$$\tilde{Q}_\Sigma = \{ \tilde{Q}_n \mid n = \overline{1, N} \}. \quad (11.10)$$

Процедура формування результатів оцінювання всіх об'єктів у вигляді підсумкового масиву не є завершальним етапом експертизи. Масив тільки створює інформаційну базу для прийняття подальших рішень. Справа в тому, що за відсутності обміну інформацією між експертами найімовірнішим буде випадковий розподіл оцінок кожного показника майже по всьому інтервалу $[0;1]$ кожного рівня шкали оцінок. Звідси впливає практична потреба розроблення математичного апарату оцінювання, узгодження та уточнення результатів експертизи.

Беручи до уваги, що масиви (11.9) і (11.10) апріорно поділено на 7 рівнів, кожний із яких характеризується певним інтервалом, для формування математичного апарату системного аналізу результатів експертизи доцільно застосувати принципи і підходи теорії групованої випадкової вибірки [80]. Основні показники вибірки формують послідовно, починаючи з результату оцінювання k -м експертом j -го показника n -го об'єкта. Математичне сподівання для показника Q_{nj}^k апроксимують вибірковою середньою $\bar{Q}_{nj}^k$, яке визначають співвідношенням

$$\bar{Q}_{nj}^k = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_{njs}^k \bar{Q}_{njs}^k. \quad (11.11)$$

Тут показники v_{njs}^k мають випадковий характер і визначають ступінь упевненості k -го експерта в оцінці j -го показника для $j \in J_0$ за різних апріорно відомих значень $s = \overline{1, S}$ і $k = \overline{1, K}$. Величина $\bar{Q}_{nj}^k$ є обґрунтованою незміщеною оцінкою для генерального середнього, котре визначає математичне сподівання як функціонал, що описує властивості розподілу випадкової послідовності $v_{nj1}^k \bar{Q}_{nj1}^k, \dots, v_{njs}^k \bar{Q}_{njs}^k, \dots, v_{njs}^k \bar{Q}_{njs}^k$. Показник $\bar{Q}_{njs}^k$ визначає середнє значення інтервалу кількісної характеристики s -го рівня шкали для досліджуваного j -го показника об'єкта. Показники $\bar{Q}_{njs}^k$ для всіх $j \in J_0$ є детермінованими величинами, які визначено апріорно відомими інтервалами для різних

значень $s = \overline{1, S}$ і не залежать від думок експертів. Зокрема, для показника перспективності ринкового попиту K_{12} на об'єкт маємо (див. табл. 11.8):

$$\bar{Q}_{12s} = \langle 0,05; 0,175; 0,325; 0,5; 0,675; 0,825; 0,95 \rangle \quad s = \overline{1, S}, S = 7. \quad (11.12)$$

Тут значення 0,05 відповідає $s = 1$ і визначає середнє значення інтервалу шкали $[0, 0,1)$; 0,95 відповідає $s = 7$ та інтервалу $[0,9, 1)$. Інші величини характеризують проміжні інтервали. Такий вибір послідовності інтервалів цілком відповідає структурі і фізичному змісту шкали. У шкалі прийнято, що інтервал кожного рівня показника узгоджений із практичною значущістю оцінки показника. Найменше середнє значення інтервалу відповідає найгіршій оцінці показника, а найбільше середнє — характеризує найкращу оцінку. Значення $\bar{Q}_{12s} = 0,5$ у формулі (11.12) відповідає середньому значенню інтервалу $[0,4; 0,6]$ при $s = 4$ для показника K_{12} для об'єкта O_1 .

Зі співвідношення (11.11) за вихідних умов (11.12) і припущення про абсолютну впевненість експерта в оцінці $v_{njs}^k = 1$ одержуємо $\bar{Q}_{nj}^k = 0,5$, що цілком відповідає структурі і фізичному змісту шкали. Введення показника v_{njs}^k , який характеризує ступінь упевненості k -го експерта, дає змогу уточнити значення $\bar{Q}_{nj}^k$ для $j \in J_0$ за різних значень $s = \overline{1, S}, S = 7$ і $k = \overline{1, K}, K = 16$.

Наведемо приклад оцінювання $\bar{Q}_{nj}^k$ з урахуванням ступеня упевненості k -го експерта за даними, поданими у табл. 11.11.

$$v_{njs}^k = \langle 0,99; 0,85; 0,65; 0,97; 0,75; 0,85; 0,95 \rangle, \quad s = \overline{1, S}, S = 7. \quad (11.13)$$

На підставі формул (11.11)–(11.13) одержуємо значення вибіркового середнього:

$$\bar{Q}_{nj}^k = \langle 0,0495; 0,14875; 0,21125; 0,485; 0,50625; 0,70125; 0,9025 \rangle.$$

Наступним етапом є формування математичного сподівання для показників μ_{njs}^k . З урахуванням ступеня впевненості k -го експерта математичне сподівання апроксимують вибіркоким середнім у формі співвідношення:

$$\bar{\mu}_{nj}^k = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_{njs}^k \mu_{njs}^k. \quad (11.14)$$

Враховуючи оцінку і ступінь упевненості k -го експерта, наведені в табл. 11.11, для показника μ_{njs}^k одержуємо таке значення математичного сподівання:

$$\bar{\mu}_{nj}^k = \left\langle \begin{array}{l} 0,17634375; 0,26296875; 0,35546875; 0,5638125; 0,30703125; \\ 0,18328125; 0,0857375 \end{array} \right\rangle.$$

Співвідношення (11.11), (11.14) і (11.7) дають змогу визначити математичне сподівання для латентних нечітких показників інноваційних об'єктів. Як приклад визначимо математичне сподівання для показника перспективності ринкового попиту K_2 з використанням його апроксимації вибіркоким середнім у вигляді нечіткої величини $\bar{K}_2^k$. Оцінки для латентних показників інноваційних об'єктів за означенням формують на підставі (11.7) і (11.8). Тому для оцінки k -м експертом показника K_{n2} досліджуваного n -го об'єкта слід виконати відповідності:

$$K_{n2} \Rightarrow K_{n2}^k \Rightarrow \langle \bar{Q}_{nj}^k | j = 2 \rangle \Rightarrow \bar{Q}_{n2}^k; \quad \bar{Q}_{n2}^k \Rightarrow \bar{K}_{n2}^k. \quad (11.15)$$

Звідси згідно з формулами (11.7) і (11.8) маємо:

$$\tilde{Q}_{n2}^k = \langle Q_{njs}^k; \mu_{njs}^k \rangle; \quad j = 2; \quad s = \overline{1, S}, \quad S = 7. \quad (11.16)$$

Тоді математичне сподівання оцінки k -м експертом показника K_2 відповідно до (11.15) і (11.16) можна зобразити у вигляді:

$$M\tilde{Q}_{n2}^k = \bar{Q}_{n2}^k = \langle \bar{Q}_{n2}^k; \bar{\mu}_{n2}^k \rangle.$$

У загальному випадку математичне сподівання результату оцінювання k -м експертом довільного j -го показника n -го об'єкта характеризується співвідношенням

$$M\tilde{Q}_{nj}^k = \bar{Q}_{nj}^k = \langle \bar{Q}_{nj}^k; \bar{\mu}_{nj}^k \rangle, \quad (11.17)$$

де $\bar{Q}_{nj}^k$ і $\bar{\mu}_{nj}^k$ визначають за допомогою (11.11) і (11.14).

На підставі (11.17) доволі просто побудувати модель, що дає змогу визначати математичне сподівання результату оцінювання k -м експертом n -го об'єкта у цілому за заданими показниками:

$$M\tilde{Q}_n^k = \bar{Q}_n^k = \frac{1}{J_n} \sum_{j=1}^{J_n} \beta_{nj}^k \bar{Q}_{nj}^k, \quad (11.18)$$

де β_{nj}^k — значення коефіцієнта важливості j -го показника для n -го об'єкта, який визначає k -й експерт на інтервалі $[0, 1]$. Зображення математичного сподівання у вигляді (11.18) на практиці використовують для ранжування кількох досліджуваних об'єктів за перевагою. Наявні й інші варіанти оцінювання коефіцієнтів важливості. Зокрема, значення коефіцієнтів важливості можна задавати апріорно або коригувати у процесі узгодження думок експертів. Можлива ще одна модель оцінювання об'єкта у цілому за багатьма показниками, які впорядковано за ступенем важливості і рівнем значущості. У такому разі модель є упорядкованою послідовністю показників.

На основі моделі (11.18) формують підсумковий результат експертизи досліджуваного об'єкта, що має відображати думки всіх експертів. Математичне сподівання $M\tilde{Q}_n$ підсумкової оцінки n -го об'єкта всіма експертами за всією групою заданих показників формують на основі моделі (11.18) і визначають за допомогою співвідношення

$$M\tilde{Q}_n = \bar{Q}_n = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \chi_n^k \bar{Q}_n^k, \quad (11.19)$$

де χ_n^k — показник компетентності k -го експерта у практичній галузі, яка визначає життєвий цикл n -го об'єкта.

Модель (11.19) є основою для формування підсумкових результатів експертизи всіх поданих об'єктів. Результати повинні відображати переваги і недоліки кожного об'єкта і забезпечити їхнє ранжування за упорядкованою послідовністю заданих показників. У процесі формування та узгодження підсумкових результатів експертизи у складі показників і критеріїв оцінювання можливі зміни та доповнення. Остаточним підсумком експертизи повинна бути така послідовність досліджуваних об'єктів, яка відображає їхню впорядкованість за перевагою на основі вихідних показників або з додатковими показниками і критеріями, які оцінюють ступінь важливості, рівень значущості та інші латентні властивості об'єктів.

Наприклад, вихідні об'єкти ранжовані за перевагою у вигляді послідовності:

$$O_{n_0}^l > \dots > O_n^l > \dots > O_{n_k}^l,$$

де l — порядковий номер об'єкта у послідовності $l \in L_0$; $L_0 = [l_1; l_n]$, отриманий за результатами експертизи; $n \in N_0$; $N_0 = [1; N]$ — вихідний номер об'єкта, наданий під час підготовки експертизи.

В оцінюванні якості експертизи важливу роль відіграють характеристики розташування і розсіювання вибірки експертних оцінок. Серед характеристик розташування особливе значення має центр розподілу, який описаний вибіркоvim середнім і апроксимує математичне сподівання групованої вибірки.

Математичне сподівання є не лише центром розподілу оцінок експертів за рівнями $s = \overline{1, S}$ для кожного j -го показника кожного n -го об'єкта, але й визначає фактично середню підсумкову оцінку вигляду (11.18) для об'єкта у цілому. Такої оцінки достатньо для попереднього ранжування досліджуваних об'єктів за перевагою. Однак середня оцінка для об'єкта нівелює значущість окремих його показників. Якщо їх більше двох, може виявитися, що визначальними в ранжуванні є об'єкти, які переважають інші лише за одним чи двома показниками, одночасно суттєво поступаючись за іншими.

Тому потрібно враховувати й інші властивості вибірки, зокрема характеристики її розсіювання. Серед них доцільно виділити дисперсію, середній абсолютний відхил і розмах.

Дисперсію визначатимемо послідовно, починаючи з результатів оцінювання k -м експертом j -го показника n -го об'єкта. Для показника Q_{nj}^k дисперсію визначає співвідношення

$$DQ_{nj}^k = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_{njs}^k (\bar{Q}_{njs} - M\bar{Q}_{nj}^k)^2, \quad (11.20)$$

де $M\bar{Q}_{nj}^k$ — середнє значення інтервалу кількісної характеристики s -го рівня шкали для j -го показника. Математичне сподівання показника Q_{nj}^k визначає співвідношення (11.11).

Аналогічно визначають дисперсію оцінок μ_{nj}^k . Враховуючи (11.14), одержуємо таке співвідношення:

$$D\mu_{nj}^k = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_{js}^k (\mu_{nj}^k - M\mu_{nj}^k)^2. \quad (11.21)$$

Дисперсію результатів оцінювання k -м експертом n -го об'єкта у цілому за всіма показниками характеризує співвідношення

$$D\bar{Q}_n^k = \frac{1}{J_n} \sum_{j=1}^{J_n} \beta_{nj}^k (\bar{Q}_{nj}^k - M\bar{Q}_n^k)^2, \quad (11.22)$$

де $\bar{Q}_{nj}^k$ визначене співвідношенням (11.17).

Підсумкову дисперсію оцінювання n -го об'єкта всіма експертами формулюють на підставі (11.22) у вигляді

$$D\bar{Q}_n = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \chi_n^k (\bar{Q}_n^k - M\bar{Q}_n)^2, \quad (11.23)$$

Співвідношення (11.20)–(11.23) є характеристиками розсіювання вибіркового розподілу відповідних результатів експертного оцінювання. Зазначимо, що для вибірових середніх і дисперсії є спрощені методи обчислення, зручні для визначення центра вибіркового розподілу як початку відліку. Іноді за початок відліку доцільно брати сере-

дину інтервалу кожного j -го показника. Зокрема, для показника K_2 за початок відліку можна взяти середину інтервалу для рівня $s = 4$. Тоді точку відліку буде визначати значення 0,5. Однак для програмної реалізації розглянутих обчислень більш зручними є наведені вище співвідношення.

Серед інших характеристик розсіювання виділимо практичну важливість оцінювання розмаху вибірки. У загальному випадку розмах випадкової вибірки характеризує різниця між її найбільшим і найменшим значеннями. В експертизі величина розмаху визначає рівень відмінності поглядів експертів щодо оцінювання заданих показників досліджуваних об'єктів. Кількісно величину відмінності поглядів експертів в оцінюванні j -го показника n -го об'єкта для кожного рівня $s \in S_0$; $S_0 = \overline{1, S}$ шкали визначимо за допомогою співвідношення

$$\hat{Q}_{njs} = Q_{njs}^+ - Q_{njs}^-; \quad Q_{njs}^+ = \max Q_{njs}; \quad Q_{njs}^- = \min Q_{njs} \quad (11.24)$$

Аналогічно, відмінність думок експертів щодо оцінювання j -го показника n -го об'єкта й об'єкта за всіма заданими показниками визначимо так:

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{nj} &= Q_{nj}^+ - Q_{nj}^-; \quad Q_{nj}^+ = \max Q_{nj}; \quad Q_{nj}^- = \min Q_{nj}; \\ \hat{Q}_n &= Q_n^+ - Q_n^-; \quad Q_n^+ = \max Q_n; \quad Q_n^- = \min Q_n, \end{aligned} \quad (11.25)$$

На підставі одержаних нормованих результатів оцінювання для кожного класу $\Omega_1, \dots, \Omega_5$, використовуючи метод Делфі чи інший метод якісного аналізу, коригують результати експертизи. Розв'язання цієї задачі можна звести до виконання таких процедур.

1. Визначити нечіткі оцінки експертів $\tilde{Q}_{nj}^k$ j -го показника n -го виду продукції, що найбільшою мірою відрізняються від нечіткого математичного сподівання $M\tilde{Q}_{nj}$ або збільшують розкид вибірки щодо центра розмаху $R\tilde{Q}_{nj}$. Такі оцінки визначимо на підставі формул

$$\tilde{Q}_{njs}^{k_1} = \max_{k \in K_0} |Q_{njs}^k - M\tilde{Q}_{nj}|; \quad n \in N_0; \quad j \in J_0; \quad s = \overline{1, S_0}; \quad (11.26)$$

$$\tilde{Q}_{njs}^{k_2} = \max_{k \in K_0} |Q_{njs}^k - R\tilde{Q}_{nj}|; \quad n \in N_0; \quad j \in J_0; \quad s = \overline{1, S_0}. \quad (11.27)$$

2. Визначити співвідношення між величинами $\hat{\mu}_{njs}^{k_1}$ і $\hat{\xi}_{nj}$ та між $\hat{\mu}_{njs}^{k_2}$ і $R\tilde{Q}_{nj}$. Як відомо, для реальних задач встановлено допуски, що відповідають певним фізичним умовам виробництва, експлуатації, застосування, зберігання чи іншим обмеженням для продукції. У процесі експертного оцінювання допуски математично визначає величина максимального відхилення одержуваних оцінок від математичного сподівання $\hat{\xi}_{nj}$ або від центра $R\tilde{Q}_{nj}$ допустимого інтервалу значень показників. Тому мета цієї процедури — визначення наявності чи відсутності відповідності між отриманими експертними оцінками і заданими допустимими відхиленнями за допомогою аналізу співвідношень між наведеними вище парами величин. Такий аналіз дає змогу виявити практично важливі варіанти результатів експертизи:

♦ для величин $\hat{Q}_{njs}^{k_1}$ і $\tilde{Q}_{njs}^{k_1}$ виконуються умови узгодження

$$0 < |\hat{Q}_{njs}^{k_1}| \leq \hat{\beta}_{nj} M\tilde{Q}_{nj}; \quad 0 < |\tilde{Q}_{njs}^{k_1}| \leq \check{\beta}_{nj} R\tilde{Q}_{nj}; \quad (11.28)$$

- ♦ умова виконується для $\tilde{Q}_{njs}^{k_s}$, але не виконується для $\tilde{Q}_{njs}^{k_s}$:

$$0 < |\tilde{Q}_{njs}^{k_s}| \leq \hat{\beta}_{nj} M \tilde{Q}_{nj}; \quad |\tilde{Q}_{njs}^{k_s}| > \check{\beta}_{nj} R \tilde{Q}_{nj}; \quad (11.29)$$

- ♦ умова виконується для $\tilde{Q}_{njs}^{k_s}$, але не виконується для $\tilde{Q}_{njs}^{k_s}$:

$$0 < |\tilde{Q}_{njs}^{k_s}| \leq \check{\beta}_{nj} R \tilde{Q}_{nj}; \quad |\tilde{Q}_{njs}^{k_s}| > \hat{\beta}_{nj} M \tilde{Q}_{nj}. \quad (11.30)$$

У співвідношеннях (11.28)–(11.30) враховано, що величини $\hat{\beta}_{nj}$ і $\check{\beta}_{nj}$ можна задати за допомогою технічних умов для допустимих відхилень показників виробу або експерти їх можуть визначити у процесі узгодження думок щодо конкретних об'єктів експертизи. За симетричних допусків допустимі відхилення обмежені значеннями

$$0 < |\tilde{Q}_{njs}^{k_s}| \leq 0,5 M \tilde{Q}_{nj}; \quad 0 < |\tilde{Q}_{njs}^{k_s}| \leq 0,5 R \tilde{Q}_{nj},$$

тому величини $\hat{\beta}_{nj}$ і $\check{\beta}_{nj}$ повинні бути обмежені інтервалами

$$0 < \hat{\beta}_{nj} \leq 0,5; \quad 0 < \check{\beta}_{nj} \leq 0,5.$$

- Виконати процедури 1 і 2 для всіх видів продукції $n = \overline{1, N}$ і для всіх показників якості $j = \overline{1, J}$ кожного виду продукції $n \in N_0$. Потреба у виконанні цієї процедури безпосередньо впливає з формулювання задачі експертизи.
- Визначити умови завершення експертного оцінювання. Формально необхідною і достатньою умовою цього є задоволення для всіх $n = \overline{1, N}$ і $j = \overline{1, J}$ обмежень, визначених співвідношеннями (11.27). Однак може виявитися, що виконання таких обмежень недостатньо для раціонального розв'язання реальних задач. Зокрема, обсяг вибірки може бути недостатнім для одержання практично прийнятного рівня достовірності оцінювання одного або кількох видів продукції. Однією з можливих причин такої ситуації може бути нерівномірний розподіл результатів експертного оцінювання в межах заданого інтервалу. Аналогічний результат одержують у разі відбраковування тієї частини вибірки, за значень компонентів $\tilde{Q}_{njs}^{k_s}$, $\tilde{Q}_{njs}^{k_s}$ якої виконуються умови (11.28) або (11.29). Можуть бути й інші причини, що зумовлюють такий обсяг вибірки, який не дає змоги одержати необхідний рівень довірчого інтервалу оцінки для всіх об'єктів експертизи. Тому потрібно виконати наступну процедуру.
- Провести колективне обговорення групою експертів результатів експертизи і прийняти рішення про завершення експертизи або коригування обсягу вибірки. Прийняттям рішення за підсумками обговорення завершується перший тур узгодження результатів експертизи. Якщо рішення підтверджує необхідність збільшення обсягу вибірки, то реалізують наступну процедуру.
- Виконати коригування обсягу вибірки, зокрема такими способами:

- ♦ виключенням такої множини даних $N_0^- \in N_0$; $J_0^- \in J_0$, що задовольняє умови (11.28) або (11.29), з подальшою її заміною новими результатами оцінювання, визначеними обмеженням складом експертів;
- ♦ виконанням додаткових експертиз для збільшення обсягу вибірки й уточнення показників RQ_{nj} , MQ_{nj} , σ_{nj}^2 для всіх $n = \overline{1, N}$ і всіх $j = \overline{1, J}$;

♦ проведенням додаткових експертиз для уточнення показників лише для тих $n \in N_0$ і $j \in J_0$, які визначають значення $\tilde{Q}_{njs}^{k_1}$, $\tilde{Q}_{njs}^{k_2}$.

Крім того, раціональний обсяг вибірки можна визначити за допомогою наступної процедури.

7. Забезпечити раціональний обсяг вибірки, який дозволить одержати практично прийнятний довірчий інтервал для всіх показників $j = \overline{1, J}$ кожного досліджуваного об'єкта $n = \overline{1, N}$. За результатами коригування виконати процедури 1–6 і на цьому етапі підбити підсумки експертного оцінювання щодо кожного досліджуваного об'єкта.

11.6.4. Аналіз результатів розв'язання задач

На підставі розробленого вище апарату, процедури експертизи та алгоритму його реалізації виконано математичну обробку даних, поданих 16 експертами (див. табл. 11.7–11.10). Реалізацію алгоритму у вигляді програмного комплексу та обчислення виконала аспірантка Інституту прикладного системного аналізу Е. С Клименко.

Зокрема, досліджено оцінки показників $K_{11}, K_{12}, \dots, K_{43}, K_{44}$ для об'єктів O_1, O_2, O_3, O_4 ;

На підставі даних, наведених у табл. 11.8, досліджено оцінки за показником K_{11} ринкової конкурентоспроможності об'єкта O_1 . Результати такого дослідження подано у табл. 11.12.

Таблиця 11.12. Оцінки експертизи ринкової конкурентоспроможності об'єкта O_1

Клас	Експерти, оцінки яких утворили кластер	Медіана кластерів	Експерти, оцінки яких потрапили у довірчий інтервал	Коефіцієнт узгодженості
1	1	0,05; 0,1; 0,25; 0,45; 0,35; 0,15; 0,05	1	1
2	2–7, 9–11	0,2; 0,4; 0,65; 0,6; 0,45; 0,25; 0,1	2, 7, 9–11	0,5555556
3	8	0,15; 0,35; 0,45; 0,6; 0,75; 0,25; 0,15	8	1
4	12	0,65; 0,85; 0,75; 0,7; 0,25; 0,15; 0,1	12	1
5	13–16	0,35; 0,55; 0,85; 0,75; 0,6; 0,35; 0,2	13–15	0,75

Результати оцінювання за показником K_{11} ринкової конкурентоспроможності об'єкта O_1 подано на рис. 11.13.

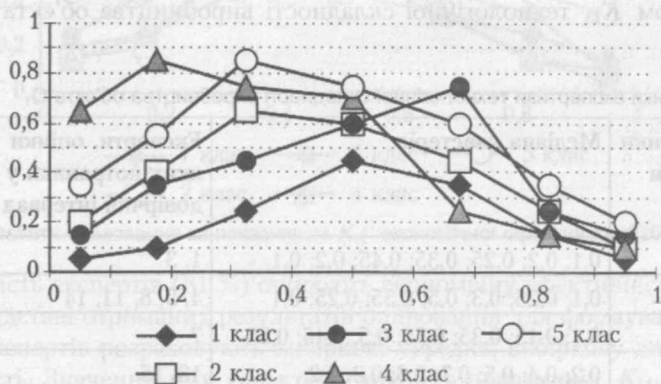


Рис. 11.13. Результати оцінювання за показником K_{11} ринкової конкурентоспроможності об'єкта O_1

Більшість експертів (81 %) передбачають низький рівень ринкової конкурентоспроможності. Крім того, думки трьох експертів кардинально відрізняються від усіх інших. Вони оцінюють цей показник відповідно як дуже низький, середній і високий.

На підставі даних, наведених у табл. 11.9, досліджено оцінки експертизи, виконаної 16 експертами за показником K_{12} перспективності ринкового попиту на об'єкт O_1 (табл. 11.13, рис. 11.14).

Таблиця 11.13. Оцінки експертизи перспективності ринкового попиту об'єкта O_1

Клас	Експерти, оцінки яких утворили кластер	Медіана кластерів	Експерти, оцінки яких потрапили у довірчий інтервал	Коефіцієнт узгодженості
1	1–3, 4, 11	0,1; 0,15; 0,5; 0,55; 0,25; 0,15; 0,05	2–4	0,6
2	5–12, 14	0,15; 0,35; 0,55; 0,45; 0,35; 0,25; 0,1	5, 6, 8, 10, 12	0,625
3	13	0,35; 0,45; 0,75; 0,65; 0,55; 0,25; 0,1	13	1
4	15	0,4; 0,55; 0,65; 0,8; 0,65; 0,5; 0,1	15	1
5	16	0,25; 0,35; 0,55; 0,95; 0,75; 0,35; 0,15	16	1

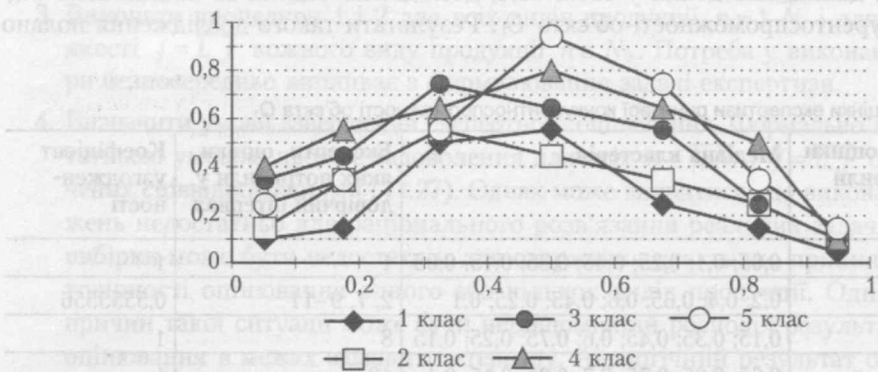


Рис. 11.14. Результати оцінювання за показником K_{12} перспективності ринкового попиту на об'єкт O_1

Половина експертів (50 %) оцінюють ринковий попит як низький, а 31 % — як середній. На підставі даних табл. 11.10 досліджено оцінки експертизи, поданих 16 експертами за показником K_{13} технологічної складності виробництва об'єкта O_1 (табл. 11.14, рис. 11.15).

Таблиця 11.14. Оцінки експертизи технологічної складності виробництва об'єкта O_1

Клас	Експерти, оцінки яких утворили кластер	Медіана кластерів	Експерти, оцінки яких потрапили у довірчий інтервал	Коефіцієнт узгодженості
1	1–3	0,1; 0,2; 0,25; 0,35; 0,45; 0,2; 0,1	1, 3	0,666667
2	4–6, 8–11, 14	0,1; 0,25; 0,3; 0,5; 0,55; 0,25; 0,1	4, 5, 8, 11, 14	0,625
3	7	0,1; 0,15; 0,35; 0,55; 0,5; 0,45; 0,25	7	1
4	12, 13, 15	0,2; 0,4; 0,5; 0,7; 0,6; 0,3; 0,2	13, 15	0,666667
5	16	0,05; 0,2; 0,45; 0,65; 0,75; 0,35; 0,25	16	1

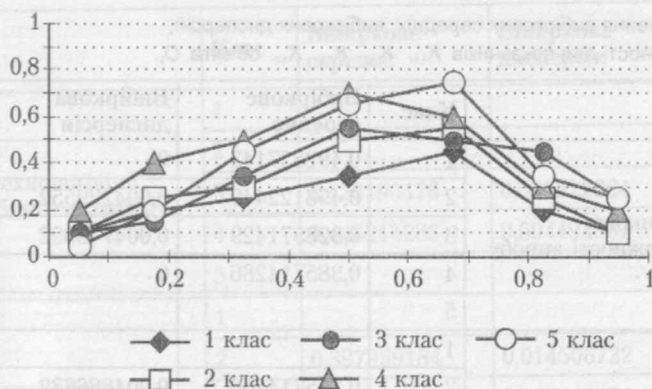


Рис. 11.15. Результати оцінювання за показником K_{13} технологічної складності виробництва об'єкта O_1

Половина експертів передбачає високий рівень показника технологічної складності виробництва виробу. На підставі даних табл. 11.11 досліджено оцінки експертизи, поданих 16 експертами за показником K_{14} економічної ефективності збуту об'єкта O_1 (табл. 11.15, рис. 11.16).

Таблиця 11.15. Оцінки експертизи економічної ефективності збуту об'єкта O_1

Клас	Експерти, оцінки яких утворили кластер	Медіана кластерів	Експерти, оцінки яких потрапили у довірчий інтервал	Коефіцієнт узгодженості
1	1–6, 8, 9	0,2; 0,25; 0,45; 0,55; 0,35; 0,25; 0,15	3, 5, 6, 9	0,5714287
2	2	0,15; 0,2; 0,65; 0,45; 0,35; 0,15; 0,1	2	1
3	7, 10–13, 15	0,25; 0,45; 0,65; 0,75; 0,45; 0,35; 0,1	11–13, 15	0,6666667
4	14	0,15; 0,25; 0,55; 0,75; 0,35; 0,15; 0,05	14	1
5	16	0,45; 0,6; 0,75; 0,65; 0,55; 0,45; 0,35	16	1

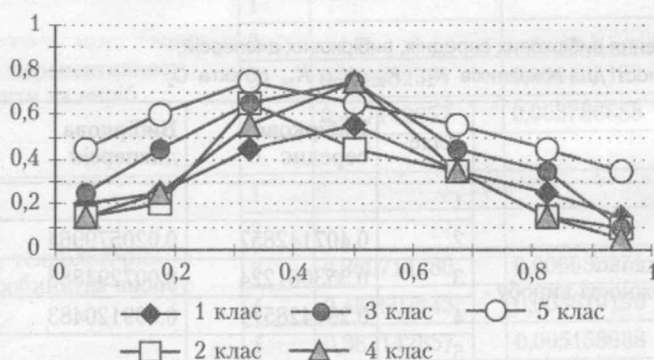


Рис. 11.16. Результати оцінювання за показником K_{14} економічної ефективності збуту об'єкта O_1

Переважає більшість експертів (81 %) оцінюють економічну ефективність збуту виробу як середню. На підставі отриманих результатів оцінювання для формування узгодженої позиції всіх 16 експертів розраховують вибіркове середнє, вибіркиму дисперсію, коефіцієнт узгодженості. Значення цих характеристик для показників K_{11} , K_{12} , ..., K_{43} , K_{44} об'єктів O_1 , O_2 , O_3 , O_4 наведено в табл. 11.16–11.19.

Таблиця 11.16. Значення вибірових середніх, вибірових дисперсій, коефіцієнтів узгодженості для показників K_{11} , K_{12} , K_{13} , K_{14} об'єкта O_1

Показник	Клас	Вибіркове середнє	Вибіркова дисперсія	Коефіцієнт узгодженості
Показник K_{11} ринкової конкурентоспроможності виробу	1	0,492857143	0	1
	2	0,456122449	0,004229552	0,777777778
	3	0,328571429	0,004748892	0,6
	4	0,385714286	0	1
	5			
Показник K_{12} перспективності ринкового попиту на виріб	1			
	2	0,345714286	0,004886832	0,625
	3	0,374285714	0,005578917	0,625
	4			
	5			
Показник K_{13} технологічної складності виробництва виробу	1			
	2			
	3	0,372857143	0,004365176	0,833333333
	4	0,30952381	0,004528408	0,9
	5			
Показник K_{14} економічної ефективності збуту виробу	1			
	2	0,469047619	0,002763545	0,6
	3	0,352380952	0,003800405	0,727272727
	4			
	5			

Таблиця 11.17. Значення вибірових середніх, вибірових дисперсій, коефіцієнтів узгодженості для показників K_{21} , K_{22} , K_{23} , K_{24} об'єкта O_2

Показник	Клас	Вибіркове середнє	Вибіркова дисперсія	Коефіцієнт узгодженості
Показник K_{21} ринкової конкурентоспроможності виробу	1			
	2	0,407142857	0,020579964	0,75
	3	0,353061224	0,007294888	0,888888889
	4	0,296428571	0,009120483	0,666666667
	5			
Показник K_{22} перспективності ринкового попиту на виріб	1			
	2	0,314285714	0,009037052	1
	3	0,34	0,013000618	0,833333333
	4	0,356122449	0,009995925	0,875
	5			

Показник	Клас	Вибіркове середнє	Вибіркова дисперсія	Коефіцієнт узгодженості
Показник K_{23} технологічної складності виробництва виробу	1			
	2			
	3	0,426190476	0,005522664	0,6
	4	0,448214286	0,004494607	0,727272727
	5			
Показник K_{24} економічної ефективності збуту виробу	1			
	2	0,397959184	0,014506732	0,875
	3	0,355357143	0,007448131	0,8
	4	0,421428571	0,004699743	0,666666667
	5			

Таблиця 11.18. Значення вибірових середніх, вибірових дисперсій, коефіцієнтів узгодженості для показників K_{31} , K_{32} , K_{33} , K_{34} об'єкта O_3

Показник	Клас	Вибіркове середнє	Вибіркова дисперсія	Коефіцієнт узгодженості
Показник K_{31} ринкової конкурентоспроможності виробу	1			
	2	0,471428571	0,001953053	0,333333333
	3	0,374025974	0,002582946	0,846153846
	4			
	5			
Показник K_{32} перспективності ринкового попиту на виріб	1			
	2			
	3	0,380952381	0,006127123	0,6
	4	0,407142857	0,003786688	0,727272727
	5			
Показник K_{33} технологічної складності виробництва виробу	1			
	2			
	3	0,360714286	0,006035271	0,666666667
	4	0,461607143	0,003610196	0,727272727
	5	0,382142857	0,005158988	1
Показник K_{34} економічної ефективності збуту виробу	1			
	2			
	3	0,39	0,007729475	0,833333333
	4	0,413265306	0,003795196	0,6
	5			

Таблиця 11.19. Значення вибірових середніх, вибірових дисперсій, коефіцієнтів узгодженості для показників K_{41} , K_{42} , K_{43} , K_{44} об'єктів O_4

Показник	Клас	Вибіркове середнє	Вибіркова дисперсія	Коефіцієнт узгодженості
Показник K_{41} ринкової конкурентоспроможності виробу	1			
	2			
	3	0,452380952	0,002832169	0,6
	4	0,421428571	0,002490354	0,6
	5	0,422619048	0,002881335	1
Показник K_{42} перспективності ринкового попиту на виріб	1			
	2	0,360714286	0,024119388	0,666666667
	3	0,4375	0,002948362	0,8
	4	0,419047619	0,003748212	0,75
	5	0,495238095	0,00247293	0,75
Показник K_{43} технологічної складності виробництва виробу	1			
	2	0,385714286	0,004410653	0,5
	3	0,347619048	0,004180895	0,625
	4	0,426190476	0,00347323	0,75
	5	0,389285714	0,002981797	1
Показник K_{44} економічної ефективності збуту виробу	1			
	2	0,396428571	0,005705102	1
	3	0,46875	0,003293997	0,727272727
	4	0,410714286	0,003345496	1
	5			

Результати першого туру процедури експертного оцінювання об'єкта O_4 з урахуванням показників K_{11} , K_{12} , K_{13} , K_{14} та рекомендацією щодо подальших дій наведено у табл. 11.20:

Таблиця 11.20. Результати першого туру експертного оцінювання показників об'єкта O_4

Показник	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3	Кластер 4	Кластер 5
Показник K_{11} ринкової конкурентноспроможності виробу	Рівень: середній (виконуються умови завершення експертизи)	Рівень: низький	Рівень: високий (виконуються умови завершення експертизи)	Рівень: дуже низький (виконуються умови завершення експертизи)	Рівень: низький
Показник K_{12} перспективності виробу ринкового попиту на виріб	Рівень: середній	Рівень: низький (виконуються умови завершення експертизи)	Рівень: низький (виконуються умови завершення експертизи)	Рівень: середній (виконуються умови завершення експертизи)	Рівень: середній (виконуються умови завершення експертизи)

Показник	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3	Кластер 4	Кластер 5
Показник K_{13} технологічної складності виробництва виробу	Рівень: високий	Рівень: високий	Рівень: середній (виконуються умови завершення експертизи)	Рівень: середній	Рівень: високий (виконуються умови завершення експертизи)
Показник K_{14} економічної ефективності збуту виробу	Рівень: середній	Рівень: низький (виконуються умови завершення експертизи)	Рівень: середній	Рівень: середній (виконуються умови завершення експертизи)	Рівень: низький (виконуються умови завершення експертизи)

Варіантами подальших дій можуть бути: відбракування оцінок, що не потрапили у довірчий інтервал, переоцінювання експертами, чиї результати не потрапили у довірчий інтервал і збільшення кількості експертів, що оцінюють певний показник.

Аналогічно відображено результати експертного оцінювання трьох інших об'єктів O_2, O_3, O_4 .

Результати першого туру процедури експертного оцінювання всіх інноваційних об'єктів O_1, O_2, O_3, O_4 наведено у табл. 11.21.

Таблиця 11.21. Результати експертного оцінювання об'єктів O_1, O_2, O_3, O_4

Показники	Об'єкт			
	O_1	O_2	O_3	O_4
Конкурентоспроможність	Низький	Середній	Високий	Дуже високий
Перспективність ринкового попиту	Низький	Високий	Високий	Середній
Технологічна складність виробництва	Високий	Високий	Високий	Середній
Економічна ефективність	Низький	Низький	Високий	Середній

Отже, після проведення першого туру експертизи на думку більшості експертів перспективнішими з погляду розробки є об'єкти O_3 і O_4 .

Робоча група експертів може прийняти рішення щодо проведення за аналогічною схемою подальших турів експертизи для уточнення та узгодження експертних оцінок і досягнення консенсусу.

Висновки

◆ Передбачення — це складний процес, що характеризується значними обсягами організаційних і наукових заходів міждисциплінарного характеру, довільним вибором критеріїв та цілей передбачення, наявністю значної міри так званого емпіризму і нечіткості результатів процесу передбачення, що не виключає ризику «не відчувати» чи «не побачити» важливої ситуації у сценарії майбутніх подій або важливої критичної технології майбутнього. Проте, як засвідчив досвід розвинених країн, що беруть

активну участь у конкурентній боротьбі за володіння природними ресурсами та ринками збуту товарів і технологій, цьому підходу немає альтернативи. Він стає необхідним інструментом організації в ході прийняття стратегічних рішень для органів управління всіх рівнів — від державних і галузевих, котрі відповідають за економічний та індустріальний розвиток країни, до управлінського персоналу окремого підприємства чи компанії.

- ◆ Передбачення — це спроба зазирнути в майбутнє, що ґрунтується на реальних знаннях, досвіді, умінні застосування інтуїції експертів і груп ОПР. Тому у процесі технологічного передбачення слід дотримуватися умови, згідно з якою будь-який бажаний об'єкт матеріальної культури, передбачуваний та очікуваний суспільством для розробки, має бути запитаним на певному етапі розвитку, а сама матеріальна культура — здатною створювати такий об'єкт.
- ◆ Методи передбачення і процедури їхнього застосування в тій чи іншій сфері людської діяльності надзвичайно різноманітні. Сталими для цього підходу є методологія системного і сценарного аналізу та філософія інновації й відтворення. Це зобов'язує готувати нове покоління фахівців, здатних до масштабного, міждисциплінарного, системного мислення, які вміють ефективно застосовувати передбачення і розв'язувати проблеми інноваційного розвитку країни, регіону чи підприємства.

У країн, що тільки починають застосовувати методологію передбачення, зокрема й в Україні, може виникнути запитання: оскільки ця методологія складна і впровадження її на практиці пов'язане зі значними витратами, то, можливо, не варто цим і займатися, а простіше купити результати застосування передбачення в аналогічних галузях в інших країн і використовувати їх для себе? Це неможливо. Групи учасників інноваційного розвитку і зв'язки між ними в кожній країні мають свої характерні особливості, тому майже неможливо знайти у світі дві подібні системи. Як наслідок — результати передбачення і висновки для різних систем матимуть принципові відмінності. Отже, кожна країна, і насамперед Україна, мають вирішувати проблему свого інноваційного розвитку самостійно.

- ◆ Згенеровані технології, створювані за допомогою такого підходу, революційно впливатимуть на промисловість, економіку, суспільство і довкілля упродовж найближчих десятиліть. Такі технології безпосередньо визначають науково-технологічний прогрес і залежать від нього.

Якщо технології передбачено на ранніх стадіях, то уряд та інші зацікавлені сторони зможуть спрямувати свої ресурси на стратегічні дослідження і підготовку відповідної матеріальної бази для швидкого інноваційного розвитку суспільства. Це і є головною метою передбачення.

Додаток

Контрольні запитання та завдання

Розділ 1

Запитання

1. Які причини, фактори та обставини стимулювали дослідження, об'єднані загальною назвою «системний аналіз»?
2. Чим зумовлені суттєві різночитання й розбіжності у трактуванні багатьох важливих понять та означень, що мають відношення до системного аналізу?
3. Які умови і тенденції зумовлювали становлення та розвиток ідей системності в минулому столітті?
4. У чому подібність і відмінності понять «системний підхід», «системні дослідження», «системний аналіз»?
5. Чи існує відмінність між цілями системного аналізу та цілями дослідження математики, фізики й аналогічних їм наук?
6. У чому полягають подібність і відмінності предметної області системного аналізу та предметних областей фізики, механіки, кібернетики?
7. Яку роль відіграє системне мислення у становленні системного аналізу?
8. Які основні рівні пізнання навколишнього світу можна виділити в історії науки останніх століть?
9. Перелічіть фактори, процеси та умови, що стимулювали високі темпи розвитку системного аналізу в 30–40-х роках минулого століття.
10. Які умови, процеси, обставини стимулювали системні дослідження у 50–70-х роках минулого століття?
11. Завдяки чому третій етап становлення та розвитку системного аналізу можна назвати періодом синхронного розвитку теорії системного аналізу і практики системних досліджень?
12. Розкрийте значення глобальних процесів у становленні та розвитку системних досліджень.
13. Які фактори та умови стимулюють, а які стримують розвиток системного аналізу в сучасний період розвитку цивілізації?
14. Які особливості і властивості системного аналізу принципово відрізняють його від традиційних наукових дисциплін?

15. У чому подібність і відмінності підходів до системного сприйняття світу у В. І. Вернадського, Л. фон Берталанфі та Н. Вінера?
16. Розкажіть про практичну значимість фундаментальних робіт В. І. Вернадського, Л. фон Берталанфі та Н. Вінера у становленні і розвитку системного мислення.
17. Чим відрізняються позиції В. І. Вернадського, Л. фон Берталанфі та Н. Вінера у разі дослідження системних властивостей різних типів об'єктів?
18. У чому полягають принципові відмінності парадигми системного аналізу від парадигм математики, фізики, кібернетики?
19. Які неподоланні факти та умови сприяли становленню й розвитку системного аналізу на емпіричному етапі його розвитку?
20. Перелічіть галузі виробництва, які особливо інтенсивно розвивалися на емпіричному етапі його розвитку.
21. Які причини, фактори й умови гальмували розвиток багатьох галузей у період емпіричного розвитку системного аналізу?
22. Назвіть напрями розвитку системних досліджень, що можуть підвищити темпи розвитку національної, регіональної та світової економіки в умовах XXI століття.
23. Які фактори, умови і тенденції глобалізації світової економіки стимулюють, а які стримують розвиток світової цивілізації?
24. Які властивості, фактори та умови визначають системність практичної діяльності?
25. Які фактори й умови стимулювали розвиток системності практичної діяльності та суттєве ускладнення її рівнів?
26. Чим зумовлено безперервне підвищення складності практичної діяльності?
27. З якими факторами та умовами пов'язано безперервне підвищення ролі і значимості системного аналітика в розв'язанні практичних системних задач?
28. Які властивості та особливості системного аналізу зумовлюють його перехід до багатовимірної науки?
29. У чому полягає принципова відмінність системного аналізу від традиційних одновимірних дисциплін?

Розділ 2

Запитання

1. Які властивості та особливості об'єктів системного аналізу зумовлюють складність визначення їхніх меж?
2. Якими властивостями та особливостями характеризуються об'єкти системного аналізу?
3. Чому і за яких умов об'єктом системного дослідження не завжди є предмет об'єктивної реальності?
4. У чому полягають подібність та відмінність матеріальних і абстрактних об'єктів системного аналізу?

5. Чому неможливо дослідити всі властивості матеріального об'єкта, які фактори та умови обмежують діапазон дослідження?
6. Як фахівці виявляють або вибирають межі системного дослідження реальних об'єктів?
7. Які особливості, фактори та умови визначають необхідність системного дослідження реального матеріального об'єкта на основі моделі абстрактного об'єкта або моделі матеріального об'єкта?
8. Які причини та умови визначають необхідність моделювання різних процесів і явищ у системному дослідженні об'єктів?
9. Чому в розв'язанні реальних системних проблем найважливішим і найскладнішим етапом є вибір та побудова моделей?
10. Які фактори та причини зумовлюють потребу формувати і застосовувати базиси — «час», «простір», «групу», а також їхні комбінації «час–простір», «час–група» тощо?
11. Чи можна зобразити глобальну суперсистему у вигляді багаторівневої ієрархічної системи, до складу якої входять глобальні технічні, організаційні, інформаційні й інші суперсистеми та їхні складові?
12. Які умови та фактори зумовлюють необхідність введення структурно-функціонального аналізу під час системного дослідження реальних об'єктів і моделювання інноваційних об'єктів?
13. Чим пояснюється доцільність введення трьох видів рівнів ієрархічної системи?
14. Які умови, фактори і причини зумовлюють потребу у визначенні цілі системи та характеристичної функції?
15. Які потреби, умови і причини зумовлюють необхідність і доцільність створення і практичного використання ціленаправлених систем різного призначення?
16. Чим саме зумовлені необхідність і доцільність створення та практичного використання цілеспрямованих систем?
17. Чим різняться можливості ціленаправлених і цілеспрямованих систем та сфери їхнього практичного застосування?
18. Які особливості та властивості мають структуровані системи?
19. Які нові можливості в системному дослідженні реальних складних об'єктів та їхніх моделей забезпечуються завдяки використанню концептуально-функціональних просторів умов і властивостей функціонування системи?
20. У яких сферах практичної діяльності доцільно використовувати можливості структурно-функціонального аналізу?
21. Які особливості та властивості характерні для процесів реалізації інноваційних ідей і технічних рішень?
22. Які протиріччя та невизначеності необхідно усувати на всіх етапах життєвого циклу інноваційних виробів?
23. Які загальні особливості системних задач дають змогу виділити їх у окремий клас?
24. Чому ціна помилки, допущеної на етапі НДДКР або НДР, зростає в геометричній прогресії на наступних етапах?

25. Які основні властивості характерні для методології системного аналізу?
26. На яких фундаментальних принципах базується системна методологія та її практична реалізація?
27. Які умови і фактори визначають необхідність та доцільність використання евристичних підходів і принципів у системному аналізі?
28. Які евристичні гіпотези характерні для методології системного аналізу?
29. Які фактори, умови та особливості характеризують процедури системного аналізу?
30. У чому полягає практична значимість основних типів невизначеності в задачах системного аналізу?
31. У чому полягає взаємозв'язок і взаємозалежність основних процедур системного аналізу?
32. Які умови, фактори і причини зумовлюють раціональність прийомів і методів вибору альтернатив у задачах системного аналізу?
33. Якими властивостями та особливостями характеризується поняття «складність»?
34. До якого спектра складності належать задачі системного аналізу?
35. Які види складності виникають під час розв'язання системних задач?
36. Якими властивостями та особливостями характеризується оцінка алгоритмічної розв'язності системної задачі?
37. Які принципи, прийоми і підходи застосовують для подолання трансобчислювальної складності задач системного аналізу?

Розділ 3

Запитання

1. Які принципові відмінності понять «формалізована задача», «формалізована задача», «розв'язна задача»?
2. Які властивості та особливості СФС?
3. У чому полягає подібність і відмінність організаційних і технологічних підсистем СФС?
4. Які властивості взаємозв'язків і взаємозалежностей основних природних і штучних компонентів еколого-економічної системи ЕЕС?
5. Які цілі і задачі ставлять під час дослідження СФС як об'єкта системного аналізу?
6. Наведіть характеристики рівнів задач, розв'язуваних під час дослідження СФС.
7. Які фактори і причини зумовлюють взаємозв'язки між різними ієрархічними рівнями СФС?
8. У чому полягає вивчення СФС як об'єкта системного аналізу?
9. Які фактори і причини зумовлюють потребу кількісного та якісного аналізу на другому рівні задач СФС?

10. Подайте взаємозв'язки задач і методів керування складними технологічними підсистемами.
11. Які задачі характерні для 4-го рівня системного аналізу СФС?
12. Які основні методи використовують для розв'язання задач 1–4 рівнів системного аналізу СФС?
13. Які взаємозв'язки і взаємозалежності характерні для різних рівнів системного аналізу СФС?
14. Сформулюйте основні підходи до опису технологічних підсистем СФС.
15. Наведіть класифікацію моделей, що використовуються для опису технологічних підсистем СФС.
16. Сформулюйте задачу управління технологічними підсистемами СФС.
17. Сформулюйте поняття лінгвістичних змінних, використовуваних для оперування з невизначеностями у СФС.
18. Подайте перелік задач для організаційних підсистем СФС.
19. Сформулюйте стратегію прийняття рішень, що забезпечують цілеспрямовану поведінку СФС.
20. Які основні результати можуть бути одержані під час дослідження СФС?

Розділ 4

Запитання

1. Чи є поняття «формалізована задача» синонімом до «розв'язна задача»?
2. Які принципові особливості підходів до розв'язання задач на основі аксіоматичних наукових дисциплін і системного аналізу як прикладної наукової методології?
3. Які підходи застосовують для знаходження раціонального компромісу цілей?
4. У чому полягає суть принципу Парето?
5. Як кількісно можна характеризувати міру переваги розглядуваних цілей?
6. З якою метою використовують апріорну інформацію про задані в технічному завданні обмеження?
7. Які є методи розв'язання несумісних систем рівнянь?
8. Якими принциповими особливостями обґрунтовано вибір критеріїв для розв'язання оптимізаційних задач?
9. У чому полягає принципова відмінність прийомів введення коефіцієнтів важливості за лінійної згортки та зведення задачі розкриття невизначеності цілей до системи рівнянь?
10. Які фактори і дії характеризують ситуаційну та природну невизначеності?
11. Назвіть методи розкриття ситуаційної невизначеності.
12. Які особливості принципу гарантованого результату, його переваги і недоліки?

13. Які прийоми використовують для розкриття невизначеності дій партнерів чи супротивників у задачах конфлікту стратегій?
14. Які принципові відмінності задач протидії конкурентів від задач взаємодії партнерів?
15. Які принципові особливості задачі розкриття системної невизначеності?
16. Які принципові особливості формування цільових функцій у задачі розкриття системної невизначеності?
17. За яких умов принципово можливо незалежно аналізувати різні види невизначеностей?
18. За яких обмежень і припущень можна одночасно розкривати кілька видів невизначеностей?
19. Чи можна агрегувати результати різних видів невизначеностей у сумарний результат із достатнім ступенем достовірності?
20. Чи існують ефективні методи і підходи до розкриття кількох видів невизначеностей одночасно в одній системній задачі?

Завдання

1. *Задано:* аналітичні залежності цільових функцій $f_1(x)$, $f_2(x)$ і порогові обмеження f_1^* , f_2^* .

Потрібно: визначити множину Парето на заданому інтервалі $[x_1, x_2]$, якщо виконуються умови $f_1(x) \geq f_1^*$, $f_2(x) \geq f_2^*$. Звузити множину Парето, використовуючи прийоми (варіанти) технічних обмежень.

Розв'язуючи рівняння, всі обчислення виконати з точністю до 0,0001, у разі звуження інтервалів значення меж округлити до 0,001 і крок сітки брати таким, що дорівнює 0,001.

Варіанти завдання подано в табл. 1.

Таблиця 1. Цільові функції суб'єктів та значення змінних

Варіант	Цільові функції суб'єктів		Значення			
	$f_1(x)$	$f_2(x)$	f_1^*	f_2^*	x_1	x_2
Обмеження: $f_1(x) \geq f_1^*$, $f_2(x) \geq f_2^*$						
1	$100 \log(x)$	$100 - x^2$	60	19	0	10
2	2^x	$9 - x^2$	2	6	0	4
3	$\sin x$	$4 - x^2$	$\sqrt{2}/2$	0,5	0	2
4	$20 + 6x - 3x^2$	$9 \ln(x) + 9$	20	10	1	5
5	2^x	$5 + 2x + x^3$	5	15	1	5
6	$0,8 \exp(-2(x-3)^2)$	$10 - 6x + x^2$	0,2	1	1	5
7	$20x^{-1}$	$5 + 6x - x^{1,5}$	5	12	1	5

Варіант	Цільові функції суб'єктів		Значення			
	$f_1(x)$	$f_2(x)$	f_1^*	f_2^*	x_1	x_2
8	3^{x+1}	$5+4x-3x^2$	1	3	1	3
9	$\sqrt{5x^2+10}$	$3-0,5x^2$	10	6	1	6
10	$15\sin(x+1)$	$10\cos(2x-2,4)+12$	12,82	16	6	8
Обмеження: $f_1(x) \leq f_1^*$, $f_2(x) \geq f_2^*$						
11	$1-x^2$	$ x $	-2	2	-2	2
12	$3+12x+0,4x^3$	$\sin(x^2)+7x^2$	50	10	0	4
13	$5 x-2 +10 x-3 $	$15+4x$	25	23	0	5
14	$2+0,5\exp(x)$	$8+x^2$	3	7	-3	3
15	$-32-x+10x^2$	$10+x-32x^2$	0,001	-10	-2	2
16	$5\log(x+9)$	$-12+4x$	10	2	0,001	5
17	$9-6x+x^2$	$18-9x-0,1x^2$	45	10	-5	4
18	$1-1,6x+7x^2$	$6+8x-3x^2$	45	5	-2	2
19	$1-x+x^2$	$56-x-3x^2$	15	5	-5	2
20	$1+\ln(x)$	$-1+x+x^2$	1	-0,25	0,001	1,5

2. Задано: задачу розкриття невизначеності протидії двох суб'єктів. Кожна сторона має власну цільову функцію: суб'єкт 1 – $f_1(x_1, x_2)$, суб'єкт 2 – $f_2(x_1, x_2)$. Суб'єкти діють незалежно – вони не знають ні цільової функції, ні параметрів один одного.

Потрібно знайти:

- ♦ гарантований результат f_{12}^*, f_{21}^* кожного суб'єкта;
- ♦ множину Парето з умови: $f_{12}(x_1, x_2) \geq f_{12}^*$; $f_{21}(x_2, x_1) \geq f_{21}^*$;
- ♦ оптимальні значення x_1^* і x_2^* , за яких $\Delta_i = |f_i(x_1^*, x_2^*) - f_i^*|$, $i = 1, 2$ набуває мінімального значення $\Delta \rightarrow 0$.

Варіанти завдання подано в табл. 2

Таблиця 2. Цільові функції суб'єктів та діапазони значень змінних

Варіант	Цільові функції суб'єктів		Крок сітки	Діапазони значень змінних		
	$f_1(x_1, x_2)$	$f_2(x_1, x_2)$		x_1	x_2	x_3
1	$f_{12}(x_1, x_2)$	$\cos x_1 - x_2$	0,01	x_1	0	3
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$\sin x_1 + x_2$	0,01	x_2	-2	2
2	$f_{12}(x_1, x_2)$	$8x_1^2 + 16x_1 + 6x_2^2 - 12x_2 + 50$	0,01	x_1	-1	1
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$-8x_2^2 + 24x_2 + 11x_1^2 - 17x_1 + 4$	0,01	x_2	-2	2

Таблиця 2 (продовження)

Варіант	Цільові функції суб'єктів		Крок сітки	Діапазони значень змінних		
3	$f_{12}(x_1, x_2)$	$0,01\sin^2(x_1) - 0,07(x_1 + (x_1 + 4,1)^2)$	0,01	x_1	-1	1
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$0,01\cos^2(x_2) + 0,3x_1x_2 + 0,14x_2^2 + 0,1x_1^2$	0,01	x_2	-1	4
4	$f_{12}(x_1, x_2)$	$(-2x_1^3 - 4x_1^2 - 24x_1 + 17)(2x_2^2 - 10x_2 + 15)$	0,02	x_1	1	8
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$(3x_2^2 - 18x_2x_1 - 33x_2 - 12)(x_1^2 - 6x_1 + 13)$	0,02	x_2	0	6
5	$f_{12}(x_1, x_2)$	$3x_1^2 + 6x_1x_2 - 12x_2 + 72$	0,01	x_1	0	3
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$4x_2^2 - 8x_2 + 10x_1^2x_2 - 32x_1 + 64$	0,01	x_2	0	2
6	$f_{12}(x_1, x_2)$	$5x_1^2 - 12x_1x_2 + 3x_2^2 + 15$	0,01	x_1	0	3
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$(-6x_1^3 + 15x_2^2 - 7x_2 + 10)(5x_1^2 - 8x_1 + 7)$	0,01	x_2	0	2
7	$f_{12}(x_1, x_2)$	$x_1^3 - x_2^3$	0,02	x_1	0	4
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$x_1 + x_2$	0,01	x_2	0	4
8	$f_{12}(x_1, x_2)$	$(-6x_1^2 + 10x_1 + 6)(-2x_2^2 + 5x_2 + 8)$	0,01	x_1	0	2
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$(4x_2^2 - 9x_2 + 11)(-3x_1^2 + 15)$	0,01	x_2	-1	1
9	$f_{12}(x_1, x_2)$	$6x_1^2 - 12x_1 + 4x_2^2 + 8x_2 + 40$	0,01	x_1	-2	2
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$-8x_1^2 + 16x_1 - 3x_2^2 + 6x_2 + 50$	0,01	x_2	-2	2
10	$f_{12}(x_1, x_2)$	$-8x_1x_2^2 + 9x_2^2 - 37x_2 + 4x_1^2 + 50$	0,01	x_1	0	2
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$-2(x_2 - 5)^2 - 9(x_1 - 0,95)^2x_2 + 2x_1x_2 + 50$	0,01	x_2	0	2
11	$f_{12}(x_1, x_2)$	$\cos^2(3\sqrt{x_1^2 + x_2^2})$	0,01	x_1	0	2
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$\sin(2\sqrt{(x_1 - 15)^2 + (x_2 - 15)^2})$	0,01	x_2	0	2
12	$f_{12}(x_1, x_2)$	$-6x_1^2 + 15x_1 - x_2^2 - 3x_2 + 42$	0,01	x_1	-1	1
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$-5x_2^2 + 17x_2 + 9x_1^2 + 2x_1 + 7$	0,01	x_2	-2	2
13	$f_{12}(x_1, x_2)$	$5x_1^2 - 9x_1x_2 + 3x_2^2 + 15$	0,01	x_1	0	3
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$3x_1^2 - 7x_1x_2 + 5x_2^2 + 12$	0,02	x_2	0	4
14	$f_{12}(x_1, x_2)$	$(2x_1^2 - 4x_1 + 18)(6x_2^2 - 26x_2 + 29)$	0,01	x_1	0	2
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$(-6x_2^2 + 26)(-3x_1^2 + 4x_1 + 6)$	0,01	x_2	0	2
15	$f_{12}(x_1, x_2)$	$-20x_1^2 + 7x_1 - 3x_1x_2^2 + 46x_2 + 12$	0,01	x_1	0	3
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$18x_2^2 - 8x_2 + 15x_2x_1^2 - 32x_1 + 123$	0,01	x_2	0	2
16	$f_{12}(x_1, x_2)$	$(x_1 - 1,02)(x_2 - 1,55) + 1,5$	0,02	x_1	-1	4
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$(2,5 - x_2^2) + 0,2x_1^2$	0,01	x_2	-1	2
17	$f_{12}(x_1, x_2)$	$6x_1^2 - 2x_1x_2 - 4x_2^2 + 9$	0,01	x_1	2	5
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$2x_2^2 - 2x_2 - 15x_1x_2 - 5x_1^2 + 20$	0,01	x_2	-3	1

Варіант	Цільові функції суб'єктів		Крок сітки	Діапазони значень змінних		
18	$f_{12}(x_1, x_2)$	$5x_1^2 + x_1x_2 + 3x_2^2 + 10$	0,01	x_1	-2	2
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$-2x_2^2 - 2x_1x_2 - 4x_1^2 + 20$	0,01	x_2	-2	2
19	$f_{12}(x_1, x_2)$	$2x_1^2 - 3x_2 + 3x_2^2 + 10$	0,01	x_1	-1	1
	$f_{21}(x_1, x_2)$	$-2x_2^2 + 2x_1 + x_1^2 + 4$	0,01	x_2	-1	1
20	$f_{12}(x_1, x_2)$	$-2x_1^2 - x_1x_2 + x_2^2 + 8x_1$	0,01	x_1	0	3
	$f_{12}(x_1, x_2)$	$2x_1^2 - 10x_1x_2 + 4x_2^2 + 12x_2$	0,02	x_2	0	4

Розділ 5

Запитання

1. Які принципові особливості формування функціональних залежностей у задачі розкриття концептуальної невизначеності?
2. У чому полягає принципова відмінність задачі відтворення функціональних залежностей за умов концептуальної невизначеності від типової задачі відтворення функціональної залежності?
3. Чим зумовлено потребу відшукування раціонального компромісу між суперечливими цілями під час створення нового виробу?
4. Чим зумовлено вибір кількості цільових функцій, їхніх аналітичних форм, обґрунтування їхнього змісту і призначення?
5. За яких обмежень і припущень можна одночасно розкривати кілька видів невизначеностей?
6. Чим зумовлено вибір класу і структури наближувальних функцій під час формування функціональних залежностей?
7. Чим зумовлений вибір критеріїв під час побудови наближувальних функцій за дискретною вибіркою?
8. У чому полягає специфіка екстремальних властивостей шуканих наближувальних функцій?
9. У чому полягає пошук раціонального компромісу між суперечливими вимогами?
10. На чому ґрунтується підхід до побудови наближувальних функцій, що із практично прийнятною похибкою характеризують реальні функціональні залежності?
11. За яких умов шукані функції від декількох змінних можна подати у вигляді суперпозиції функцій від однієї змінної?
12. За яких умов шукані функції формують у класі адитивних або мультиплікативних функцій?
13. Чому наближувальні функції формують у вигляді ієрархічної багаторівневої системи моделей?

14. Як реалізовано процес агрегування послідовності відповідних розв'язків в остаточний розв'язок?
15. У чому полягають особливості та властивості поліномів Чебишева?
16. Які є методи розв'язання несумісних лінійних систем рівнянь? Які їхні принципи особливості?
17. Які особливості формування множини Парето на основі системного узгодження області визначення і множини значень цільових функцій?
18. У чому полягає суть підходу до формування множини Парето на основі взаємного узгодження області визначення і множини значень цільових функцій?
19. Чи є взаємозамінними підходи до формування множини Парето на основі узгодження тільки області визначення або тільки множини значень цільових функцій?

Завдання

1. Задано: дискретні значення $X_s, s = \overline{1, 3}$ і $Y_i, i = \overline{1, 4}$ вибірки, поданої в табл. 3.

Потрібно:

- а) розв'язати задачу відтворення функцій $y_i(x_1, x_2, x_3), i = \overline{1, 4}$ за заданими дискретними значеннями $X_s, s = \overline{1, 3}$ і $Y_i, i = \overline{1, 4}$ вибірки;

Таблиця 3. Вихідні дискретні значення вибірки $X_1[X_{11}, X_{12}], X_2[X_{21}, X_{22}], X_3[X_{31}, X_{32}, X_{33}]$ і $Y_i[X_1, X_2, X_3], i = \overline{1, 4}$

q_0	X_{11}	X_{12}	X_{21}	X_{22}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	5,050	2,015	7,050	8,015	10,00	1,000	5,100	594,621	112,859	49,406	117,683
2	5,150	2,100	7,150	9,109	15,80	2,100	4,200	338,163	123,717	92,651	290,123
3	5,200	2,125	7,192	9,125	22,50	2,500	3,500	287,411	137,965	187,691	383,576
4	5,250	2,175	7,250	9,175	25,00	3,510	2,720	137,197	145,912	278,793	474,789
5	5,325	2,200	7,325	9,198	32,50	4,200	2,530	116,547	169,173	379,497	674,316
6	5,350	2,250	7,350	9,251	35,00	5,020	2,100	97,789	192,924	577,082	472,817
7	5,400	2,400	7,411	9,395	40,70	8,200	1,150	138,926	238,549	687,758	377,425
8	5,500	2,500	7,505	9,498	51,80	10,10	0,720	274,316	277,354	771,956	289,519
9	5,600	2,600	7,610	9,598	65,00	12,80	0,540	352,817	394,167	891,123	121,374
10	5,700	2,700	7,695	9,699	72,00	14,40	0,120	187,425	296,375	912,859	87,173
11	5,750	2,750	7,750	9,748	75,40	14,70	1,250	229,519	261,326	853,717	114,136
12	5,800	2,775	7,804	9,775	82,80	15,50	1,760	361,374	145,651	717,965	179,152
13	5,850	2,800	7,850	9,798	85,00	16,30	2,230	459,173	129,856	625,912	231,239
14	5,907	2,850	8,050	9,850	90,78	16,70	2,610	684,136	118,314	469,359	325,482
15	5,910	2,855	7,910	9,855	91,00	16,90	4,160	735,327	141,716	292,924	440,976
16	5,925	2,865	7,925	9,865	92,50	17,50	5,250	858,386	178,942	118,549	675,846
17	5,929	2,885	8,011	9,875	92,90	17,70	6,370	618,859	229,316	97,354	716,124
18	5,933	2,915	7,933	9,899	93,50	18,20	7,260	535,737	268,231	64,167	863,928
19	5,935	2,950	7,935	9,951	94,58	19,10	7,510	406,168	337,987	116,375	903,153
20	5,950	2,975	7,950	9,975	95,40	19,50	7,740	385,761	432,967	241,326	831,195

q_0	X_{11}	X_{12}	X_{21}	X_{22}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
21	5,010	1,995	6,950	9,015	11,50	21,00	8,140	290,639	382,856	475,651	771,588
22	5,050	2,975	7,108	9,975	10,50	19,56	8,350	135,784	285,632	544,856	636,847
23	5,150	2,950	7,151	9,950	15,80	19,30	8,580	87,438	172,859	648,314	541,842
24	5,200	2,900	7,204	9,915	21,50	18,70	8,740	121,321	143,717	744,716	439,425
25	5,250	2,875	7,248	9,875	26,40	17,56	8,850	291,845	117,364	829,942	322,147
26	5,325	2,865	7,325	9,865	32,50	17,10	9,210	488,614	146,123	949,316	235,954
27	5,350	2,855	7,351	9,855	35,30	16,70	9,520	589,956	242,341	848,231	150,492
28	5,400	2,850	7,408	9,850	41,70	16,20	9,750	712,129	288,324	747,987	84,897
29	5,500	2,775	7,495	9,775	50,20	15,70	10,100	897,152	326,939	642,967	158,289
30	5,600	2,750	7,607	9,750	62,70	15,36	0,100	628,654	377,128	532,856	272,164
31	5,700	2,710	7,697	9,697	69,80	14,70	1,150	442,145	405,327	415,632	353,356
32	5,750	2,603	7,750	9,605	75,10	13,34	1,360	286,243	458,386	393,135	427,168
33	5,800	2,495	7,798	9,495	80,52	11,72	1,750	162,345	518,859	277,824	506,123
34	5,850	2,394	7,850	9,415	85,20	8,900	2,130	102,879	595,737	163,453	682,659
35	5,907	2,245	7,913	9,255	90,76	7,740	2,570	197,976	685,761	99,167	793,834
36	5,910	2,192	7,910	9,205	91,10	6,360	2,750	295,846	790,639	67,836	891,345
37	5,925	2,175	7,925	9,175	92,50	5,700	3,260	456,124	636,847	57,192	696,841
38	5,929	2,125	7,929	9,125	92,90	3,750	3,790	663,928	571,842	85,834	593,952
39	6,010	2,105	7,933	9,091	93,30	3,650	4,120	743,153	489,425	101,985	409,463
40	5,935	2,010	7,935	8,985	94,50	3,520	4,360	949,976	452,147	228,591	313,415
41	5,950	2,110	7,950	9,115	98,60	2,720	3,850	749,421	377,128	302,861	208,613
42	5,020	2,115	6,995	9,115	110,0	2,340	2,340	515,356	316,124	415,817	107,319
43	6,050	2,128	7,950	9,120	95,26	2,560	1,680	376,578	273,329	578,473	82,263
44	5,935	2,131	7,935	9,130	93,52	2,760	1,320	176,948	187,364	681,417	134,132
45	5,925	2,135	7,925	9,135	92,80	2,980	1,160	98,334	141,381	778,653	281,953

б) під час розв'язання несумісної системи рівнянь (5.4) дослідити й обґрунтувати застосування таких методів:

- ♦ методу найменших квадратів;
- ♦ симплекс-методу;
- ♦ градієнтного методу;
- ♦ методу покоординатного спуску;

в) проаналізувати й обґрунтувати вибір величини b_{q_0} серед таких варіантів:

- ♦ b_{q_0} визначає середнє арифметичне значення

$$b_{q_0} = \left\{ \max_{i \in [1, m]} \hat{Y}_i[q_0] + \min_{i \in [1, m]} \hat{Y}_i[q_0] \right\} / 2, \quad q_0 = \overline{1, k_0};$$

- ♦ b_{q_0} беруть такими, що дорівнюють нормованим значенням $\hat{Y}_i[q_0]$, $i = \overline{1, m}$;
- ♦ b_{q_0} визначає інтервальна оцінка

$$b_{q_0} = \left\{ \max_{i \in [1, m]} \hat{Y}_i[q_0] - \min_{i \in [1, m]} \hat{Y}_i[q_0] \right\} / 2, \quad q_0 = \overline{1, k_0};$$

♦ b_{q_0} визначає ширина інтервалу

$$b_{q_0} = \left\{ \max_{i \in [1, m]} \hat{Y}_i[q_0] - \min_{i \in [1, m]} \hat{Y}_i[q_0] \right\}, \quad q_0 = \overline{1, k_0};$$

♦ b_{q_0} визначає прийом, запропонований дослідником;

г) проаналізувати й обґрунтувати вплив вибору степенів поліномів Чебишева на достовірність відтворення наближувальних функцій;

д) дослідити доцільність розв'язання систем рівнянь (5.2) і (5.4), що мають вигляд однієї або трьох систем рівнянь для визначення коефіцієнтів $a_{is}, s = \overline{1, 3}$ і $\lambda_{jsps}, s = \overline{1, 3}$, відповідно;

е) дослідити вибір такого варіанта структури функцій:

$$\Phi_i(x) = \exp \left\{ \sum_{k=1}^{K_0} c_{ik} \ln[1 + \Phi_{ik}(x_k)] \right\} - 1; \quad i = \overline{1, m}; \quad k = \overline{1, K_0};$$

$$\Phi_{ik} = \exp \left\{ \sum_{j_k=1}^{n_k} a_{ikj_k} \ln[1 + \Psi_{kj_k}(x_{kj_k})] \right\} - 1; \quad x_k = \langle x_{kj_k}, j_k = \overline{1, n_k} \rangle;$$

$$\Psi_{kj_k}(x_{kj_k}) = \exp \left\{ \varphi_{0j_k} + \sum_{p_{j_k}=1}^{P_{0j_k}} \lambda_{kj_k} \ln[1 + \varphi_{p_k}(x_{kj_k})] \right\} - 1.$$

Для наведеної формули оцінити різні варіанти вибору функцій φ_{p_k} :

$$\varphi_{p_k}(x_{j_k}) \Rightarrow T_n^*(x); \quad \varphi_{0j_k} = \lambda_{0j_k} \ln(1 + T_0^*) = \lambda_{0j_k} \ln 1,5; \quad k = \overline{1, K_0}; \quad j_k = \overline{1, n_k};$$

$$\varphi_{p_k}(x_{j_k}) \Rightarrow 1 + T_n(x); \quad \varphi_{0j_k} = \lambda_{0j_k} \ln(1 + T_0) = \lambda_{0j_k} \ln 1,5; \quad k = \overline{1, K_0}; \quad j_k = \overline{1, n_k};$$

$$\varphi_{p_k}(x_{j_k}) \Rightarrow U_n^*(x); \quad \varphi_{0j_k} = \lambda_{0j_k} \ln(1 + U_0^*) = \lambda_{0j_k} \ln 1,5; \quad k = \overline{1, K_0}; \quad j_k = \overline{1, n_k};$$

$$\varphi_{p_k}(x_{j_k}) \Rightarrow 1 + U_n(x); \quad \varphi_{0j_k} = \lambda_{0j_k} \ln(1 + U_0^*) = \lambda_{0j_k} \ln 1,5; \quad k = \overline{1, K_0}; \quad j_k = \overline{1, n_k};$$

$$\varphi_{p_k}(x_{j_k}) \Rightarrow 1 + C_n^*(x); \quad \varphi_{0j_k} = \lambda_{0j_k} \ln(1 + C_0^*) = \lambda_{0j_k} \ln 1,5; \quad k = \overline{1, K_0}; \quad j_k = \overline{1, n_k};$$

$$\varphi_{p_k}(x_{j_k}) \Rightarrow 1 + S_n^*(x); \quad \varphi_{0j_k} = \lambda_{0j_k} \ln(1 + S_0^*) = \lambda_{0j_k} \ln 1,5; \quad k = \overline{1, K_0}; \quad j_k = \overline{1, n_k};$$

$$\varphi_{p_k}(x_{j_k}) \Rightarrow P_n^*(x); \quad \varphi_{0j_k} = \lambda_{0j_k} \ln(1 + P_0^*) = \lambda_{0j_k} \ln 1,5; \quad k = \overline{1, K_0}; \quad j_k = \overline{1, n_k};$$

$$\varphi_{p_k}(x_{j_k}) \Rightarrow 1 + P_n^*(x); \quad \varphi_{0j_k} = \lambda_{0j_k} \ln(1 + P_0^*) = \lambda_{0j_k} \ln 1,5; \quad k = \overline{1, K_0}; \quad j_k = \overline{1, n_k};$$

$$\varphi_{p_k}(x_{j_k}) \Rightarrow 1 + P_n(x); \quad \varphi_{0j_k} = \lambda_{0j_k} \ln(1 + P_0) = \lambda_{0j_k} \ln 1,5; \quad k = \overline{1, K_0}; \quad j_k = \overline{1, n_k};$$

$$\varphi_{p_k}(x_{j_k}) \Rightarrow 1 + L_n(x); \quad \varphi_{0j_k} = \lambda_{0j_k} \ln(1 + L_0) = \lambda_{0j_k} \ln 1,5; \quad k = \overline{1, K_0}; \quad j_k = \overline{1, n_k};$$

$$\varphi_{p_k}(x_{j_k}) \Rightarrow 1 + H_n(x); \quad \varphi_{0j_k} = \lambda_{0j_k} \ln(1 + H_0) = \lambda_{0j_k} \ln 1,5; \quad k = \overline{1, K_0}; \quad j_k = \overline{1, n_k};$$

Тут прийнято, що відповідно до робіт [90, 173]:

♦ $T_n^*(x)$ — зміщені поліноми Чебишева першого роду;

♦ $T_n(x)$ — поліноми Чебишева першого роду;

♦ $U_n^*(x)$ — зміщені поліноми Чебишева другого роду;

♦ $U_n(x)$ — поліноми Чебишева другого роду;

♦ $C_n^*(x) = 2T_n^*\left(\frac{2+x}{4}\right)$ — спеціальні поліноми Чебишева першого роду;

- ♦ $S_n^*(x) = U_n^*\left(\frac{2+x}{4}\right)$ — спеціальні поліноми Чебишева другого роду;
- ♦ $P_n(x)$ — поліноми Лежандра;
- ♦ $P_n^*(x)$ — зміщені поліноми Лежандра;
- ♦ $L_n(x)$ — поліноми Лагерра;
- ♦ $H_n(x)$ — поліноми Ерміта.

Розділ 6

Запитання

1. Для яких видів практичної діяльності характерні задачі, з одного боку, взаємодії, а з іншого — протидії коаліцій?
2. За яким принципом можуть бути впорядковані коаліції у множинах X_1 і X_2 ?
3. Які характерні риси формулювання задач активної взаємодії кількох коаліцій?
4. Як визначають вектор-функції кожного учасника коаліції?
5. Як формують загальну вектор-функцію F_r цілей взаємодії учасників коаліції як партнерів?
6. Як у задачах активної взаємодії формують вектор-функцію φ_r спільних цілей кожної коаліції?
7. Які особливості формування вектор-функції $\bar{f}_r$ власних цілей взаємодії?
8. Яка принципова особливість формалізації задач протидії коаліцій на відміну від задач взаємодії?
9. Які характерні особливості формулювання задач активної протидії коаліцій на відміну від задач взаємодії?
10. Які принципові особливості формалізації прямого і непрямого збитків?
11. Які характерні особливості формалізації задач протидії коаліцій з урахуванням невизначеності ситуацій?
12. Як виконують формалізацію задачі для випадку взаємодії кількох коаліцій, об'єднаних у суперкоаліцію?
13. На яких принципах ґрунтується загальна стратегія розв'язання задач системної взаємодії або системної протидії коаліцій?
14. Які принципові особливості принципу мінімізації ризику?
15. Які припущення характерні для задач взаємодії або протидії коаліцій у традиційних дисциплінах?
16. Які обмеження враховують під час розв'язування задач системної взаємодії або системної протидії коаліцій?
17. Які характерні риси реалізації стратегії розв'язання задач системної протидії коаліцій?
18. У чому полягає основна мета реалізації стратегії розв'язання задач системної протидії коаліцій?

- 19. Як виконують формалізацію ймовірнісних властивостей ситуацій?
- 20. Які групи факторів ризику враховують у задачах системної взаємодії або системної протидії коаліцій?
- 21. Як визначити ступінь ризику у випадку впливу всіх уведених факторів ризику?
- 22. Яка принципова особливість процедури оптимізації в задачах системної протидії коаліцій?

Завдання

Задано:

- функціональні залежності $I'_{12}(x, y), I'_{21}(x, y)$ (табл. 4);
- функціональні залежності значень збитків $J_{12ns}(x, y), J_{12fm}(x, y), J_{12in}(x, y), J_{21ns}(x, y), J_{21fm}(x, y), J_{21in}(x, y)$ (табл. 5);
- ситуаційні матриці ймовірностей факторів ризику (табл. 6).

Потрібно: оцінити вплив факторів ризику на значення цільових функцій $F_{\Sigma 12}(x, y)$ і $F_{\Sigma 21}(x, y)$ у задачі протидії двох коаліцій.

Порядок виконання завдання наведено у розділі 6.5.2.

Таблиця 4. Функціональні залежності $I'_{12}(x, y), I'_{21}(x, y)$

Варіант	$I'_{12}(x, y)$	$I'_{21}(x, y)$	Діапазони значень змінних
1	$\sin\left(\pi \frac{x}{2}\right) + 0,01 \sin\left(\pi \frac{x}{2}\right)y - 0,1y$	$-\cos\left(\pi \frac{x}{2}\right) + 0,1 \cos\left(\pi \frac{x}{2}\right)y + 0,2y + 1$	$x \in [0; 2]$ $y \in [0; 2]$
2	$7x^2 + 12xy - 10y + 5x + 12$	$2,13(y - 1,5)^3 - 2,1xy - 4y - 1,5x + 30$	$x \in [0; 3]$ $y \in [0; 3]$
3	$\tan\left(\pi \frac{x}{2} - 1\right) + 0,01 \tan\left(\pi \frac{x}{2} - y\right)y - 0,1y$	$-\sin\left(\pi \frac{x}{2}\right) + 0,1 \cos\left(\pi \frac{x}{2}\right) + 0,2y + 1$	$x \in [0; 2]$ $y \in [0; 2]$
4	$\frac{8,3x - 7,6xy - 12y + 25,2}{98,6}$	$\frac{-3,9x + 12,5xy + 13,9y + 12,6}{76,4}$	$x \in [0; 3]$ $y \in [0; 2]$
5	$\frac{(x - 2)^2 + (y - 2)^2}{1,6}$	$\frac{(x - 1)^2 - (y - 1)^2}{1,6}$	$x \in [0; 3]$ $y \in [0; 3]$
6	$x^2 + y^2 + 2xy$	$x^2 + y^2 + 2xy$	$x \in [0; 3]$ $y \in [0; 2]$
7	$\frac{15x^2 - 10x}{x^2 + 2x + 1} - x + y - \frac{9y^2 - 2y}{y^2 + 3y + 1}$	$\frac{15(x + y)^2 - 5(x + y)}{((x + y)^2 + 1)(x + y)}y - y$	$x \in [0; 5]$ $y \in [0; 5]$

8	$\frac{(x-1)^2 + (y-1)^2}{18}$	$\frac{-(x-3)^2 - (y-3)^2}{18} + 1$	$x \in [0; 4]$ $y \in [0; 4]$
9	$0,6(2x^2 + 1,7xy^2 + 3y^2 + 67)$	$0,2(-5y^2 + x^2y + 2x + 93)$	$x \in [0; 2]$ $y \in [1; 4]$
10	$\frac{x^2 + 2y - 4y^2 + 15}{12}$	$\frac{x^2 + 2xy + 4y^2 + 12}{141}$	$x \in [0; 2]$ $y \in [0; 2]$

Таблиця 5. Функціональні залежності значень збитків

Варіант	$J_{12ns}(x, y), J_{12fm}(x, y), J_{12in}(x, y)$	$J_{21ns}(x, y), J_{21fm}(x, y), J_{21in}(x, y)$
1	$J_{12ns}(x, y) = 0,04y - 0,05xy -$ $-0,03 - 0,06$ $J_{12fm}(x, y) = 0,1y - 0,01xy +$ $+0,014x + 0,2$ $J_{12in}(x, y) = 0,12y - 0,33xy -$ $-0,03x + 0,11$	$J_{21ns}(x, y) = -0,015y - 0,03xy +$ $+0,14x - 0,11$ $J_{21fm}(x, y) = 0,18y - 0,01xy +$ $+0,1x - 0,44$ $J_{21in}(x, y) = -0,095y - 0,009xy +$ $+0,032x + 0,64$
2	$J_{12ns}(x, y) = 0,022xy^2 - 0,053xy^2 -$ $-0,63xy - 6x$ $J_{12fm}(x, y) = 0,31y^2 - 0,16x^2y +$ $+0,19xy - 0,3x$ $J_{12in}(x, y) = 0,801y^3 - 0,64x^2y^2 -$ $-0,47x + 0,59y$	$J_{21ns}(x, y) = 0,148y^2x - 0,053(x+1)^{-1}y^2 -$ $-0,3xy - 0,6x$ $J_{21fm}(x, y) = 0,117y^3 - 0,639x^2y^2 +$ $+0,99xy - 0,34x(y+1)$ $J_{21in}(x, y) = 0,181y - 0,47x^2y -$ $-0,771xy + 0,29y$
3	$J_{12ns}(x, y) = 0,04y - 0,05xy -$ $-0,03x - 0,06$ $J_{12fm}(x, y) = 0,1y - 0,01xy +$ $+0,014x + 0,2$ $J_{12in}(x, y) = 0,12y - 0,33xy -$ $-0,03x + 0,11$	$J_{21ns}(x, y) = -0,015y - 0,03xy +$ $+0,14x - 0,11$ $J_{21fm}(x, y) = 0,18y - 0,01xy +$ $+0,1x + 0,44$ $J_{21in}(x, y) = -0,095y - 0,009xy +$ $+0,032x + 0,64$
4	$J_{12ns}(x, y) = \frac{2,3y - 3,8xy + 0,63x - 0,6}{9,2}$ $J_{12fm}(x, y) = \frac{2,9y - 6,9xy - 1,7x + 2,9}{3,9}$ $J_{12in}(x, y) = \frac{1,6y - 3,6xy - 4,3x - 7,4}{2,5}$	$J_{21ns}(x, y) = \frac{-4,7y + 9,1xy + 5,2x + 1,3}{11,6}$ $J_{21fm}(x, y) = \frac{-14,4y + 9,2xy + 7,1x - 2,8}{7,2}$ $J_{21in}(x, y) = \frac{-6,5y + 8,2xy + 3,5x + 5,8}{3,2}$
5	$J_{12ns}(x, y) = \frac{0,73y - 0,17x + 0,51}{1,5}$ $J_{12fm}(x, y) = \frac{0,9y + 0,25x + 0,18}{1,9}$ $J_{12in}(x, y) = \frac{-0,1y + 0,45x + 4,3}{2,7}$	$J_{21ns}(x, y) = \frac{0,49y - 0,5x + 1,56}{2,9}$ $J_{21fm}(x, y) = \frac{0,89y + 0,7x + 1,34}{4,3}$ $J_{21in}(x, y) = \frac{-0,05y + 0,38x + 0,21}{1,1}$

Таблиця 5 (продовження)

Варіант	$J_{12ns}(x, y), J_{12fm}(x, y), J_{12in}(x, y)$	$J_{21ns}(x, y), J_{21fm}(x, y), J_{21in}(x, y)$
6	$J_{12ns}(x, y) = \frac{-y + x - xy}{1,3}$	$J_{21ns}(x, y) = \frac{y - x + xy}{1,3}$
	$J_{12fm}(x, y) = \frac{-y + x - xy}{13}$	$J_{21fm}(x, y) = \frac{y - x + xy}{13}$
	$J_{12in}(x, y) = \frac{-y + x - xy}{130}$	$J_{21in}(x, y) = \frac{y - x + xy}{130}$
7	$J_{12ns}(x, y) = \frac{-15y + 7xy + 5x + 30}{7}$	$J_{21ns}(x, y) = \frac{2y - 5xy + 6x + 3}{5}$
	$J_{12fm}(x, y) = \frac{2y - 3xy - 6x + 10}{10}$	$J_{21fm}(x, y) = \frac{5y - xy + 3x + 10}{12}$
	$J_{12in}(x, y) = \frac{2y - 5xy + 13x + 11}{15}$	$J_{21in}(x, y) = \frac{4y + xy - 6 + 4}{15}$
8	$J_{12ns}(x, y) = 0,04y - 0,05x + 0,2$	$J_{21ns}(x, y) = 0,02y + 0,1x + 0,1$
	$J_{12fm}(x, y) = 0,11y + 0,03x$	$J_{21fm}(x, y) = 0,1y + 0,08x + 0,05$
	$J_{12in}(x, y) = 0,18y - 0,04x + 0,16$	$J_{21in}(x, y) = 0,21y - 0,09x + 0,36$
9	$J_{12ns}(x, y) = 6y + 1,4x^2$	$J_{21ns}(x, y) = y - 3x + 3$
	$J_{12fm}(x, y) = 0,5y + 0,05xy + 1,5x - 5$	$J_{21fm}(x, y) = y + 0,25xy - 5x + 5$
	$J_{12in}(x, y) = -0,3y^2 - 0,66xy + x - \frac{107}{3}$	$J_{21in}(x, y) = 0,5y^2 + 1,5xy - x + 4,5$
10	$J_{12ns}(x, y) = \frac{y + 2,5x + 15,5}{54}$	$J_{21ns}(x, y) = \frac{y - 0,5x + 15,5}{14}$
	$J_{12fm}(x, y) = \frac{y + 2,5x + 11}{20}$	$J_{21fm}(x, y) = \frac{y - 3xy + 11}{2}$
	$J_{12in}(x, y) = 0,5(y - xy - x + 14)$	$J_{21in}(x, y) = \frac{y + 2,5xy + 21,3}{112}$

Таблиця 6. Ситуаційні матриці ймовірностей факторів ризику

Варіант	Ситуаційні матриці ймовірностей факторів ризику															
1	$R_1 = \begin{vmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ 0,03 & 0,03 & 0,05 \\ 0,01 & 0,015 & 0,02 \\ 0,04 & 0,01 & 0,01 \end{vmatrix}$	η_{ns}	η	η_{in}	$R_2 = \begin{vmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ 0,07 & 0,09 & 0,12 \\ 0,04 & 0,01 & 0,03 \\ 0,002 & 0,004 & 0,015 \end{vmatrix}$	η_{ns}	η_{fm}	η_{in}								
									$y = 0$	$y = 1$	$y = 2$	$x = 0$	$x = 1$	$x = 2$		
2	$R_1 = \begin{vmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ 0,13 & 0,12 & 0,1 & 0,12 \\ 0,07 & 0,02 & 0,03 & 0,05 \\ 0,02 & 0,19 & 0,02 & 0,04 \end{vmatrix}$	η_{ns}	η_{fm}	η_{in}	$R_2 = \begin{vmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ 0,03 & 0,02 & 0,01 & 0,02 \\ 0,15 & 0,13 & 0,11 & 0,07 \\ 0,02 & 0,09 & 0,12 & 0,14 \end{vmatrix}$	η_{ns}	η_{fm}	η_{in}								
									$y = 0$	$y = 1$	$y = 2$	$y = 3$	$x = 0$	$x = 1$	$x = 2$	$x = 3$

3	S_1	S_2	S_3		S_1	S_2	S_3	
	$R_1 = \begin{vmatrix} 0,03 & 0,03 & 0,05 \\ 0,01 & 0,015 & 0,02 \\ 0,04 & 0,1 & 0,01 \end{vmatrix}$			$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$	$R_2 = \begin{vmatrix} 0,07 & 0,09 & 0,12 \\ 0,04 & 0,01 & 0,03 \\ 0,002 & 0,004 & 0,015 \end{vmatrix}$			$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$
	$y = 0$	$y = 1$	$y = 2$		$x = 0$	$x = 1$	$x = 2$	
4	S_1	S_2	S_3		S_1	S_2	S_3	S_4
	$R_1 = \begin{vmatrix} 0,01 & 0,13 & 0,08 \\ 0,07 & 0,1 & 0,12 \\ 0,15 & 0,01 & 0,03 \end{vmatrix}$			$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$	$R_2 = \begin{vmatrix} 0,11 & 0,08 & 0,06 & 0,19 \\ 0,02 & 0,07 & 0,15 & 0,03 \\ 0,09 & 0,09 & 0,01 & 0,02 \end{vmatrix}$			$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$
	$y = 0$	$y = 1$	$y = 2$		$x = 0$	$x = 1$	$x = 2$	$x = 3$
5	S_1	S_2	S_3	S_4	S_1	S_2	S_3	S_4
	$R_1 = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,15 & 0,1 & 0,05 \\ 0,15 & 0,2 & 0,05 & 0,15 \\ 0,25 & 0,015 & 0,1 & 0,1 \end{vmatrix}$			$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$	$R_2 = \begin{vmatrix} 0,2 & 0,1 & 0,05 & 0,15 \\ 0,1 & 0,015 & 0,2 & 0,15 \\ 0,025 & 0,23 & 0,1 & 0,21 \end{vmatrix}$			$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$
	$y = 0$	$y = 1$	$y = 2$	$y = 3$	$x = 0$	$x = 1$	$x = 2$	$x = 3$
6	S_1	S_2	S_3		S_1	S_2	S_3	S_4
	$R_1 = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,4 & 0,1 \\ 0,2 & 0,5 & 0,1 \\ 0,3 & 0,05 & 0,2 \end{vmatrix}$			$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$	$R_2 = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,231 & 0,05 & 0,02 \\ 0,15 & 0,1 & 0,15 & 0,13 \\ 0,5 & 0,32 & 0,2 & 0,001 \end{vmatrix}$			$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$
	$y = 0$	$y = 1$	$y = 2$		$x = 0$	$x = 1$	$x = 2$	$x = 3$
7	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6		
	$R_1 = \begin{vmatrix} 0,02 & 0,02 & 0,04 & 0,06 & 0,03 & 0,01 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,12 \\ 0,03 & 0,08 & 0,1 & 0,07 & 0,02 & 0,04 \end{vmatrix}$						$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$	
	$y = 0$	$y = 1$	$y = 2$	$y = 3$	$y = 4$	$y = 5$		
	S_1	S_2	S_3	S_4				
	$R_2 = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,231 & 0,05 & 0,02 \\ 0,15 & 0,1 & 0,15 & 0,13 \\ 0,5 & 0,32 & 0,2 & 0,001 \end{vmatrix}$				$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$			
	$x = 0$	$x = 1$	$x = 2$	$x = 3$				
8	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5			
	$R_1 = \begin{vmatrix} 0,025 & 0,05 & 0,1 & 0,05 & 0,025 \\ 0,5 & 0,1 & 0,2 & 0,1 & 0,5 \\ 0,025 & 0,05 & 0,1 & 0,05 & 0,025 \end{vmatrix}$					$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$		
	$y = 0$	$y = 1$	$y = 2$	$y = 3$	$y = 4$			
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5			
	$R_2 = \begin{vmatrix} 0,0125 & 0,025 & 0,05 & 0,025 & 0,0125 \\ 0,025 & 0,05 & 0,1 & 0,05 & 0,025 \\ 0,0125 & 0,25 & 0,05 & 0,025 & 0,0125 \end{vmatrix}$					$\begin{matrix} \eta_{ns} \\ \eta_{fm} \\ \eta_{in} \end{matrix}$		
	$x = 0$	$x = 1$	$x = 2$	$x = 3$	$x = 4$			

Таблиця 6 (продовження)

Варіант	Ситуаційні матриці ймовірностей факторів ризику									
	S_1	S_2	S_3	S_4		S_1	S_2	S_3		
9	$R_1 = \begin{vmatrix} 0,3 & 0,5 & 0,1 & 0,3 \\ 0,3 & 0,4 & 0,04 & 0,1 \\ 0,1 & 0,7 & 0,12 & 0,3 \\ y = 1 & y = 2 & y = 3 & y = 4 \end{vmatrix}$				η_{ns}	$R_2 = \begin{vmatrix} 0,09 & 0,5 & 0,3 \\ 0,2 & 0,05 & 0,1 \\ 0,2 & 0,05 & 0,3 \\ x = 0 & x = 1 & x = 2 \end{vmatrix}$				η_{ns}
					η_{fm}					η_{fm}
					η_{in}					η_{in}
10	S_1	S_2	S_3		η_{ns}	S_1	S_2	S_3		η_{ns}
	$R_1 = \begin{vmatrix} 0,15 & 0,1 & 0,2 \\ 0,1 & 0,01 & 0,15 \\ 0,05 & 0,25 & 0,1 \\ y = 0 & y = 1 & y = 2 \end{vmatrix}$				η_{fm}	$R_2 = \begin{vmatrix} 0,1 & 0,2 & 0,25 \\ 0,1 & 0,01 & 0,1 \\ 0,01 & 0,15 & 0,05 \\ x = 0 & x = 1 & x = 2 \end{vmatrix}$				η_{fm}
					η_{in}					η_{in}

Розділ 7

Запитання

1. Які основні цілі та задачі інформаційного аналізу?
2. Обґрунтуйте поняття кількості інформації.
3. Обґрунтуйте потребу оцінювання кількості та якості інформації з погляду ОПР для формування і досягнення цілей досліджуваного об'єкта.
4. Що слід розуміти під інформованістю ОПР?
5. Якими якісними характеристиками інформації доцільно оцінювати рівень інформованості ОПР?
6. Які особливості формалізації якісного показника повноти інформованості ОПР?
7. Що слід розуміти під максимально доцільним обсягом інформації?
8. Які особливості формалізації якісного показника своєчасності інформованості ОПР?
9. У чому полягає суть часового ресурсу формування рішення і часового ресурсу його реалізації?
10. З якою метою множини ситуацій класифікують на підмножини, у кожній із яких виконується тільки одна з умов своєчасності інформованості?
11. Які особливості формалізації якісного показника достовірності інформованості ОПР?
12. Які особливості класифікації множини ситуацій за показниками повноти і достовірності інформованості?
13. Які властивості та особливості якісних показників інформації потрібно враховувати під час формування інтегрального показника інформованості?
14. Як визначають кількісні характеристики інформації?
15. Що є мірою можливості аналізу множини ситуацій?
16. Які властивості та особливості інтегрального показника інформованості ОПР?

17. Як змінюються у часі якісні показники повноти, достовірності та своєчасності?
18. Як класифікують множину ситуацій за сукупністю часткових показників інформованості?
19. Які переваги і недоліки класифікації множини ситуацій за інтегральним показником інформованості і за сукупністю часткових показників інформованості?
20. Як реалізують процедуру розпізнавання ситуацій за умов неповноти і нечіткості інформації?
21. Як приймають рішення за певної наявної ситуації?
22. Як розв'язати задачі розпізнавання ситуацій у процесі зміни інформованості ОПР?
23. Як реалізують процедуру розпізнавання ситуацій за сукупністю часткових показників інформованості?

Завдання

Задано:

- ♦ фактори ризику і ситуацій для розглядуваних варіантів подано в табл. 7, де знак «+» означає, що за впливу відповідного фактора штатна ситуація переходить у позаштатну, а знак «-» — фактор ризику не впливає на ситуацію;
- ♦ значення коефіцієнта $\hat{\alpha}_{ij}$ і показників $\hat{I}_D^{\hat{ij}}, \hat{I}_P^{\hat{ij}}, \hat{I}_T^{\hat{ij}}$ для розглядуваних варіантів наведено в табл. 8;
- ♦ аналітичний вигляд функціональних залежностей $I_D^{\hat{ij}}, I_P^{\hat{ij}}, I_T^{\hat{ij}}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$ за умови $t \in [T_1, T_2]$ наведено нижче;
- ♦ для функціональних залежностей $I_D^{\hat{ij}}, I_P^{\hat{ij}}, I_T^{\hat{ij}}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$ введено умови та обмеження з метою раціональної організації обчислювальних процесів. Їх визначено для показників $I_D^{\hat{ij}}, I_P^{\hat{ij}}$ — інтервалом допустимих значень, для показника $I_T^{\hat{ij}}$ — обмеженням допустимого періоду часу $T_0 = [T_1, T_2]$ та умовою $T_1 < t < T_2$. Для показників $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$ основна умова визначена наявністю (знак «+») або відсутністю (знак «-») впливу фактора ризику. Значення кожного показника залежить від значення $\hat{\alpha}_{ij}$ в інтервалі $0 < \hat{\alpha}_{ij} \leq 1$ і взаємозалежності значень $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$. Суть і особливості структури умов та обмежень покажемо на прикладі вихідних залежностей показників для варіанта 1.

Вихідні залежності:

$$I_P^{\hat{ij}} = 0,5 \hat{I}_P^{\hat{ij}} (1 + \alpha_{ij} t); \quad I_D^{\hat{ij}} = \hat{I}_D^{\hat{ij}} (1 + \gamma_{ij} t); \quad I_T^{\hat{ij}} = \hat{I}_T^{\hat{ij}} (1 - \beta_{ij} t^2);$$

$$\alpha_{ij} = 0,05 \frac{\hat{\alpha}_{ij}^2}{\gamma_{ij}} \hat{I}_P^{\hat{ij}}; \quad \beta_{ij} = 10^{-2} \frac{\hat{\alpha}_{ij}}{\gamma_{ij}^2} \hat{I}_D^{\hat{ij}}; \quad \gamma_{ij} = 0,5 \beta_{ij} \hat{\alpha}_{ij}^{-2} \hat{I}_T^{\hat{ij}}.$$

Умови та обмеження:

$$I_D^{\hat{ij}}(t) = \begin{cases} \hat{I}_D^{\hat{ij}} (1 + \gamma_{ij} t), & \text{якщо } 0 < \hat{I}_D^{\hat{ij}} (1 + \gamma_{ij} t) < 1, \\ 1, & \text{якщо } \hat{I}_D^{\hat{ij}} (1 + \gamma_{ij} t) \geq 1; \end{cases}$$

$$I_{II}^{\bar{y}}(t) = \begin{cases} 0,5\hat{I}_{II}^{\bar{y}}(1 + \alpha_{\bar{y}}t), & \text{якщо } 0 < \hat{I}_{II}^{\bar{y}}(1 + \alpha_{\bar{y}}t) < 1, \\ 1, & \text{якщо } \hat{I}_{II}^{\bar{y}}(1 + \alpha_{\bar{y}}t) \geq 1; \end{cases}$$

$$I_T^{\bar{y}}(t) = \begin{cases} \hat{I}_T^{\bar{y}}(1 - \beta_{\bar{y}}t), & \text{якщо } 0 < \hat{I}_T^{\bar{y}}(1 - \beta_{\bar{y}}t) < 1; T_1 < t \leq T_2, \\ 0, & \text{якщо } \hat{I}_T^{\bar{y}}(1 - \beta_{\bar{y}}t) \geq 1 \text{ або } t > T_2; \end{cases}$$

$$\alpha_{\bar{y}} = \begin{cases} 0,05 \frac{\hat{\alpha}_{\bar{y}}^2}{\gamma_{\bar{y}}} \hat{I}_{II}^{\bar{y}}, & \text{якщо } 0 < \hat{\alpha}_{\bar{y}} \leq 1, \\ 0, & \text{якщо } \hat{\alpha}_{\bar{y}} \text{ відповідає «-»}; \end{cases}$$

$$\beta_{\bar{y}} = \begin{cases} 10^{-2} \frac{\hat{\alpha}_{\bar{y}}}{\gamma_{\bar{y}}^2} \hat{I}_D^{\bar{y}}, & \text{якщо } 0 < \hat{\alpha}_{\bar{y}} \leq 1, \\ 0, & \text{якщо } \hat{\alpha}_{\bar{y}} \text{ відповідає «-»}; \end{cases}$$

$$\gamma_{\bar{y}} = \begin{cases} 0,5\beta_{\bar{y}}\hat{\alpha}_{\bar{y}}^{-2}\hat{I}_T^{\bar{y}}, & \text{якщо } 0 < \hat{\alpha}_{\bar{y}} \leq 1, \\ 0, & \text{якщо } \hat{\alpha}_{\bar{y}} \text{ відповідає «-»}. \end{cases}$$

Потрібно:

- визначити допустимий період часу $T_0 = [T_1, T_2]$ на формування і реалізацію рішення, для якого ймовірність $\eta_{\bar{y}}$ переходу ситуації $S_i \in S$ у надзвичайну не перевищуватиме задане значення допуску $\eta_{\text{доп}}$;
- виконати класифікацію і розпізнавання рівня небезпеки критичних ситуацій;
- розв'язати задачу віднесення ситуації $S_i \in S$ до деякого класу A_k критичних ситуацій.

Під час виконання необхідно:

- побудувати графіки зміни показників інформованості $I_D^{\bar{y}}, I_{II}^{\bar{y}}, I_T^{\bar{y}}$ у процесі формування рішення;
- реалізувати програмний модуль, що дає змогу знаходити допустимий період часу T_0 на формування і реалізацію рішення, для якого ймовірність $\eta_{\bar{y}}$ переходу ситуації $S_i \in S$ у надзвичайну, визначена виразом (7.50), не перевищуватиме задане значення допуску $\eta_{\text{доп}}$. Результати аналізу звести в таблицю, аналогічну до табл. 7.5. Передбачити у програмі можливість варіювання значення допуску $\eta_{\text{доп}} \in [0,3; 0,9]$ із кроком 0,1;
- визначити, до якого класу $A_k; B_k; B_k$ критичних ситуацій належить досліджувана ситуація $S_i \in S$.

Таблиця 7. Фактори Φ_j ризику, що впливають на перехід ситуації $S_i \in S$ у позаштатну

$S_i \backslash \Phi_j$	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7
S_1	+	+	+	+	-	+	+
S_2	-	-	+	+	-	-	+
S_3	-	-	+	+	+	+	+
S_4	-	-	+	+	+	+	-

Таблиця 8. Значення коефіцієнта $\hat{\alpha}_{ij}$ і показників $\hat{I}_D^{\hat{y}}, \hat{I}_H^{\hat{y}}, \hat{I}_T^{\hat{y}}$

$S_i \backslash \Phi_j$	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7
$\hat{\alpha}_{ij}$							
S_1	0,60	0,30	0,20	0,50	—	0,25	0,40
S_2	—	—	0,40	0,30	—	—	0,30
S_3	—	—	0,70	0,60	0,40	0,45	0,35
S_4	—	—	0,45	0,50	0,30	0,35	—
$\hat{I}_H^{\hat{y}}$							
S_1	0,40	0,50	0,40	0,40	—	0,30	0,50
S_2	—	—	0,30	0,30	—	—	0,40
S_3	—	—	0,45	0,50	0,30	0,40	0,40
S_4	—	—	0,50	0,40	0,45	0,30	—
$\hat{I}_D^{\hat{y}}$							
S_1	0,30	0,40	0,50	0,40	—	0,40	0,60
S_2	—	—	0,35	0,20	—	—	0,50
S_3	—	—	0,35	0,40	0,35	0,50	0,50
S_4	—	—	0,35	0,50	0,50	0,30	—
$\hat{I}_T^{\hat{y}}$							
S_1	0,70	0,60	0,40	0,60	—	0,40	0,50
S_2	—	—	0,50	0,40	—	—	0,40
S_3	—	—	0,60	0,40	0,35	0,55	0,60
S_4	—	—	0,50	0,50	0,60	0,30	—

Таблиця 9. Значення показників $\hat{I}_D^{\hat{y}}, \hat{I}_H^{\hat{y}}, \hat{I}_T^{\hat{y}}$ та коефіцієнтів $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$

Варіант	Значення показників $\hat{I}_D^{\hat{y}}, \hat{I}_H^{\hat{y}}, \hat{I}_T^{\hat{y}}$	Значення коефіцієнтів $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$
1	$\hat{I}_H^{\hat{y}} = 10 \hat{I}_H^{\hat{y}} (1 + \alpha_{ij}) t;$ $\hat{I}_D^{\hat{y}} = \hat{I}_D^{\hat{y}} (1 + \gamma_{ij} t); \quad \hat{I}_T^{\hat{y}} = \hat{I}_T^{\hat{y}} (1 - \beta_{ij} t^2),$	$\alpha_{ij} = 0,05 \frac{\hat{\alpha}_{ij}^2}{\gamma_{ij}} \hat{I}_H^{\hat{y}};$ $\beta_{ij} = 10^{-2} \frac{\hat{\alpha}_{ij}}{\gamma_{ij}^2} \hat{I}_D^{\hat{y}}; \quad \gamma_{ij} = 0,5 \beta_{ij} \hat{\alpha}_{ij}^{-2} \hat{I}_T^{\hat{y}}$
2	$\hat{I}_H^{\hat{y}}(t) = \hat{I}_H^{\hat{y}} (1 + \beta_{ij}) \alpha_{ij} t;$ $\hat{I}_D^{\hat{y}}(t) = \frac{\hat{I}_D^{\hat{y}} \alpha_{ij} \gamma_{ij} t}{10 \hat{I}_H^{\hat{y}}}; \quad \hat{I}_T^{\hat{y}}(t) = \frac{1 - \beta_{ij} t^2}{\hat{I}_T^{\hat{y}}};$	$\alpha_{ij} = \frac{e^{\hat{I}_H^{\hat{y}} \hat{I}_T^{\hat{y}}}}{10^2 (1 + \hat{\alpha}_{ij}^2)};$ $\beta_{ij} = \frac{10^{-4} e^{\hat{I}_T^{\hat{y}} \hat{I}_D^{\hat{y}}}}{(1 + \hat{\alpha}_{ij}^4)}; \quad \gamma_{ij} = \frac{e^{\hat{I}_D^{\hat{y}} \hat{\alpha}_{ij}}}{5}$
3	$\hat{I}_T^{\hat{y}}(t) = \hat{I}_T^{\hat{y}} (1 - \beta_{ij} t);$ $\hat{I}_D^{\hat{y}}(t) = \gamma_{ij} (\hat{I}_D^{\hat{y}} + 0,4 t);$ $\hat{I}_H^{\hat{y}}(t) = \{\hat{I}_H^{\hat{y}} \lg[(1 + a_{ij} \hat{I}_D^{\hat{y}})(t^2 - 1)]\};$	$\alpha_{ij} = 10^{-2} (\hat{I}_T^{\hat{y}} + \hat{I}_H^{\hat{y}}) \hat{a}_{ij};$ $\beta_{ij} = \frac{e^{\hat{I}_T^{\hat{y}} 10^{-4}}}{(1 + \hat{\alpha}_{ij}^2)}; \quad \gamma_{ij} = 25 e^{10^{-3} (\hat{I}_H^{\hat{y}} + \hat{I}_T^{\hat{y}})} \hat{\alpha}_{ij}$

Таблиця 9 (продовження)

Варіант	Значення показників $\hat{I}_H^y, \hat{I}_D^y, \hat{I}_T^y$	Значення коефіцієнтів $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}$
4	$\hat{I}_H^y(t) = \hat{I}_H^y(1 + 0,5(1 - \alpha_{ij})t);$ $\hat{I}_D^y(t) = 10^{-2} \hat{I}_D^y(1 + (1 + \gamma_{ij})t);$ $\hat{I}_T^y(t) = 0,5 \hat{I}_T^y(1 - \beta_{ij}^2 t);$	$\alpha_{ij} = \hat{\alpha}_{ij} \hat{I}_H^y \hat{I}_D^y \hat{I}_T^y;$ $\beta_{ij} = \frac{10^{-3}}{\hat{\alpha}_{ij} \hat{I}_T^y}; \quad \gamma_{ij} = \frac{\hat{\alpha}_{ij}^2 \hat{I}_D^y}{\hat{I}_T^y}$
5	$\hat{I}_H^y(t) = \hat{I}_H^y(1 + \beta_{ij})\alpha_{ij}t;$ $\hat{I}_T^y(t) = \frac{(1 - \beta_{ij}^2 t^2)}{5\gamma_{ij} + \hat{I}_T^y};$ $\hat{I}_D^y(t) = \frac{\alpha_{ij}\gamma_{ij}t}{1 + \hat{I}_D^y};$	$\alpha_{ij} = \frac{e^{\hat{I}_H^y} \hat{I}_T^y}{1 + \hat{\alpha}_{ij}^2};$ $\beta_{ij} = \frac{10^{-2} e^{-2\hat{I}_T^y} \hat{I}_D^y}{2(1 + \hat{\alpha}_{ij}^2)}; \quad \gamma_{ij} = \frac{e^{\hat{I}_D^y} \hat{\alpha}_{ij}}{15}$
6	$\hat{I}_H^y(t) = 10 \hat{I}_H^y [\lg(1 + \alpha_{ij})(t + 1)^2];$ $\hat{I}_D^y(t) = \frac{(1 + 0,5\beta_{ij} + \gamma_{ij})^2}{(1 + \hat{I}_D^y)^2 + 0,4\alpha_{ij}};$ $\hat{I}_T^y(t) = 0,05 \hat{I}_T^y [(2 + 10^{-2}\alpha_{ij})(1 - 3\beta_{ij}t)];$	$\alpha_{ij} = 0,5(\hat{I}_T^y + \hat{I}_D^y)\hat{\alpha}_{ij};$ $\beta_{ij} = \frac{e^{\hat{I}_T^y} 10^{-4}}{(1 + \hat{\alpha}_{ij})^2}; \quad \gamma_{ij} = 1,5 e^{-0,5(\hat{I}_T^y + \hat{I}_D^y)} \hat{\alpha}_{ij}$
7	$\hat{I}_H^y(t) = \hat{I}_H^y(1 + \alpha_{ij}^2)t;$ $\hat{I}_D^y(t) = 10^{-2} \hat{I}_D^y(3\alpha_{ij} + \gamma_{ij})(1 + t)^2;$ $\hat{I}_T^y(t) = \hat{I}_T^y(1 - \beta_{ij}t);$	$\alpha_{ij} = \frac{\hat{\alpha}_{ij}^2 \hat{I}_D^y}{1 + 0,05\hat{\alpha}_{ij}};$ $\beta_{ij} = \frac{10^{-4}}{(\hat{I}_T^y + 10^{-6})^2(1 + \hat{\alpha}_{ij})};$ $\gamma_{ij} = \frac{(1 + \hat{\alpha}_{ij} \hat{I}_D^y)^2}{10^2 \beta_{ij} + 5(1 + \hat{\alpha}_{ij}^3)}$
8	$\hat{I}_H^y(t) = 10^{-2} \hat{I}_H^y[1 + \alpha_{ij}(t + 1)^2];$ $\hat{I}_D^y(t) = 10^{-1} \hat{I}_D^y(1 + \gamma_{ij}(1 + t));$ $\hat{I}_T^y(t) = 10^{-1} \hat{I}_T^y[1 + (1 - \beta_{ij}t^2)];$	$\alpha_{ij} = 0,5(1 + \hat{I}_H^y)^2(1 + \gamma_{ij});$ $\beta_{ij} = \frac{1 + 0,7\hat{\alpha}_{ij}}{(1 + \hat{I}_H^y)^2} 10^{-3} \gamma_{ij};$ $\gamma_{ij} = 0,5[1 + (1 + \alpha_{ij})^2]$
9	$\hat{I}_H^y(t) = \hat{I}_H^y[1 + \alpha_{ij}(t + 1)^2];$ $\hat{I}_D^y(t) = \frac{(1 + \hat{I}_D^y)(1 + \hat{\alpha}_{ij}t)^2}{(1 + 10 \hat{I}_D^y)^2};$ $\hat{I}_T^y(t) = 0,5 \hat{I}_T^y[1 + (1 - \beta_{ij}t^2)];$	$\alpha_{ij} = 0,5(\hat{I}_T^y + \hat{I}_D^y)\hat{\alpha}_{ij};$ $\beta_{ij} = \frac{0,5(1 + 10^{-2}\alpha_{ij})^2}{(\hat{I}_T^y)^2(1 + \hat{\alpha}_{ij})}; \quad \gamma_{ij} = \frac{1 + \hat{\alpha}_{ij}^2 \hat{I}_D^y}{1 + \hat{I}_T^y}$
10	$\hat{I}_H^y(t) = 10^{-2} \hat{I}_H^y[1 + 2\alpha_{ij}(t + 1)^2];$ $\hat{I}_D^y(t) = \frac{(1 + (0,5\beta_{ij} + \gamma_{ij}t)^2)}{(1 + \hat{I}_D^y)^2 + 2\hat{\alpha}_{ij}};$ $\hat{I}_T^y(t) = 1 - \frac{(1 - \beta_{ij}t^2)}{5\gamma_{ij} + 2\hat{I}_T^y};$	$\alpha_{ij} = (1 + \hat{\alpha}_{ij} \hat{I}_H^y)(1 + \hat{I}_T^y \hat{I}_D^y)^2;$ $\beta_{ij} = \frac{(1 - 0,5\alpha_{ij})^2}{(1 + \hat{I}_T^y)^2(1 + \hat{\alpha}_{ij})}; \quad \gamma_{ij} = \frac{1 - e^{-\hat{I}_D^y} \hat{\alpha}_{ij}}{(1 + \alpha_{ij})^2}$

Розділ 8

Запитання

1. До якого класу за ступенем складності належать задачі СФА?
2. Які особливості задач організованої складності?
3. Які особливості складних ієрархічних структур?
4. Які загальні прийоми застосовують для розв'язання майже всіх задач СФА?
5. Які функціональні та конструктивно-технологічні властивості різних типів і видів систем?
6. Для чого виконують структурування складної ієрархічної системи?
7. Як реалізують структурування системи?
8. Як виконують формалізований опис структури та функцій складної системи?
9. Які прийоми і підходи використовують для реалізації стратегії розв'язання задач СФА?
10. У чому суть узагальненого алгоритму СФА?
11. На яких принципах ґрунтується підхід до розв'язання багатокритерійних задач структурної і параметричної оптимізації складних технічних об'єктів?
12. Як розв'язати неформалізовані задачі вибору кількості ієрархічних рівнів і кількості ФЕ на кожному рівні, формування та обґрунтування критеріїв вибору цих елементів?
13. На підставі яких принципів та прийомів визначають вимоги до ФЕ ієрархічної структури?
14. У чому суть методу цілеспрямованого вибору раціональної ієрархічної структури?
15. Як реалізують гарантований вибір ФЕ?
16. Які системно взаємозалежні цілі реалізують під час параметричної оптимізації?
17. Як визначають обчислювальну складність для алгоритмів вибору структури системи?
18. Як ураховують ризик позаштатної ситуації?
19. Які узагальнені процедури містить алгоритм розв'язання задачі параметричної оптимізації?
20. Як формують математичні моделі показників ризику?

Завдання

1. Розв'язати задачу вибору раціональної кількості ієрархічних рівнів.
2. Скласти програмний модуль формування вимог до ФЕ ієрархічної структури.
3. Скласти програмний модуль гарантованого вибору ФЕ.
4. Скласти програмний комплекс цілеспрямованого вибору раціональної ієрархічної структури складного об'єкта.
5. Сформувати раціональну структуру спортивного комплексу.
6. Сформувати раціональну структуру легкового автомобіля.
7. Сформувати раціональну структуру інтелектуального будинку.

8. Розробити обчислювальний алгоритм розв'язання несумісних систем лінійних рівнянь.
9. Розробити обчислювальний алгоритм розв'язання задач параметричної оптимізації.
10. Скласти програмний модуль розв'язання задач параметричної оптимізації.

Розділ 9

Запитання

1. Які принципово важливі особливості загальної задачі системного аналізу багатofакторних ризиків?
2. З якою метою виконують структурування загальної задачі системного аналізу багатofакторних ризиків?
3. Чим зумовлена складність формалізації структурованої послідовності задач системного аналізу багатofакторних ризиків?
4. Які причини зумовлюють потребу і доцільність використання модульного принципу розв'язання задачі системного аналізу багатofакторних ризиків?
5. Чим зумовлені принципові відмінності задач розпізнавання ситуацій ризику від типових задач теорії розпізнавання образів?
6. Які причини зумовлюють принципові відмінності задачі класифікації ризиків від типових задач класифікації?
7. Чим зумовлено практичну потребу ранжування позаштатних ситуацій за ступенем і рівнем ризику?
8. Які відмінності задачі багатокритерійної мінімізації ризиків від типових математичних задач мінімізації?
9. Які причини зумовлюють порогове обмеження часу на формування і реалізацію розв'язку задачі мінімізації ризиків?
10. Чому необхідний якісно новий підхід до розв'язання проблем безпеки сучасних СТС різного призначення?
11. Які властивості та особливості СТС за умов штатного і позаштатного режимів функціонування?
12. У чому полягають подібність та відмінності позаштатної, критичної і надзвичайної ситуацій СТС?
13. У чому полягають подібність та відмінності аварійної і катастрофічної ситуацій СТС?
14. Які небажані наслідки для СТС характеризують такі показники: ступінь ризику, рівень ризику, ресурс допустимого ризику?
15. Які властивості СТС визначає ресурс допустимого ризику позаштатного режиму?
16. Які процеси визначають тривалість переходу стадій позаштатного режиму СТС в аварійну або катастрофічну ситуацію?
17. Які властивості характеризують послідовний перехід позаштатного режиму функціонування складної системи в аварійну або катастрофічну ситуацію?

18. Які вимоги до інформаційного забезпечення гарантованої безпеки складних систем?
19. Навіщо потрібні міри кількісного та якісного оцінювання інформації для аналізу позаштатного режиму СТС?
20. Які причини визначають необхідність системного дослідження умов, факторів і процесів функціонування СТС?
21. Навіщо потрібне системно узгоджене дослідження режимів функціонування СТС із єдиних позицій виявлення механізмів функціонування і працездатності в штатному режимі та механізмів появи і розвитку позаштатного режиму?
22. Якими засобами та діями доцільно забезпечувати гарантовану безпеку СТС?
23. Які принципи є основою стратегії системного забезпечення гарантованої безпеки складних систем?
24. Чому системна узгодженість рішень і заходів на всіх етапах життєвого циклу СТС є найважливішою обов'язковою вимогою для реалізації гарантованої безпеки?
25. На підставі яких результатів роблять висновок про необхідність розробки раціональної стратегії дій ОПР для реалізації гарантованої безпеки?
26. Від яких умов і факторів залежить успіх ОПР у реалізації стратегії в динаміці позаштатної ситуації?
27. Чому для забезпечення гарантованої безпеки СТС необхідне своєчасне виявлення помилкових рішень конкретної ОПР?
28. Чому реалізацію стратегії гарантованої безпеки складних систем потрібно виконувати на основі системного узгодження дій на всіх етапах життєвого циклу?
29. Які процедури повинні забезпечити системно узгоджені дії на всіх етапах життєвого циклу СТС?
30. Чому реалізацію основних процедур конкретної СТС необхідно виконувати на основі індивідуального підходу до формування інформаційного, математичного та програмного забезпечення?

Завдання

1. Забезпечити розпізнавання включення заданої ситуації S_k у класи Ω_i , $i = 1, 2, 3$, що задані інформаційними векторами I_k та I_1, I_2, I_3 відповідно (табл. 10). Визначити ступінь загальності та ступінь однорідності елементів класів Ω_i , $i = 1, 2, 3$.

Таблиця 10. Значення векторів I_k та I_1, I_2, I_3

Варіант	Значення векторів I_k	Значення векторів I_1, I_2, I_3
1	$I_k = (0; 1; 0; 9; 0; 0; 1; 0; 7)$	$I_1 = (0, 7; 0, 1; 0, 5; 0, 1; 0; 0)$ $I_2 = (0, 2; 0; 0; 0, 3; 0, 7; 0, 8)$ $I_3 = (0, 4; 0, 7; 0; 0; 0, 6; 0, 4)$
2	$I_k = (0, 2; 0, 4; 0, 8; 0; 0, 1; 0, 9)$	$I_1 = (0, 8; 0, 3; 0, 5; 0; 0; 0, 8)$ $I_2 = (0; 0; 0; 0, 2; 0, 7; 0, 9)$ $I_3 = (0, 9; 0, 2; 0, 5; 0; 0; 0, 4)$

Таблиця 10 (продовження)

Варіант	Значення векторів I_k	Значення векторів I_1, I_2, I_3
3	$I_k = (0,1; 0,9; 0,6; 0,6; 0,1; 0,7)$	$I_1 = (0; 0,6; 0,3; 0; 0; 0,5)$ $I_2 = (0,4; 0; 0; 0,3; 0,7; 0,8)$ $I_3 = (0,2; 0,5; 0; 1; 0; 0,2)$
4	$I_k = (0,1; 0,4; 0,8; 0,5; 0,6; 0,9)$	$I_1 = (0,7; 0,3; 0; 0; 0,5; 0,9)$ $I_2 = (0,6; 0,8; 0; 0,2; 0; 0,2)$ $I_3 = (0,3; 0,1; 0,5; 0; 0; 0,4)$
5	$I_k = (0,2; 0; 0,7; 0; 0,1; 0,5)$	$I_1 = (0,7; 0,1; 0,6; 0,1; 0; 0)$ $I_2 = (0,9; 0; 0,3; 0,3; 0,7; 0,8)$ $I_3 = (0,4; 0,3; 0; 1; 0,6; 0,5)$
6	$I_k = (0; 0,9; 0,2; 0,6; 0; 0,3)$	$I_1 = (0,7; 0; 0,5; 0,1; 0; 0,7)$ $I_2 = (0,6; 0,3; 0; 0,2; 0,7; 0,9)$ $I_3 = (0,2; 0,5; 0; 0; 0,4; 0,6)$
7	$I_k = (0,8; 0,6; 0,9; 0,2; 0,1; 0)$	$I_1 = (0,2; 0,7; 0,8; 0,9; 0; 0,1)$ $I_2 = (0,1; 0; 0; 0,2; 0,7; 0,3)$ $I_3 = (0,7; 0,5; 0,5; 0,6; 0; 0,4)$
8	$I_k = (0,5; 0,35; 0,3; 0; 0,1; 0)$	$I_1 = (0,4; 0; 0; 0,7; 0,6; 0,8)$ $I_2 = (0,7; 0,1; 0,5; 0,2; 0,7; 0,5)$ $I_3 = (0,4; 0,9; 0,2; 0,3; 0; 0,5)$
9	$I_k = (0,6; 0,4; 0,3; 0,1; 0,2; 0,6)$	$I_1 = (0,4; 0,2; 0,1; 0,6; 0,6; 0,9)$ $I_2 = (0,3; 0,1; 0,5; 0,2; 0,7; 0,4)$ $I_3 = (0,5; 0,9; 0,3; 0,7; 0,4; 0,5)$
10	$I_k = (0,3; 0,4; 0; 0,5; 0,6; 0,2)$	$I_1 = (0,7; 0,3; 0; 0; 0,5; 0,9)$ $I_2 = (0,6; 0,8; 0,1; 0,4; 0; 0,2)$ $I_3 = (0,3; 1; 0,5; 0; 0; 0,4)$

2. Розробити алгоритм і програму класифікації ризиків, які повинні забезпечити на основі множини M_k із (9.33) формування скінченної множини Ω_0 класів Ω_{ih} , які не перетинаються і кожен з яких характеризується певними півінтервалами допустимих значень ступеня ризику η_{ih} і рівня ризику W_{ih} :

$$\eta_{ih}^- < \eta_{ih} \leq \eta_{ih}^+; \quad W_{ih}^- < W_{ih} \leq W_{ih}^+.$$

3. Розробити алгоритм і програму розпізнавання ситуацій ризиків, які повинні на підставі числових значень $I_{qr}^k[t_\tau]$, $t_\tau \in T_k$ інформаційних векторів I_{qr}^k множини S_τ ситуацій ризику з (9.35) забезпечити оцінювання для кожної ситуації $S_k^i \in S_\tau$ ступеня ризику і рівня ризику, визначення класу Ω_{hi2} , до якого належить ця ситуація, і виконання ранжування всіх ситуацій $S_k^i \in S_\tau$ за ступенем і рівнем ризику.
4. Розробити алгоритм і програму виявлення та розпізнавання потенційної можливості переходу штатного режиму функціонування досліджуваної складної системи в аварійну або катастрофічну ситуацію, які повинні на підставі апіорної інформації та результатів її технічного діагностування забезпечити:
 - ♦ визначення раціонального рівня $\bar{U}_\tau^*$ інтегрального показника інформованості $\bar{U}_\tau$, при якому з практично допустимим рівнем достовірності може бути виконане розпізнавання кожної нештатної ситуації $S_k^i \in S_\tau$, оцінювання ступеня і рівня ризику її переходу в критичну або надзвичайну;
 - ♦ визначення ресурсу допустимого ризику переходу кожної нештатної ситуації $S_k^i \in S_\tau$ у критичну, надзвичайну, аварійну або катастрофічну.

Розділ 10

Запитання

1. У чому полягає принципова відмінність задач системного управління від традиційних задач регулювання?
2. Які фактори стимулювали появу нових класів задач системного управління?
3. Чим зумовлена практична необхідність пошуку нових принципів та підходів до управління сучасними СТС?
4. Якими властивостями обумовлена результативність управління сучасними СТС?
5. Які два принципово різні трактування одержало класичне вінерівське означення управління?
6. Які принципи реалізують у випадку здійснення керувань «розвитком» і «призначеннями»?
7. Яка важлива особливість характеризує перехід від класу У1 до класу У5?
8. Як формулюється задача оптимального управління?
9. У чому полягає суть математичної постановки задачі оптимального управління?
10. Які вимоги ставлять до процесів управління функціонуванням складної системи за умов можливих впливів факторів ризику?
11. У чому полягає принципова відмінність процесів функціонування складних технічних систем і процесів забезпечення їхньої безпеки?
12. Чому управління складними об'єктами повинне бути системним?
13. Як повинна діяти система управління працездатністю після одержання сигналу про нештатну ситуацію?
14. Яка математична постановка задачі системного управління складними об'єктами?

15. У чому полягає суть поняття безпеки функціонування складної системи?
16. У чому полягає принципова відмінність розв'язування задачі системного управління складними об'єктами від розв'язування типових задач управління?
17. На чому ґрунтується стратегія розв'язування задачі системного управління складними об'єктами?
18. Які конкретні цілі та задачі управління безпекою постають у процесі управління складними об'єктами?
19. Які три можливі варіанти стану складного об'єкта аналізують під час реалізації стратегії розв'язування задачі системного управління складними об'єктами на етапі розпізнавання стану штатного режиму функціонування?
20. Які найважливіші властивості та особливості структури баз знань і даних системного управління працездатністю і безпекою складних об'єктів?
21. Які заходи, що гарантуватимуть своєчасний перехід нештатної ситуації у штатну до порогового обмеження часу, потрібно вчасно прийняти?
22. Які фактори зумовлюють необхідність управління властивостями і структурою складних об'єктів?
23. Якими причинами може бути зумовлений недостатній рівень інформованості ОПР у реальних умовах проектування систем управління складними об'єктами?
24. У чому полягає суть математичної задачі раціонального управління складною ієрархічною системою за умов багатofакторних ризиків?
25. Які особливості загальної стратегії розв'язування задачі раціонального управління складною ієрархічною системою за умов багатofакторних ризиків?
26. Чому необхідно мати два види взаємозв'язку ФЕ ієрархічної структури для реалізації стратегії розв'язування задачі раціонального управління складною ієрархічною системою за умов багатofакторних ризиків?
27. До послідовності яких задач зводиться стратегія управління складною ієрархічною системою?
28. Які питання розв'язують задачі техніко-економічного аналізу системного управління за умов багатofакторних ризиків?
29. Які особливості математичного формулювання задачі техніко-економічного аналізу системного управління за умов багатofакторних ризиків?
30. На яких основних засадах ґрунтується загальна стратегія оцінювання техніко-економічної ефективності системного управління складними об'єктами за умов багатofакторних ризиків?

Завдання

На основі стратегії системного управління працездатністю та безпекою СІС, беручи до уваги можливості алгоритму управління безпекою у позаштатних ситуаціях, можливості баз даних і знань для системного управління, враховуючи взаємо-

зв'язки задач аналізу ризиків у процесі управління СІС, необхідно розробити такі алгоритми та обчислювальні програмні модулі:

- а) розпізнавання ознак штатного режиму в динаміці функціонування СІС;
- б) аналізу динаміки та оцінювання результативності функціонування СІС у штатному режимі;
- в) розпізнавання ознак порушення штатного режиму функціонування СІС;
- г) розпізнавання ознак позаштатної ситуації в динаміці функціонування СІС;
- д) розпізнавання ознак невизначеності ситуацій ризиків у динаміці функціонування СІС;
- е) оцінювання живучості та безпеки СІС на основі аналізу динаміки факторів ризиків;
- є) оцінювання працездатності та безпеки СІС на основі аналізу ступеня і рівня ризиків;
- ж) прийняття та реалізації рішення про зупинку функціонування СІС;
- з) координації режимів функціонування СІС на основі оцінювання ресурсів допустимого ризику;
- и) оцінювання ліміту часу на формування та реалізацію рішення в умовах невизначеності ступеня і рівня ризику.

Розділ 11

Запитання

1. Які особливості та принципові відмінності методів прогнозування та передбачення?
2. Для розв'язання якого класу проблем можна застосовувати методологію передбачення?
3. Наведіть приклади застосування методології до розв'язання задач регіонального і національного характеру.
4. У чому полягає основний зміст сценаріїв регіональної програми Європейського Союзу «Європа-2010»?
5. Які основні ідеї національних програм технологічного передбачення Великої Британії та Угорщини?
6. Охарактеризуйте складну систему з людським фактором як об'єкт передбачення.
7. Наведіть структурно-логічну схему та основні етапи сценарного аналізу.
8. У чому полягає попереднє вивчення проблеми передбачення з використанням методів сканування і мозкового штурму?
9. У чому полягає якісний аналіз проблеми передбачення і які методи використовують для цього?
10. Порівняйте особливості методів Делфі, перехресного впливу, Сааті та морфологічного аналізу.

11. У чому полягає етап написання сценаріїв у методології технологічного передбачення?
12. За допомогою яких підходів та методів вивчають сценарії для надання їх групі ОНР?
13. Сформулюйте задачу експертного оцінювання, яку розв'язують під час виконання сценарного аналізу.
14. З якою метою вводять шкалу якісного і кількісного оцінювання характеристик досліджуваних об'єктів відповідно до шкали Міллера?
15. Яка послідовність виконання процедур під час розв'язання задач експертного оцінювання?
16. У чому полягає формування узгоджених експертних оцінок у задачах передбачення?
17. Сформулюйте поняття інформаційної платформи сценарного аналізу.
18. Наведіть типовий цикл передбачення.
19. Опишіть системне узгодження творчої складової та об'єктивних знань людини за допомогою трикутника передбачення.
20. Опишіть структуру інформаційної платформи сценарного аналізу і поясніть взаємодію рівнів її ієрархії.
21. Наведіть приклади задач, для розв'язання яких застосовують методологію сценарного аналізу.
22. Які економічні та соціальні фактори застосування передбачення в інноваційній діяльності?
23. У чому полягають процедури експертного оцінювання в інноваційній діяльності?
24. Які основні особливості національної та регіональної систем інновацій?
25. Сформулюйте основні принципи організації експертизи в інноваційних системах.

Завдання

1. Створити програмний обчислювальний комплекс введення і зберігання вихідних даних для задач експертного оцінювання (інформації про інноваційні об'єкти та показники, за якими вони оцінюються).
2. Створити програмний модуль оцінювання експертами досліджуваних інноваційних об'єктів за критичними для них показниками. Аналізувати результати, отримані під час виконання завдань 1 та 2.
3. Розробити процедуру та створити програмний модуль системного оцінювання якісних характеристик експерта: професійна компетентність (практичний досвід, теоретична підготовка, кваліметрична компетентність, участь у попередніх експертизах тощо), особисті якості (зацікавленість, діловитість, об'єктивність тощо).
4. Розробити програмний комплекс оцінювання, узгодження та уточнення результатів експертизи (організація N турів експертизи).
5. Удосконалити алгоритм, отриманий у завданні 5, ввівши показник компетентності експертів.

6. Розв'язати задачу оцінювання комп'ютерних програм, орієнтованих на виконання ідентичних задач (наприклад, робота з текстовими редакторами), використовуючи загальну процедуру експертного оцінювання.
Під час оцінювання використовувати показники: зручність користування системою; діапазон технічних можливостей системи; ресурси комп'ютера, що виділяються для роботи програми; користувацький попит на програму; складність розробки програми. Залучити до роботи експертні групи у таких предметних областях комп'ютерних знань: обчислювальна техніка, операційні середовища, мови програмування, Інтернет-технології, текстові редактори, графічні редактори тощо.
7. На основі методу аналізу ієрархій оцінити якість роботи різних підрозділів компанії, використовуючи такі критерії, як надійність, гарантія, реактивність (збереження активного стану), співчуття, матеріальні цінності. Виконати аналіз чутливості отриманого рішення.
8. Для задачі вибору програмного забезпечення розробити раціональну ієрархію, що складатиметься не менше ніж із п'яти рівнів. За допомогою методу аналізу ієрархій вибрати найбільш придатний альтернативний варіант. Виконати аналіз чутливості отриманого рішення.
9. Розробити раціональну ієрархічну модель для задачі складання іспитів у вузі, включаючи вибір питань і перевірку результатів. Розглянути такі показники: здатність студентів давати правильні відповіді в межах винесеного на іспит матеріалу; здатність студентів розв'язати певну задачу за обмежений час. Визначити пріоритети альтернативних варіантів, використовуючи метод аналізу ієрархій. Виконати аналіз чутливості отриманого рішення.
10. Розробити раціональну мережну модель для задачі оцінювання екологічно безпечної виробничої програми. Типи оцінюваних програм можуть включати програми проектування виробу, складання тощо, до програм демонтажу й утилізації виробів. Для знаходження коефіцієнтів відносної важливості кожної програми використовувати узагальнення методу аналізу ієрархій — метод аналізу мереж.
11. У задачі прийняття рішення відносно доцільності інвестування нового проекту розглянути модель затрати/випуск. Для цього доцільно побудувати дві ієрархії — ієрархію прибутків та ієрархію затрат з наступним знаходженням глобальних вагових коефіцієнтів альтернативних варіантів інвестування за методом аналізу ієрархій. Для остаточного ранжування альтернативних варіантів інвестування, розглянути різні способи агрегування вагових коефіцієнтів, відповідних прибуткам і затратам.
12. Побудувати раціональну мережну модель прийняття рішення відносно оцінювання компанією «Укрнафта» місцезнаходження нового нафтопереробного заводу, виходячи з існуючих і прогнозованих нафтопроводів. Врахувати такі фактори: політична ситуація у країні, конкурентоспроможність, державне регулювання, різноманітні економічні показники. Включити у модель кластер акторів, наприклад, органи державного регулювання, представники бізнесу, промисловості. Використовуючи метод аналізу мереж, визначити пріоритети альтернативних варіантів місцезнаходження. Провести аналіз чутливості отриманого рішення.
13. У завданні 13 розглянути такі додаткові цілі: мінімізація відхилення від місцезнаходження із задовільною якістю життя; мінімізація відхилення затрат від бюджетного

- обмеження; мінімізація транспортних затрат. Використовувати результати завдання 12 (значення вагових коефіцієнтів, отримані за допомогою методу аналізу мереж) як коефіцієнти цих цільових функцій у відповідних задачах цільового програмування.
14. Розробити раціональну ієрархію для розв'язання задачі розподілу спільної діяльності відносно партнерів відповідно до інтенсивностей впливу їх виробничого потенціалу на взаємно посилюючий ефект. Провести оптимізацію стосовно кожної із трьох конфліктних цілей: максимізація середньої продуктивності; мінімізація середньої кількості незавершених робіт; мінімізація середнього часу простоїв. Для знаходження коефіцієнтів цих цільових функцій використовувати метод аналізу ієрархій.
 15. Розробити раціональну ієрархію для розв'язання задачі планування інформаційних ресурсів у системі охорони здоров'я. Визначити цільову функцію та необхідні обмеження. Коефіцієнти цільової функції визначити методом аналізу ієрархій.
 16. Розробити раціональну мережну модель для аналізу системи постачання в лікарнях з метою визначення, чи можуть роботи замінити в цій сфері діяльність людини. Розглянути технічні, економічні, соціальні, людський та екологічний фактори. Включити до розгляду такі послуги, як постачання, транспортування, розподілення. Використати узагальнення методу аналізу ієрархій — метод аналізу мереж — для знаходження коефіцієнтів відносно важливості кожного альтернативного варіанта системи постачання.
 17. Скориставшись методом сканування та методом мозкового штурму створити ментальну карту (mindmap diagram), що описує розвиток енергетики держави через 5 і 20 років.
 18. Створити ландшафтну карту (product roadmap), що описує розвиток процесорів ПК через 10 років.
 19. Створити технологічну карту (technological roadmap) розвитку персональних комунікаційних пристроїв, виробництво яких може бути розпочато у Вашій країні.
 20. Розробити структуру інформаційного об'єкта-інструмента (UML, STD), що дає змогу формувати «опитувальники» за ключовими моментами технологічних і ландшафтних карт.
 21. Визначити вхідну, вихідну інформацію, управляючі зв'язки та ресурси для процесу технологічного передбачення. Побудувати функціональну діаграму (IDEF0), з точки зору управління процесом передбачення.
 22. Побудувати діаграму потоків даних (DFD або EPC) для автоматизації одного з етапів сценарію процесу технологічного передбачення.
 23. Розробити об'єктну модель зберігання альтернатив сценаріїв і її імплементацію.
 24. Розробити модель функціонування/поведінки сценарію, що розглядається, для генерації звітів у середовищі імітаційного моделювання (Visio + ARIS/ARENA).

Література

1. Ажогин В. В., Згуровский М. З. Моделирование на цифровых, аналоговых и гибридных ЭВМ. — К.: Высш. шк., 1983. — 280 с.
2. Ажогин В. В., Згуровский М. З. Автоматизация проектирования математического обеспечения АСУ ТП. — К.: Высш. шк., 1986. — 336 с.
3. Ажогин В. В., Згуровский М. З., Корбич Ю. С. Методы фильтрации и управления стохастическими процессами с распределенными параметрами. — К.: Высш. шк., 1988. — 445 с.
4. Ажогин В. В., Згуровский М. З., Новицов А. Н. Параметрическая идентификация пространственно распределённых стохастических процессов фильтрационного типа // Автоматика. — 1986. — Т. 3 — С. 14–22.
5. Академик С. П. Королев. Ученый. Инженер. Человек. Творческий портрет по воспоминаниям современников: Сб. ст. — М.: Наука, 1986. — 519 с.
6. Арнольд В. И. Теория катастроф. — М.: Наука, 1990. — 128 с.
7. Беляев В. И., Худошина М. Ю. Основы логико-информационного моделирования сложных геосистем. — К.: Наук. думка, 1989. — 244 с.
8. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 448 с.
9. Берталанфи Л. фон. Общая теория систем. — 2-е изд. — М.: Мир, 1960. — 328 с.
10. Берталанфи Л. фон. Общая теория систем — обзор проблем и результатов // Системные исследования. Ежегодник. — М.: Ин-т ист. естествозн. и техн., 1969. — С. 30–54.
11. Берталанфи Л. фон. История и статус общей теории систем // Системные исследования. Ежегодник, 1973. — М.: Ин-т ист. естествозн. и техн., 1973. — С. 20–37.
12. Блауберг И. В., Юдин Э. Г. Становление и сущность системного подхода. — М.: Наука, 1973. — 270 с.
13. Блауберг И. В., Садовский В. Н., Юдин Б. Г. Философский принцип системности и системный подход // Вопросы философии, 1978. — № 8. — С. 39–52.
14. Блауберг И. В., Мирский Э. М., Садовский В. Н. Системный подход и системный анализ // Системные исследования. Ежегодник, 1982. — М.: Наука, 1982. — С. 47–64.
15. Богданов А. А. Всеобщая организационная наука, или тектология. — М.: 1913–1929. — Т. 1–3.
16. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1968. — 356 с.
17. Вапник В. Н. Восстановление зависимости по эмпирическим данным. — М.: Наука, 1979. — 448 с.
18. Васильев В. И., Суровцев И. В. Индуктивные методы обнаружения закономерностей, основанные на теории редукции // Управляющие системы и машины. — 1998. — № 5. — С. 3–13.

19. Вернадский В. И. Учение о биосфере и ее постепенном переходе в ноосферу. — 3-е изд. — М.: Наука, 1978.
20. Вертьев С., Егоров А., Золотов А. и др. Семейство систем автоматизации испытаний летательных аппаратов // Мир компьютерной автоматизации. — 1995. — №1. — С. 68–71.
21. Волкович В. Л., Волошин А. Ф. Об одной схеме метода последовательного анализа и отсеивания вариантов // Кибернетика. — 1978. — № 4. — С. 98–105.
22. Гвишиани Д. М. Аурелио Печчеи и становление глобальной проблематики // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник, 1992–1994. — М.: Эдиториал УРСС, 1996. — С. 7–28.
23. Гвишиани Д. М. Международный институт прикладного системного анализа: цели, основные перспективы // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник, 1987. — М.: Наука, 1987. — С. 7–25.
24. Гельфанд И. М., Колмогоров А. Я., Яглом А. М. К общему определению количества информации // Доклады АН СССР, 1956. — Т. 111. — № 4 — С. 745–748.
25. Герасимов Б. М., Самохвалов Ю. Я., Бобунов А. И. Выбор рационального варианта технической реализации сложной системы // Управляющие системы и машины. — 1999. — №5. — С. 3–6.
26. Гермейер Ю. Б. Игры с противоположными интересами. — М., 1976. — 327 с.
27. Глушков В. М. О системной оптимизации // Кибернетика. — 1980. — № 5. — С. 89–90.
28. Глушков В. М., Михалевич В. С., Волкович В. Л., Доленко Г. А. Системная оптимизация в многокритериальных задачах линейного программирования при интервальном задании предпочтения // Кибернетика. — 1983. — № 3. — С. 1–8, 15.
29. Глушков В. М. Основы безбумажной информатики. — М.: Наука, 1982. — 552 с.
30. Горелик А. Л., Гуревич Н. Б., Скрипник В. А. Современное состояние проблемы распознавания. — М.: Радио и связь, 1985. — 162 с.
31. Горский Ю. М. Системно-информационный анализ процессов управления. — Новосибирск: Наука, 1988. — 327 с.
32. Григоренко Я. М., Василенко А. Т., Панкратова Н. Д. Задачи теории упругости неоднородных тел. — К.: Наук. думка, 1991. — 216 с.
33. Григоренко Я. М., Панкратова Н. Д. Обчислювальні методи в задачах прикладної математики. — К.: Либідь, 1995. — 280 с.
34. Дейнека В. С., Сергиенко И. В. Оптимальное управление неоднородными распределенными системами. — К.: Наук. думка, 2003. — 505 с.
35. Дивеев А. И., Северцев Н. А. Метод трансформации в схеме последовательного анализа и отсеивания вариантов // Тр. междунар. конф. «Вопросы оптимизации вычислений (ВОВ — XXVII)». — К., 1997. — 6–8 окт. — С. 94–97.
36. Добрушин Р. Л. Общая формулировка основной теоремы Шеннона в теории информации // Успехи мат. наук. — 1956. — № 11. — Вып. 1 (67). — С. 17–75.
37. Добрушин Р. Л. Общая формулировка основной теоремы Шеннона в теории информации // Успехи мат. наук. — 1959. — Т. 14. — Вып. 6. — С. 3–104.

38. Дорошенко С. И. Наукометрические показатели массива советской литературы по системным исследованиям // Системные исследования. Ежегодник, 1978. — М.: Наука, 1978. — С. 127–135.
39. Драгалин А. Г. Математический интуиционизм. Введение в теорию доказательств. — М.: Наука, 1979. — 256 с.
40. Емельянов С. В., Нанпельбаум Э. Л. Основные принципы системного анализа // Проблемы научной организации управления социалистической промышленностью. — М.: Экономика, 1974. — С. 92–99.
41. Емельянов С. В., Нанпельбаум Э. Л. Методы исследования сложных систем. Логика рационального выбора // Итоги науки и техники. Техн. киб. — М., 1977. — 8. — С. 5–101.
42. Емельянов С. В., Нанпельбаум Э. Л. Методы исследования сложных систем. Выбор в условиях неопределенности // Итоги науки и техники. Техн. киб. — М., 1977. — 9. — С. 169–242.
43. Ермолов Ю. М., Михалевич В. С. Об исследованиях в области риска. (Препр./АН УССР. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова; №91–19). — К., 1991. — 9 с.
44. Журавлев Ю. И., Гуревич И. Б. Методы и средства преобразования и обработки информации в задачах распознавания образов и анализа изображений // Параллельная обработка информации. — К.: Наук. думка, 1990. — Т. 5. — С. 218–318.
45. Журавлев Ю. И. Об алгоритмическом подходе к решению задач распознавания и классификации // Проблемы кибернетики: Сб. ст. — М.: Наука, 1971. — С. 5–68.
46. Згуровский М. З. Интегрированные системы оптимального управления и проектирования. — К.: Высш. шк., 1990. — 351 с.
47. Згуровский М. З. Стан та перспективи розвитку методології системного аналізу в Україні // Кибернетика и системный анализ. — 2000. — №1. — С. 101–109.
48. Згуровский М. З., Панкратова Н. Д. Технологическое предвидение. — К.: Политехника, 2005. — 165 с.
49. Згуровський М. З. Шляхи нашого відродження. Науково-публіцистичні нариси. — К.: Генеза, 2002. — 176 с.
50. Згуровський М. З. Сценарний аналіз як системна методологія передбачення // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2002. — № 1. — С. 7–38.
51. Згуровський М. З. Науково-технологічне передбачення як механізм інноваційного розвитку // Утвердження інноваційної моделі розвитку економіки України. Матеріали наук.-практ. конф. — К.: НТУУ «КПІ». — 2003. — С. 69–82.
52. Згуровский М. З., Новиков А. Н. Анализ и управление односторонними физическими процессами. — К.: Наук. думка, 1996. — 350 с.
53. Згуровский М. З., Доброногов А. В., Померанцева Т. Н. Исследование социальных процессов на основе методологии системного анализа. — К.: Наук. думка, 1997. — 224 с.
54. Згуровский М. З., Бидюк П. И. Анализ и управление большими космическими конструкциями. — К.: Наук. думка, 1997. — 451 с.
55. Згуровский М. З., Доброногов А. В. Применение методологии системного анализа к проблемам пенсионного обеспечения в переходной экономике Украины. — К.: Наук. думка, 1998. — 56 с.

56. *Згуровский М. З., Денисенко В. А.* Дискретно-непрерывные системы с управляемой структурой. Теория, моделирование, применение. — К.: Наук. думка, 1998. — 351 с.
57. *Згуровский М. З., Мельник В. С.* Нелинейный анализ и управление бесконечными системами. — К.: Наук. думка, 1999. — 630 с.
58. *Згуровский М. З., Панкратова Н. Д.* Информационная платформа сценарного анализа задач технологического предвидения // Кибернетика и системный анализ. — 2003. — № 4. — С. 112–125.
59. *Згуровский М. З., Панкратова Н. Д.* Системный анализ: проблемы, методология, приложения. — К.: Наук. думка. — 2005. — 744 с.
60. *Зуховицкий С. И., Авдеева А. И.* Линейное и выпуклое программирование. — М.: Наука, 1967. — 460 с.
61. *Ицкович Л.* Определение расстояния между датчиками при контроле пространственно-распределенных полей // Автоматика и телемеханика. — 1963. — Т. 3. — С. 233–239.
62. *Калашиников Ю. В.* Представление и использование знаний для автоматизированного контроля функционирования сложных динамических объектов // Зарубежная радиоэлектроника. — 1992. — №7. — С. 3–23.
63. *Квейд Э.* Анализ сложных систем. — М.: Мир, 1969. — 526 с.
64. *Келле В. В.* Переосмысление системной методологии: версия П. Чекленда // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник, 1995–1996. — М.: Эдиториал УРСС, 1996. — С. 376–389.
65. *Клир Дж.* Наука о системах: новое измерение науки // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник, 1983. — М.: Наука, 1983. — С. 61–85.
66. *Клир Дж.* Системология. Автоматизация решения системных задач. — М.: Радио и связь, 1990. — 540 с.
67. *Князева Е. Н., Курдюмов С. П.* Синергетика как новое мировидение: диалог с И. Пригожиным // Вопросы философии. — 1992. — №12. — С. 3–20.
68. *Коваленко И. И., Поджаренко В. А., Азаров А. Д.* Избыточные системы счисления, моделирование, обработка данных и системное проектирование в технике преобразования информации: Учеб. пособие. — К.: Высш. шк., 1990. — 208 с.
69. *Коваленко И. Н.* Анализ редких событий при оценке эффективности и надежности систем. — М.: Сов. радио, 1980. — 208 с.
70. *Коваленко И. Н., Кузнецов Н. Ю.* Методы расчета высоко надежных систем. — М.: Радио и связь, 1988. — 170 с.
71. *Коваленко И. Н., Наконечный А. Г.* Приближенный расчет и оптимизация надежности. — К.: Наук. думка, 1989. — 182 с.
72. *Коваль В. Н.* Прикладные системы анализа многомерных процессов. — К.: Наук. думка, 2002. — 496 с.
73. *Колмогоров А. Н.* Теория передачи информации // Сессия АН СССР по научным проблемам автоматизации производства. 15–20 окт. 1956.: Пленар. заседания. — М.: АН СССР, — 1957. — С. 66–69.
74. *Колмогоров А. Н.* О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиции непрерывных функций одного переменного и сложения // Доклады АН СССР. — 1957. — 114. — № 5. — С. 953–956.

75. Колмогоров А. Н. Новый метрический инвариант транзитивных динамических систем и автоморфизмов пространств Лебега // Доклады АН СССР. — 1958. — Т. 119. — № 5. — С. 861–864.
76. Колмогоров А. Н. Об энтропии на единицу времени как метрическом инварианте автоморфизмов // Доклады АН СССР. — 1959. — Т. 124. — № 4. — С. 754–755.
77. Колмогоров А. Н. Три подхода к определению понятия «количества информации» // Проблемы передачи информации. — 1965. — Т. 1. — Вып. 1. — С. 3–11.
78. Колмогоров А. Н. Теория информации и теория алгоритмов. — М.: Наука, 1987. — 304 с.
79. Колмогоров А. Н., Драгалин А. Г. Математическая логика. Дополнительные главы. — М.: МГУ, 1984. — 120 с.
80. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1968. — 720 с.
81. Корнейчук Н. П. О методах исследования экстремальных задач теории наилучшего приближения // Успехи мат. науки. — 1974. — Т. 29. — № 3. — С. 9–41.
82. Кузьмин И. И., Романов С. В. Риск и безопасность с точки зрения системной динамики // Радиационная безопасность и защита АЭС. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — С. 82–105.
83. Кульбак С. Теория информации и статистика. — М.: Наука, 1954. — 408 с.
84. Кунцевич В. М. Адаптивное управление динамическими объектами. Игровой подход // Кибернетические методы планирования, проектирования и управления. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова. — 1982. — С. 122–130.
85. Кунцевич В. М., Лычак М. М. Синтез оптимальных и адаптивных систем управления: игровой подход. — К.: Наук. думка. — 1985. — 248 с.
86. Курилин Б. И. К решению чебышевской задачи приближения для несовместной системы нелинейных уравнений // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 1970. — Т. 10. — № 1. — С. 3–14.
87. Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. Синергетика — новые направления. — М.: Знание, 1989. — 48 с.
88. Кухтенко А. И. Кибернетика и фундаментальные науки. — К.: Наук. думка, 1987. — 74 с.
89. Кухтенко А. И. Бифуркация и хаос в стохастических системах // Кибернетика и вычислительная техника. — 1994. — Вып. 103. — С. 3–11.
90. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. — М.: Физматгиз, 1961. — 524 с.
91. Ларичев О. И., Мошкович Е. М. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений. — М.: Наука; Физматлит, 1996. — 208 с.
92. Лионе Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. — М.: Мир, 1972. — 415 с.
93. Мазур М. Качественная теория информации. — М.: Мир, 1974. — 239 с.
94. Мазуров В. Д. Математические методы распознавания образов в решении задач планирования и управления. — Свердловск: Средне-Уральское, 1977. — 47 с.
95. Малиновский Б. Н. Академик Виктор Глушков. Золотые вехи истории компьютерной науки и техники в Украине. — К.: «ВМУРОЛ», 2003. — 183 с.

96. *Марчук Г. И.* Математическое моделирование в проблемах окружающей среды. — М.: Наука, 1982. — 315 с.
97. *Марчук Г. И., Кондратьев К. Я.* Приоритеты глобальной экологии. — М.: Наука, 1992. — 264 с.
98. *Марчук Г. И.* Вычислительные методы в математической физике, геофизике и оптимальном управлении: Докл. сов.-франц. симпоз. (7–11 июня 1976) / Под ред. *Марчука* и *Ж. И. Лионса*. — Новосибирск: Наука, 1978. — 235 с.
99. *Махутов Н. А., Петров В. П., Тарташев Н. И.* Научно-технические проблемы техногенной безопасности // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1998. — № 5. — С. 164–170.
100. *Медоуз Д.* Пределы роста. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. — 205 с.
101. *Медоуз Д. Л.* За пределами роста // Системные исследования. Методологические проблемы. 1992–1994. — М.: Эдиториал УРСС, 1996. — С. 29–40.
102. *Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Коровин С. Я.* Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. — М.: Наука, 1990. — 272 с.
103. *Месарович М., Тахакара Я.* Общая теория систем: математические основы. — М.: Мир, 1978. — 311 с.
104. *Месарович М., Маке Д., Тахакара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. — М.: Мир, 1973. — 344 с.
105. Механика катастроф / Под ред. акад. *К. В. Фролова*. Международный институт безопасности сложных технических систем. — М., 1995. — 389 с.
106. *Михалевич В. С., Волкович В. Л.* Вычислительные методы исследования и проектирования систем — М.: Наука, 1982. — 287 с.
107. *Михалевич В. С., Кунцевич В. М.* Об одном подходе к исследованию процесса управления уровнем вооружения. (Препр. АН УССР. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова.) — К., 1991. — № 89–19. — 6 с.
108. *Михалевич В. С., Яненко В. М., Атоев К. Л.* Информационная система для оценки риска экологических катастроф // Моделирование функционального состояния организма и управление им: Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова. — 1993. — С. 52–74.
109. *Моисеев Н. Н.* Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981. — 488 с.
110. *Моисеев Н. Н.* Алгоритмы развития. — М.: Наука, 1987. — 303 с.
111. *Моисеев Н. Н.* Расставание с простотой. — М.: Аграф, 1998. — 480 с.
112. *Нагель Э., Ньюман Д.* Теорема Геделя. — М.: Знание, 1970. — 63 с.
113. *Наппельбаум Э. Л.* Системный анализ как программа научных исследований: структура и ключевые понятия // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник, 1979. — М.: Наука, 1980. — С. 55–77.
114. Начала информационной теории управления / *Петров Б. Н., Петров В. В., Уланов Г. М.* и др. // Итоги науки и техники «Техническая кибернетика» — М.: ВИНТИ, 1970. — С. 221–352; 1971. — С. 5–88; 1972. — С. 5–128.
115. *Никаноров С. П.* Системный анализ: этап развития методологии решения проблем в США. — С. 7–43. // *С. Л. Оптнер*. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. — М.: Мир, 1969. — 126 с.

116. Палагин А. В. Концепция системной интеграции в инновационных стратегиях // Управляющие системы и машины. — 2001. — № 2. — С. 6–9.
117. Панкова Л. А., Петровский А. М., Шнейдерман М. В. Организация экспертизы и анализ экспертной информации. — М.: Наука, 1984. — 120 с.
118. Панкратова Н. Д. Тенденции и проблемы развития системного анализа как научной дисциплины // Сучасні інформаційні технології та системний аналіз — шлях до інформаційного суспільства. Ювілейний збірник наукових праць, присвячених 10-річчю кафедри математичних методів системного аналізу. — К., 1998 р. — С. 9–18.
119. Панкратова Н. Д. Общие тенденции и системные проблемы развития информационных технологий // Проблемы управления и информатики. — 1999. — № 1. — С. 58–68.
120. Панкратова Н. Д. Формирование целевых функций в системной задаче концептуальной неопределенности // Доповіді НАН України. — 2000. — № 9. — С. 67–73.
121. Панкратова Н. Д. Системная оптимизация конструктивных элементов современной техники // Кибернетика и системный анализ. — 2001. — № 3. — С. 119–131.
122. Панкратова Н. Д. Формирование множества Парето в системной задаче концептуальной неопределенности // Доповіді НАН України. — 2001. — № 12. — С. 65–70.
123. Панкратова Н. Д. Рациональный компромисс в системной задаче концептуальной неопределенности // Кибернетика и системный анализ. — 2002. — № 4. — С. 162–180.
124. Панкратова Н. Д. Становление и развитие системного анализа как прикладной научной дисциплины // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2002. — № 1. — С. 65–94.
125. Панкратова Н. Д. Математическое обеспечение задач технологического предвидения применительно к отрасли промышленности // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2003. — № 1. — С. 26–33.
126. Панкратова Н. Д. Проблеми формування ринку наукоємної продукції // Утвердження інноваційної моделі розвитку економіки України. Матеріали наук.-практ. конф. — К.: НТУУ «КПІ», 2003. — С. 337–346.
127. Панкратова Н. Д., Курилин Б. И. Рациональный выбор иерархической структуры сложной системы // Доповіді НАНУ. — 1999. — № 9. — С. 54–59.
128. Панкратова Н. Д., Курилин Б. И. Концептуальные основы системного анализа рисков в динамике управления безопасностью сложных систем Ч. 1. Основные утверждения и обоснования подхода // Проблемы управления и информатика. — 2000. — № 6. — С. 110–132.
129. Панкратова Н. Д., Курилин Б. И. Концептуальные основы системного анализа рисков в динамике управления безопасностью сложных систем. Ч. 2. Общая задача системного анализа рисков и стратегия ее решения // Проблемы управления и информатика. — 2001. — № 2. — С. 108–126.
130. Панкратова Н. Д., Курілін Б. І. Концептуальні основи системного аналізу ризиків у динаміці управління безпекою складних систем // Соціальні ризики

та соціальна безпека в умовах природних і техногенних надзвичайних ситуацій та катастроф / В. В. Дурдинець, Ю. І. Саєнко, Ю. О. Привалов. — К.: Стилос, 2001. — С. 121–168.

131. Панкратова Н. Д., Иванченко И. А. К оценке интегрального уровня информированности при решении задач системного анализа нештатных и критических ситуаций // Тр. II Нац. научно-практич. конф. «Системный анализ и информ. технологии», НТУУ «КПИ». — 2000. — С. 42–45.
132. Панкратова Н. Д., Курилин Б. И. Математические основы информационного анализа системных задач // Сб. тр. Пятой междунар. конф. «Интеллектуальный анализ информации», К., 17–20 мая 2005. — С. 224–233.
133. Панкратова Н. Д., Опарина Е. Л., Шаповал А. Восстановление функциональных зависимостей при раскрытии неопределенности в автоматизированных системах испытания и контроля // Международная конференция по управлению // Автоматика. — Львов, 2000. — С. 194–199.
134. Панкратова Н. Д., Катков И. И. К вопросу технического диагностирования авиационного двигателя // II Нац. научно-практич. конф. «Системный анализ и информ. технологии», НТУУ «КПИ». — 2000. — С. 49–52.
135. Панкратова Н. Д., Иванченко И. А. Определение количественных и качественных показателей информированности в задачах системного прогнозирования динамики ситуаций риска // III Междунар. научно-практич. конф. «Системный анализ и информ. технологии», НТУУ «КПИ». — 2001. — С. 109–111.
136. Панкратова Н. Д., Кривошеева М. С. Выбор и системное обоснование показателей качества сложной системы // III Междунар. научно-практич. конф. «Системный анализ и информ. технологии», НТУУ «КПИ». — 2001. — С. 112–114.
137. Панкратова Н. Д., Миленкий Д. В. Системный анализ экспертных процедур и выбор рациональной стратегии организации экспертного оценивания // III Междунар. научно-практич. конф. «Системный анализ и информ. технологии», НТУУ «КПИ». — 2001. — С. 115–116.
138. Панкратова Н. Д., Пугач О. В. Рациональный выбор структуры многоуровневых иерархических технических систем // III Междунар. научно-практич. конф. «Системный анализ и информ. технологии», НТУУ «КПИ». — 2001. — С. 117–119.
139. Панкратова Н. Д., Опарина Е. Л. Восстановление многофакторных закономерностей в условиях концептуальной неопределенности // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2004. — № 3. — С. 103–114.
140. Панкратова Н. Д., Заводник В. В. Системный анализ и оценивание экологических процессов // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2004. — № 2. — С. 47–59.
141. Пановко Я. Г., Губанов И. И. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, парадоксы и ошибки. — 4-е изд., перераб. — М.: Наука, 1987. — 352 с.
142. Парамонов А. Н., Кушнир В. М., Збурдаев В. И. Современные методы и средства измерения гидрологических параметров океана. — К.: Наук. думка, 1979. — 247 с.
143. Першиков В. И., Савинков В. М. Толковый словарь по информатике. — М.: Финансы и статистика. — 1995. — 544 с.

144. *Пестель Э.* За пределами роста. — М.: Прогресс, 1988. — 268 с.
145. *Печчи А.* Человеческие качества. — 2-е изд. — М.: Прогресс, 1985. — 312 с.
146. *Подиновский В. В., Ногин В. Д.* Парето — оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982. — 256 с.
147. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / *Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д.* — М.: Мир, 1983. — 397 с.
148. *Примак А. В., Щербань А. Н., Сорока А. С.* Автоматизированные системы защиты воздушного бассейна от загрязнения. — К.: Техника, 1988. — 166с.
149. Пріоритети та інструменти інноваційного розвитку України // Матеріали засідання круглого столу 18 грудня 2002 р. Нац. ін-т стратегічних досліджень. — К.: Альтерпрес. —2003. — 47 с.
150. *Райбман Н. С., Богданов В. О., Киеллер Д. В.* Идентификация систем с распределёнными параметрами // Автоматика и телемеханика. — 1984. — Т. 3. — С. 44–50.
151. *Рапопорт А.* Различные подходы к общей теории систем // Системные исследования. Ежегодник. — М.: Наука, 1969. — С. 55–79.
152. *Ремез Е. Я.* Основы численных методов чебышевского приближения. — К.: Наук. думка, 1969. — 624 с.
153. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
154. *Саати Т., Кернс К.* Аналитическое планирование. Организация систем. — М.: Радио и связь, 1991. — 224 с.
155. *Садовский В. Н.* Некоторые принципиальные проблемы построения общей теории систем // Системные исследования. Ежегодник, 1971. — М.: Наука, 1972. — С. 35–54.
156. *Садовский В. Н.* Парадоксы системного мышления // Системные исследования. Ежегодник, 1972. — М.: Наука, 1972. — С. 133–146.
157. *Садовский В. Н.* Основания общей теории систем. — М.: Наука, 1974. — 279 с.
158. *Садовский В. Н.* Системный подход и общая теория систем: статус, основные проблемы и перспективы развития // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник, 1979. — М.: Наука, 1980. — С. 29–54.
159. *Садовский В. Н.* Смена парадигм системного мышления // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник, 1992–1994. — М.: Эдиториал УРСС, 1996. — С. 64–78.
160. *Северцев Н. А., Дивеев А. И.* Оптимальный выбор варианта технического изделия // Проблемы машиностроения и надежности машин. РАН. — 1995. — №5. — С. 3–8.
161. *Сейдж Дж., Мелса Дж. Л.* Идентификация систем управления. — М.: Наука, 1974. — 248 с.
162. *Сейдж Дж., Мелса Дж. Л.* Теория оценивания и её применение в связи и управлении. — М.: Связь, 1976. — 496 с.
163. *Сергиенко И. В.* Об основных направлениях развития информатики // Кибернетика и системный анализ. — 1997. — № 6. — С. 3–93.

164. *Сергієнко І. В.* Інформатика в Україні: становлення, розвиток, проблеми. — К.: Наук. думка, 1999. — 354 с.
165. *Сергієнко І. В.* Інформатика та комп'ютерні технології. — К.: Наук. думка, 2004. — 430 с.
166. *Сергиенко И. В., Яценко В. М., Атоев К. Л.* Общая концепция управления риском экологических, техногенных и социогенных катастроф // Кибернетика и системный анализ. — 1997. — №2. — С. 65–86.
167. *Сергиенко И. В., Шило В. П.* Задачи дискретной оптимизации. Проблемы. Методы решения. Исследования. — К.: Наук. думка, 2003. — 261 с.
168. *Сидорина Т. Ю.* Пределы роста: 20 лет спустя // Системные исследования. Методологические проблемы. 1992–1994. — М.: Эдиториал УРСС, 1996. — С. 41–46.
169. Системный анализ в исследовании сложных физических процессов и полей / *Згуровский М. З., Демченко А. М., Новиков А. Н., Коваленко И. И.* — К.: Ин-т кибернетики им. В. Г. Глушкова, 1993. — 37 с.
170. *Скопеецкий В. В., Марченко О. А., Лежнина Н. А.* Системный анализ объектов, находящихся под влиянием взаимодействующих процессов // Кибернетика и системный анализ. — 2001. — № 6. — С. 54–66.
171. *Скурихин В. И.* О формулировании концепции. Концепция «четырёх И» // Управляющие системы и машины. — 1989. — №2. — С. 7–12.
172. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие / Отв. ред. акад. НАНУ В. Т. Трощенко. — К.: Наук. думка, 1993. — Ч. 1. — 288 с; 1994 — Ч.2. — 702 с.
173. Состояние и перспективы развития исследований в области обработки и распознавания видеоинформации / *Журавлев Ю. И., Рудаков К. В., Гуров С. И. и др.* // Информационные технологии. — 1998. — №4. — С. 22–26.
174. *Стратонович Р. Л.* О ценности информации // Изв. АН СССР. Техн. киберн. — 1965. — №5. — С. 3–12.
175. *Тетельман А., Безунер П.* Применение анализа риска к исследованию хрупкого разрушения и усталости стальных конструкций // Механика разрушения конструкций. — М.: Мир, 1980. — С. 7–30.
176. Технические средства диагностирования. Справочник / Под ред. *Клюева В. В.* — М.: Машиностроение, 1989. — 672 с.
177. *Тихонов А. Н., Кальнер В. Д., Гласко В. Б.* Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1990. — 264 с.
178. *Томпсон Дж.* Неустойчивость и катастрофы в науке и технике. — М.: Мир, 1985. — 254 с.
179. *Тутабакин В. Н.* Статистическая обработка рядов наблюдений. — М.: Знание, 1973. — 64 с.
180. *Уемов А. И.* Логические основы метода моделирования. — М.: Мысль, 1971. — 311 с.
181. *Уемов А. И.* Логика и методология системных исследований. — К.: Высш. шк., 1977. — 255 с.

182. *Успенский В. А.* Теорема Геделя в элементарном изложении // Успехи матем. наук. — 1974. — Т. 29. — Вып. 1(82). — С. 3–47.
183. *Форрестер Дж.* Мировая динамика. — М.: Наука, 1978. — 167 с.
184. *Хинчин А. Я.* Понятие энтропии в теории вероятностей // Успехи матем. наук. — 1953. — Т. 8. — Вып. 3. — С. 3–20.
185. *Хинчин А. Я.* Об основных теоремах теории информации // Успехи матем. наук. — 1956. — Т. 11. — Вып. 1. — С. 17–75.
186. *Хинчин А. Я.* Об основных теоремах теории информации // Успехи матем. наук. — 1959. — Т. 14. — Вып. 6. — С. 3–104.
187. *Холл А.* Опыт методологии для системотехники. — М.: Сов. радио, 1975. — 448 с.
188. *Цветков Э. И.* Нестационарные случайные процессы и их анализ. — Л.: Знание, 1973. — 128 с.
189. *Цветков Э. И.* Основы теории статистических измерений. — Л.: Энергия, 1979. — 288 с.
190. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике. — М.: Изд-во иностран. лит., 1963. — 829 с.
191. *Шеннон К.* Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963. — С. 243–332.
192. *Эйкофф П.* Современные методы идентификации систем. — М.: Мир, 1983. — 397 с.
193. Энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия, 1979. — 1600 с.
194. Экспертные оценки в социологических исследований / Отв. Ред. *Крымский С. Б.* — К.: Наук. думка, 1990. — 320 с.
195. *Эшби У. Р.* Введение в кибернетику. — М.: Изд-во иностр. лит., 1960. — 434 с.
196. *Юдин Б. Г.* Некоторые особенности развития системных исследований // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник, 1980. — К.: Наука, 1981. — С. 7–22.
197. *Яковлев А. С.* Цель жизни (записки авиаконструктора). — М.: Политиздат, 1972. — 628 с.
198. 100 великих катастроф / Автор-состав. *И. А. Муромов.* — М.: Вече. — 2003. — 528 с.
199. *Ashby W. R.* Some peculiarities of complex systems // Cybernetic Medicine. — 1973. — 9. — №2. — P. 1–7.
200. *Boulding K.* General systems theory — The skeleton of science // Management Science, 2. — 1956. — P. 196–208.
201. *Bourgeois P.* Technology Foresight for Strategic Decision-Making // The proceedings of the UNIDO Technology Foresight Conference for Central and Eastern Europe and the Newly Independent States. — Vienna, April 4–5, 2001. — P. 24.
202. *Bremermann H. J.* Optimization through evolution and recombination // In: Self-organizing systems. Ed. By M. C. Yovits and S. Cameron. Spartan. — Washington, D.C., 1962. — P. 93–106.

203. *Brockhaus W. L., Mickelsen J. F.* An analysis of prior Delphi applications and some observations on its future applicability. *Technol. Forecast. and Soc. Change.* — 1977. — № 1. — P. 103–110.
204. *Checkland P. B.* Systems Thinking, Systems Practice. — Chichester: J. Wiley and Sons, 1986. — 402 p.
205. *Cornacchio I. V.* System complexity — a bibliography // *International Journal of General Systems.* — 1977. — 3. — № 4. — P. 267–271.
206. *Dague P., Raiman O., Deves P.* Troubleshooting: when modeling is the trouble // *Proceeding of the European Conference on Artificial Intelligence (ECAI).* — Seattle, 1987. — P. 600–605.
207. *Demtchenko A.* A Membership function construction method // *Journal of Chengdu University of Science and Technology (China).* — 38(1988) — P. 69–74.
208. *Enthoven A. C.* System Analysis — Grond Rules for Constructive Debate. *Air Force Magazine*, Jan. — 1968. — P. 33–40.
209. *Ermoliev Y. M., Ermolieva T. Y., MacDonald G. J., Norkin V. I., Amendola A.* A system approach to management of catastrophic risks // *European Journal of Operational Research.* — 2000. — № 122. — P. 452–460.
210. *Forbus K. D.* Qualittative Process Theoij // *Ibid.* — P. 85–168.
211. *Forester T.* Megatrends or Megemistrakes ? What ever happened to the information society? // *Inf. Soc.* — 1992. — 8. — № 3. — P. 133–146.
212. *Gharajedaghi Ja.* Systems Thinking: Managing Chaos and Complexity. A Platform for Designing Business Architecture. — Boston: Butterworth — Heinemann, 1999. — 308 p.
213. *Godet M.* Reducing the Blunders in Forecasting // *Futures.* — 1983. — 15. — № 3. — P. 181–192.
214. *Kleer J, Brown J. S.* Theory of Causal Orderring / *Artificial Intelligence.* — 1986. — V. 29. — P. 33–61.
215. *Kleer J, Brown, J. S.* The origin, form and logic of Qualitative Physical Laws // *PROC II Conf. on Artificial Intelligence.* — Pitsburg, 1982. — P. 125–137.
216. *Kleer J, Brown, J. S.* A qualitative physics based or confuences // *Artificial Intelligence.* — 1984. — 24. — P. 7–83.
217. *Klir G. J.* Architecture of Systems Problem Solving. — N. Y.: Plenum Press. — 1985. — 536 p.
218. *Korbicz J., Zgurovsky M. Z.* Estymacja i sterowanie stochastyczne ukladami o parametrach rozlozonych. — Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1991. — 511 p.
219. *Kotarbinski T.* Elemety trorji poznania, logiki formalnoj i metodologii nauk. — Lwiw: Wyd-wo Zakladu Narodowego imienia Ossolinshich, 1929. — 483 s.
220. *Kovats F.* Enlargement Seen From the Other Side (Foresight in a precession country) // *The proceedings of the UNIDO Technology Foresight Conference for Central and Eastern Europe and the Newly Independent States.* — Vienna, April 4–5, 2001. — P. 48–59.

221. Krohn K. B., Rhodes I. L. Complexity of finite semigroups // *Annals of Mathematics*. — 1968. — № 88. — P. 128–160.
222. Kuipers B. Commonsense Reasoning About Causality Intelligence // *Ibid.* — P. 169–203.
223. Kuipers B. Qualitative Simulation // *Ibid.* — P. 289–338.
224. Kurilin B. I. Intelligent system of support of decision in dynamics of critical situations // In: *Proceedings of the second world congress of structural and multidisciplinary optimization*. May 26–30, 1997, Zacopane. — Poland: International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization ISSMO, 1997. — V. 1. — P. 65–70.
225. Kurilin B., Pankratova N., Pugach O. Method of purposeful choice of a rational structure for a complex construction // XXXVIII Sympozjon «Modelowanie w mechanice», Gliwice. — Poland, 1999. — V. 9. — P. 141–147.
226. Loveridge D. Technology forecasting and foresight: pedantry or disciplined vision // *Ideas in Progress*. — 1997. — № 2.
227. Mandelbrot B. B. *Fractals, from chance and dimension*. — San Francisco: Freeman, — 1977.
228. Martin B. Technology Foresight in a Rapidly Globalizing Economy // *The proceedings of the UNIDO Technology Foresight Conference for Central and Eastern Europe and the Newly Independent States*. — Vienna, April 4–5, 2001. — P. 1–17.
229. Mavrouniotis M. L., Stephanopoulos G. Formal order-of-magnitude in process engineering // *Computer and Chemical Engineering*. — 1988. — V. 12. — P. 867–880.
230. Mavrouniotis M. L., Stephanopoulos G.N. Computer-aided modelling of Bacterial Cells: the use of expert system // *AIChE*. — 1986. — P. 85–168.
231. Meadows D. L. Beyond the Limits to Growth // «Global Environment and Local Action», The Club of Rome Conference in Fukuoka. — Japan, 1992. — P. 35–46.
232. Morales Jesus E. A. The Most Commonly Applied Methodologies in Technology Foresight // *The proceedings of the UNIDO Technology Foresight Conference for Central and Eastern Europe and Newly Independent States*. — Vienna, April 4–5, 2001. — P. 170–178.
233. Pankratova N. Elastic Equilibrium of Anisotropic Non-homogeneous Hollow Bodies // *J. Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne*. — Ustron, Poland, 1996 — P. 82–88.
234. Pankratova N. Deformation of the Anisotropic Non-homogeneous Cylinder // *J. of Theoretical and Applied Mechanics*. — Warszawa, Poland, 1996. — 34. — № 4. — P. 733–748.
235. Pankratova N. D. Thermo-stressed state of anisotropic non-homogeneous constructive elements // In *Proceed. Recent Advances in Solids/Structures and Application of Metallic Materials*. — N. Y., 1997. — V. 369. — P. 203–210.
236. Pankratova N. D. System Minimization of Multifactor Risks in Dynamics of Critical Situations // *Proceedings of the Second World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*. May 26–30, 1997, Zacopane. — Poland: International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization ISSMO. — 1997. — V. 2. — P. 619–624.

237. *Pankratova N. D.* A system analysis of multifactor risks in conditions of uncertainty // Proceedings of the XV IFIP World Computer Congress. Vienna/Austria and Budapest/Hungary, 31 August – 4 September, 1998. CD-ROM, file: /doc/000/000/665.htm.
238. *Pankratova N. D.* The thermo-Stressed State of Composite Constructive Elements // *Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne*, Clavicle. – Poland, 1998. – P. 61–68.
239. *Pankratova N., Vasilenko A.* Stress-deformed State of Laminated Anisotropic Environment with Cavity or Inclusion // Proceedings of the forth Int. Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. – Calgary, Canada, 1995. – P. 1023–1027.
240. *Pankratova N. D., Kurilin B. I.* System modelling and optimization of non-homogeneous anisotropic constructive elements // In Proceed. of XXXV Symposium «Modelling in Mechanics». Gliwice. – 1996. – P. 268–272.
241. *Pankratova N., Kurilin B.* System Modelling of Outstandart Situations at Designing Composite Constructions // Proceedings of the XXXVI Int. Symposium «Modelling in Mechanics». Gliwice. – Poland, 1997 – P. 275–284.
242. *Pankratova N., Gracheva L.* Deformation of Structural Elements from Anisotropic Composite Materials under Thermal Loading // Proceedings of the Second International Symposium on Thermal Stresses and Related Topics, Thermal Stresses'97. – Rochester, USA, 1997. – P. 1012–1018.
243. *Pankratova N. D., Kurilin B. I.* System modelling of outstandart situations at designing of complex constructions // *Доповіді НАНУ*. – 1999. – № 3. – С. 56–60.
244. *Pankratova N. D.* System designing of complex constructions. // IV Scientific–technical conference «Polimery i kompozyty konstrukcyjne». – Ustron, Poland, 2000. – P. 31–42.
245. *Pankratova N. D., Oparina E. L.* Recognition and minimization of risks in dynamics of operation for complex ecological systems // *miedzynarodowa Konferencja «V Jubileuszowa Szkoła Geomechaniki» Materiały konferencyjne, czesc II*. Gliwice. – Ustron, 2001. – P. 77–86.
246. *Pankratova N., Kurilin B.* Conceptual foundations of the system analysis of risks in dynamics of control of complex system safety. Part 1. Basic statements and substantiation of approach // *Journal of automation and information sciences*. – 2001. – V. 33. – № 2. – P. 15–31.
247. *Pankratova N., Kurilin B.* Conceptual foundations of the system analysis of risks in dynamics of control of complex system safety. Part 2. The general problem of the system analysis of risks and the strategy of its solving // *Journal of automation and information sciences*. – 2001. – V. 33. – № 4. – P. 1–14.
248. *Pankratova N. D., Katkov I. Y., Oparina E. L., Chervinsky-Ivashura A. L.* Robust information technologies of detection of legitimacies on multiparameter statistical and empirical data // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. – 2001. – № 22. – С. 3–14.
249. *Pankratova N. D., Oparina E. L.* Information maintenance of the technology foresight problems for the branch in dynamic development // *X Miedzynarodowe Sympozjum «Geotechnika – Geotechniks 2003»*. – Ustron, Poland, 2003. – P. 25–31.

250. *Pankratova N. D., Oparina E. L.* Problems and principle of system strategy in innovation activity // XI Miedzynarodowe Sympozjum «Geotechnika – Geotechnics 2004». – Ustron, Poland, 2004. – P. 89–96.
251. *Pankratova N. D.* The scenario analysis information platform for technology foresight problems // Proceedings of Seminar on technology Foresight Methods and Practices for Ukraine. 31 August – 4 September 2004. National Technical University of Ukraine «KPI». – 2004. – P. 186–217.
252. *Saaty Thomas L.* How to make and justify a decision: the Analytic Hierarchy Process (AHP). Part 1. Examples and applications // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2002. – № 1. – С. 95–107.
253. *Saaty Thomas L.* Theory of the Analytic Hierarchy Process, Part 2.1. // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2003. – №1. – С. 48–72.
254. *Saaty Thomas L.* Theory of the Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes – Examples, Part 2.2 // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2003. – № 2. – С. 7–34.
255. *Saaty Thomas L.* The Analytic Network Process, Examples, Part 2.3 // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2003. – № 4. – С. 7–23.
256. *Simon H. A.* Administrative behavior. – N. Y.: Free Press, 1957 / Саймон Г. Наука об искусственном. – М.: Мир, 1972.
257. *Shannon C. E.* A mathematical theory of communication. Pt I, II. Bell Syst. Techn. J. – 1948. – V. 27. – № 3. – P. 379–423; № 4. – P. 623–656.
258. *The Delphi method: Techniques and applications.* Adelson-Wesley, Reading, Mass. – 1975.
259. *The Radiological Consequences of the Chernobyl Accident*, ed. A. Karaoglou, G. Desmet, G. Kelly and H. Menze, IIPSA. – Luxemburg, 1996.
260. *Weaver W.* Science and complexity // American Scientist. – 1968. – № 36. – P. 536–544.
261. *Wiener N.* Cybernetics or control and communication in the animal and the machine. – N. Y.: J. Wiley & Sons, 1948. – 194 p.
262. *Wolfman S.* Universality and complexity in cellular automata // Physica D. – 1984. – V. 101–2. – P. 1–35.
263. *Zgurovsky M.* Technology Foresight in Ukraine // The proceedings of the UNIDO Technology Foresight Conference for Central and Eastern Europe and Newly Independent States. – Vienna, April 4–5, 2001. – P. 140–151.
264. *Zgurovsky M.* The scenario analysis platform as a methodological base of the national foresight program of Ukraine // System Research and Information Technologies. – 2003. – № 1. – P. 7–25.
265. *Zgurovsky M. Z.* The role of technology foresight in economic transformations of Ukraine. The Proceedings of the UNIDO Technology Foresight Summit. – Budapest, Hungary, 2003. – 26–28 of March. – P. 7–25.
266. *Zgurovsky M. Z., Ramirez W. F.* Control and Design Optimization for Industrial Systems. – Kiev: Vyshcha Shkola Publishers, 1990. – 254 p.
267. *Zgurovsky M. Z., Melnik V. S.* Nonlinear Analysis and Control of Physical Processes and Fields. Springer. – 2004. – 508 p.

Алфавітний покажчик

адаптація, 404

аксіома ситуацій ризику, 362

алгоритм, 318

багатофакторної класифікації
ситуації ризиків, 380

вибору функціональних елементів, 327

позаштатного режиму складної
системи, 365

розв'язання задач параметричної
оптимізації, 336

розв'язання задачі системного
управління об'єктом, 420

розв'язання задач
структурно-функціонального
аналізу, 319

управління безпекою, 397

формування множини Парето, 211

цілеспрямованого вибору ФЕ, 332

аналіз

інформаційний, 90, 93, 263

організаційно-процедурний, 91, 93

ситуаційний, 90, 93

структурно-функціональний, 90, 93, 306

сценарний, 429, 434

техніко-економічний, 91, 93, 410

цільовий, 90, 93

бази знань і даних, 397

гарантувальна стратегія, 160

гіпотеза про режим

складної системи, 367

випадкова компонента, 367

детермінована компонента, 367

хаотична компонента, 367

глобалізація, 37, 40

експертне оцінювання, 464

задач технологічного

передбачення, 461, 464

типове, 461, 463

експертні латентні показники оцінювання, 464

економічна доцільність, 464

практична необхідність, 464

технологічна можливість, 464

adaptation, 404

axiom of risk situations, 362

algorithm, 318

of multifactor classification
of risks situation, 380

for choosing functional elements, 327

for abnormal modes of a complex
system, 365

for solving a problem
of parametrical optimization, 336

for solving the problem of system
control object, 420

for solving a problem
of structural-functional
analysis, 319

of safety control, 397

of Pareto set formation, 211

of purposeful choice of FEs, 332

analysis

information, 90, 93, 263

organizational-procedural, 91, 93

situational, 90, 93

structural-functional, 90, 93, 306

scenario, 429, 434

technical-economical, 91, 93, 410

goal, 90, 93

knowledge and data bases, 397

guaranteeing strategy, 160

hypothesis about the mode

of a complex system, 367

random component, 367

determinate component, 367

chaotic component, 367

globalization, 37, 40

expert evaluation, 464

technology

foresight, 461, 464

typical, 461, 463

expert evaluation indices, 464

economy expediency, 464

practical necessity, 464

technology possibility, 464

ентропія, 265**етапи розвитку системного аналізу, 24**

- глобалізації, 36, 37
- емпіричного формування, 27, 29
- синхронного розвитку теорії
й практики, 29, 33
- системного мислення, 25, 26

ефективність, 308

- техніко-економічна, 308
- технологічна, 308

життєвий цикл виробу, 331, 373, 386**етап**

- експлуатації, 309, 310, 312, 329, 334
- розробки, 309, 310

задача оптимізації, 143

- багатокритеріальної, 143
- максимінна, 148, 150
- мінімаксна, 148, 150

задача

- взаємодії, 161, 226, 229
- відтворення функціональних
залежностей, 186, 189
 - в адитивній формі, 195, 200
 - у мультиплікативній формі, 204
- вибору класу
- і структури функцій
наближення, 188, 188
- інтерполяції, 194
- інформаційного аналізу, 287
 - оцінки рівня інформованості
ОПР, 279
 - розпізнавання ситуації,
 - в процесі зміни
інформованості, 288
 - в умовах невизначеності
інформації, 288, 291, 295, 298
 - в умовах повної визначеності
інформації, 287
- концептуального проектування
складних систем, 208
- наближення Чебишевська, 155, 178, 191,
192, 247, 327, 337
- оптимального управління, 390
- передбачення,
 - задача експертного оцінювання, 446,
447, 448, 465
 - раціональна класифікація
експертних оцінок, 465

entropy, 265**system analysis development stages, 24**

- of globalization, 36, 37
- of empirical formation, 27, 29
- of simultaneous development
of theory and practice, 29, 33
- of forming of theoretical basis
of system thinking, 25, 26

efficiency, 308

- technical-economical, 308
- technological, 308

product life cycle, 331, 373, 386**stage**

- of operation, 309, 310, 312, 329, 334
- of development, 309, 310

optimization problem, 143

- multicriterion, 143
- maximin, 148, 150
- minimax, 148, 150

problem

- interaction, 161, 226, 229
- of functional dependence
recovery, 186, 189
 - in additive form, 195, 200
 - in multiplicative form, 204
- of choosing a class and
structure of approximating
functions, 188, 188
- interpolation, 194
- of information analysis, 287
 - of estimating the level of
decision maker's informedness, 279
 - of situations recognition,
 - while informedness status
is changing, 288
 - in conditions of uncertainty
of information, 288, 291, 295, 298
 - in conditions of complete
certainty of information, 287
- of complex system conceptual
design, 208
- Chebyshev approximation, 155, 178, 191, 192,
247, 327, 337
- optimal control, 390
- of foresight,
 - expert estimation problem, 446, 447,
448, 465
 - rational classification
of expert estimates, 465

задача (продовження)

протидії, 229, 243
 раціонального вибору, 317
 розкриття концептуальної невизначеності, 208, 210
 розкриття системної невизначеності, 175, 177
 системного управління складними об'єктами, 395
 структурно-функціонального аналізу, 311
 багатоцільової оцінки функціональних якісних показників системи, 315
 декомпозиції вимог, 314
 параметричної оптимізації, 333
 раціонального вибору параметрів функціональних елементів, 315
 стратегія розв'язання, 316
 структурної оптимізації, 329, 329, 330, 331, 337, 340
 формалізація задачі, 316
 формування багаторівневої структури, 314
 системного аналізу багатофакторних ризиків, 347
 багатоцільової мінімізації ризиків, 349, 353, 374
 визначення раціонального рівня інформованості, 349, 355
 визначення ресурсів допустимого ризику, 349, 354
 оптимізації рівня інформованості, 349, 354
 системного багатофакторного ранжирування, 349, 353, 374
 системного багатофакторного розпізнавання, 349, 352, 374, 417
 системного оцінювання ресурсів допустимого ризику, 349, 355
 системного оцінювання степені й рівня ризику, 375
 системної багатофакторної класифікації, 349, 351, 374, 379
 техніко-економічного аналізу системного управління, 410
 узгодженого управління працездатністю і безпекою складних ієрархічних систем, 393
 управління, 385

problem (continued)

counteraction, 229, 243
 of rational choice, 317
 of conceptual uncertainty disclosure, 208, 210
 of system uncertainty disclosure, 175, 177
 complex object system control, 395
 of structural-functional analysis, 311
 of a multipurpose estimation of system's functional quality indicators, 315
 of requirements decomposition, 314
 of parametrical optimization, 333
 of a rational choice of functional elements' parameters, 315
 strategy for solving, 316
 of structural optimization, 329, 329, 330, 331, 337, 340
 formalization of, 316
 of multilevel structure formation, 314
 of system analysis of multifactor risks, 347
 of multipurpose risk minimization, 349, 353, 374
 of rational informedness level definition, 349, 355
 of permissible risk margins' coordination, 349, 354
 of informedness level optimization, 349, 354
 of system multicriterion ranking, 349, 353, 374
 of system multifactor recognition, 349, 352, 374, 417
 of permissible risk margins' system estimation, 349, 355
 of system evaluation of the risk degree and level, 375
 of system multifactor classification, 349, 351, 374, 379
 of technical-economical analysis of system control, 410
 of coordinated control of serviceability and safety of complex hierarchical systems, 393
 control, 385

задача (продовження)

- управління безпекою, 415
- управління структурою, 406
- формалізована, 122
- формалізована, 122

збиток, 169, 237

- непрямий, 237, 239
- прямий, 237, 239

інноваційна діяльність, 44, 455, 456**інформаційна платформа сценарного аналізу, 452, 455****інформаційне суспільство, 37, 38****інформаційний вектор, 347, 351****інформація, 264**

- кількість, 265, 266, 362
- якість, 267, 268, 362
- невизначеність, 268
- неповнота, 268
- неточність, 268

інформованість ОПР, 267, 283

- достовірність, 269, 275, 276
- інтегральний показник, 281, 282
- несвоєчасність, 268
- повнота, 269, 270, 300
- рівень, 267, 281
- своєчасність, 269, 271, 273

- реалізація рішення, 299

- формування рішення, 299

- часовий ресурс реалізації рішення, 272

- часовий ресурс формування рішення, 272

класифікація ситуацій, 274, 302

- по інтегральному показнику інформованості, 279, 280, 284
- по сукупності часткових показників інформованості, 274, 277, 279, 285

коаліція, 219

- взаємодія, 221
- формалізація цілей, 221
- конкуренти, 219
- конфлікт стратегій, 166, 220
- партнери, 219
- протидія, 224
- з урахуванням невизначеності ситуацій, 225
- формалізація цілей, 224, 231, 239, 241

problem (continued)

- safety control of, 415
- structure control, 406
- formalized, 122
- formalizable, 122

damage, 169, 237

- indirect, 237, 239
- direct, 237, 239

innovation activity, 44, 455, 456**scenario analysis information platform, 452, 455****information society, 37, 38****information vector, 347, 351****information, 264**

- quantity of, 265, 266, 362
- quality of, 267, 268, 362
- uncertainty, 268
- incompleteness, 268
- inaccuracy, 268

informedness of a decision maker, 267, 283

- credibility of, 269, 275, 276
- integral indicator of, 281, 282
- untimeliness of, 268
- completeness of, 269, 270, 300
- level of, 267, 281
- timeliness of, 269, 271, 273

- decision realization, 299

- decision generation, 299

- time margin for decision realization, 272

- time margin for decision generation, 272

situations classification, 274, 302

- by an integral informedness indicator, 279, 280, 284
- by the totality of partial informedness indicators, 274, 277, 279, 285

coalition, 219

- interaction of, 221
- formalization of goals, 221
- competitors, 219
- conflict of strategies, 166, 220
- partners, 219
- counteraction of, 224
- taking into account situational uncertainty, 225
- formalization of goals, 224, 231, 239, 241

коаліція (продовження)

- суперкоаліція, 225
- суперники, 220
- формалізація цілей
- суперкоаліції, 225

компроміс раціональний, 143, 145, 246, 329, 372**конструктивно-технологічні властивості систем, 309**

- енергоємність, 309
- капіталомісткість, 309
- матеріалоємність, 309
- металоємність, 309
- трудомісткість, 309

концептуально-функціональний простір, 90

- властивостей, 91, 92
- умов, 90, 92

критерій, 83, 115

- ефективності управління, 392
- середньоквадратичний, 155, 157
- середньостепеневий, 155, 157
- чебишевський, 155, 157, 180, 182, 191, 244

метаметодологія систем, 89**метод**

- Делфі, 439
- дослідження (складних систем), 84
- моделей Байеса, 445
- мозкового штурму, 438
- морфологічного аналізу, 442
- написання сценаріїв, 443
- перехресного впливу, 440
- проектування (складних систем), 84
- Сааті аналізу ієрархій, 441
- системного дослідження, 20
- сканування, 438
- цілеспрямованого вибору, 332

методи

- рішення формалізованих задач, 127
 - кількісного аналізу
 - другого рівня, 128, 134
- прийняття рішень для задач
- четвертого рівня, 140
- рішення задач першого рівня, 128, 133
- якісного аналізу другого
- й третього рівнів, 130, 138

coalition (continued)

- supercoalition, 225
- opponents, 220
- formalization of supercoalition
- goals, 225

rational compromise, 143, 145, 246, 329, 372**constructive-technological properties of a system, 309**

- power intensity, 309
- capital intensity, 309
- material consumption, 309
- metal intensity, 309
- laboriousness, 309

conceptual functional space, 90

- of properties, 91, 92
- of conditions, 90, 92

criterion, 83, 115

- control efficiency of, 392
- root-mean-square, 155, 157
- power-mean, 155, 157
- Chebyshev, 155, 157, 180, 182, 191, 244

metamethodology of systems, 89**method**

- Delphi, 439
- research, 84
- Bayes model, 445
- brainstorm, 438
- morphological analysis, 442
- Scenario-writing, 443
- cross impact, 440
- design, 84
- Saaty analytic hierarchy process, 441
- system research, 20
- scanning, 438
- of the purposeful choice, 332

methods

- of formalized solution problems, 127
 - of quality analysis
 - of the second level, 128, 134
- of making decision
- for the forth level problems, 140
- of solution problems
- for the first level, 128, 133
- of quality analysis of the
- second and third levels, 130, 138

методи (продовження)

- розкриття невизначеності цілей, 143
- лінійної згортки, 146
- зведення до системи рівнянь, 153
- технічних обмежень, 147

методологія

- системного аналізу, 435
- сценарного аналізу, 436
- технологічного передбачення, 456

міра чебишевського наближення, 180, 182, 244**множина Парето, 143, 144, 142, 209, 222, 215, 326, 331, 332, 330****моделювання, 67**

- графічне, 68
- імітаційне, 68, 446
- математичне, 67
- фізичне, 67

наукомістка технологія, 39**наукомісткий виріб, 250****невизначеність, 142**

- взаємодії, 162
- знань, 142
- інформаційна, 236
- конфліктів, 166
- концептуальна, 22, 187, 460
- природна, 158
- протидії, 167, 169, 235
- системна, 176
- ситуаційна, 143, 158, 162, 225, 233
- цілей, 142, 143

несумісна система рівнянь, 191

- лінійних, 192, 197, 207
- нелінійних, 191

об'єкт

- абстрактний, 65, 66
- дослідження, 52, 66
- матеріальний, 65, 66
- передбачення, 435

оцінка, 170

- гарантована, 160
- інтервальна, 171, 231
- точкова, 171

парадигма

- змістовна, 89
- методологічна, 88
- фундаментальна, 17

methods (continued)

- of disclosing goal uncertainty, 143
- of linear convolution, 146
- of reduction to a system of equations, 153
- of technical restrictions, 147

methodology

- of system analysis, 435
- of scenario analysis, 436
- of technology foresight, 456

Chebyshev approximation measure, 180, 182, 244**Pareto set, 143, 144, 142, 209, 222, 215, 326, 331, 332, 330****modeling, 67**

- graphical, 68
- simulation, 68, 446
- mathematical, 67
- physical, 67

high technology, 39**high-technology product, 250****uncertainty, 142**

- of interaction, 162
- of knowledge, 142
- information, 236
- of conflicts, 166
- conceptual, 22, 187, 460
- natural, 158
- of counteraction, 167, 169, 235
- system, 176
- situational, 143, 158, 162, 225, 233
- of goals, 142, 143

incompatible system of equations, 191

- linear, 192, 197, 207
- nonlinear, 191

object

- abstract, 65, 66
- object under investigation, 52, 66
- material, 65, 66
- object of foresight, 435

estimation, 170

- Guaranteed, 160
- Interval, 171, 231
- Point, 171

paradigm

- contensive, 89
- methodological, 88
- fundamental, 17

- параметр, 83, 115**
- передбачення, 47, 429**
технологічне, 430
- підхід**
до відтворення функціональних залежностей, 188
до вирішення проблем безпеки сучасних складних технічних систем, 356
до розкриття невизначеності мети, 143
зведення багатоцільової задачі до однокритеріальної задачі, 146, 147, 153
зведення до множини Парето, 143
до управління безпекою, 393, 394
до формування множини Парето, 143, 209
- поліном Чебишева зміщений, 191, 192, 194, 207**
- порогове обмеження часу, 307, 350, 355, 366, 372**
- прийоми розв'язання задач трансобчислюваної складності, 110**
- принципи**
агрегування, 82, 116
гарантованого результату, 159, 160
гарантування своєчасності реалізації рішення в процесі управління безпекою, 370
декомпозиції, 82, 116, 349
додатковості Геделя, 55, 326
експертного оцінювання, 463
збережуваності, 462
ймовірності збережуваності, 463
потенційної здійсненності, 462
можливої реалізованості, 463
живучості системи, 357
мінімізації ризику, 227
несумісності, 103
оптимальності, 372
Парето, 143, 145
раціональності, 111, 372
рішення задач системного аналізу, 121
своечасності і достовірності оцінювання та прогнозування ситуацій ризику, 370
системного гарантованого діагностування ситуацій ризику, 370
системної узгодженості заходів забезпечення безпеки, 370
- parameter, 83, 115**
- foresight, 47, 429**
technology, 430
- approach**
to recovering functional dependences, 188
to solving the problems of modern complex engineering system safety, 356
to disclosing goal uncertainty, 143
Reduction of multipurpose problem to one criteria problem, 146, 147, 153
Approach based on Pareto set, 143
to safety control, 393, 394
to forming Pareto set, 143, 209
- Chebyshev shifted polynomial, 191, 192, 194, 207**
- threshold time restriction, 307, 350, 355, 366, 372**
- approach to solving transcomputational problems, 110**
- principle**
aggregation, 82, 116
of guaranteed result, 159, 160
of guaranteeing timely realization of decisions in the process of safety control, 370
decomposition, 82, 116, 349
Godel's of complementarity, 55, 326
of expert evaluation, 463
invariance, 462
probable invariance, 463
potential realization, 462
possible realization, 463
of system's survivability of, 357
of risk minimization, 227
of incompatibility, 103
optimality, 372
Pareto, 143, 145
rationality, 111, 372
of the system analysis problem, 121
of the timeliness and credibility of estimation and forecast of risk situations, 370
of system-guaranteed diagnostics of risk situations, 370
of the system coordination of safety-ensuring measures, 370

принцип (продовження)

системної узгодженості управління
безпекою, 370
цілісності, 87

принципи, 460

інноваційної діяльності,
раціональний компроміс між
рівнем достовірності та
обґрунтованості оперативного
розв'язання і рівнем
витрат, 460
раціонального спільного
використання інтуїції, досвіду
й знань, 460
раціонального спільного
використання можливостей
інтерактивних
й ітераційних процедур, 460
раціональності вибору рішень
і дій при формуванні та реалізації
стратегії, 460
розумної обережності
й раціонального ризику, 460
фундаментальні, 85
багатофакторна адаптивність, 86
багатоцільова загальність, 86
інформаційна взаємозалежність, 85
процедурна відкритість, 86
процедурна повнота, 85
раціональна доповнюваність, 86
системна погодженість, 85
функціональна ортогональність, 85
функціональна раціональність, 85
цілеспрямована відповідність, 85

проект

венчурний, 113
інноваційний, 113

процедура, 94

експертного оцінювання, 448, 467
інформаційного аналізу, 95
класифікації, 290
організаційно-процедурного аналізу, 96
розпізнавання, 288, 290
ситуаційного аналізу, 94
структурно-функціонального
аналізу, 95, 323
техніко-економічного
аналізу, 96
цільового аналізу, 94

principle (continued)

of system coordination of safety
control, 370
of integrity, 87

principles, 460

innovation activity,
of rational compromise
between the level of
correctness and validity
of an operative decision
and level of expenses, 460
of rational simultaneous usage
of intuition, experience,
and knowledge, 460
of rational simultaneous
usage of abilities
of interactive and
iterative procedures, 460
of rationality selection
of solutions and
actions, 460
of reasonable care
and rational risk, 460
fundamental, 85
multifactor adaptability, 86
multipurpose generality, 86
information interdependence, 85
procedural openness, 86
procedural completeness, 85
rational supplementation, 86
system consistency, 85
functional orthogonality, 85
functional rationality, 85
purposeful conformity, 85

project

venture, 113
innovation, 113

procedure, 94

of expert evaluation, 448, 467
information analysis, 95
of classification, 290
organizational-procedural analysis, 96
of recognition, 288, 290
situational analysis, 94
structural-functional
analysis, 95, 323
technical-economical analysis
procedure, 96
goal analysis, 94

раціональність, 111

- економічна, 111
- експлуатаційна, 111
- ергономічна, 111
- естетична, 112
- здорового глузду, 112
- ігрова, 113
- інформаційна, 112
- коаліційна, 112
- концептуальна, 113, 114
- методична, 112
- соціальна, 111
- технічна, 111
- технологічна, 111
- юридична, 112

режим функціонування, 357

- перехідний керований, 359
- перехідний некерований, 358
- позаштатний, 358, 363
- штатний, 358, 415, 417

ресурс допустимого ризику, 360, 363, 369

- аварійної ситуації, 359
- катастрофічної ситуації, 359
- критичної ситуації, 359
- надзвичайної ситуації, 359
- позаштатного режиму, 360
- позаштатної ситуації, 359

ризик, 360, 369

- ресурс допустимого ризику, 360, 363, 369
- рівень, 234, 335, 360, 361
- ступінь, 234, 335, 360, 377, 378

розв'язок раціональний, 145, 245**середовище, 52****система, 69**

- велика, 69
- відкрита, 74
- глобальна, 69
- глобальна суперсистема, 69
- надвелика, 69
- повна, 75
- породжувальна, 74
- складна, 69, 70
- з людським фактором, 435
- формалізована, 123, 127
- еколого-економічна система
- промислового регіону, 124

rationality, 111

- economic, 111
- operational, 111
- ergonomic, 111
- aesthetic, 112
- commonsense, 112
- game, 113
- informational, 112
- coalition, 112
- conceptual, 113, 114
- methodological, 112
- social, 111
- technical, 111
- technological, 111
- legal, 112

functioning mode, 357

- controllable transition, 359
- uncontrollable transition, 358
- abnormal, 358, 363
- normal, 358, 415, 417

margin of permissible risk, 360, 363, 369

- of emergency situation, 359
- of catastrophic situation, 359
- of critical situation, 359
- of extreme situation, 359
- of abnormal mode, 360
- of abnormal situation, 359

risk, 360, 369

- margin of permissible risk, 360, 363, 369
- level of, 234, 335, 360, 361
- degree of, 234, 335, 360, 377, 378

rational solution, 145, 245**environment, 52****system, 69**

- grand, 69
- open, 74
- global, 69
- global supersystem, 69
- giant, 69
- complete, 75
- generating, 74
- complex, 69, 70
- with human factor, 435
- complex formalized, 123, 127
- ecological-economic system
- of industrial region, 124

система (продовження)

еколого-організаційна
підсистема, 125
еколого-технологічна
підсистема, 125
організаційні підсистеми, 123
технологічні підсистеми, 123

структурована, 74

структурована вихідна, 74

технічна, 69

складна, 69

велика, 70

надвелика, 70

глобальна, 70

глобальна суперсистема, 70

ціленаправлена, 73

цілеспрямована, 73

системна задача, 72, 105, 329

змістовне формулювання, 79

неформалізована, 82, 329, 349

основні процедури рішення, 79

слабко структурована, 82

формалізована, 82

системна математика, 89**системна методологія та її властивості, 85**

ефективність, 85

масштабність, 85

результативність, 85

системне мислення, 22, 40**системний аналіз, 56, 57, 60, 59**

предмет вивчення, 20

предметна область, 20

системний аналітик, 52, 54, 55**системний дослідник, 22****системний інструментарій, 19, 32****системний підхід, 40, 450**

агрегування, 81, 82

декомпозиція, 81, 82, 116

ситуація, 94

аварійна, 359

аварія, 359, 361

катастрофа, 359, 361

катастрофічна, 298, 299, 359

критична, 95, 299, 359

надзвичайна, 298, 299, 359

непрогнозована, 235

позаштатна, 95, 335, 350, 359

system (continued)

ecological-organizational
subsystem, 125

ecological-technology
subsystem, 125

organizational subsystem, 123

technology subsystem, 123

structured, 74

structured initial, 74

engineering, 69

complex, 69

grand, 70

giant, 70

global, 70

global supersystem, 70

purposeful, 73

goal-seeking, 73

system problem, 72, 105, 329

contensive statement of, 79

nonformalizable, 82, 329, 349

main procedures of solution, 79

weakly structured, 82

formalizable, 82

system mathematics, 89**system methodology properties, 85**

efficiency, 85

scope, 85

resultiveness, 85

system thinking, 22, 40**system analysis, 56, 57, 60, 59**

subject of study, 20

subject domain, 20

system analyst, 52, 54, 55**system researcher, 22****system tools, 19, 32****system approach, 40, 450**

aggregation, 81, 82

decomposition, 81, 82, 116

situation, 94

emergency, 359

accident, 359, 361

catastrophe, 359, 361

catastrophic, 298, 299, 359

critical, 95, 299, 359

extreme, 298, 299, 359

unpredictable, 235

abnormal, 95, 335, 350, 359

ситуація (продовження)

прогнозована, 234
штатна, 94

складність, 99, 100

задач, 105
інформаційна, 308
конструктивна, 308
обчислювальна задачі, 106, 332, 368
систем, 105
структурна, 308
технологічна, 308
трансобчислювальна, 105, 329
формалізації системного задачі, 110
формування системи, 110
функціональна, 308

спектр складності задач, 102

неорганізованої складності, 103
організованої простоти, 102
організованої складності, 103, 305, 306

стратегія, 318

загальна
техніко-економічного аналізу, 413
інноваційної діяльності, 458
протидії коаліцій, 231, 242
раціональна, 250, 363
раціональна
дій ОПР, 373
рішення задач
структурно-функціонального
аналізу, 318
рішення задачі управління
структурою, 403
розв'язання задачі системного
управління складними об'єктами, 396
системного забезпечення
гарантованої безпеки
складних систем, 371, 373
технологічного передбачення, 460, 461
управління складною ієрархічною
системою, 405

**суб'єкти інноваційної
діяльності, 458****теорія ризику, 233****управління, 386, 388**

безпекою, 359
властивостями, 388, 404
поведінкою, 388, 404
призначенням, 388

situation (continued)

predictable, 234
normal, 94

complexity, 99, 100

of problems, 105
information, 308
constructive, 308
computational of a problem, 106, 332, 368
of systems, 105
structural, 308
technological, 308
transcomputational, 105, 329
of the system problem formalization, 110
of forming a system, 110
functional, 308

complexity spectrum, 102

unorganized complexity problem, 103
organized simplicity problem, 102
organized complexity problem, 103, 305, 306

strategy, 318

general strategy of
technical-economical analysis, 413
of innovation activity, 458
coalitions counteraction strategy, 231, 242
rational, 250, 363
rational strategy of a decision
maker's actions, 373
of solving a problem
of structural-functional
analysis, 318
for structure control
problem solution, 403
for solving the problem of system
control of complex objects, 396
for providing guaranteed
safety of complex
systems, 371, 373
technology foresight, 460, 461
for complex hierarchical
system control, 405

**innovation activity
subjects, 458****risk theory, 233****control, 386, 388**

safety, 359
property, 388, 404
behavior, 388, 404
purpose, 388

управління (продовження)

розвитком, 388
 системне, 386, 388
 структурою, 388, 404

фактор, 83

ризик, 234
 інформаційного, 234, 235, 238
 непередбачуваних ситуацій, 234, 238
 форс-мажорного, 234, 235, 238

функціональні властивості систем, 308

адаптивність, 308, 404
 безпека, 360, 366, 371, 393, 395
 ефективність, 308
 живучість, 309, 360
 керованість, 308
 координованість, 308
 надійність, 309
 працездатність, 360
 складність, 308
 спостережність, 308
 стійкість, 308
 чутливість, 308

якісні методи, 435**control (continued)**

evolution, 388
 system, 386, 388
 structure, 388, 404

factor, 83

risk, 234
 information, 234, 235, 238
 of unpredictable situations, 234, 238
 force majeure, 234, 235, 238

functional properties of systems, 308

adaptability, 308, 404
 safety, 360, 366, 371, 393, 395
 efficiency, 308
 survivability, 309, 360
 controllability, 308
 coordinateness, 308
 reliability, 309
 serviceability, 360
 complexity, 308
 observability, 308
 stability, 308
 sensitivity, 308

qualitative methods, 435

Навчальне видання

**Згуровський Михайло Захарович,
Панкратова Наталія Дмитрівна**
ОСНОВИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

Підручник

Керівник проекту В. П. Пасько
Редактор М. В. Прокопенко
Коректор В. М. Бабійчук
Комп'ютерна верстка Д. С. Трішенкова

ТОВ «Видавничка група БНУ»

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру України
суб'єктів видавничої справи
серія ДК №175 від 13.09.2000 р.

Підписано до друку 26.01.07. Формат 70х100 ¹/₁₆.
Папір офсетний. Гарнітура Petersburg. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 43,86. Обл.-вид. арк. 42,43
Наклад 3000 прим. Зам. №30006

Виготовлено в ТОВ «Освітня книга»,
м. Київ, вул. Орловська, 2/7, оф. 6.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єктів видавничої справи України
серія ДК № 2245 від 26.07.2005 р.

М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова

ОСНОВИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

У підручнику розглядаються основи методології системного аналізу складних взаємопов'язаних об'єктів різної природи, які функціонують у відповідності до множин суперечливих критеріїв і цілей за наявності суттєвих ризиків та невизначеностей зовнішніх і внутрішніх факторів. Значна увага приділяється формуванню цілісного підходу до вирішення складних міждисциплінарних задач, розкриттю невизначеностей, врахуванню якісних оцінок інформації та аналізу багатфакторних ризиків.

Викладено основи системної методології передбачення та сценарного аналізу в задачах прийняття рішень і стратегічного планування. Крім теоретичного матеріалу підручник містить чисельні приклади вирішення практичних задач, а також контрольні питання й завдання для самої роботи студентів.

Детально розглянуто такі теми:

- основні поняття системного аналізу;
- об'єкти і задачі системного аналізу;
- розкриття невизначеностей у задачах системного аналізу;
- системний аналіз багатфакторних ризиків;
- інформаційний аналіз системних задач;
- структурно-функціональний аналіз системних задач;
- системне управління складними об'єктами;
- системна методологія передбачення;
- сценарний аналіз та людино-машинні системи прийняття рішень.

Згуровський Михайло Захарович — академік НАН України, директор Інституту прикладного системного аналізу НАН України та Міністерства освіти і науки України, член Президії НАН України, відомий вчений у галузі математики та кібернетики. Сфера наукових інтересів — методологія системного аналізу, теорія прийняття рішень за умов невизначеності, аналіз та глобальне моделювання складних міждисциплінарних систем різної природи.

Панкратова Наталія Дмитрівна — доктор технічних наук, професор, заступник директора Інституту прикладного системного аналізу НАН України і Міністерства освіти України, відомий вчений у галузі системного аналізу та прикладної механіки. Сфера наукових інтересів — теорія і практика системного аналізу, сценарний аналіз та людино-машинні системи прийняття управлінських рішень, прикладна математика.

Базовий курс для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямками:

«Системний аналіз»,
«Прикладна математика»,
«Інформатика»,
«Комп'ютерні науки»,
«Комп'ютерна інженерія»,
«Системна інженерія».

Зміст підручників серії відповідає навчальним планам з інформатики, що використовуються у провідних вищих навчальних закладах України.

За додатковою інформацією звертайтеся на сайти
www.osvita.info, www.bhv.kiev.ua, www.piter.com

