

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

Павленко П. М.

ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
СИСТЕМ І ПРОЦЕСІВ

Навчальний посібник

Київ 2013

УДК 004.942 (076.5)
ББК Ж102 в 631.0 я 7
П 12

Укладач: *П.М. Павленко*

Рецензенти:

Ю.В. Куц – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інформаційно-вимірювальних систем Національного авіаційного університету;

А.І. Щерба – канд. ф.-м. наук, проф., зав. каф. прикладної математики Черкаського державного технологічного університету;

В.В. Гавриленко – д-р ф.-м. наук, проф., зав. каф. інформаційних систем і технологій Національного транспортного університету;

С.О. Лук'яненко – д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизованого проектування енергетичних процесів і систем Національного технічного університету України (КПІ).

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України
(лист № від)*

П12 Павленко П.М.

Основи математичного моделювання систем і процесів: навч. посіб. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2013. – 201 с.

У посібнику викладено основні поняття та положення математичного моделювання систем і процесів. Розглянуто загальну методику математичного моделювання для побудови моделей і формалізованого опису систем і процесів. Особливу увагу приділено можливостям сучасних інформаційних технологій з аналізу, синтезу та оптимізації процесів і систем.

Для студентів технічних вищих навчальних закладів, аспірантів, інженерів і наукових співробітників для підготовки та проведення досліджень над системами і процесами.

**УДК 004.942 (076.5)
ББК Ж102 в 631.0 я 7**

ISBN

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	9
1.1. Інформаційне середовище технічних систем.....	9
1.2. Роль і місце математичного моделювання в інформаційних технологіях.....	16
1.3. Задачі досліджень технічних систем.....	20
1.4. Методи моделювання технічних систем.....	22
1.4.1. Класифікаційні ознаки методів моделювання технічних систем.....	23
1.4.2. Математичне моделювання технічних систем.....	26
1.4.3. Імітаційне моделювання технічних систем.....	27
1.4.4. Інші види моделювання технічних систем.....	31
1.5. Використання результатів математичного моделювання.....	33
Контрольні питання.....	36
2. ТЕХНІЧНА СИСТЕМА ЯК ОБ'ЄКТ МОДЕЛЮВАННЯ.....	38
2.1. Поняття про термін “технічна система”.....	38
2.2. Моделі технічних систем.....	42
2.3. Об'єкт моделювання – технічна система.....	49
2.4. Аналіз та класифікація факторів при моделюванні технічних систем.....	54
2.5. Властивості факторів.....	57
2.6. Методи відбору факторів експериментів.....	60
Контрольні питання.....	66
3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.....	67
3.1. Класифікація математичних моделей.....	67
3.2. Вимоги до математичних моделей.....	71
3.3. Структурні елементи математичних моделей.....	74
3.4. Параметри математичної моделі.....	76
3.5. Системний підхід до розробки та аналізу математичної моделі.....	81
3.6. Приклади розробки математичних моделей.....	83
Контрольні питання.....	86

4. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	87
4.1. Способи організації процесу математичного моделювання.....	88
4.2. Послідовність математичного моделювання.....	92
4.3. Постановка задачі.....	94
4.4. Розробка концептуальної математичної моделі технічної системи.....	109
4.5. Алгоритмізація математичної моделі технічної системи та комп'ютерне моделювання.....	112
4.6. Експериментальна перевірка та оптимізаційні експерименти...	119
4.7. Отримання та представлення результатів моделювання.....	124
Контрольні питання.....	131
5. СИНТЕЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.....	132
5.1. Задачі синтезу технічних систем	133
5.2. Формалізоване представлення процесу синтезу проектних варіантів технічної системи	109
5.3. Оптимізація процесу синтезу технічних систем	116
5.4. Метод оптимального синтезу проектних варіантів технічної системи	121
Контрольні питання.....	153
6. ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА КОМП'ЮТЕРНІ ПРОГРАМИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	154
6.1. Сучасні пакети прикладних програм математичного моделювання.....	154
6.2. САЕ-системи комп'ютерного моделювання.....	162
6.3. Функціональне моделювання технічних процесів.....	146
6.4. Ефективність використання інформаційних систем.....	186
Контрольні питання.....	195
ЛІТЕРАТУРА	196

ВСТУП

Досягнення в галузі інформаційних технологій та розвиток методів математичного моделювання дають можливість створювати нові технічні системи, вискоєфективні технологічні процеси та методи управління ними. Зустрічний розвиток технологій виробництва та систем автоматизації сприяв створенню таких виробничих процесів і систем, як наприклад, розширене виробництво, комп'ютеризоване інтегроване виробництво (CIM – Computer Integrated Manufacturing), комп'ютеризований інженерний аналіз (CAE – Computer Aided Engineering) та ін.

Створення та експлуатація таких виробництв, технологій та систем на промислових підприємствах є не тільки функцією фахівців з автоматизованого управління та фахівців з інформаційних технологій. Вони потребують різних форм участі практично всіх груп інженерно-технічного та адміністративно-управлінського персоналу підприємств та організацій.

Отже, сучасний інженер, який працює як дослідник чи проектувальник технічних систем, об'єктів і процесів або працює як користувач автоматизованих та інформаційних систем повинен мати глибокі теоретичні й практичні знання по математичному моделюванню. Використання сучасних інформаційних технологій з метою моделювання технічних об'єктів, систем і процесів ґрунтується на математичних методах моделювання, які дозволяють моделювати виробничі ситуації, аналізувати наявні види інформації та виробляти оптимальні рекомендації щодо дій, які забезпечують найефективніше досягнення мети.

Різноманітні технічні об'єкти та системи, а також виробничі, технологічні та інші процеси з погляду їх подальшої формалізації, алгоритмізації та математичного моделювання надалі будемо називати одним узагальненим терміном – **технічна система**.

Підготовка фахівців на межі двох наук – прикладної інженерії та розділів прикладної математики надає майбутнім інженерам можливість приймати оптимальні рішення, підвищувати

ефективність їх обґрунтувань та бути провідниками ефективних засобів вирішення сучасних наукових і виробничих задач.

Впровадження математичних методів у різні інженерні дисципліни надає можливість користуватись новими, як правило, дуже ефективними засобами досліджень, розробки та виробництва технічних систем. Зростання математичної культури фахівців у відповідних інженерних галузях знань призводить до поглибленого вивчення загальних теоретичних положень та методів розрахунків за допомогою прикладної математики і, у цілому, достатньо та доступно висвітлена у виданих навчальних посібниках.

Разом з тим, наукова та виробнича практика доводить, що одних математичних знань, на жаль, не достатньо для вирішення тієї чи іншої наукової або прикладної задачі. У вищому технічному навчальному закладі ще обов'язково потрібно отримати теоретичні і практичні навички по формалізації конкретної задачі, по математичному опису необхідної інформації, по послідовності математичного моделювання, що потребує освоєння методики математичного моделювання та використання отриманих моделей для аналізу, синтезу, розрахунку та оптимізації технічних систем за допомогою сучасних інформаційних технологій.

Сьогодні в науково-технічній та навчальній літературі студентам і фахівцям доводиться часто зустрічатися з різною інтерпретацією таких фундаментальних понять, як система, модель, моделювання. Подібна неоднозначність не свідчить про помилковість одних і правильність інших визначень термінів, а відображає залежність предмету розгляду як від області функціонування об'єкту, так і від службового призначення та його цілей. Відмінною особливістю даного посібника є спроба автора інтегрувати питання моделювання в задачі, які вирішуються на протязі всього життєвого циклу технічної системи за допомогою інформаційних технологій.

Цей навчальний посібник, у деякій мірі, ліквідує відсутність навчальної літератури з основ математичного моделювання технічних систем для студентів вищих навчальних закладів України. Сучасний інженер повинен використовувати математику не тільки, як метод розрахунку, а й як метод мислення, формалізації та формування інформаційних понять. Доповнюючи досвід інженера та його інтуїцію, формалізовані методи

математичного моделювання створюють фундаментальну базу для розробки та експлуатації технічних систем, використання сучасних інтегрованих автоматизованих систем і значно підвищують якісний рівень підготовки інженерів-механіків.

У більшості технічних спеціальностей навчальним планом передбачено курс «Основи математичного моделювання...», який має ознайомити майбутніх інженерів з деякими розділами прикладної математики і навчити їх практичним основам математичного моделювання за допомогою сучасних інформаційних технологій, підготувати студентів до подальшого вивчення базових інженерних дисциплін. Запропонований навчальний посібник може бути використаний для більшості інженерних спеціальностей, оскільки він майже не відображає специфіки конкретної спеціальності, а містить базову інформацію для навчального етапу вивчення основ математичного моделювання з подальшою «прив'язкою» до специфіки технічних систем конкретної інженерної спеціальності.

У першому розділі розглянуто взаємозв'язок математичного моделювання з сучасними інформаційними технологіями. Вивчаючи цей розділ, треба зрозуміти зміст основних понять і визначень інформаційних технологій та методів моделювання технічних систем. Інформаційний матеріал другого і третього розділів надає можливість студентам систематизувати, класифікувати та формалізувати більшість термінів і понять об'єкту «технічна система» та самих математичних моделей. Четвертий та п'ятий розділи цього посібника представляють систематизовану автором методику моделювання технічних систем, яка застосовувалась автором як у науковій, так і в інженерній практиці. Шостий розділ знайомить читачів із практичними можливостями сучасних прикладних пакетів моделювання та САЕ-системами.

Розділи посібника логічно пов'язані між собою, містять основні поняття та визначення, необхідні для вивчення курсу «Математичне моделювання систем і процесів». Список літератури в кінці посібника містить всі монографії та навчальні посібники, використані автором і рекомендовані для подальшого поглибленого вивчення.

Автор присвячує навчальний посібник світлій пам'яті свого Учителя – професора Руденка Петра Олексійовича.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АС	– автоматизована система
АСТПВ	– автоматизована система технологічної підготовки виробництва;
БД	– база даних;
БЗ	– база знань;
ПС	– інтегроване інформаційне середовище;
ЖЦВ	– життєвий цикл виробу;
СУБД	– системи управління базою даних;
ТД	– технологічна документація;
ТПВ	– технологічна підготовка виробництва;
API	– Application Programming Interface (прикладний програмний інтерфейс)
CAD	– Computer Aided Design (комп'ютерне проектування)
CAE	– Computer Aided Engineering (комп'ютерний інженерний аналіз)
CALS	– Computer Aided Acquisition and Lifecycle Support (підтримка безперервних поставок і життєвого циклу)
CAM	– Computer Aided Manufacturing (комп'ютерне виготовлення)
CAPP	– Computer Aided Process Planning (комп'ютерне планування процесів підготовки виробництва)
CPC	– Collaborative Product Commerce (спільна розробка і використання інформації про виріб)
ERP	– Enterprise Resource Planning (планування і управління підприємством)
PDM	– Product Data Management (управління даними про виріб)
PLM	– Product Life-cycle Management (управління життєвим циклом виробу)

1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

1.1. Інформаційне середовище технічних систем

За останні двадцять років світове промислове виробництво зазнало низки кардинальних змін. Ці зміни багато в чому обумовлені розвитком інформаційних технологій, що ґрунтуються на сучасних комп'ютерних і комунікаційних засобах. Інтегрованим результатом змін, що відбулися в промисловості, визнана глобалізація, під якою розуміють інтеграцію регіональної, національної та галузевої економіки .

Створені в сучасних умовах інформаційні технології (ІТ), з одного боку, намагаються наздогнати зростаючі вимоги до себе, а з іншого – самі виступають ініціаторами нових ідей. Реалізація цих ідей привела до появи нових форм промислових виробництв, комплексної автоматизації та інтеграції основних функцій життєвого циклу технічних систем – на основі ISO-стандартів та інформаційних технологій.

Комплексна автоматизація проектної діяльності розробників, виробників та експлуатаційників технічних систем базується на використанні сучасних інформаційних і телекомунікаційних технологій та інтегрованих автоматизованих систем (ІАС). Саме використання ІАС дозволяє комплексно автоматизувати дослідницькі, проектні та виробничі процеси. Прикладом такої системи є зображена на рис. 1 структурно-функціональна схема автоматизованої системи технічної підготовки виробництва (АСТПВ), розробкою якої автор займався на протязі декількох років.

Коротко розглянемо історичний ракурс термінології та понять інформаційних технологій.

Важливість комплексного підходу при розробці технічних систем почали усвідомлювати ще в 70-х рр. минулого століття. У 80-х рр. ідеї комплексності знайшли відображення у створенні гнучких виробничих систем [2, 3]. Іншим втіленням цих ідей стала концепція єдиної інформаційної підтримки всіх етапів життєвого циклу виробів. Поняття життєвого циклу виробів містить у собі всі

стадії виробу – від вивчення ринку перед проектуванням до утилізації виробу після його використання.

Фахівці з прогнозування розвитку промисловості вже давно передбачали, що процеси розробки, підготовки виробництва,

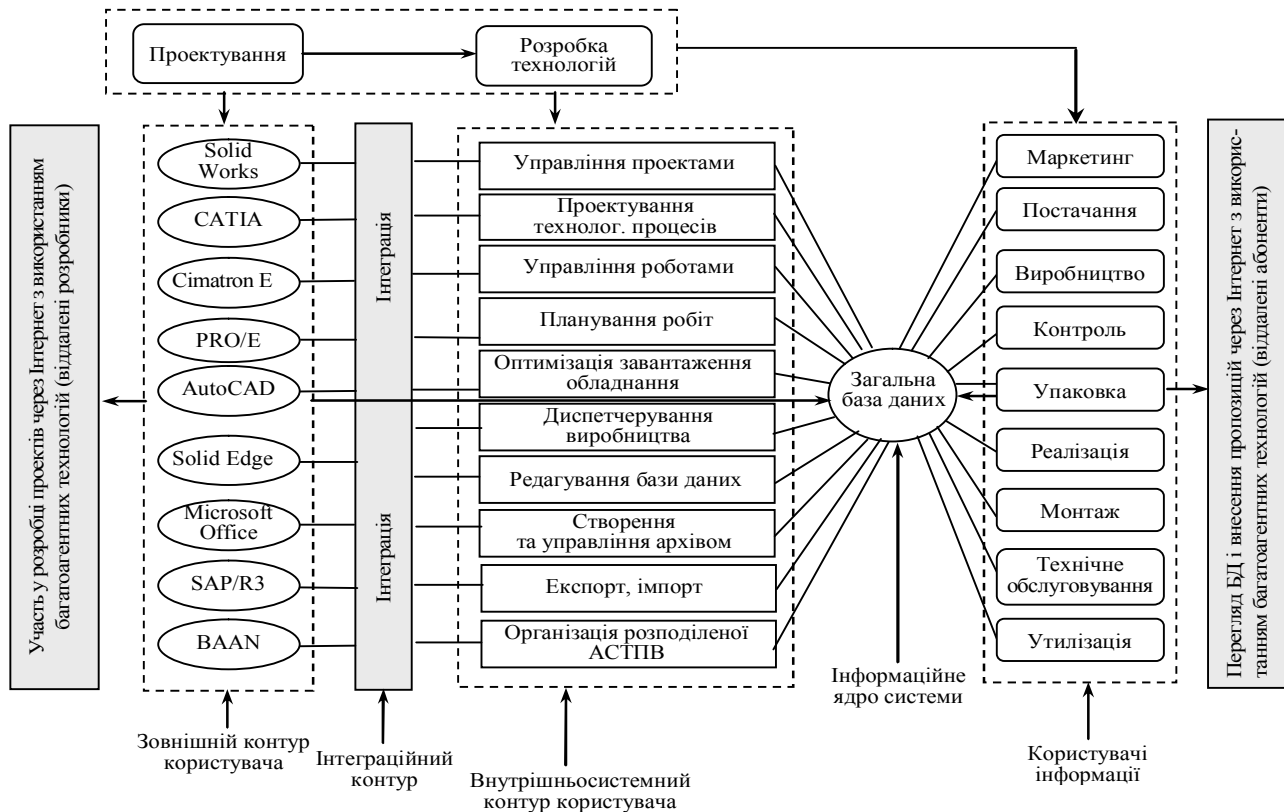


Рис. 1.1. Структурно-функціональна схема автоматизованої системи технічної підготовки виробництва

стадії виробу – від вивчення ринку перед проектуванням до утилізації виробу після його використання.

Фахівці з прогнозування розвитку промисловості вже давно передбачали, що процеси розробки, підготовки виробництва, виготовлення, маркетингу та продажу, експлуатації й підтримки підпорядковуються одним закономірностям і можуть бути формалізовані. Тобто вони можуть об'єктивно розраховуватись, моделюватися та оптимізуватися. Технічно ця можливість стримувалася дефіцитом можливостей комп'ютерів і засобів комунікацій. На організаційному й науковому рівнях було досить добре описано лише деякі з процесів, а їхня системна інтеграція мала стільки ж видів і форм, скільки самих промислових підприємств.

Комп'ютерно-інформаційна підтримка етапів життєвого циклу виробів знайшла своє відображення в методології та стандартах CALS-технологій [4, 5]. Відповідно до концептуальних положень CALS-технологій реальні виробничі процеси відображаються у віртуальному інформаційному середовищі, в якому опис виробу подано у вигляді повного електронного опису, а середовище його створення та експлуатації – у вигляді систем моделювання процесів. Усі три складові (визначення виробу, середовища його створення й середовища експлуатації) не тільки взаємозалежні, а й безперервно розвиваються впродовж життєвого циклу виробу.

Існують різні розшифровки абревіатури CALS. Методологія CALS зародилася в департаменті оборони США в середині 80-х рр. Історія її розвитку докладно викладена у деяких вітчизняних та іноземних виданнях [5, 6]. Сьогодні в технічній літературі (як зарубіжній, так і вітчизняній) під терміном CALS розуміють Continuous Acquisition and Life cycle Support – безперервну інформаційну підтримку життєвого циклу виробу і називають цю підтримку CALS-технологіями. У російській технічній та науковій літературі поряд з терміном CALS використовують рівнозначний російський термін ИПИ (Информационная Поддержка Изделий) [7, 8].

У галузі технічної підготовки виробництва, яка охоплює концептуальні розробки технічних систем, конструкторське проектування та технологічну підготовку виробництва, принципи

ИПИ/CALS знайшли своє відображення у створенні провідними західними розробниками програмних систем, що забезпечують комплексну інформаційну підтримку етапів життєвого циклу виробу на основі концепції PLM (Product Life-cycle Management – управління життєвим циклом виробу). Цими провідними розробниками є компанії Dassault Systemes (Франція), Siemens PLM Software (Німеччина) та компанія PTC (США) [9, 10].

Відповідно до визначення CIMdata, відомого у світі незалежного експерта з проблем PLM [11], «PLM – це стратегічний підхід до ведення бізнесу, що використовує набір сумісних рішень для підтримки загального подання інформації про продукт у процесі його створення, реалізації та експлуатації, у середовищі розширеного підприємства, починаючи від концепції створення продукту до його утилізації – при інтеграції людських ресурсів, процесів та інформації».

На підставі цього визначення можна виокремити три основні вимоги PLM-рішень до розробки, виготовлення та експлуатації технічних систем:

- можливість універсального, безпечного й керованого засобу управління та використання інформації, що визначає технічну систему та її структурні елементи;
- підтримка цілісності інформації, що визначає технічну систему, протягом усього його життєвого циклу;
- управління й підтримка всіх процесів, які реалізуються під час створення, розподілу й використання інформації.

Концепцію PLM (рис. 1.2) було розроблено науково-дослідним центром компанії Dassault Systemes [12]. В основу розробки цієї концепції покладено такі вимоги:

1. Інтеграція інформації етапів життєвого циклу технічної системи. Усі види діяльності та предмети, що представляють компоненти життєвого циклу технічної системи, мають знайти універсальне інформаційне ядро, що забезпечує єдине подавання промислового бізнесу як системи продуктів, процесів, ресурсів та знань. Усі три компоненти повинні ґрунтуватися на єдиній схемі опису (специфікування).

2. Асоціативність. Між усіма компонентами життєвого циклу технічної системи мають підтримуватися стійкі й керовані причино-наслідкові зв'язки. Будь-який елемент опису продукту,

процесу, ресурсу чи знань має зберігати своє походження й умови існування. Це основний радикальний захід для скорочення витрат на випуск нових, конкурентоспроможних товарів.

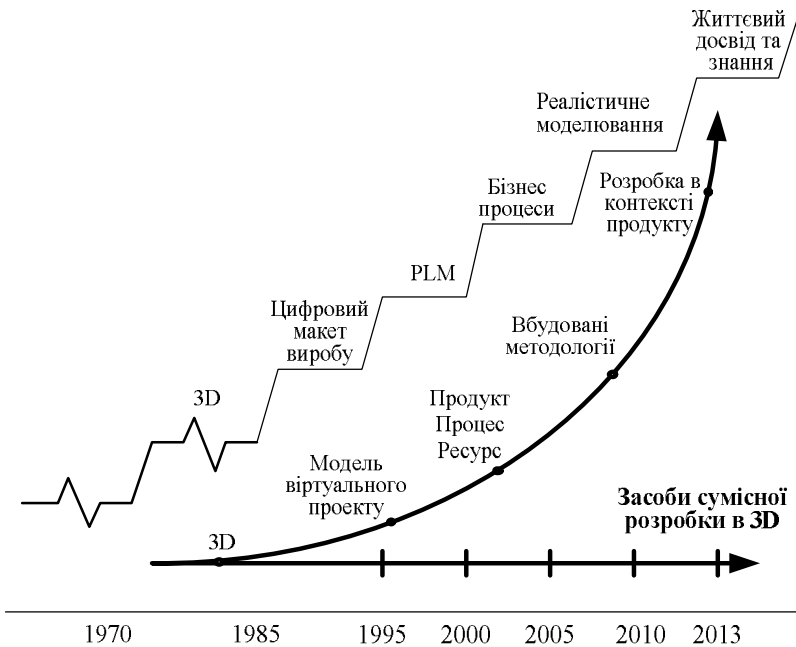


Рис. 1.2. Концепція PLM-рішень для комплексної інформаційної підтримки етапів життєвого циклу виробів

3. Сертифікованість. Електронна модель виробу повинна мати властивості контролепридатності. Інструкція контролю – це вид процесу, специфікований за тими самими законами, що й продукт, та є невід’ємною частиною віртуального проекту виробу. Вона має існувати й діяти на всіх етапах життєвого циклу технічної системи. Дані про виріб повинні існувати й розвиватися разом із процедурами контролю, пов’язаними з ними.

4. Умовна інваріантність. Більшість технічних систем має велику кількість версій, модифікацій, варіантів виконання, залежних від певних умов.

5. Різноманітність засобів надання інформації про систему. Оскільки змістовна частина проекту технічної системи в електронному вигляді зростає й покриває дедалі більше галузей знань, то й представлення його має бути селективним, тобто вибіркоvim за певним критерієм. Відповідно до цього структура даних повинна мати ознаки (атрибути) ролі, завдання і рівня допуску користувача.

Оскільки існують стійкі (стандартні) ролі користувачів, то мають бути передбачені відповідні стандартні форми представлення проекту:

- інженерна – для розробників;
- презентаційна – для відвідувачів;
- експлуатаційна – для операторів;
- маркетингова – для публікацій та продажу тощо.

Програмні додатки, що працюють над електронним проектом, повинні бути чутливі до ролі, в якій перебуває користувач.

Базовими системами, що забезпечують реалізацію стратегії PLM, є системи класів CAD/CAM/CAE (Computer Aided Design – комп’ютерне проектування / Computer Aided Manufacturing – комп’ютерне виготовлення / Computer Aided Engineering – комп’ютерний інженерний аналіз) та PDM (Product Data Management – управління даними про виріб). Відповідно до концепції Dassault Systemes системи класів ERP (Enterprise Resource Planning – планування ресурсів підприємства), SCM (Supply Chain Management – управління ланцюгами постачань) і CRM (Customer Relationship Management – управління відносинами з замовниками) не належать до засобів підтримки PLM-рішень, а забезпечують, разом з PLM, ефективне функціонування промислових підприємств.

Базові засоби підтримки PLM-рішень через свою універсальність можуть використовуватися на різних етапах життєвого циклу технічної системи (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Схема етапів життєвого циклу технічної системи

Найхарактернішим прикладом є CAD-система, яка може застосовуватись як на етапі проектування, так і на етапі технологічної підготовки виробництва під час проектування засобів технологічної оснастки. При цьому CAD/CAM і CAE-системи стають засобами автоматизації виконання різних проектних процедур по розробці технічних систем, а PDM-система – засобом для реалізації процесів управління інформацією на всіх етапах життєвого циклу технічної системи (рис. 1.4). Водночас PDM-система є базовим засобом, за допомогою якого реалізується інтегроване інформаційне середовище для всіх етапів життєвого циклу технічної системи.

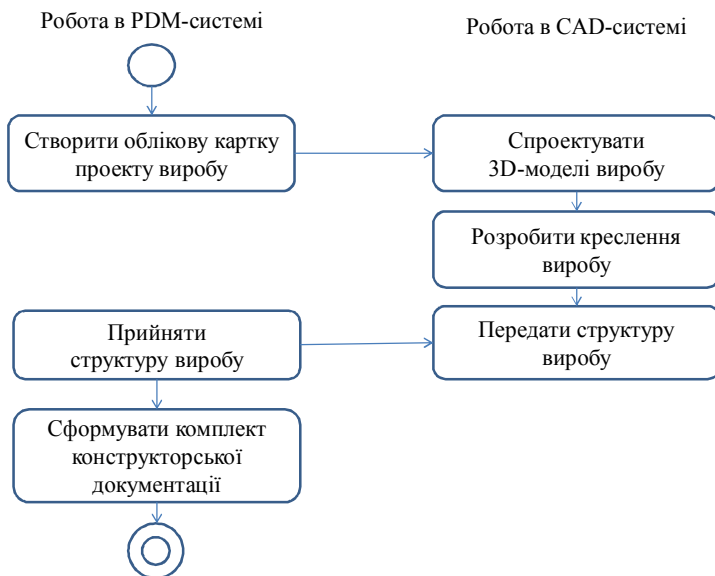


Рис. 1.4. Фрагмент загальної послідовності етапів конструкторського проектування з використанням PDM і CAD-систем

Перетворення структури проекту в PDM-системі полягає в тому, що вхідні об'єкти розміщуються (при збереженні зв'язків між ними) у відповідних їм класах «Складальні одиниці», «Деталі», «Моделі», «Креслення», «Стандартні вироби» та ін.

Відзначимо, що дане перетворення структури проекту (як і формування текстових конструкторських документів) не є «штатною» функцією PDM-системи, а реалізується за допомогою спеціального додатку PDM-системи, а саме – засобами API інтерфейсів (рис. 1.5).

причина – це потреба в розвитку науки, техніки та технологій, тобто в традиційних методах отримання нової інформації.

Наука з прадавніх часів займається збором та переробкою інформації. Наукові методи пізнання – одна з найстаріших інформаційних технологій. Більше того, це найдосконаліші з інформаційних технологій, оскільки наукові методи – це методи якісного перетворення інформації. Але традиційно науковий метод є індивідуальним, повільним методом перероблення інформації, на відміну від індустріального методу. Еволюція самої науки потребує нової інформаційної технології.

Потужним стимулятором наукового методу пізнання є використання системного методу, поєднання аналізу та синтезу, використання методів математичного моделювання.

Математичне моделювання з прадавніх часів використовувалось у фізиці для опису реального світу та методів математичного дослідження моделей, отримання якісних та кількісних властивостей явищ і процесів, що вивчаються. Паралельно культура математичного моделювання та аналізу поширилась на інші природничі науки, проникла в інженерну справу та у відповідні навчальні дисципліни.

Високий рівень формалізації мають математичні абстрактні методи, які добре поєднуються зі схемним зображенням процесів і систем.

Стосовно конкретної системи, що моделюється, розробнику математичної моделі допомагають лише ті математичні схеми, які пройшли апробацію для даного класу систем і показали свою ефективність у прикладних дослідженнях на комп'ютері. Ці схеми отримали назву *типових математичних схем* [].

Введення поняття «типова математична схема» дозволяє розглядати математику не як метод розрахунку, а як метод мислення, як засіб формулювання понять, що є найбільш важливим при переході від словесного опису системи до формального подання процесу її функціонування у вигляді деякої математичної моделі. При користуванні типовою математичною схемою дослідника технічної системи, у першу чергу, повинно цікавити питання про адекватність відображення у вигляді конкретних схем реальних процесів у досліджуваній системі, а не

можливість одержання відповіді (результату рішення) на конкретне питання дослідження.

Наприклад, подання процесу функціонування інформаційно-обчислювальної системи колективного користування у вигляді мережі схем масового обслуговування дає можливість добре описати процеси, що відбуваються в системі. При складних законах розподілу вхідних потоків і потоків обслуговування такі схеми не дають можливості одержання результатів у явному вигляді

Типову математичну схему визначають як ланку при переході від змістовного до формального опису процесу функціонування технічної системи з урахуванням впливу зовнішнього середовища. Тобто при формалізації процесу функціонування технічних систем має місце ланцюжок: *«описова модель – типова математична схема – математична модель»*.

Під час практичного моделювання технічних систем на початкових етапах їх дослідження раціонально використовувати такі типові математичні схеми: диференціальні рівняння, кінцеві та імовірнісні автомати, системи масового обслуговування, мережі Петрі та інші.

Типові математичні схеми мають переваги в наочності й простоті при значному зменшенні можливостей їх використання. Так, якщо при дослідженні технічних систем не враховуються випадкові фактори (детерміновані моделі), то при математичному моделюванні використовуються диференціальні, інтегральні, інтегродиференціальні та інші рівняння. Для моделювання систем, які функціонують у дискретному часі рекомендують використовувати математичний апарат і типові математичні схеми теорії кінцевих автоматів. При моделюванні систем з урахуванням часу (дискретні моделі) та випадкових факторів (стохастичні моделі) використовують імовірнісні автомати. Для представлення таких систем у безперервному часі використовують системи масового обслуговування, а для представлення поведінки систем і процесів у реальному часі – імітаційне моделювання [].

Названі типові математичні схеми не можуть описати й формально представити всі процеси, які відбуваються у більшості технічних систем. Наприклад, для опису складних інформаційно-

вимірювальних систем і процесів, що в них відбуваються, перспективним є застосування агрегативних моделей [].

Агрегативні моделі дозволяють описати певну кількість об'єктів дослідження з відображенням системного характеру цих об'єктів. Саме при агрегативному описі складний об'єкт (технічна система) розділяється на кінцеву кількість частин (підсистем), зберігаючи при цьому зв'язки, які забезпечують взаємодію цих частин.

Враховуючи вище сказане, очевидно, що при побудові математичних моделей процесів функціонування систем і самих систем (технічних систем) існують такі основні типові математичні схеми:

- 1) безперервно-детермінована (математичний апарат – диференціальні рівняння);
- 2) дискретно-детермінована (кінцеві автомати);
- 3) дискретно-стохастична (імовірнісні автомати);
- 4) безперервно-стохастична (системи масового обслуговування, імітаційне моделювання);
- 5) мережева (мережі Петрі, Е-мережі та інші);
- 6) універсальна чи комбінована (агрегативні моделі).

Названі типові математичні схеми та приклади їх практичного використання під час математичного моделювання в середовищі інформаційних технологій змістовно і в повній мірі представлено в навчальному посібнику [].

Використання аналізу під час проектування технічних систем привело до постановки задачі синтезу системи з заданими можливостями. Проектувальника вже не задовольняє аналіз тільки одного варіанту системи, він намагається порівняти різні альтернативи системи, щоб обрати найкращу, а це вже спроба вирішення завдання синтезу. При цьому виникають такі питання:

- де взяти опис багатьох можливих варіантів системи?
- як сформулювати цілі, заради яких створюється система та умови її функціонування?
- як серед усіх можливих варіантів системи знайти «найбільш відповідну поставленому завданню»?

Практика підтверджує, що окремі фахівці (інженер, математик, програміст) не можуть самостійно вирішити ці проблеми. Потрібно разом сформулювати задачу синтезу технічної

системи й дати їй чітке формальне представлення, бо інакше не можливе використання математичних моделей.

Таким чином, для постановки та вирішення задачі синтезу, (яка постійно використовується інженерами при розробці та використанні технічних систем) потрібен системний підхід, тобто, необхідні спеціалісти-інженери, які володіють системним аналізом і математичним мисленням.

Під час вирішення проектних, управлінських та інших завдань у вищенаведеній постановці, треба вміти використовувати методи математичного моделювання. Тому стає очевидною ключова роль математичного моделювання у сучасних інформаційних технологіях, які автоматизують процес розробки, аналізу та експлуатації технічних систем.

1.3. Задачі досліджень технічних систем

Найважливішими для дослідження складних технічних систем є задача аналізу та задача синтезу. Розв'язуючи задачу аналізу за відомою структурою й відомими параметрами системи, вивчають її поведінку, тобто досліджують властивості системи та її характеристики. Задача синтезу полягає у з'ясуванні структури й головних параметрів системи за її заданими властивостями. Обидві задачі взаємно обернені, тому їх розв'язують здебільшого спільно, зокрема задачі синтезу як складніші найчастіше розв'язують, використовуючи результати розв'язання задач аналізу.

Аналіз – це процес дослідження властивостей, притаманних системі.

Синтез – це процес створення функцій та структур, необхідних і достатніх для одержання певних результатів. Відшуковуючи функції, які реалізує система, знаходять деяку абстрактну систему про яку відомо лише те, що вона буде функціонувати.

Результат аналізу – одержання моделі процесів, що відбуваються в складних системах, і закономірностей, притаманних процесам і системам. Моделі виявляють причинно-наслідкову природу процесів і визначають залежності між їх характеристиками й параметрами систем. Саме в цьому й полягає пізнавальна цінність аналізу. Прикладну цінність зумовлює

застосування результатів аналізу для постановки задач синтезу (конструювання), котрі виникають під час проектування складних систем.

Кожну систему в ієрархії систем можна розглядати в двох аспектах – як елемент широкої системи і як сукупність взаємопов'язаних елементів. Тому аналізувати її можна двома способами – за допомогою мікро- і макроаналізу.

Мікроаналіз – це вивчення й моделювання структури системи та властивостей її елементів. Його часто можна замінити дослідженням функцій елементів і процесу функціонування системи.

Макроаналіз спрямовують на систему загалом – її властивості, поведінку, взаємодію з навколишнім середовищем. Його наслідком є макромодель системи, яку часто розглядають у вигляді «чорної скриньки». Це образне поняття означає, що внутрішня будова системи невідома. Знають лише зв'язки системи із зовнішнім середовищем і вивчають зміну на її виходах залежно від вхідних дій. На підставі цього дістають уявлення про властивості й внутрішню будову системи. Таке дослідження й моделювання називають методом «чорної скриньки».

Зображення реального об'єкта як системи й використання системних понять під час його моделювання є основою принципів дослідження, названих системним аналізом.

Системний аналіз передбачає послідовний перехід від загального до часткового, коли в основі розгляду є мета, а досліджуваний об'єкт виділяють з навколишнього середовища. Такий спосіб дає змогу розв'язати проблему побудови складної системи, враховуючи всі фактори й можливості, пропорційні їх значущості, на всіх етапах дослідження системи та побудови її моделі. Системний аналіз ґрунтується на розгляді системи як інтегрованого цілого, котрий розпочинають з головного: формулювання мети функціонування. Використання системного аналізу допомагає не тільки побудувати модель реального об'єкта, а й на її основі вибрати необхідну кількість інформації в реальній системі, оцінити показники функціонування останньої та завдяки цьому знайти найефективніший варіант побудови й оптимальний режим функціонування реальної технічної системи.

Ефективно розв'язувати сучасні задачі моделювання технічних систем можливо тільки за умов загальної методології – системного аналізу. У сучасному автоматизованому виробництві найважливішим інструментом системного аналізу є програмне моделювання в інформаційному середовищі САЕ-систем.

При цьому важливу роль у процесі моделювання відіграє дослідник. Постановка завдання з побудовою змістовної моделі реального об'єкту є творчим процесом і базується на евристиці. **У цьому сенсі** немає формальних шляхів вибору оптимального методу моделювання. Часто відсутні формальні методи, які дозволяють досить точно описати реальний процес. Тому вибір тієї чи іншої аналогії, вибір того чи іншого математичного апарату моделювання повністю ґрунтується на наявному досвіді дослідника. Помилка дослідника може призвести до хибних результатів моделювання [].

1.4. Методи моделювання технічних систем

Досліджуючи або проектуючи технічну систему, застосовують різні методи моделювання систем. Розглянемо детальніше особливості методів моделювання, які найчастіше використовуються.

Залежно від характеру використаного математичного апарату можна виділити два основних розділи математики – класична та прикладна.

Методи класичної математики, що включають математичний аналіз і теорію ймовірності, не є основними для використання в наукових дослідженнях і для розв'язання проектних задач під час аналізу та синтезу технічних систем.

Група методів прикладної математики значно ширша за номенклатурою та частіше використовується інженерами-практиками. Методи, які до неї входять неоднорідні за складом елементарних розрахунків, способом їх реалізації, використаними прийомами тощо. Їх можна класифікувати таким чином: теорія множин, теорія графів, математична логіка, теорія прийняття рішень, лінійне та оптимальне програмування, теорія розкладів, теорія масового обслуговування, теорія надійності, експертні методи оцінки та ін.

Вибір методу математичного моделювання безпосередньо залежить від ступеня деталізації об'єкта, закону функціонування елементів системи і зовнішніх дій. Залежно від ступеня деталізації опису складних систем та їх елементів можна вирізнити три основних рівні моделювання:

1) структурне моделювання систем із використанням моделей і застосуванням спеціалізованих мов моделювання, теорій множин, алгоритмів, формальних граматики, графів, масового обслуговування, статистичного моделювання;

2) логічне моделювання функціональних систем, моделі яких зображують у вигляді логічних рівнянь і будують, застосовуючи дво- або багатозначну алгебру логіки;

3) кількісне моделювання (аналіз) принципів схем елементів складальних систем, моделі яких зображують у вигляді систем нелінійних алгебраїчних або інтегродиференціальних рівнянь і досліджують, застосовуючи методи функціонального аналізу, теорії диференціальних рівнянь, математичної статистики.

Сукупність моделей об'єкта на структурному, логічному й кількісному рівнях моделювання являє собою ієрархічну систему, яка показує взаємозв'язок різних аспектів опису об'єкта та забезпечує системну пов'язаність його елементів і властивостей на всіх стадіях процесу проектування.

1.4.1. Класифікаційні ознаки методів моделювання технічних систем

Однією з основних ознак класифікації видів моделювання є ступінь повноти моделі, за яким моделі ділять на повні, неповні й наближені. В основі повного моделювання лежить абсолютна подібність як у часі, так і в просторі. Для неповного моделювання характерна часткова подібність моделі з досліджуваним об'єктом. Наближене моделювання – це приблизна подібність, при якій певні етапи технічної системи зовсім не моделюються []. Класифікація видів моделювання технічних систем у загальному вигляді представлена на рис. 1.6 [].

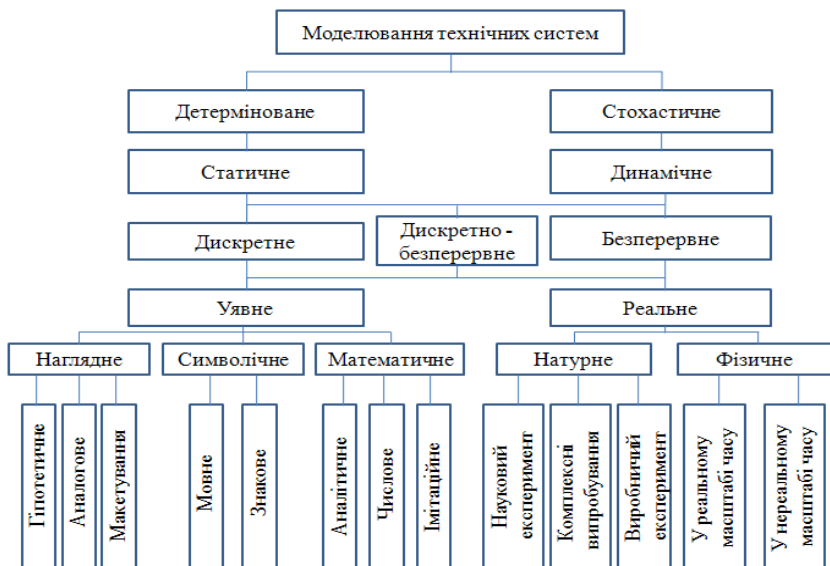


Рис. 1.6. Класифікація методів моделювання технічних систем

Залежно від характеру досліджуваних процесів у технічній системі всі види моделювання можуть бути розділені на детерміновані й стохастичні, статичні й динамічні, дискретні, безперервні й дискретно-безперервні.

Детерміноване моделювання відображає детерміновані процеси, з яких виключаються будь-які випадкові впливи.

Стохастичне моделювання відображає імовірнісні процеси й події. При цьому аналізують можливість реалізації випадкового процесу та оцінюють середні характеристики, тобто набір однорідних реалізацій.

Статичне моделювання описує поведінку об'єкта в певний момент часу, а **динамічне** – за весь час.

Дискретне моделювання описує дискретні процеси, **безперервне** – відображає безперервні процеси в системах, **дискретно-безперервне** використовується для випадків, де є дискретні та безперервні процеси.

Залежно від форми представлення об'єкта технічної системи існує уявне та реальне моделювання. **Уявне моделювання** часто

буває єдиним способом моделювання об'єктів, які або практично нереалізовані в заданому інтервалі часу, або існують поза умовами, можливими для їх фізичного створення. Наприклад, на основі уявного моделювання можна проаналізувати багато ситуацій мікросвіту, що не піддаються фізичному експерименту. Уявне моделювання може бути реалізоване у вигляді наочного, символічного й математичного.

При **наочному моделюванні** на основі спостережень про реальні об'єкти створюються різні наочні моделі, які відображають явища та процеси, що в них відбуваються.

В основу **гіпотетичного моделювання** дослідником закладається гіпотеза про закономірність протікання процесу в реальному об'єкті, що відображає рівень знань дослідника про об'єкт і базується на причинно-наслідкових зв'язках між входом і виходом досліджуваного об'єкта. Гіпотетичне моделювання застосовується тоді, коли знань про об'єкт недостатньо для побудови формальних моделей.

Аналогове моделювання базується на застосуванні аналогій різних рівнів. Найвищим рівнем є повна аналогія, яка використовується тільки для дуже простих об'єктів. Для складніших об'єктів використовують аналогії наступних рівнів, де аналогова модель відображає частину або тільки один бік функціонування об'єкта.

Велике значення при уявному наочному моделюванні має **макетування**. Уявний макет може застосовуватись тоді, коли у реальному об'єкті протікають процеси, які не піддаються фізичному моделюванню або можуть передувати проведенню інших видів моделювання. В основі побудови уявних макетів також лежать аналогії, основані на причинно-наслідкових зв'язках між явищами й процесами в об'єкті. Якщо ввести умовне позначення окремих знаків і певні операції між ними, то можна реалізувати знакове моделювання. Наприклад, використовуючи операції об'єднання, перетинання й доповнення теорії множин, можна за допомогою окремих символів зробити опис реального об'єкта.

В основі **мовного моделювання** лежить **тезаурус**. Він утворюється з набору вхідних тезаурусів, причому цей набір має бути фіксованим. Треба зазначити, що між тезаурусом і звичайним словником є принципові розходження. Тезаурус – словник, який

виключає неоднозначність, тобто кожному слову може відповідати лише єдине значення, хоча у звичайному словнику одне слово може мати кілька значень.

Символічне моделювання – це штучний процес створення логічного об'єкта, який замінює реальний і виражає його основні відношення за допомогою системи знаків чи символів.

1.4.2. Математичне моделювання технічних систем

Математичне моделювання використовується під час дослідження характеристик процесу функціонування будь-якої системи за допомогою математичних методів (включаючи машинні). При цьому проводять формалізацію даного процесу, тобто будують математичну модель. **Під математичним моделюванням** розуміють процес установалення відповідності математичного об'єкта (математичної моделі) до реального названого, та дослідження цієї моделі, що дозволяє отримувати характеристики розглянутого об'єкта. Вид математичної моделі залежить як від природи об'єкта, так і від завдань по його дослідженню, необхідної ймовірності й точності вирішення даного завдання. Будь-яка математична модель описує реальний об'єкт, але з певним наближенням.

Математичне моделювання з дослідження характеристик процесу функціонування систем розділяють на аналітичне, імітаційне й комбіноване.

Для **аналітичного моделювання** характерно те, що процеси функціонування елементів системи подаються у вигляді функціональних співвідношень (алгебраїчних, інтегрально-диференціальних, кінцево-різницевих та ін.) або за принципом логіки. Аналітична модель може бути досліджена такими методами:

- аналітичним – коли намагаються отримати в загальному вигляді явні залежності для характеристик, які досліджуються;
- числовим – коли не маючи змоги вирішити рівняння у загальному вигляді, намагаються отримати числові результати за конкретними початковими даними;

— якісним — коли не маючи рішення в явному вигляді, можна знайти деякі властивості рішення (наприклад, оцінити стійкість рішення).

Найбільш повне дослідження процесу функціонування системи можна провести при відомих залежностях, які зв'язують шукані характеристики з початковими умовами, параметрами й змінними системи. Проте ці залежності вдається отримати тільки для порівняно простих систем. Дослідження складніших систем аналітичним методом призводить до значних ускладнень, які важко усунути. Тому, використовуючи аналітичний метод, йдуть на значне спрощення вихідної моделі, що дозволяє вивчити хоча б загальні властивості системи. Дослідження на спрощеній моделі аналітичним методом допомагає одержати орієнтовні результати для отримання точніших даних за допомогою інших методів.

Порівняно з аналітичним, **числовий метод** дозволяє досліджувати ширший діапазон класу систем, проте отримані при цьому рішення носять індивідуальний характер. Числовий метод найбільш ефективний при застосуванні програмних засобів.

Іноді, під час дослідження технічної системи можуть задовольняти висновки, отримані при використанні якісного методу аналізу математичної моделі. Такі якісні методи широко використовуються, наприклад, у теорії автоматичного керування для оцінки ефективності різних варіантів систем керування.

1.4.3. Імітаційне моделювання технічних систем

Під час імітаційного моделювання алгоритм, що реалізує модель, відтворює процес функціонування системи у часі. При цьому імітуються елементарні явища (складові цього процесу) із збереженням їх логічної структури й послідовності протікання в часі. Це дозволяє за вихідними даними отримати відомості про стани процесу в певні моменти часу, що дає можливість оцінити характеристики системи.

Основною перевагою імітаційного моделювання, порівняно з аналітичним, є можливість вирішення більш складних завдань. Імітаційні моделі дозволяють легко враховувати такі фактори, як: наявність дискретних і безперервних елементів, нелінійні

характеристики елементів системи, численні випадкові впливи та інше, що часто створює труднощі під час аналітичних досліджень.

На сьогоднішній день імітаційне моделювання – найбільш ефективний метод дослідження складних технічних систем, а часто і єдиний, практично доступний метод одержання інформації з впровадження системи, особливо на етапі її проектування.

Незважаючи на те, що імітаційне комп'ютерне моделювання є потужним інструментом дослідження систем, його застосування не завжди доцільне. Відомо багато задач, ефективніше розв'язаних за допомогою інших методів. Разом із тим, для вищого класу задач дослідження й проектування систем метод імітаційного моделювання найбільш прийнятний. Його правильне застосування можливе лише за умов чіткого розуміння суті методу імітаційного моделювання та розумного використання в дослідницькій практиці реальних систем при врахуванні особливостей конкретних систем і можливостей їхнього дослідження різними методами.

Основними критеріями доцільності застосування методу імітаційного комп'ютерного моделювання є:

- відсутність або неприйнятність аналітичних, числових і якісних методів вирішення поставленого завдання;
- наявність достатньої кількості вихідної інформації про модельовану технічну систему для побудови адекватної імітаційної моделі;
- необхідність проведення на основі можливих методів численних обчислень, важко реалізованих навіть спеціальними програмними засобами;
- можливість пошуку оптимального варіанту системи при її комп'ютерному моделюванні.

До основних достоїнств методу імітаційного моделювання при дослідженні складних систем можна віднести такі:

- машинний експеримент з імітаційною моделлю досліджує особливості процесу функціонування технічної системи за будь-яких умов;
- застосування програмних засобів в імітаційному експерименті істотно скорочує тривалість випробувань порівняно з натурним експериментом;

- імітаційна модель дозволяє включати результати натурних випробувань реальної системи чи її частин для проведення подальших досліджень;

- імітаційна модель має відому гнучкість варіювання структури, алгоритмів і параметрів модельованої системи, що важливо під час пошуку оптимального варіанту системи;

- імітаційне моделювання складних систем є єдиним практично реалізованим методом дослідження процесу функціонування таких систем на етапі їхнього проектування.

Основним недоліком машинної реалізації методу імітаційного моделювання є те, що рішення, отримане під час аналізу імітаційної моделі, завжди носить локальний характер, бо відповідає фіксованим елементам структури, алгоритмам поводження й значенням параметрів технічної системи, початковим параметрам впливів зовнішнього середовища. Тому для повного аналізу характеристик процесу функціонування систем доводиться багато разів відтворювати імітаційний експеримент, варіюючи даним вихідним завданням. Внаслідок цього збільшуються витрати машинного часу на проведення експерименту з імітаційною моделлю в процесі функціонування досліджуваної технічної системи.

Під час імітаційного моделювання, як і під час будь-якого методу аналізу та синтезу технічної системи, важливим є питання його ефективності. Ефективність імітаційного моделювання може оцінюватись як критерій, у тому числі точністю й вірогідністю результатів моделювання, часом побудови й роботи з моделлю, витратами машинних ресурсів (часу й пам'яті), вартістю розробки й експлуатації моделі. Очевидно, найкращою оцінкою ефективності є порівняння отриманих результатів з реальним дослідженням тобто моделюванням на реальному об'єкті при проведенні натурального експерименту. Оскільки це не завжди вдається зробити, то статистичний підхід дозволяє з певним ступенем точності при повторюваності машинного експерименту одержати усереднені характеристики поводження системи.

У випадку, коли результати, отримані при відтворенні на імітаційній моделі процесу функціонування технічної системи, є реалізацією випадкових величин і функцій, то для знаходження

характеристик процесу потрібно його багаторазове відтворення з подальшою статистичною обробкою інформації. При цьому, в якості методу машинної реалізації імітаційної моделі, доцільно використовувати метод статистичного моделювання.

Спочатку був розроблений метод статистичних випробувань. Це числовий метод, який застосовувався для моделювання випадкових величин і функцій, імовірнісні характеристики яких збігалися з рішеннями аналітичних завдань (метод Монте-Карло). Цей прийом стали застосовувати і для машинної імітації під час дослідження характеристик процесів функціонування систем, які попадають під випадковий вплив, тобто з'явився метод статистичного моделювання []. Отже, методом статистичного моделювання є метод машинної реалізації імітаційної моделі, а метод статистичних випробувань (Монте-Карло) – числовий метод вирішення аналітичного завдання.

Метод імітаційного моделювання дозволяє вирішувати завдання аналізу складних технічних систем, включаючи завдання оцінки: варіантів структури системи, ефективності різних алгоритмів управління системою, впливу зміни різних параметрів системи. Імітаційне моделювання може бути основою структурного, алгоритмічного й параметричного синтезу складних систем, коли потрібно створити систему із заданими характеристиками при певних обмеженнях, що є оптимальним при певних критеріях оцінки ефективності.

Під час вирішення завдань машинного синтезу систем на основі імітаційних моделей крім розробки моделюючих алгоритмів для аналізу фіксованої системи потрібно також розробити алгоритми пошуку оптимального варіанта системи. Надалі, в методології машинного моделювання будемо розрізняти два основних розділи: статистику й динаміку, задачами яких є відповідно вирішення питань аналізу та синтезу систем, заданих моделюючими алгоритмами [].

Комбіноване (аналітико-імітаційне) моделювання *при аналізі й синтезі систем дозволяє об'єднати переваги аналітичного та імітаційного моделювання.* При побудові комбінованих моделей проводиться попередня декомпозиція процесу функціонування об'єкта на відповідні підпроцеси. І там, де це можливо використовуються аналітичні моделі, де ні –

будуються імітаційні моделі. Такий комбінований підхід дозволяє охопити якісно нові класи систем, які не можуть бути досліджені з використанням тільки аналітичного й імітаційного моделювання окремо.

1.4.4. Інші види моделювання технічних систем

При реальному моделюванні досліджують характеристики цілого об'єкта або його частин. Такі дослідження проводять як на об'єктах, що працюють при нормальних режимах, так і при спеціальних режимах під час оцінки характеристик, які цікавлять дослідників (при інших значеннях змінних і параметрів, в іншому масштабі часу та ін.).

Реальне моделювання є найбільш адекватним, але його можливості з урахуванням особливостей реальних об'єктів обмежені. Наприклад, проведення реального моделювання АСУ підприємством дозволяє створити таку АСУ та провести експерименти з об'єктом управління (підприємством), що в більшості випадків є неможливим. Розглянемо різновиди реального моделювання.

Натурним моделюванням називають проведення дослідження на реальному об'єкті з наступною обробкою результатів експерименту на основі теорії подібності. При функціонуванні об'єкта, відповідно до поставленої мети, вдається виявити закономірності протікання реального процесу. Такі різновиди натурного експерименту як виробничий експеримент і комплексні випробування, мають високий ступінь імовірності.

Із розвитком техніки й проникненням у глибокі процеси, що протікають у реальних системах, зростає технічна оснащеність сучасного наукового експерименту. Він характеризується ширшим використанням засобів проведення автоматизації, застосуванням різноманітних засобів обробки інформації, можливістю втручання людини в процес експерименту. У зв'язку з цим з'явився новий науковий напрям – автоматизація наукових експериментів [].

Різниця між експериментом і реальним протіканням процесу полягає в тому, що експеримент може мати критичні ситуації і в ньому можуть визначатися межі стійкості процесу. Під час експерименту у процесі функціонування об'єкта вводяться нові

збурюючі фактори й впливи. Один із різновидів – комплексні випробування, які відносять до натурного моделювання. При цьому, внаслідок повторних випробувань з'являються загальні закономірності про надійність виробів, про характеристики якості та ін. У цьому випадку моделювання здійснюється шляхом обробки й узагальнення відомостей, які проходять у групі однорідних явищ.

Поряд зі спеціально організованими випробуваннями можлива реалізація натурного моделювання шляхом узагальнення досвіду, накопиченого під час виробничого процесу, тобто можна говорити про виробничий експеримент. За допомогою теорії подібності тут обробляють статистичний матеріал виробничого процесу й отримують його узагальнені характеристики.

Іншим видом реального **моделювання** є **фізичне**, яке відрізняється від натурного тим, що дослідження проводяться на установках, які зберігають природу явищ і мають фізичну подібність. У процесі фізичного моделювання задаються характеристики зовнішнього середовища й досліджується поведінка чи реальний об'єкт, його моделі при заданих або створених штучно впливах зовнішнього середовища.

Фізичне моделювання може протікати в реальному й нереальному (псевдо реальному) масштабі (відліку) часу, а також може розглядатись без врахування часу. В останньому випадку досліджуються так звані «заморожені» процеси, які фіксуються в заданий момент часу. Найбільшу складність і цікавість, із погляду точності одержаних результатів, представляє фізичне моделювання в реальному масштабі (відліку) часу.

З погляду математичного опису об'єкта й залежно від його характеру, моделі можна розділити на: аналогові (безперервні), цифрові (дискретні) та аналогово-цифрові (комбіновані). **Під аналоговою моделлю** розуміють модель, що описується рівняннями із безперервних величин. **Під цифровою** розуміють **модель**, яка описується рівняннями із дискретних величин, представлених у вигляді цифр. **Під аналого-цифровою** розуміють **модель**, яка може бути описана рівняннями, до яких входять безперервні й дискретні величини.

Особливе місце в моделюванні займає **кібернетичне моделювання**, в якому відсутня подібність фізичних процесів, що відбуваються в моделях, з реальними процесами. У цьому випадку

намагаються відобразити лише певну функцію й розглядають реальний об'єкт як «чорну скриньку», яка має входи і виходи та моделюють зв'язки між входами й виходами.

Найчастіше при використанні кібернетичних моделей проводять аналіз поведінки об'єкта при різних впливах зовнішнього середовища.

Таким чином, в основі кібернетичних моделей лежить відбиття інформаційних процесів управління, що дозволяє оцінити поведінку реального об'єкта. У цьому випадку для побудови імітаційної моделі потрібно виділити досліджувану функцію реального об'єкта, спробувати формалізувати її у вигляді певних операторів зв'язку між входом і виходом та відтворити на імітаційній моделі дану функцію, причому на основі зовсім інших математичних співвідношень і, природно, іншої фізичної реалізації процесу.

1.5. Використання результатів математичного моделювання

Вітчизняна промисловість уже має значний досвід у вирішенні задач, в яких використовуються математичні методи та комп'ютерні технічні засоби в області розробки нової техніки, проектуванні технологій, плануванні та управлінні технічними системами. Процес проникнення математики в інженерну діяльність інтенсивно проходив в останні 20 років. Існують наукові школи по впровадженню математичних методів у прикладні задачі промисловості у США, Франції, ФРН, Росії та Україні, викликаному об'єктивними причинами. Так, розширення масштабів виробництва, поглиблення його спеціалізації, зростання вимог до якості та надійності продукції, призвели до різкого збільшення кількості проектних, управлінських та інших рішень, серед яких потрібно обирати найкращі.

У загальному вигляді математичне моделювання технічних систем використовується [1]:

а) для дослідження технічної системи ще до того, як вона буде спроектована з метою встановлення чутливості характеристик до змін структури та параметрів об'єкту моделювання і зовнішнього середовища;

б) на етапі проектування технічної системи для аналізу та синтезу різних варіантів системи й відбору такого варіанту, який би задовольняв заданому критерію оцінки ефективності системи за прийнятих обмежень;

в) при експлуатації технічної системи для отримання інформації, яка б доповнювала результати експлуатації реальної системи та для отримання прогнозів із розвитку системи в часі.

Названі випадки відображають лише загальний підхід до використання математичного моделювання. У реальних навчальних, дослідницьких чи виробничих процесах їх значно більше, вони більш різноманітні за своїми вхідними та вихідними параметрами і характеристиками.

Методи моделювання успішно застосовують у таких галузях, як автоматизація проектування, організація роботи виробничих комплексів, транспорту, сфери обслуговування, аналіз різних аспектів діяльності людини, при автоматизованому управлінні виробничими та іншими процесами. Треба зауважити, що моделювання використовують під час проектування, виробництва, впровадження й експлуатації технічних систем, а також на різних рівнях її вивчення – від аналізу роботи елементів до дослідження систем загалом у процесі взаємодії з навколишнім середовищем, тобто на всіх етапах життєвого циклу технічної системи.

Математичне моделювання, як альтернатива дослідному (пробному) фізичному експерименту, методу спроб та помилок, вже входить у практику промислового виробництва як достатньо ефективний та економічно вигідний шлях розвитку та вдосконалення.

Так, наприклад, розробка автоматизованих вимірювальних комплексів не може обійтись без моделювання таких об'єктів як «деталь», «вимірювальний процес», «пристрій» тощо. При цьому використовується апарат дискретної математики: теорія множин, теорія графів, математична логіка, теорія прийняття рішень, лінійне та динамічне програмування та ін.

Успішно використовуються на практиці методи математичного програмування, теорії масового обслуговування, мережеві методи планування та управління. Так, методами лінійного програмування оптимізуються рішення від порівняно простих завдань різки листового металу, пошуку оптимальної

траєкторії обробки складних контурів різальним інструментом до складних завдань оптимізації планів ділянки цеху при максимальному завантаженні обладнання тощо.

Значні можливості для вирішення складних задач промислового виробництва закладено у використанні методів динамічного програмування, випадкового пошуку та евристичного програмування. Методи теорії масового обслуговування широко розповсюджені при управлінні технологічною підготовкою виробництва, забезпечують потрібне завантаження обладнання та виконання робіт в установлені терміни.

У зв'язку зі швидким розвитком інформаційних технологій, відкриваються нові можливості для широкого використання методів теорії ймовірності та математичної статистики, особливо методів кореляційного та дисперсійного аналізів при проектуванні технологічних процесів, прогнозуванні та ін.

Розвиток теорії та практики автоматизованого управління створив основу для створення адаптивних слідкуючих систем у металообробці. Математичне моделювання системи «верстат – пристрій – інструмент – заготовка» дозволило розробити для таких систем принципові основи автоматизованого управління точністю обробки, управління продуктивністю верстатного обладнання тощо.

На жаль, як у технічних науках, так і в їх практичному втіленні ще багато вузьких «неформалізованих» задач, які стримують використання автоматизованих систем типу САПР, АСУ ТП та ін. Напевно, головним прискорювачем рішення цих задач і є використання методів математичного моделювання.

Загальновживаний вираз: “Ніколи не починати справу, якщо не знаєш як вести її до заданої цілі”, у перекладі на інженерно-математичну мову, означає: “Промоделюйте та розрахуйте за допомогою програмних засобів те, що ви отримаєте при ваших вхідних даних, тоді зрозумієте шляхи розв’язання задачі”.

Використання автоматизованих систем і масове впровадження комп’ютерної техніки на промислових підприємствах суттєво збільшує первинні капіталовкладення та основні фонди.

Звичайно, у виробників і теоретиків виникає цікавість до оцінки ефективності цих витрат, терміну їх окупності. Кажучи про критерії ефективності, звичайно мають на увазі кількісну оцінку якісних характеристик, які відображають відношення досягнутих цілей до витрат. Прямим показником ефективності у цьому випадку може бути значення досягнутого результату, віднесене до суми витрат.

Наприклад, Ви – керівник підприємства, якому запропонували декілька альтернативних замовлень. Як обрати те, яке при мінімумі витрат принесе Вам максимум прибутку? Тут потрібно оцінити свої ресурси, ступінь завантаження підприємства, наявність обладнання та інше. Використання математичного моделювання та інформаційних технологій дозволять у лічені хвилини визначити всі переваги і недоліки запропонованих варіантів та обрати найкращий (оптимальний). Такі ж конкретні рішення й конкретні ефекти у натуральних та економічних показниках досягаються за допомогою математичного моделювання у більшості проектних і виробничих задач.

Контрольні питання

- 1.1. Які етапи включає життєвий цикл технічної системи?
- 1.2. Які основні вимоги PLM-рішень до технічних систем?
- 1.3. Що розуміють під концепцією PLM-рішень?
- 1.4. Що називається математичною схемою?
- 1.5. Які типові схеми використовуються під час моделювання технічних систем?
- 1.6. Які умови та особливості використання під час розробки моделей систем різних типових схем?
- 1.7. Що називається синтезом технічних систем?
- 1.8. У чому полягає суть системного аналізу?
- 1.9. Які є методи моделювання систем?
- 1.10. У чому суть імітаційного моделювання?
- 1.11. Що називається математичним моделюванням?
- 1.12. Як використовуються результати математичного моделювання?

2. ТЕХНІЧНА СИСТЕМА ЯК ОБ'ЄКТ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. Поняття про термін “технічна система”

Одним із сучасних принципів наукової та проектної діяльності розробника є ставлення до об'єктів дослідження і проектування і відповідних їм виробничим процесам. Як було сказано на стор. 3 в подальшому сукупність об'єктів, систем, приладів та процесів їх розробки, виготовлення та експлуатації в подальшому будемо називати узагальненим терміном – технічна система. У термін «система» вкладають різні поняття. Але він завжди є підмножиною взаємопов'язаних елементів, виділеною з множини елементів будь-якої природи, відповідно до вимог поставленої задачі.

Суб'єктивний зміст поняття системи полягає в тому, що дослідник, розпочинаючи вивчати певний об'єкт чи групу об'єктів, вибирає для розгляду ті елементи або явища, які, з одного боку, відповідають меті дослідження, а з другого – легше й природніше піддаються аналізу чи синтезу. Об'єктивний зміст поняття системи пов'язаний з тим, що її, як правило, поділяють за просторовою чи функціональною ознакою.

Для того, щоб визначити об'єкт як систему треба мати:

- об'єкт, що складається з множини елементів та їх властивостей, які можна розглядати як єдине ціле завдяки зв'язкам між ними та їх властивостями;
- дослідника, який виконує цілеспрямовану дію (роботу);
- задачу, з погляду розв'язання якої, об'єкт виділяється дослідником як система;
- мову, якою дослідник може описати об'єкт, властивості його елементів та зв'язки.

Прикладами системи є:

- 1) сонячна система;
- 2) обчислювальний центр;
- 3) промислове підприємство;
- 4) система лінійних рівнянь;
- 5) інформаційно-вимірювальний пристрій;
- 6) операційна система комп'ютера;

7) система управління підприємством.

Системи 1-4, що складаються з матеріальних чи абстрактних об'єктів, сформовано за просторовою ознакою, а системи 5-7 – за функціональним призначенням. Деякі з перелічених систем можна описувати двома способами. Так, операційну систему комп'ютера можна задавати як її функціями, так і набором програм, що реалізують ці функції.

Коли систему задають за просторовими ознаками, то здебільшого одночасно проводять і її структурування – виділення двох типів об'єктів – множини елементів та множини зв'язків і співвідношень цих множин одна з одною. Так, у промисловому підприємстві, елементами можуть бути окремі цехи, а зв'язками – матеріальні та інформаційні потоки між ними. У системі лінійних рівнянь елементи – це окремі рівняння, а зв'язки – участь одних і тих самих змінних у різних рівняннях. Структурною одиницею (елементом) підприємства може бути цех, дільниця чи робоче місце. Залежно від цього змінюються й види зв'язків. Окрім того, те, що в одному випадку є видом зв'язку, в іншому може бути видом елемента. Поділ системи на елементи – один із перших кроків у напрямі побудови її формального опису, тобто математичної моделі.

Елементи – це частина або компоненти системи, які умовно вважають нероздільними.

Властивості – якості, що дозволяють описувати систему й виділяти її серед інших систем. Вони можуть мати кількісну або якісну міру.

Зв'язки – це те, що з'єднує елементи та їх властивості з іншими елементами. Вважають, що кожен елемент системи з'єднаний зв'язками прямо чи посередньо з будь-яким іншим елементом.

Структура системи – це спосіб організації елементів у системі з певними властивостями та визначенням між ними взаємозв'язків. Структура системи класифікується за такими характеристиками:

- за кількістю рівнів ієрархії (одно- та багаторівневі);
- за принципом розбиття елементів системи на підсистеми (функціональні та об'єктні);

- за кількістю цілей функціонування (одноцільові, багатоцільові).

Структура та властивості елементів описують індивідуальні характеристики системи і дозволяють розглядати її як цілісне утворення. Елемент належить системі, оскільки він пов'язаний з іншими її елементами, об'єднаними в єдине ціле для досягнення певної мети. Вилучення із системи елемента чи сукупності елементів неодмінно змінює її властивості, віддаляючи від мети. Цілісність системи полягає в тому, що її властивості якісно можуть відрізнитися від властивостей складових елементів. Наприклад, металорізальний верстат можна зобразити як систему, в якій елементами є складальні одиниці, пов'язані між собою. Кожну складальну одиницю верстата можна описати певними властивостями, але жодна з них не має його властивості – оброблювати деталі виробів зніманням стружки. Отже, система – це не сукупність частин, що її утворюють, а цілісне утворення з новими властивостями, притаманними елементам системи.

Систему вважають простою, коли вона складається з малої кількості елементів або її модель можна зарахувати до розряду простих. Складна система складну математичну модель із множини взаємозв'язаних елементів та підсистем з різною фізичною природою, які взаємодіють між собою, становлять неподільне ціле й забезпечують виконання системою певної складної функції.

Система згідно з означенням має деяку множину елементів. Припускають, що існує множина елементів за межами системи, з якими система взаємодіє, але не є з ними єдиним цілим. Цю множину називають зовнішнім середовищем. Елементи, котрі взаємозв'язані з системою, не є частиною її середовища.

Отже, назначаючи об'єкт як систему, дослідник залежно від розв'язуваної проблеми вилучає її з зовнішнього середовища, окреслює її межі, визначає вхідні та вихідні зв'язки, з'ясовує фактори, які мають описувати стани системи.

Відносність систем полягає також і в тому, що одну й ту ж сукупність елементів можна розглядати як систему або як частину більшої системи, множину елементів якої можна поділити на кілька підмножин.

Частину системи, утворену з елементів підмножини, називають підсистемою.

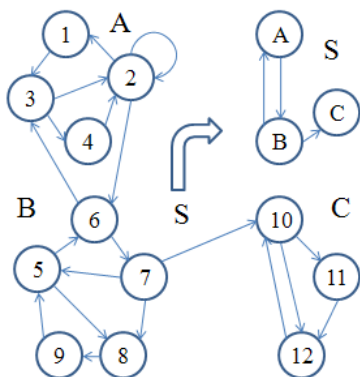


Рис. 2.1. Схема поділу системи на підсистеми

Нехай систему S (рис. 2.1) утворено з елементів 1-12 $\{e_1, e_2, \dots, e_{12}\}$, пов'язаних між собою. Цю систему можна поділити на три підсистеми, наприклад, A, B, C .

Підмножину елементів $\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$, що утворюють підсистему A , можна розглядати як систему, тоді B і C будуть елементами зовнішнього середовища. Якщо ми не цікавимося властивостями елементів і структурою підсистем A, B, C , то систему можна спростити й розглядати ці підсистеми як

елементи системи S .

Отже, кожную систему можна розглядати як підсистему чи елемент більшої системи або як сукупність елементів, кожен з яких припустимо називати системою.

Звідси випливає ієрархія систем, в якій елементами системи i -го рівня є системи $(i+1)$ -го рівня. Наприклад, підприємство можна розглядати як систему, елементами якої є цехи, як сукупність виробничих дільниць, а дільниця – як система верстатів тощо. Якщо брати за початковий рівень аналізу підприємство, то можна розширювати уявлення про систему не тільки «вниз», а й «угору», що робить дану систему (підприємство) підсистемою, або елементом більшої системи (об'єднання чи холдингу).

Виходячи з проведеного аналізу, поняття «система» та системного підходу [], введемо визначення терміну «технічна система», який будемо використовувати надалі.

Так, **технічна система** – це цілісний об'єкт (множина взаємопов'язаних об'єктів), у рамках якого визначено його функціональне призначення, сформульовано цілі, поставлені перед системою та визначено показник якості її функціонування, що кількісно визначає ціль функціонування.

У загальному випадку технічна система, як об'єкт моделювання, характеризується такими параметрами:

1) **вхідні** ($x_1, x_2, \dots, x_i$) – значення можуть бути виміряні (встановлені), але можливість впливу на них з боку системи відсутня;

2) **управляючі** ($u_1, u_2, \dots, u_n$) – мають прямий вплив на технічну систему та дозволяють управляти вихідними параметрами;

3) **збурюючі** ($z_1, z_2, \dots, z_k$) – значення змінюються випадково з плином часу та недоступні для зміни дослідником;

4) **вихідні** ($y_1, y_2, \dots, y_j$) – характеризують стан технічної системи або результат її функціонування від загального впливу вхідних, управляючих та збурюючих параметрів.

Таким чином, графічно технічна система може мати вигляд, як на рис. 2.2.

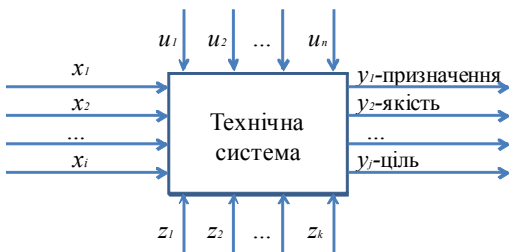


Рис. 2.2. Схема технічної системи

Виходячи з визначення технічної системи, її фізичним змістом є система ВПІД – "верстат – пристрій – інструмент – деталь". Другий приклад технічної системи – це відділ головного технолога підприємства, що

містить такі підсистеми: проекту, управлінську, планову тощо.

Технологічний процес також можна розглядати як технічну систему, тому що він має атрибути системи – ціль, структуру, параметри та ін.

Рівень складності технічної системи визначається задачею, що виконується у кожному конкретному випадку. Задача навчального процесу (використовуючи математичний апарат) – навчитися моделювати технічну систему з метою подальшого управління, автоматизації та вирішення поставлених задач.

2.2. Моделі технічних систем

Фахівці з розробки, проектування та експлуатації технічних систем, наприклад, інформаційно-вимірювальних приборів та комплексів, прагнуть досягти конкретної мети. Залежно від цієї мети

можуть розглядатись різні співвідношення між самим об'єктом (системою) S і зовнішнім середовищем E . Тому, залежно від мети, яку ставить фахівець, система може виділятися (формалізуватися) по-різному і можуть виникати різні взаємодії цього об'єкта з зовнішнім середовищем. Таким чином, система S є цілеспрямованою безліччю взаємозалежних елементів будь-якої природи. Зовнішнє середовище E – безліч існуючих поза системою елементів будь-якої природи, які роблять вплив на систему або перебувають під її впливом [1].

Традиційний підхід до вивчення взаємозв'язків між окремими частинами моделі передбачає розгляд їх як віддзеркалення зв'язків між окремими підсистемами об'єкту. Такий класичний підхід може бути використаний при створенні простих моделей. Процес синтезу моделі M на основі класичного (індуктивного) підходу представлено на рис. 2.3, а [1]. Реальний об'єкт, що підлягає моделюванню, розбивається на окремі підсистеми, тобто вибираються початкові дані D для моделювання і ставляться цілі C , які відображають окремі сторони процесу моделювання. За окремою сукупністю початкових даних D ставиться мета моделювання окремої сторони функціонування системи. На базі цієї мети формується певна компонента K до майбутньої моделі. Сукупність компонент об'єднується в модель M .

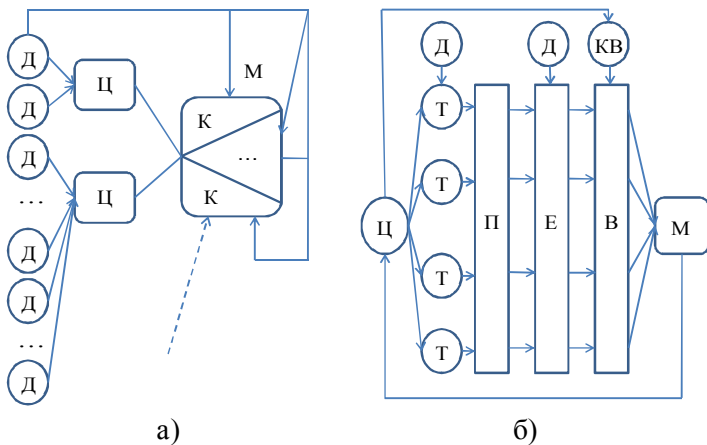


Рис. 2.3. Схеми процесу синтезу моделі на основі класичного (а) і системного (б) підходів

Таким чином, розробка моделі M на базі класичного підходу означає об'єднання окремих компонент в єдину модель. Кожна з компонент вирішує свої завдання та ізольована від інших частин моделі. Тому класичний підхід може бути використаний для реалізації порівняно простих моделей, в яких можливе розділення і взаємно незалежний розгляд окремих сторін функціонування реального об'єкту. Для моделі складного об'єкту така роз'єднаність вирішуваних завдань недопустима, оскільки приводить до значних витрат ресурсів при реалізації моделі на базі конкретних програмно-технічних засобів. Можна відзначити дві відмінні сторони класичного підходу:

- 1) дослідження системи йде від **часного** до загального;
- 2) створювана модель (система) утворюється шляхом об'єднання окремих її компонент і при цьому не враховується виникнення нового системного ефекту.

З погляду системного підходу створювана модель M також є системою, тобто $S' = S'(M)$, і може розглядатися по відношенню до зовнішнього середовища E . Найпростіші за уявленням моделі ті, в яких зберігається пряма аналогія явища. Застосовують також моделі, в яких немає прямої аналогії, а зберігаються лише закони і загальні закономірності поведінки елементів системи S . Правильне розуміння взаємозв'язків усередині самої моделі M і взаємодії її з зовнішнім середовищем E в значній мірі визначається тим, на якому рівні знаходиться дослідник.

Системний підхід дозволяє вирішити проблему побудови складної системи з урахуванням усіх факторів і можливостей, які пропорційні їхній значимості на всіх станах дослідження технічної системи S і побудови моделі M . Системний підхід означає, що кожна система S є інтегрованим цілим навіть тоді, коли вона складається з окремих роз'єднаних підсистем. Тобто, в основі системного підходу лежить розгляд системи як інтегрованого цілого і починається цей розгляд з формулювання мети функціонування. Процес синтезу моделі технічної системи на базі системного підходу матиме вигляд, як на рис. 2.3, б. На основі вихідних даних D , які відомі з аналізу зовнішнього середовища E , врахування існуючих обмежень, які накладаються на систему та виходячи з можливостей їх реалізації, і на основі мети

функціонування формуються вихідні вимоги T до математичної моделі системи S . На базі цих вимог формуються деякі підсистеми P та їх елементи $\mathcal{E}$ та здійснюється найбільш складний етап синтезу – вибір B , для чого використовуються спеціальні критерії вибору KB .

З ускладненням об'єктів моделювання виникла необхідність спостереження за ними з вищого рівня. У цьому випадку дослідник (розробник) розглядає дану систему S як підсистему певної метасистеми (системи вищого рангу) і вимушений перейти на позиції системного підходу. Це дозволить йому побудувати не тільки досліджувану систему, що вирішує сукупність завдань, але й створювати систему, яка є складовою частиною метасистеми. Наприклад, якщо ставиться завдання проектування автоматизованої системи управління підприємством (АСУП), то з позиції системного підходу не можна забувати про те, що ця система може бути складовою частиною АСУП об'єднання або холдингу.

Системний підхід отримав застосування в системотехніці в зв'язку з необхідністю дослідження великих реальних систем, коли позначилась недостатність, а іноді помилковість ухвалення будь-яких локальних рішень. На виникнення системного підходу вплинула зростаюча кількість початкових даних при розробці, необхідність обліку складних стохастичних зв'язків у системі та дій зовнішнього середовища E . Усе це змусило дослідників вивчати складний об'єкт не ізольовано, а у взаємодії із зовнішнім середовищем, а також разом з іншими системами певної метасистеми.

Поняття системи та моделі взаємопов'язані. Модель являє собою обраний спосіб опису системи. Саме слово «модель» походить від латинського «modus» (копія, образ, опис). По суті, усім наукам в явній чи неявній формі притаманне поняття моделі, яка відбиває схожі риси досліджуваних явищ та об'єктів. Кожна дослідницька або проектна діяльність так чи інакше пов'язана з побудовою моделей. Проект машини, заводу, креслення деталі, макет автомобіля, трактора – це все моделі майбутніх реальних об'єктів. Вивчення явищ, які відбуваються в природі, економічній, політичній, технічній та громадській діяльності людей, також пов'язане з моделюванням.

Поняття моделі ґрунтується на певній подібності двох об'єктів. Проте слова «подібність» і «об'єкт» вживають у дуже широкому розумінні. Подібність може бути суто зовнішньою, вона може стосуватися внутрішньої структури зовні зовсім неподібних об'єктів або певних рис поведінки об'єктів, які не мають нічого спільного ні за формою, ні за структурою. Поняття подібності застосовують до багатьох матеріальних об'єктів живої та неживої природи, штучних об'єктів, створених людиною, зображень, символів тощо.

Зовнішню подібність (подібність форми) мають такі об'єкти, як автомобіль та його зображення у вигляді малюнка, об'ємної моделі чи комплекту креслень, металевий виливок та його дерев'яна модель. Подібність структури можуть мати система керування державою та її структурна схема; міська водогінна мережа і схема водопостачання. Для систем управління найважливішою схожістю є подібність їхньої поведінки. Моделювання поведінки ґрунтується на тому факті, що однаково поводитися за певних умов можуть системи, які дуже відрізняються за формою, структурою й фізичною природою наявних у них процесів.

Коли між двома об'єктами можна виявити подібність хоча б в якомусь одному певному розумінні, то між ними є відношення оригіналу й моделі. Це означає, що один з об'єктів можна розглядати як оригінал, а другий – як його модель. Відношення «оригінал – модель» можуть мати не тільки два, але й скільки завгодно об'єктів.

Моделлю називають відображення певних (деяких) характеристик об'єкта з метою його вивчення.

Модель дозволяє з усієї різноманітності проявів досліджуваного об'єкта вирізняти тільки ті, які необхідні з погляду розв'язування проблеми. Модель – не точна копія об'єкта, а відображення лише певної частини його властивостей. Тому, головне завдання моделювання – розумне спрощення моделі, тобто вибір ступеня подібності та об'єкта. Подібність – це взаємно однозначна відповідність між двома об'єктами, коли відомі функції переходу від параметрів одного з них до параметрів іншого, а математичні описи цих об'єктів можна перетворити на тотожні.

Під час проектування дослідник оперує не з самими об'єктами, а з їх моделями, тому моделювання є апаратом і засобом створення проекту складної технічної системи. У широкому розумінні, моделюванням – це процес адекватного відображення найпростіших властивостей досліджуваного об'єкта чи явища з точністю, необхідною для практичних потреб. У загальному випадку моделюванням можна назвати особливу форму опосереднення, яка ґрунтується на формалізованому підході до дослідження системи.

Отже, **моделювання** – це процес зображення об'єкта дослідження подібною до нього моделлю і виконання експериментів з нею для одержання інформації про об'єкт дослідження.

Моделі можна реалізувати як фізичними, так і абстрактними системами. Відповідно до цього є фізичні та абстрактні моделі.

Фізичні моделі складаються із сукупності матеріальних об'єктів. Для їх побудови використовують різні фізичні властивості об'єктів, але застосовувані в моделі матеріальні елементи не обов'язково повинні мати таку саму природу, що й досліджуваний об'єкт. Приклад фізичної моделі – макет машини, приладу, споруди, електрична модель об'єкта чи явища. Проте фізичні моделі мають обмежену сферу застосування, бо не для кожного явища та об'єкта можна побудувати аналоги. Варто назвати виробничі процеси, організаційні системи тощо.

Абстрактна модель – це опис досліджуваного об'єкта певною мовою. Абстрактність моделі виявляється в тому, що її компонентами є поняття, а не фізичні елементи. Наприклад, словесні описи, креслення, схеми, графіки, таблиці, алгоритми або програми, математичні описи. Абстрактні моделі поділяють на гносеологічні, інформаційні, сенсуальні, концептуальні й математичні.

Гносеологічні моделі спрямовано на вивчення об'єктивних законів природи, приміром, моделі сонячної системи, біосфери, світового океану, катастрофічних явищ природи.

Інформаційні моделі описують поведінку об'єкта – оригіналу, але не копіюють його.

Сенсуальні – це моделі якихось почуттів, емоцій або моделі, що впливають на почуття людини, наприклад малярство, музика, поезія.

Концептуальна – це абстрактна модель, яка виявляє причинно-наслідкові зв'язки, притаманні досліджуваному об'єкту, істотні в межах певного дослідження. Основне її призначення – виявлення набору причинно-наслідкових зв'язків, які необхідно урахувати для одержання потрібних результатів. Один і той самий об'єкт можна подавати різними концептуальними моделями, що їх будують залежно від мети дослідження.

Математичною моделлю системи називають її опис формальною мовою, що дозволяє робити висновки про певні риси поведінки цієї системи за допомогою формальних процедур над її описом.

Оскільки математичний опис не може бути всеосяжним та ідеально точним, то математичні моделі описують не реальні системи, а їх спрощені (гомоморфні) моделі. Математична модель має форму функціональних залежностей між параметрами, що їх урахує відповідна концептуальна модель. Ці залежності конкретизують причинно-наслідкові зв'язки, виявлені в концептуальній моделі, які і характеризують їх кількісно.

Математична мова може бути аналітичною (рівняння), графічною (графіки, структурні схеми, графи), матрицевою й табличною.

Наприклад, графік залежності затухаючих синусоїдних коливань від часу є абстрактною моделлю вільних коливань маятника, яка може бути представлена графічною мовою опису. Різні досліджувані явища можуть мати однаковий математичний опис. Наприклад, електричний коливальний контур і пружинний маятник описують однаковими рівняннями.

Створюючи модель, дослідник вирізняє її як об'єкт вивчення з навколишнього середовища і будуватиме її формальний опис відповідно до поставленої мети, завдань та наявних можливостей. Надалі він аналізує систему через поведінку, властивості й стан моделі, можливі зміни, дозволені й заборонені форми існування тощо.

2.3. Об'єкт моделювання – технічна система

Для загального опису технічної системи зручно користуватись кібернетичним підходом, пов'язаним з поняттям "чорна скринька" (рис. 2.3) [].

У ролі технічної системи можуть бути фізичні та абстрактні (віртуальні) об'єкти, процеси та ін. Так, процес – це об'єкт, в якому внутрішня будова невідома при розгляді системи, а дослідник спостерігає тільки за вхідними й вихідними процесами.

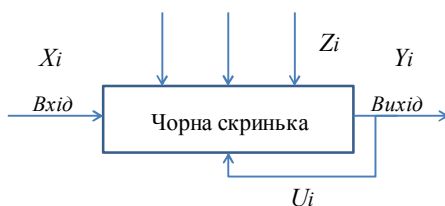


Рис. 2.3. Кібернетична модель технічної системи

Прикладом характерних технічних систем і функцій, що вони виконують, є дві характерні технічні системи (рис. 2.4).

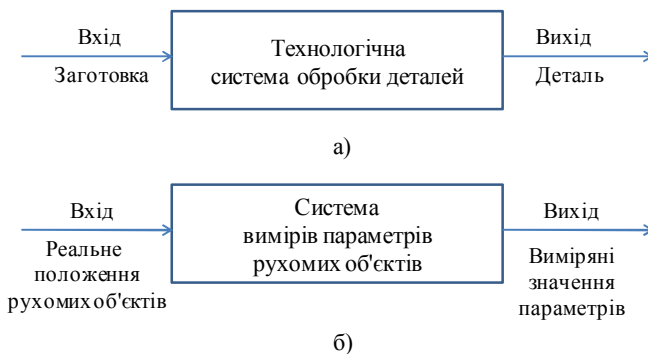


Рис. 2.4. Приклади технічних систем:
а) оброблювальна система; б) вимірювальна система

При математичному моделюванні представлених на рис.2.4 технічних систем математична модель повинна мати такі структурні елементи:

обмеження системи – граничні значення, які накладаються на параметри функціонування технічної системи;

цільову функцію, яка виражає залежність ефекту функціонування технічної системи від параметру, що регулюється;

вхідні параметри – сукупність вхідних показників процесу, які визначають зміст та властивості технічної системи при її моделюванні;

вихідні параметри – кількісні та якісні показники системи (продуктивність, точність, якість, собівартість), які характеризують функціонування системи та залежать від сумарної дії зовнішніх факторів, вхідних параметрів;

управляючі параметри – чинять пряму дію на нестабільність і дозволяють керувати роботою технічної системи;

збурюючі параметри – постійно вимірювані параметри, які впливають на вихідні параметри.

Під **об'єктом моделювання** розуміють технічну систему, яка підлягає вивченню або оптимізації. Основною властивістю об'єкта дослідження є його складність, яка визначається кількістю станів, у яких може знаходитись об'єкт. Різний стан технічної системи відповідає, за задумом відтворення, деталі з визначеними властивостями (точність, жорсткість поверхні та ін.).

Структурна схема об'єкту моделювання наведена на рис.2.5.

У загальному вигляді математична модель об'єкту записується таким чином:

$$Y = F(X, Q), \quad (2.1)$$

де Y – вектор вихідних параметрів $Y = (y_1, y_2, \dots, y_j)$; Q – вектор внутрішніх параметрів $Q = (q_1, q_2, \dots, q_m)$; X – вектор зовнішніх (вхідних) параметрів $X = (x_1, x_2, \dots, x_i)$.

Потрібно пам'ятати, що будь-який об'єкт не може існувати відособлено, без взаємозв'язку з іншими об'єктами (навколишнім середовищем). Для процесу різання елементами навколишнього

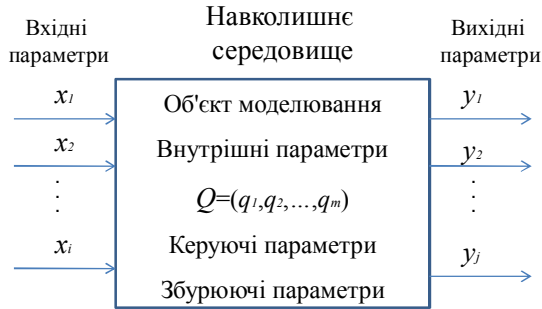


Рис. 2.5. Структурні елементи об'єкту моделювання

середовища є оброблюваний та інструментальний матеріали, змащувально-охолоджуюча рідина, стружка, що утворюється в результаті обробки та ін. При виконанні технологічного процесу – це технологічне обладнання, ріжучий інструмент, елементи пристосування та ін. Для технологічної системи (механічної ділянки з універсальних верстатів або верстатів з ЧПК, автоматичної лінії та ін.) елементами навколишнього середовища будуть інші технологічні системи, цеховий транспорт тощо.

Важливою характеристикою об'єкта дослідження є його керованість. *Керованим* є такий об'єкт, який дослідник може перенести в будь-який із станів і підтримувати його на протязі певного часу з заданою точністю. Об'єкти, для яких вказана вимога не виконується є *некерованими*.

Властивість керованості об'єкта дозволяє проводити так звані “активні” експерименти, які полягають в безпосередньому впливу на об'єкт за бажанням експериментатора. “Активний експеримент найчастіше використовується в лабораторних дослідженнях.

У більшості випадків функціонуючі промислові об'єкти не забезпечують можливості активного впливу. У такій ситуації здійснюється пасивне спостереження за об'єктом і фіксація зацікавлених параметрів без прямого впливу на їх, тобто здійснюється “пасивний” експеримент. Іноді можливо досліджувати роботу діючих промислових об'єктів в різних станах, близьких за значенням, тобто експериментатор може “варіювати”

об'єкт навколо одного з його станів. Такий експеримент називають активно-пасивним, а планування експериментів на промислових об'єктах – еволюційним.

Важливою властивістю об'єкта дослідження є ступінь відтворення результатів, для оцінки якої необхідно при одному й тому ж стані об'єкта у різні моменти часу провести декілька серій експериментів, які в плануванні експерименту прийнято називати паралельними. Для виключення впливу на результати різних похибок, пов'язаних з порядком проведення експериментів у серії, номер експерименту назначається випадково.

Для математичного моделювання будемо використовувати математичні моделі об'єкту дослідження. Під математичною моделлю розуміють рівняння, яке пов'язує параметр оптимізації з факторами. Це рівняння в загальному вигляді можна записати так:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k), \quad (2.2)$$

де k – кількість факторів, а символ $f(X)$ замінює слова “функція від”. Така функція називається функцією відгуку.

Кожний фактор може набувати під час експерименту одне з декількох значень. Такі значення називають рівнями. Фактор може приймати нескінченно багато значень (нескінченний ряд), але на практиці точність, з якою виявляються ці значення не безмежна. Тому можна вважати, що будь-який фактор має визначену кількість дискретних рівнів.

Фіксована кількість рівнів факторів (встановлення кожного фактора на певний рівень) визначає одне з можливих станів “чорної скриньки”. Одночасно це є умови проведення одного з можливих експериментів. Якщо перебрати всі можливі варіанти станів, то отримаємо безліч різних станів даної “скриньки”. Одночасно це буде можлива кількість різних експериментів.

Щоб визначити кількість різних станів, достатньо кількість рівнів факторів піднести до степеня кількості факторів k :

$$N = p^k, \quad (2.3)$$

де N – кількість станів; p – кількість рівнів.

Проте при плануванні експерименту не байдуже, які властивості має об'єкт дослідження. Вкажемо основні вимоги, з якими доводиться рахуватись. По-перше, суттєво, чи відтворюються на об'єкті результати експерименту. Виберемо деякі рівні для всіх факторів і в цих умовах проведемо експеримент. Потім повторимо його декілька разів через нерівні проміжки часу та порівняємо значення параметру оптимізації. Розкид цих значень характеризує відтворення результатів. Якщо він не перевищує заданої величини (наших вимог до точності експерименту), то об'єкт задовольняє вимозі відтворення, а якщо перевищує – то не задовольняє. Ми будемо розглядати лише такі об'єкти, для яких вимога відтворення здійснюється.

Планування експерименту передбачає активне втручання в процес і можливість вибору в кожному експерименті тих рівнів факторів, які викликають інтерес. Такий експеримент називається активним. Об'єкт, на якому можливий активний експеримент називають керованим. Це друга вимога до об'єкта дослідження.

Поняття “об'єкт дослідження ” потребує точного формального визначення. Для цього запропоновано використовувати кібернетичне поняття “чорної скриньки ” – модель об'єкта. Експериментатор, який почав використовувати методи планування експерименту, повинен вміти формулювати свою задачу в термінах “чорної скриньки ”.

Входи “чорної скриньки ” називаються факторами. Кожен фактор може приймати визначену кількість різних значень – рівнів. Сполучення визначених рівнів всіх факторів визначає можливий стан “чорної скриньки ” та умови одного з можливих експериментів.

Сукупність усіх можливих станів визначає складність “чорної скриньки ” та загальну кількість можливих експериментів.

Результати експерименту використовуються для відтворення математичної моделі об'єкту дослідження, що має вигляд рівняння, яке пов'язує параметри оптимізації та фактори. Таке рівняння називають функцією відгуку.

Використання всіх можливих експериментів для отримання моделі приводить до абсурдно великої їх кількості. Задача вибору необхідної кількості експериментів, методів математичної обробки їх результатів та прийняття рішень є задачею планування

експерименту. Частковий випадок цієї задачі – планування екстремального експерименту, тобто експерименту, поставленого з метою пошуку оптимальних умов об'єкту, при яких він функціонує. Планування екстремального експерименту – метод вибору мінімальної кількості експериментів, необхідних для пошуку оптимальних умов.

2.4. Аналіз та класифікація факторів

Після вибору параметрів оптимізації приступають до вибору засобів впливу на об'єкт дослідження, тобто факторів – незалежних змінних величин, які можуть впливати на об'єкт дослідження.

Фактором називають засіб впливу на об'єкт дослідження, тобто змінну величину, яка вимірюється та набуває визначеного значення у певний момент часу. Кількість факторів при технічних дослідженнях практично необмежена, що різко збільшує кількість дослідів і витрат на їх проведення.

Як і параметр оптимізації, кожний фактор має область визначення, схема якої представлена на рис. 2.6.

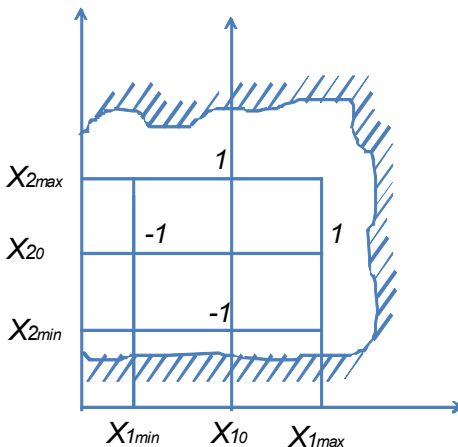


Рис. 2.6. Схематичне зображення області визначення факторів

Будемо вважати, що фактор задано, якщо разом з його назвою вказана область його визначення.

Під областю визначення розуміють сукупність усіх значень, які може приймати даний фактор.

Область визначення може бути безперервною та дискретною. На практиці задачі області визначення факторів, як правило, обмежені. Обмеження можуть мати принциповий, технічний

або техніко-економічний характер.

Принципові обмеження – це такі обмеження, які не можуть

бути порушеними ні за яких обставин.

Технічні обмеження попереджають про можливість пошкодження окремих елементів технічної системи. Технічні обмеження визначаються конкретними умовами проведення процесу, наприклад, обладнанням, технологією та ін. (на метало-оброблювальному верстаті моделі 1K62 мінімальна кількість обертів шпинделя $n = 12,5$ об/хв., а максимальна кількість обертів $n = 2000$ об/хв.).

Техніко-економічні міркування враховують витрати на проведення експериментів або виходять з реальних можливостей конкретного виробництва чи лабораторії (наявність устаткування, інструмента, оснащення, апаратури, характеру досліджуваного процесу).

В області визначення фактор може мати декілька значень, які відповідають кількості його станів. Такі фіксовані значення фактора називаються рівнями варіювання.

У загальному випадку рівнів варіювання може бути скільки завгодно. Вони визначається постановкою задачі, видом фактора, точністю його фіксування, передбачуваною складністю об'єкта. Тоді загальну кількість різних станів об'єкту чи процесу, що реалізуються при їх дослідженні (загальну кількість експериментів N), можна визначити за такою залежністю:

$$N = \prod_{i=1}^k p_i, \quad (2.4)$$

де k – кількість досліджуваних факторів; p_i – кількість рівнів варіювання i -го фактора.

Якщо всі фактори мають однакову кількість рівнів варіювання, тобто $p_i = p$, то формула (2.3) має вигляд (2.2).

Аналіз цих залежностей показав, що зі збільшенням k різко зростають загальна кількість серій дослідів N та витрати на їх проведення. Тому, якщо $k > 10$, то треба застосовувати різні статистичні методи з відсіювання несуттєвих факторів.

Різниця між двома значеннями фактора називається інтервалом варіювання. Його величина залежить від задач дослідження й точності вимірювальної апаратури. Надмірне збільшення чи зменшення інтервалу варіювання призводить до ускладнення плану експерименту й зниження ефективності пошуку оптимуму.

Експериментальні фактори – це розмірні величини, що мають різну розмірність та істотно відрізняються за абсолютною величиною. Використання їх під час аналізу результатів експерименту значно збільшує обсяг обчислювальних робіт і ускладнює інтерпретацію знайденої математичної моделі. Тому експериментальні фактори підлягають попередньому кодуванню, що є лінійним перетворенням досліджуваного факторного простору.

Фактори можна поділити на:

- 1) керовані та некеровані;
- 2) кількісні та якісні.

Усі змінні, що визначають поведінку й стан досліджуваної технічної системи незалежно від їх фізичного змісту поділяють на групи, як це показано на рис. 2.7.

1. Керовані фактори $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$, за допомогою яких заданий технічний режим реалізується й підтримується сталим на протязі необхідного часу. До них належать **режими різання при механічній обробці деталі на металооброблювальному верстаті (глибина, подача, швидкість різання), геометричні параметри різального інструмента та ін.**

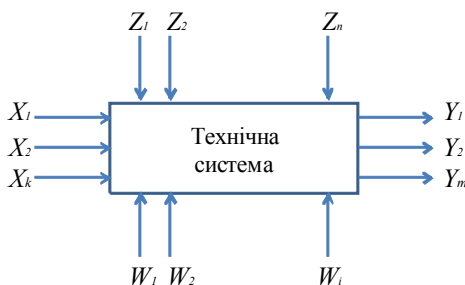


Рис. 2.7. Фактори, що впливають на технічну систему

2. Некеровані контрольовані фактори $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$, які характеризують якість сировини чи проміжних продуктів, можливості технічних систем та підсистем. Вони не припускають цілеспрямованої зміни в ході експерименту.

Початкову інформацію про значення цих змінних отримують у

процесі попередніх досліджень та лабораторних аналізів.

Змінні X та Z утворюють єдину групу контрольованих незалежних факторів досліджуваного процесу.

3. Некеровані неконтрольовані фактори ($W = w_1, w_2, \dots, w_l$), дію яких не можна врахувати під час експериментів. Під дією цих факторів істотно збільшується розсіювання результатів, тобто знижується точність і спостерігається безперервна повільна зміна параметрів досліджуваного процесу та об'єкта.

Прикладом некерованого фактора є температура зовнішнього оточення (ми ще не навчилися робити погоду за замовленням). При плануванні експерименту фактори повинні бути керованими.

Залежно від способу опису всі фактори поділяються на кількісні та якісні.

Кількісні фактори – це змінні величини, які можна оцінити кількісно, тобто виміряти, зважити.

Якісні фактори – це змінні, які характеризуються якісними властивостями. До них належать оброблювані та інструментальні матеріали, мастильно-охолодні рідини, способи обробки, оператор, тип устаткування, технологічного оснащення чи експериментальна установка та ін.

Хоча цим факторам не відповідає числова шкала, але в деяких випадках їх можна трансформувати в кількісні, використовуючи умовну порядкову шкалу, числа якої відповідають рівням якісного фактора.

У деяких випадках межа між поняттям якісного та кількісного фактора дуже умовна.

2.5. Властивості експериментальних факторів

Експериментальні фактори мають задовольняти певні вимоги, тобто бути керованими, однозначними, сумісними й незалежними.

Керованість гарантує можливість вибору та підтримування потрібного значення експериментального фактора на протязі усього дослідження, тобто дає можливість активно й безпосередньо впливати на об'єкт дослідження. Поява некерованих факторів значно збільшує помилку експерименту, створює велике

“шумове” поле, спричиняє безперервну зміну досліджуваних факторів, що призводить до тимчасового дрейфу параметра оптимізації. Тому під час дослідження потрібно врахувати й оцінити вплив якомога більшої кількості некерованих контрольованих факторів, що гарантує підвищення якості й точності дослідження.

У процесі досліджень бажано оперувати однозначними факторами, які характеризують безпосередній вплив на об'єкт, оскільки керувати складними факторами (відношенням довжини вильоту заготовки до її діаметра або логарифмом будь-якої величини) важче. Проте складні фактори також можуть брати участь в експерименті.

Особливо важливою є вимога сумісності факторів, коли всі потрібні комбінації рівнів досліджуваних факторів можна безпечно реалізувати на практиці. Несумісність факторів звичайно спостерігається на межах областей їх визначення, а тому позбутись її в цих випадках можна лише за рахунок скорочення намічених областей визначення. Якщо несумісність факторів виявляється всередині областей визначення, то для її усунення необхідно розбити цю область на підобласті й розв'язати кілька паралельних задач.

Вимога незалежності факторів передбачає можливість їх фіксації на будь-якому взятому рівні незалежно від рівнів інших факторів, тобто не повинно існувати лінійної кореляції між факторами. Введення в експеримент кореляційних факторів, наприклад, сукупності кутів різця в плані (φ , φ_I , ε) не сприяє отриманню нової інформації, оскільки один із факторів ($\varepsilon = 180 - (\varphi + \varphi_I)$) не дає жодних додаткових відомостей про досліджуваний об'єкт, але збільшує витрати часу й матеріалів. Тому, щоб оцінити тісноту лінійного зв'язку між досліджуваними факторами, можна скористатися кореляційним аналізом.

Отже, фактори – це змінні величини, які відповідні засобам впливу зовнішнього середовища на об'єкт. Вони визначають, як сам об'єкт, так і його стан. Вимоги до факторів: керованість та однозначність.

Керувати фактором – означає встановити потрібне значення та підтримувати його сталим під час експерименту або змінювати

по заданій програмі. У цьому полягає особливість “активного” експерименту. Планування експерименту можливе лише у випадку, коли фактори підпорядковуються рішення експериментатора.

Фактори повинні безпосередньо впливати на об'єкт дослідження. Важко керувати фактором, якщо він є функцією інших змінних, але в плануванні експерименту можуть приймати участь складні фактори, такі, як логарифми, співвідношення та ін.

Вимогами до сукупності факторів є сумісність та відсутність лінійної кореляції. Обрана кількість факторів повинна бути достатньо повною. Якщо будь-який суттєвий фактор пропущено, то це призведе до неправильного визначення умов або до великої похибки експерименту. Фактори можуть бути кількісні та якісні.

Точність фіксування факторів повинна бути високою. Значення точності визначається діапазоном зміни факторів.

Склад і кількість факторів визначає розмірність факторного простору, що вивчається. Тому, вибір факторів – дуже відповідальний етап при підготовці до планування експерименту. Від вдалого вибору залежить успіх оптимізації, отримання достовірних та адекватних результатів.

Так, наприклад, будь-який процес механічної обробки треба розглядати як складну технічну систему, на яку впливає багато різних факторів. Сила їх впливу на досліджувані вихідні параметри (продуктивність, точність, собівартість) різна й апіорі невідома. Тому в програму досліджень спочатку треба ввести всі фактори, виявлені на етап аналізу літературних та виробничих даних, які мають будь-який вплив на вихідні параметри.

Докладно вивчити всі ці фактори практично неможливо через потребу проведення великої кількості експериментів та невиправданої витрати часу й матеріалів. Усунення зазначених недоліків потребує попереднього оцінювання сили впливу кожного фактора й формування на цій основі групи найістотніших факторів, які треба всебічно дослідити на подальших етапах.

Інтуїтивний добір істотних факторів досить суб'єктивний і може призвести до помилкових результатів. Тому зараз на етапі попереднього дослідження широко використовуються статистичні методи підбору факторів, до яких належать:

- методи експертних оцінок, які ґрунтуються на статистичній обробці даних, отриманих в результаті опитування спеціалістів або

аналізу наукових досліджень;

– експериментальні методи, за допомогою яких можна оцінити внесок кожного фактора та їх взаємодій за результатами попередньої серії дослідів.

Точність статистичних висновків залежить від обсягу експериментальних робіт, що визначається типом взятого плану, кількістю проаналізованих факторів та їх взаємодій.

На етапі попередніх досліджень найчастіше використовуються ненасичені й наднасичені плани.

Ненасичені плани, для яких кількість ступенів волі $f > 0 (f = N - k' > 0)$, де N – загальна кількість серій дослідів, k' – кількість значущих коефіцієнтів), дають можливість окремо оцінити значущість усіх досліджуваних факторів та їх взаємодій, але потребують проведення досить великої кількості експериментів.

До цієї групи планів належать різні дисперсійні плани а також повний і частковий факторні експерименти.

Насичені плани ($f = N - k' = 0$) дозволяють оцінити значущість усіх лінійних коефіцієнтів рівняння регресії та потребують постановки такої кількості експериментів, яка строго відповідає кількості оцінюваних лінійних ефектів, включаючи вільний член. До цих планів належать плани Плакетта-Бермана, а також насичені репліки повного факторного експерименту.

Наднасичені плани забезпечують визначення істотних лінійних ефектів та парних взаємодій при від'ємній кількості ступенів свободи ($f = N - k' < 0$), тобто коли кількість досліджуваних факторів та їх взаємодій перевищує кількість дослідів. При цьому різко скорочуються витрати на проведення експериментів, але збільшується помилка визначення значущих коефіцієнтів рівняння регресії.

2.6. Методи відбору факторів експериментів

При відборі факторів потрібно вирішувати компромісну оптимізаційну задачу, яка витікає з мети розробки математичної моделі. З одного боку, дослідник прагне розглянути якомога більше факторів, з іншого – не можна включати до розгляду всі фактори, тому що буде отримана дуже складна модель

(беруться до уваги найбільш значимі фактори). Відомо три основні методи проведення відсіюючих експериментів:

1. Метод рангової кореляції.
2. Метод дисперсного аналізу.
3. Метод випадкового балансу.

Коротко розглянемо кожний з цих методів.

Метод рангової кореляції більш економічний з точки зору затрат матеріальних і трудових ресурсів, оскільки базується на систематизації апріорної інформації, яку одержують із літературних довідників та з опитування фахівців. При методі рангової кореляції не потрібно виконувати натурні чи машинні експерименти, достатньо, так званого, психологічного експерименту.

Метод рангової кореляції виконують у такій послідовності:

1. Порівняльна оцінка впливу факторів починається з розробки анкети опитування фахівців. Вводиться операційне визначення фактора, яке містить абсолютне значення (номінал), розмірність, точність зміни даного фактора, інтервал зміни фактора, наявність інших факторів.

2. Заповнення анкети шляхом очного чи заочного опитування фахівців. Вони розташовують фактори в порядку спадання дії на технічну систему (ранжування факторів).

3. Систематизація отриманої інформації: перевірка коректності відповідей та заповнення загальної анкети (табл.2.1).

Таблиця 2.1

Обробка результатів опитування

Фахівці, які опитувались	Фактори				
	X_1	X_2	X_3	...	X_k
1. Петров А.В.					
2. Іванов М.М.					
3. Козлов П.М.					
...					
т. Симонов Р.В.					
Сума рангів $A = \sum a_{ij}$					
Відхилення від середньої суми рангів $\Delta j = A_j - T$					
Квадрати відхилень Δj^2					

4. Обробка результатів здійснюється в такій послідовності:
а) за кожним фактором визначається сума рангів:

$$A = \sum_{i=1}^m a_{ij}, \quad (2.5)$$

де a_{ij} – ранг j -го фактора за думкою i -го фахівця; m – кількість всіх фахівців, які опитувались;

- б) визначається середня сума рангів:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k a_{ij}}{k}, \quad (2.6)$$

де k – кількість факторів, які включені в анкету;

- в) визначення ступеню відповідності думок фахівців за коефіцієнтом конкордації W :

– для не зв'язаних рангів:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (k^3 - k)}, \quad (2.7)$$

де S – сума квадратів відхилень:

$$S = \sum_{i=1}^m \Delta_{ji}^2, \quad (2.8)$$

– для зв'язаних рангів:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} \cdot m^2 \cdot (k^3 - k) - m \cdot \sum_i T_i}, \quad (2.9)$$

$$T_i = \frac{1}{12} \cdot \sum_j (t_j^3 - t_j), \quad (2.10)$$

де $t_j - j$ -е число однакових рангів в i -му ранжуванні.

W показує ступінь взаємозв'язку ранжованими рядами і має такі властивості: змінюється від 0 до 1. При $W \rightarrow 0$ – зв'язок між рядами слабкий, $W = 0$ – зв'язок відсутній, $W \rightarrow 1$ – усі ряди проранжовані однаково. Значення W говорить про наявність або відсутність зв'язку між думками спеціалістів.

г) перевірка W за χ^2 -критерієм:

$$\chi^2 = m \cdot (k - 1) \cdot W. \quad (2.11)$$

Для 5%-го рівня значущості та кількості ступенів волі $f = k - 1$, де f – кількість ступенів волі. Розрахункове значення порівнюють з табличним.

$$P = \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) \cdot 100\%, \quad (2.12)$$

де P – ймовірність, α – рівень значимості. У технічних дослідях користуються $\alpha = 5 - 20\%$.

Якщо $\alpha = 5\%$, то $P = 95\%$, якщо $\alpha = 20\%$, то $P = 80\%$.

Якщо χ^2 табличне менше за χ^2 , то з прийнятою ймовірністю можна констатувати, що існує визначення відповідності думок фахівців відносно ступеню впливу факторів на параметр, що досліджується.

д) визначаємо відповідність фахівців за кожним фактором.

Для зменшення кількості факторів:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{k_1} (n_i - p_i)^2}{p_i} \quad (2.13)$$

де k_1 – кількість інтервалів рангу; p_i – теоретично очікувані частоти для нуль-гіпотези про рівномірне ранжування; n_i – частоти для факторів, що спостерігаються (кількість рангів, які попадають в даний інтервал).

Метод дисперсійного аналізу потребує виконання певних

статистичних вимог:

1. Розсіювання параметра оптимізації **підкоряється** закону нормального розподілу Гауса.

2. Дисперсії, що характеризують розсіювання випадкової змінної, у кожній серії однорідні.

Однорідність дисперсій ω перевіряється розрахунком критеріїв та порівнянням його значення з табличним при вибраному рівні достовірності

$$\omega = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^q a_{n-i+1} [y_{n_i(n-i+1)} - y_{n_i}] \right\}^2}{\sum_{i=1}^{n_u} y_{n_0}^2 - \frac{\sum_{i=1}^{n_q} y_{n_i}}{n_u}} \quad (2.14)$$

де a_{n-i+1} – коефіцієнт, значення якого задані в таблиці залежності кількості паралельних дослідів та кількості серії дослідів;

$q = n_u / 2$ – при парній кількості паралельних дослідів;

$q = (n_u - 1) / 2$ – при непарній;

y_{n_i} – величини із ранжованої вибірки значень залежної змінної для кожної серії дослідів, тобто $y_{n_1} \leq y_{n_2} \leq \dots \leq y_{n_n}$.

Якщо $\omega_n \geq \omega_{табл}$ для вибраної ймовірності α , то гіпотеза приймається, якщо $\omega_n \leq \omega_{табл}$, то гіпотеза заперечується.

Перевірка гіпотези про однорідність дисперсії при $n_n = \text{const}$ може здійснюватися за допомогою G -критерія Кохрена:

$$G = \frac{S_{n \max}}{\tau \cdot S_n^2}, \quad (2.15)$$

де S_n^2 – дисперсія для кожної n -ї серії дослідів; $S_{n \max}^2$ – максимальне значення дисперсії для даних досліджень.

Знаходимо просторові дисперсії S_n :

$$S_n = \frac{1}{r-1} \cdot \sum_{j=1}^n (y_{n_j} - y_n)^2, \quad (2.16)$$

де y_{nj} – результат вимірювання параметра оптимізації n -ї строки та j -го стовпчика; y_n – середнє значення результатів досліджень для n -го дослідю.

При $G_{\text{табл}} > G$, при вибраній імовірності α та заданому об'ємі кількості дослідів та кількості ступенів волі $f = n - 1$ гіпотеза однорідності дисперсії приймається.

При $G_{\text{табл}} < G$ гіпотеза однорідності дисперсії не приймається.

Перевірка дисперсії на однорідність при $n_n \neq \text{const}$ проводиться за критерієм Бартлета.

Метод випадкового балансу базується на застосуванні дисперсного аналізу та плануванні експерименту (за спеціальним планом). Фактори знаходяться на двох рівнях: верхньому та нижньому.

Кількість дослідів не перевищує досліджуваних факторів. Оцінку значення проводять за допомогою t - критерію Стюдента.

Визначають важливість дії факторів на параметр оптимізації.

Проводиться статистична оцінка ефективності впливу факторів.

Використовується оцінка середньоквадратичних і середньоарифметичних значень. Для визначення відмінностей між двома дисперсіями вираховують критерій Фішера:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}. \quad (2.17)$$

При $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$, де σ_1^2 та σ_2^2 – дисперсії, що порівнюються. F порівнюють з $F_{\text{табл}}$.

N_1 та N_2 – об'єми вибірок, які беруться до та після впровадження заходу. Для обрахунку середньоарифметичного значення використовується формула критерій Стюдента.

Якщо кількість вимірів більше 25, то маємо:

$$t_{\sigma} = \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{\sqrt{\frac{S_1^2}{2 \cdot N_1} + \frac{S_2^2}{2 \cdot N_2}}} . \quad (2.18)$$

Якщо $t_{\sigma} > 3$, то гіпотеза про рівність середньоквадратичних значень не приймається і захід вважається ефективним.

Контрольні питання

1. Які етапи включає життєвий цикл технічної системи?
2. Які основні вимоги PLM-рішень до технічних систем?
3. Що розуміють під концепцією PLM-рішень?
4. Що називається математичною схемою?
5. Які типові схеми використовуються під час моделювання технічних систем?
6. Які умови та особливості використання під час розробки моделей систем різних типових схем?
7. Що називається синтезом технічних систем?
8. У чому полягає суть системного аналізу?
9. Які є методи моделювання систем?
10. У чому суть імітаційного моделювання?
11. Що називається математичним моделюванням?
12. Як використовуються результати математичного моделювання?

3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

3.1. Класифікація математичних моделей

Математичні моделі будують на підставі встановлених дослідником законів та закономірностей, базуючись на теоріях та методах фундаментальних (фізика, математика, економіка й т. ін.) і прикладних наук (інформаційно-вимірювальні системи, гідравліка, інформаційні технології тощо). Математичні моделі можна згрупувати за допомогою трьох основних критеріїв:

- 1) поведінки моделей у часі;
- 2) виду вхідної інформації, параметрам і виразам, які складають математичну модель;
- 3) типу математичного апарату, що використовується.

Розглянемо детальніше класифікацію видів математичної моделі по кожному із вказаних критеріїв.

Критерій 1. Математичні моделі бувають:

- динамічними (час відіграє роль незалежної змінної й поведінка системи змінюється в часі);
- статичними (поведінка системи не залежить від часу);
- квазістатичними (поведінка системи змінюється від одного статичного стану до іншого залежно від зовнішнього впливу).

Критерій 2. Якщо елементи математичної моделі встановлені досить точно й поведінку системи можна визначити, то математична модель детермінована, в протилежному випадку – стохастична. Якщо інформація й параметри є безперервними величинами, а математичні зв'язки постійними, то математична модель безперервна, в протилежному випадку – дискретна.

Критерій 3. Математичні моделі можуть мати лінійні і нелінійні складові та розглядатись, залежно від математичної проблеми, як наступні типи:

- рівняння (алгебраїчні, диференціальні та ін.);
- апроксимаційні задачі (інтерполяції, екстраполяції, числового інтегрування та диференціювання);
- задачі оптимізації;
- стохастичні задачі.

Розглянуті види математичних моделей представлено на рис. 3.1.

Класифікація в будь-якій області знань надзвичайно важлива. Вона дозволяє узагальнити накопичений досвід, упорядкувати поняття предметної області. Не є виключенням у цьому значенні й математичне моделювання. У таблиці 3.1 представлені види математичних моделей за різними ознаками класифікації.

Наведена класифікація математичних моделей може бути застосована по відношенню до будь-яких об'єктів. Ми розглянемо особливості різних видів моделей стосовно об'єкту – технічна система.

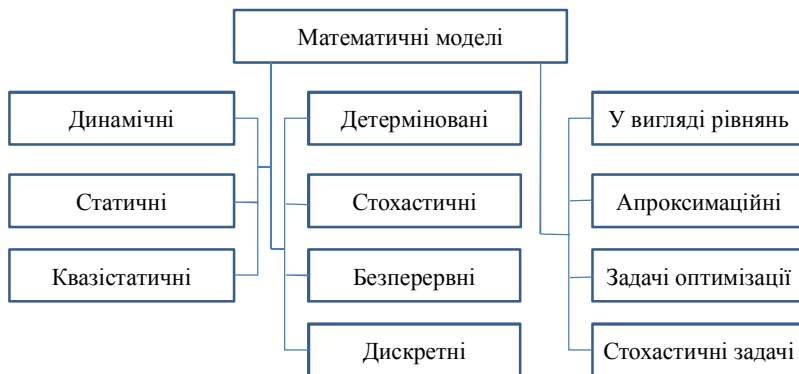


Рис. 3.1. Види математичних моделей

Математичні моделі на мікрорівні виробничого процесу відображають фізичні процеси, що протікають, наприклад, при різанні металів на рівні технологічного переходу (структурна частина операції).

Математичні моделі на макрорівні виробничого процесу описують в цілому технологічні процеси, як сукупність технологічних операцій.

Математичні моделі на метарівні виробничого процесу описують такі технологічні системи як ділянки, цехи та підприємство в цілому.

Структурні математичні моделі використовуються для відображення структурних властивостей об'єктів. Наприклад, для представлення структури технологічного процесу чи розцеховки виробів використовують структурно-логічні моделі [].

Таблиця 3.1

Класифікація математичних моделей

Ознаки класифікації	Види математичних моделей
1. Належність до ієрархічного рівня	1. Моделі мікрорівня 2. Моделі макрорівня 3. Моделі мета рівня
2. Характер властивостей об'єкту, що відображаються	1. Структурні 2. Функціональні
3. Спосіб представлення властивостей об'єкту	1. Аналітичні 2. Алгоритмічні 3. Імітаційні
4. Спосіб отримання моделі	1. Теоретичні 2. Емпіричні
5. Особливості поведінки об'єкту	1. Детерміновані 2. Стохастичні

Функціональні математичні моделі призначені для відображення інформаційних, фізичних, часових процесів, що протікають в працюючому обладнанні, в ході виконання технологічних процесів та ін.

Аналітичні математичні моделі є явними математичними виразами вихідних параметрів як функцій від параметрів вхідних та внутрішніх. Аналітичне моделювання засновано на непрямому описі модельованого об'єкту за допомогою набору математичних формул. Мова аналітичного опису містить наступні основні групи семантичних елементів: критерій (критерії), невідомі дані, математичні операції, обмеження. Найсуттєвіша характеристика аналітичних моделей полягає в тому, що модель не є структурно подібною об'єкту моделювання. Під структурною подібністю тут розуміється однозначна відповідність елементів і зв'язків моделі елементам і зв'язкам об'єкту моделювання. До аналітичних відносяться моделі, які побудовані на основі апарату математичного програмування, кореляційного, регресійного аналізу. Аналітичні моделі є ефективним інструментом для вирішення задач оптимізації процесів, які протікають в технічних системах, а також оптимізації і обчислення характеристик самих технічних систем.

Важливим моментом є розмірність конкретної аналітичної

моделі. Часто для реальних технічних систем (автоматичних ліній, комп'ютерних систем) розмірність їх аналітичних моделей така велика, що отримання оптимального рішення виявляється дуже складним з обчислювальної точки зору. Для підвищення обчислювальної ефективності в цьому випадку використовують різні прийоми. Один з них пов'язаний з розбиттям задачі великої розмірності на підзадачі меншої розмірності так, щоб автономні рішення підзадач в певній послідовності давали рішення основної задачі. При цьому виникають проблеми організації взаємодії підзадач, які не завжди виявляються простими. Інший прийом припускає зменшення точності обчислень, за рахунок чого вдається скоротити час вирішення задачі.

Алгоритмічні математичні моделі виражають зв'язки між вихідними параметрами і параметрами вхідними та внутрішніми у вигляді алгоритму.

Імітаційні математичні моделі – це алгоритмічні моделі, які відображають розвиток процесу (поведінка об'єкту дослідження) в часі при завданні зовнішніх дій на процес (об'єкт). Наприклад, це моделі систем масового обслуговування, які задані в алгоритмічній формі.

Імітаційне моделювання засновано на прямому описі об'єкту моделювання. Істотною характеристикою таких моделей є структурна подібність об'єкту та моделі. Це значить, що кожному істотному з погляду вирішуваної задачі елементу об'єкту ставиться у відповідність елемент моделі. При побудові імітаційної моделі описуються закони функціонування кожного елемента об'єкту та зв'язку між ними.

Робота з імітаційною моделлю полягає в проведенні імітаційного експерименту. Процес, що протікає в моделі в ході експерименту, подібний до процесу в реальному об'єкті. Тому дослідження об'єкту на його імітаційній моделі зводиться до вивчення характеристик процесу, що протікає в ході експерименту.

Важливою особливістю імітації є можливість керувати масштабом часу. Динамічний процес в імітаційній моделі протікає в так званому системному часі. Системний час імітує реальний час. При цьому перерахунок системного часу в моделі можна виконувати двома способами. Перший спосіб полягає в “русі” за часом з деяким постійним кроком. Другий спосіб полягає в “русі”

за часом від події до події, при цьому вважається, що в проміжках часу між подіями в моделі змін не відбувається.

Теоретичні математичні моделі *створюються в результаті дослідження об'єктів (процесів) на теоретичному рівні.* Наприклад, існують вирази для сил різання, які отримані на основі узагальнення фізичних законів. Але вони не прийнятні для практичного використання, оскільки дуже громіздкі та не зовсім адаптовані до реальних процесів обробки матеріалів.

Емпіричні математичні моделі *створюються в результаті проведення експериментів (вивчення зовнішніх проявів властивостей об'єкту за допомогою вимірювання його параметрів на вході та виході) і обробки їх результатів методами математичної статистики.*

Детерміновані математичні моделі *описують поведінку об'єкту з позицій повної визначеності в теперішньому часі і майбутньому.* Приклади таких моделей: формули фізичних законів, технологічні процеси обробки деталей і т.д.

Стохастичні математичні моделі *враховують вплив випадкових чинників на поведінку об'єкту, тобто оцінюють його майбутнє з позицій вірогідності тих або інших подій.* Приклади таких моделей: опис очікуваних довжин черг в системах масового обслуговування, очікуваних об'ємів випуску надпланової продукції виробничою ділянкою, точності розмірів в партії деталей з врахуванням явища розсіювання і т.д.

3.2. Вимоги до математичних моделей

Побудована математична модель технічної системи повинна відповідати наступним вимогам:

1. Достатній точності.
2. Адекватності.
3. Економічності та простоти.
4. Забезпечувати необхідну надійність.
5. Бути універсальною.
6. Мати стандартну форму.
7. Чіткості поставленого завдання.
8. Обов'язковому представленню взаємозв'язків і взаємозалежностей у формальному вигляді.

Розглянемо більш детально основні з цих вимог.

Точність математичної моделі оцінюється ступенем збігу значень вихідних параметрів реального об'єкту та значень тих же параметрів, які розраховані за допомогою моделі.

Припустимо, що відображені в математичній моделі властивості об'єкту оцінюються вектором вихідних параметрів $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$, y_{imm} – i -тий параметр, розрахований за допомогою математичної моделі, а y_{io} – дійсне значення того ж параметра.

Тоді відносна похибка математичної моделі за i – тим параметром буде дорівнювати:

$$E_i = \frac{|y_{imm} - y_{io}|}{y_{io}}. \quad (3.1)$$

За цією формулою розраховуються похибки для кожного вихідного параметра, в результаті отримаємо вектор похибок $E = (E_1, E_2, \dots, E_m)$. У цілому для математичної моделі похибка оцінюється таким чином:

$$E_{mm} = \max_{i=1, m} E_i, \quad (3.2)$$

Наприклад, оцінимо похибку для розглянутої вище математичної моделі. Вектор вихідних параметрів $Y = (P_X, P_Y, P_Z)$. Припустимо, що $E_{PX} = E_1 = 0,05$, $E_{PY} = E_2 = 0,07$, $E_{PZ} = E_3 = 0,03$, тоді в цілому похибка математичної моделі $E_{mm} = \max E_i = 0,07$.

Адекватність математичної моделі – це її здатність відображати задані властивості об'єкту з похибкою, не вище заданої.

Так як вихідні параметри моделі є функцією $Y=F(X,Q)$ від параметрів внутрішніх і вхідних, то й точність моделі залежить від їх значень. Адекватність моделі має місце в обмеженій області зміни внутрішніх і вхідних параметрів. Якщо позначити область адекватності як OA , то

$$OA = \{X, Q / E_{mm} \leq \delta\}, \quad (3.3)$$

де δ – задане число.

Економічність математичної моделі характеризується витратами обчислювальних ресурсів на її реалізацію. Якщо робота з математичною моделлю здійснюється вручну, то її економічність визначається витратами робочого часу проектувальника. Якщо модель використовується при автоматизованому проектуванні, то витратами машинного часу та пам'яті комп'ютера. Оскільки вказані величини визначаються характеристиками конкретного комп'ютера, то використовувати їх для оцінки економічності математичної моделі не коректно. Тому для оцінки економічності самої математичної моделі використовують інші величини:

1. Середня кількість операцій, що виконуються при одному зверненні до математичної моделі.
2. Розмірність системи рівнянь у математичній моделі.
3. Кількість внутрішніх параметрів, що використовуються в моделі й т.ін.

Надійність математичної моделі – забезпечення безпечної роботи з нею, правильність отриманих результатів, розумного інтервалу розбіжності результатів моделювання з реальними показниками технічної системи.

Універсальність математичної моделі характеризує повноту відображення в ній властивостей реального об'єкту. Математична модель відображає не все, а лише деякі властивості реального об'єкту. Наприклад, формули для сил різання не враховують температуру навколишнього повітря, вогкість, економічні параметри та ін.

Стандартність математичної моделі – необхідність використання відповідного математичного апарату, що дозволяє застосовувати його для групи однотипних технічних систем. У протилежному випадку використання універсальних машинних методів обробки математичної моделі за допомогою комп'ютера ускладнюється.

До математичних моделей пред'являється і цілий ряд допоміжних вимог, серед яких слід виділити наступні:

1. **Обчислюваність** тобто можливість ручного або за

допомогою комп'ютера дослідження якісних і кількісних закономірностей функціонування об'єкту (технічної системи).

2. Модульність тобто відповідність конструкцій моделі структурним складовим об'єкту (технічної системи).

3. Алгоритмізованість тобто можливість розробки відповідних алгоритму і програми, що реалізовує математичну модель на комп'ютері.

4. Наочність, тобто зручне візуальне сприйняття моделі користувачем.

Зазвичай модель виникає як необхідний етап рішення конкретної задачі. Проте надалі може відбуватися відособлення моделі від завдання і модель починає жити самостійно. Прикладом може служити сюжет руху з постійною швидкістю, який виникав в людській діяльності так часто, що врешті-решт відокремився від завдань і став таким, що становить фізичного знання, званого «рівномірний прямолінійний рух». Тепер при необхідності вирішити яку – або завдання, пов'язане з рівномірним рухом користуються цією готовою моделлю процесу. У одних завданнях результатом може виявитися час, в інших – пройдений шлях, в третіх швидкість. Решта параметрів моделі процесу стане початковими даними.

3.3. Структурні елементи математичних моделей

За своєю структурою математична модель має такі елементи:

1. Об'єкт моделювання – це суцільна технічна система або її складові структурні частини (підсистеми).

2. Постійні параметри – величини, які в процесі всього моделювання залишаються незмінними.

3. Змінні параметри – величини, значення яких потрібно знайти при вирішенні задачі за допомогою математичного моделювання.

4. Критерій оптимальності – прийнятий показник міри ефективності досліджуваної технічної системи, величина якого при екстремальному значенні цільової функції (максимальному чи мінімальному) визначає оптимальне рішення для заданих умов тобто оптимальне значення змінних параметрів моделі.

5. Обмеження – області можливих значень змінних умов при

заданих конкретних умовах технічної системи, що вивчається і для якої знаходиться найкраще (оптимальне) рішення.

6. Цільову функцію, яка зв'язує критерій оптимальності зі змінними та постійними параметрами. У процесі створення моделей відбувається пошук оптимального рішення та визначення таких значень змінних параметрів, які змінюють цільову функцію на максимум чи мінімум.

Розглянемо для прикладу математичне моделювання по плануванню виготовлення деталей на ділянці металорізальних верстатів. Модель має такий загальний вигляд:

$$F = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m d_{ij} x_{ij} \rightarrow \max \quad (3.4)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, k; \quad j = 1, 2, 3, \dots, m; \quad x_{ij} > 0 \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} d_{11}x_1 + \dots + d_{1m}x_m &\leq b_1; \\ d_{21}x_1 + \dots + d_{2m}x_m &\leq b_2; \\ d_{k1}x_1 + \dots + d_{km}x_m &\leq b_k; \end{aligned} \quad (3.6)$$

де F – загальна трудомісткість виготовлення усіх деталей у станко-годинах; m – кількість видів деталей; k – кількість груп обладнання; d_{ij} – норма часу (трудомісткість) на обробку j -го виду виробу на i -й групі обладнання, станко-години; x_j – кількість деталей j -го виду, що виготовляються; b_i – фонд часу роботи i -ї групи обладнання, станко-години.

Змінними параметрами в моделі є кількість деталей кожного виду, що виготовляються. Постійні параметри – це число виробів m , число груп обладнання n , норма часу на обробку кожного виду деталей на відповідній групі обладнання d_{ij} та фактичний час роботи кожної групи верстатного обладнання b_i .

Критерієм оптимальності в моделі являється загальна трудомісткість виготовлення усіх видів виробів F .

Рівняння (3.4) є цільовою функцією. Обмеженнями в моделі служать нерівності (3.5) і (3.6). Так, обмеження (3.5) говорить про те, що число деталей може бути рівним нулю або бути тільки

додатнім. Обмеження (3.6) відображає області оптимізації даної задачі та вказує на те, що трудомісткість обробки усіх видів деталей на даній групі обладнання не повинна перевищувати відповідного ліміту верстатного часу.

При побудові математичної моделі найбільш важливо правильно обрати параметри, умови їх обмежень та цільові функції. Наприклад, при обробці деталей на верстатах, основними параметрами є режими різання (v , s , t); жорсткість системи ВПД, геометричні параметри та стійкість різального інструменту та ін.

Основними обмеженнями є допустимі похибки розмірів, форми та взаємного розміщення поверхонь, що обробляються, а також вимоги до шорсткості поверхні, її зміцнення та ін.

Цільова функція, як правило, деякий узагальнюючий техніко-економічний показник. Він відображає кількісний та якісний вплив кожного з параметрів на критерій оптимальності.

При оптимізації процесу обробки деталей на верстатах у якості цільової функції може бути прийнята найменша технологічна собівартість, максимальна продуктивність та узагальнений показник найменших приведених затрат. У деяких випадках в якості цільової функції може бути прийнята допустима точність обробки та ін.

Таким чином, можемо сформулювати термін "математична модель технічної системи". **Математична модель технічної системи** – це сукупність математичних об'єктів (чисел, змінних, матриць, множин та ін.) та відношень між ними, яка адекватно відображає властивості, особливості та поведінку технічної системи, що цікавлять інженера, що розробляє або досліджує цю систему.

3.4. Параметри математичної моделі

Математична модель приблизно описує властивості досліджуваного об'єкту або технічної системи. При експериментально – статистичному методі отримання математичної моделі, виходячи з апіорної інформації, передбачають вид моделі. А за результатами експериментів, які поставлені за спеціально розробленими планами – матрицям планування (активний експеримент), визначають оцінки

теоретичних коефіцієнтів регресії.

При такому методі отримання моделей використовується кібернетичний підхід, приймаючи за модель піддослідного об'єкту "чорну скриньку" (див. рис. 2.4). Такий підхід найбільш формалізований та математично обумовлений до використовуваних методів і потребує меншого часу та витрат для розробки математичної моделі в порівнянні з теоретико-аналітичним.

Вибір вихідного параметру (параметру оптимізації) – визначає повноту характеристики модельованого об'єкта. Іще раз зауважимо, що математична модель лише приблизно описує окремі властивості технічної системи. Неможливо та й недоцільно розробляти математичну модель на всі випадки в житті.

Залежно від мети моделювання та виду технічної системи вихідні параметри можуть бути різноманітними. Це можуть бути показники якості деталі, складальної одиниці, машини або технологічного процесу по кожній операції окремо. Умовно їх можна поділити на:

- економічні показники;
- техніко-економічні показники;
- статистичні показники.

До економічних показників можна віднести економічну ефективність використання технологічного процесу, собівартість виробництва виробу, рентабельність, витрати та ін.

Найбільш розповсюдженими техніко-економічними показниками є:

- продуктивність;
- параметри якості продукції (точність, шорсткість, фізико-механічний стан поверхневого шару та ін.);
- кількісні характеристики технологічного процесу (відсоток браку, стійкість ріжучого інструменту та ін.).

Статистичні параметри часто використовують під час моделювання точності продукції, що випускається, стабільності роботи технічних систем, визначення шорсткості, мікротвердості тощо, тобто в якості вихідного параметру розглядають статистичну характеристику (дисперсія або математичне очікування) цього параметру, а не його поточне значення.

Розглянемо які вимоги висуваються до вихідного параметру (оптимізації) під час розробки математичних моделей технологічних процесів. По-перше, він повинен мати кількісну оцінку, тобто задаватись визначеним числом і вимірюватись за будь-якої зміни технологічного процесу. При неможливості визначити в кількісному виді доводиться використовувати ранговий підхід за допомогою суб'єктивних рангових критеріїв (сильно, помірно, слабо, добре, погано та ін.). Параметр повинен бути статистично ефективним, тобто вимірюватись з найбільшою точністю, що дозволяє скоротити до мінімуму дублювання експериментів. Параметр має бути інформаційним (універсальним), тобто всебічно характеризувати технологічний процес. Параметр повинен мати фізичний зміст, тобто повинна бути можливість досягнення корисних результатів визначеної властивості деталі, складальної одиниці у відповідних умовах процесу. Через технічні труднощі можливо приймати параметри, які дають непряму оцінку. У цих випадках значно важко інтерпретувати результати. Параметр повинен бути однозначним, тобто повинна максимізуватись або мінімізуватись тільки одна властивість деталі, складальної одиниці або процесу. Вимога однозначності в статистичному змісті полягає в тому, що визначеному набору факторів повинно відповідати тільки одне (з точністю помилки експерименту) значення вихідного параметру оптимізації.

Параметри оптимізації в залежності від типу контрольованих параметрів та ознак якості деталей, складальних одиниць або технологічного процесу можуть бути:

1. Простору та часу (довжина, час, площа, об'єм, лінійна швидкість, кутова швидкість, лінійне прискорення, та ін.).

2. Механічні (маса, густина, сила, момент сили (пари сил), в'язкість, кінетична в'язкість та ін.).

3. Теплові (температура, кількість теплоти, тепловий потік, теплоємність та ентропія, питома теплоємність та ентропія, поверхнева густина теплового потоку, коефіцієнт теплообміну та ін.).

4. Електричні та магнітні (кількість електрики), електричний заряд, густина електричного струму, лінійна густина електричного струму, об'ємна густина електричного заряду, питомий електричний опір, напруга магнітного поля, магнітний потік та ін.).

5. Акустичні (звуковий тиск, об'ємна швидкість, акустичний опір, інтенсивність звуку та ін.).

6. Світлові величини енергетичної фотометрії (світловий потік, світлова енергія, світимість, освітлення, яскравість та ін.).

7. Радіоактивність та іонізуюче випромінювання (поглинена доза випромінювання, потужність дози випромінювання, інтенсивність випромінювання та ін.).

8. Якісні (зовнішній вигляд деталі, складальної одиниці та ін.).

Будь який параметр повинен бути обмежений межами допусків, в яких проводиться оптимізація.

Параметр оптимізації позначають символом “Y”, відповідно визначеному показнику деталі, складальної одиниці або вимірювального процесу, узаконених одиниць вимірювання.

При плануванні екстремального експерименту дуже важливо визначити параметр, який потрібно оптимізувати (зробити це не так легко, як здається на перший погляд). Мета дослідження повинна бути сформульована дуже чітко та допускати кількісну оцінку.

Параметром оптимізації зветься кількісний вираз характеристики мети дослідження. Бажано, щоб параметрів оптимізації, було як можна менше. Проте, не слід добиватися зменшення кількості параметрів оптимізації за рахунок повноти характеристики системи.

Параметр оптимізації – це ознака, за якою ми хочемо оптимізувати процес. Він повинен бути кількісним, тобто задаватись числом. Ми повинні його вимірювати за будь-якою важливою комбінацією вибраних рівнів факторів. Множину значень, які може приймати параметр оптимізації, будемо звати ділянкою його визначення. Ділянка визначення може бути безперервною та дискретною, обмеженою та безмежною.

Наприклад, вихід реакції – це параметр оптимізації з безперервною обмеженою областю визначення. Він може змінюватись у проміжку від 0 до 100%. Кількість бракованих виробів, кількість кров'яних тілець у спробі крові – ось приклади параметрів з дискретною областю визначення, яка обмежена низу.

Вміти вимірювати параметр оптимізації – це значить мати необхідний прилад. В ряді випадків такого приладу може не бути

або він занадто дорогий. Коли нема способу кількісного вимірювання результату, то користуються засобом, який зветься ранжування (ранговий підхід). При цьому параметрам оптимізації присвоюються оцінки – ранги за раніше обраною шкалою: двобальною, п'ятибальною і т.д. Ранговий параметр має дискретну обмежену ділянку визначення. У найпростішому випадку ділянка має два значення („так”, „ні”, „добре”, „погано”). Це може відповідати якісній продукції та браку.

Ранг – це кількісна оцінка параметра оптимізації, але вона носить умовний (суб'єктивний) характер. Ми ставимо у відповідності до якісної ознаки деяке число – ранг.

Наприклад, ваша мати вирішила спекти яблуневий пиріг за новим рецептом. Вам, звичайно, тяжко залишатися в стороні, і ви пропонуєте їй свої послуги по оптимізації цього процесу. Мета процесу – виготовлення смачного пирога, але таке формулювання мети не дає можливості почати оптимізацію: треба вибрати кількісний критерій, який характеризує ступінь досягнення мети. Можна прийняти наступне рішення: дуже смачний пиріг – оцінка „5”, просто смачний – „4” і т.д. Інші приклади рангового підходу: визначення чемпіона світу з фігурного катання чи гімнастики, дегустації напоїв, порівняння виробів мистецтва та ін.

Наступна вимога – параметр оптимізації повинен відображатися одним числом. Іноді це буває природно, як реєстрація показників приладу. Наприклад, швидкість руху машини визначається числом на спідометрі.

Ще одна вимога пов'язана з кількісною природою параметра оптимізації – однозначність в статичному значенні. Заданому набору значень факторів повинно відповідати одне з точністю до похибки експерименту значення параметру оптимізації.

Для успішного досягнення мети дослідження необхідно, щоб параметр оптимізації дійсно оцінював ефективність функціонування системи. Ця вимога є головною, яка визначає коректність постановки задачі.

Уява про ефективність параметра не залишається постійною в ході дослідження. Вона змінюється по мірі накопичення інформації та в залежності від досягнутих результатів. Це призводить до послідовного підходу при обранні параметра оптимізації. Мало мати ефективний параметр оптимізації. Треба,

щоб він був ефективним в статичному змісті.

Наступна вимога до параметра оптимізації – вимога універсальності або повноти. Під універсальністю параметра оптимізації розуміють його здатність всесторонньо характеризувати об'єкт. Наприклад, технологічні параметри оптимізації недостатньо універсальні – вони не враховують економіку.

Бажано, щоб параметр оптимізації мав фізичну суть, був простим та легко вираховувався. Вимога фізичної суті пов'язана з наступною інтерпретацією результатів експерименту.

3.5. Системний підхід до розробки та аналізу математичної моделі

Складність технічних систем, що моделюються, значною мірою залежить від різноманіття номенклатури виробництва, особливостей галузі приладобудування, типу виробництва, його оснащення та багатьох інших умов. При цьому завжди намагаються використовувати такі технологічні процеси, за допомогою яких можна досягти найбільшої продуктивності праці при найменшій собівартості та високій якості продукції в умовах певного підприємства.

До системного аналізу входить:

1. Постановка задачі, яка включає визначення кінцевих цілей та питання, що потребують розв'язання умов, в яких функціонує система, визначення обмежень, що накладаються на умови функціонування системи та ін.

2. Дослідження: визначення, аналіз і узагальнення даних, необхідних для розв'язання задачі, визначення структури системи (проблеми), що аналізується, встановлення зв'язків, виявлення методів та дій для розв'язання задачі.

3. Аналіз, що охоплює побудову моделей, вибір критеріїв ефективності їх використання для передбачення наслідків того, чи іншого курсу дій, співставлення різних варіантів рішень з точки зору цих наслідків.

4. Попереднє судження – зводиться до вибору найкращих шляхів досягнення мети, розробка висновків та рекомендацій щодо подальших дій.

5. Експериментальна перевірка прийнятих рішень, результатів аналізу.

6. Заключне судження – заключний вибір найкращого варіанта вирішення задачі – на основі експериментальної перевірки результатів аналізу.

7. Реалізація прийнятого рішення, що включає доведення прийнятого рішення до конкретних результатів: креслень, технологій, організаційних заходів тощо.

З позиції системного підходу послідовність опису будь якого об'єкту, який вивчається, здійснюється спочатку на рівні властивостей (входів, виходів), потім на рівні складу, і, на кінець, на рівні структури.

Модель етапів системного підходу (проблемна ситуація – мета – функція – структура – ресурси) задає обов'язкову послідовність аналізу і синтезу об'єктів, які розглядаються як технічна система.

Системний аналіз слід направляти від кінцевої до початкової стадії проблеми, тобто від вимог до виробу та технології кінцевих етапів виробництва до вимог сировини, напівфабрикатів, вихідних заготовок та ін.

Наприклад, технічна система – сукупність функціонально взаємозв'язаних засобів технологічного оснащення, призначених для виконання в умовах виробництва заданих технологічних процесів відповідно до вимог технологічної документації. Підсистема – верстат, пристосування, пристрій. Підсистему можна розділити ще на підсистему і так далі. Вхідними елементами в технічну систему є параметри, які характеризують оброблюваність заготовки, твердість, величина припуску, параметри пристосування: кількість опорних точок, зусилля закріплення, місце прикладання. Наприклад у верстата вхідними параметрами для досягнення точності є жорсткість, подача, швидкість.

При розробці та аналізі математичної моделі необхідно враховувати принципи системного підходу:

1) пропорційне та покрокове просування по станам створення моделі;

2) постійне узгодження інформаційних, ресурсних, надійнісних та інших характеристик;

3) контроль співвідношення окремих рівнів ієрархії в системі

моделювання;

4) цілісність і взаємозв'язок окремих відособлених етапів побудови моделі.

Математична модель повинна відповідати заданій меті її створення, тому її окремі частини повинні компонуватись виходячи з єдиного системного завдання. Мета формалізується ціллю, яка в свою чергу може бути сформована якісно, тоді вона буде мати більшу змістовність і тривалий час може відображати об'єктивні можливості даного моделювання. При кількісному формулюванні мети виникає цільова функція, що точно відображає найбільш істотні фактори, що впливають на досягнення поставленої мети.

Системний підхід забезпечує побудову моделей і вирішення системних завдань математичного моделювання, при рішенні яких синтезуються нові рішення на базі великого числа вихідних даних та на основі пропозицій різних фахівців. Використання системного підходу в цих умовах дозволяє не тільки побудувати модель реального об'єкту, а на базі цієї моделі вибрати необхідну кількість управляючої інформації в реальних системах та оцінити показники її функціонування. Такий підхід до математичного моделювання дозволяє знайти найбільш ефективний варіант побудови і оптимальний режим функціонування або експлуатації реальної технічної системи.

При математичному моделюванні необхідно також забезпечити максимальну ефективність отриманої моделі. Ефективність в загальному вигляді визначається як деяка різниця між показниками цінності результатів, отриманих у підсумку експлуатації моделі і тими витратами, які були вкладені в її розробку і створення.

3.6. Приклади розробки математичних моделей

Під об'єктами моделювання в приладобудівному виробництві розуміють:

1. Технічні системи (ТС) – ділянки з універсальних верстатів, автоматичні лінії, оброблювальні центри з числовим програмним управлінням і т.д.

2. Вимірювальні процеси (ВП) – процеси, що протікають під час вимірювання заданих параметрів вимірювальних комплексів

тощо.

3. Фізичні процеси (ФП) – процеси, що протікають при різанні металів, при функціонуванні технологічного обладнання в пружній системі ВПД і т.ін.

У наявному вигляді (тобто окремо) математичні моделі даних об'єктів застосовуються рідко, як правило, вони комбіновані. Наприклад, в математичних моделях ТС використовуються математичні моделі ВП, в яких, у свою чергу, застосовуються математичні моделі ФП.

Математична модель об'єкту дослідження – це система математичних елементів (чисел, змінних, рівнянь, нерівностей, множин, матриць, графів і т.д.) та відносин між ними, що адекватно відображає деякі властивості об'єкту, істотні з погляду інженера, для вирішення тієї або іншої задачі.

Математичні моделі розробляють для:

1. Дослідження ФП, ВП, ТС.
2. Проектування ВП, ТС.
3. Оптимізації в ході проектування ВП, ТС та організації роботи ТС.
4. Опису та керування ФП, ВП, ТС, побудови систем автоматизованого проектування, та інше.

Вигляд, склад, складність математичної моделі залежить від того, який об'єкт вона описує і для якої мети розроблена.

Приклад 1. Припустимо, що необхідно описати та дослідити такий фізичний процес, як процес різання (точіння) з погляду діючих сил, які представимо відомими в теорії різання рівняннями:

$$\begin{aligned} P_X &= C_{PX} \cdot t^{X_{px}} \cdot s^{Y_{px}} \cdot K_{zag}; \\ P_Y &= C_{PY} \cdot t^{X_{py}} \cdot s^{Y_{py}} \cdot K_{zag}; \\ P_Z &= C_{PZ} \cdot t^{X_{pz}} \cdot s^{Y_{pz}} \cdot K_{zag}; \end{aligned} \quad (3.7)$$

де C_P – питомі сили різання; t – глибина різання; s – подача; X, Y – показники ступеня, які виражають вплив відповідного параметра режиму різання на силу різання (при точінні $X_p \cong 1, Y_p \cong 0,75$); $K_{zag} = K_M \cdot K_I \dots$ – коефіцієнт, який залежить

від властивостей оброблюваного матеріалу, інструментального матеріалу і т.д.

Представлені вище три рівняння – це вже один з варіантів математичної моделі процесу точіння з погляду діючих сил. Вона, звичайно ж, найпростіша і може служити для:

1. Описи процесу різання.
2. Дослідження процесу різання.
3. Розрахунку сил різання.

Наприклад, за допомогою даної моделі можна досліджувати залежність сили різання P_Z від глибини різання t .

Використовувати математичну модель процесу різання в представленому вигляді, наприклад, для проведення оптимізації режимів різання не можна, вона дуже проста. Для оптимізації математична модель повинна мати наступні елементи:

1. Критерії оптимізації.
2. Цільову функцію.
3. Систему обмежень.
4. Систему рівнянь, які описують об'єкт.
5. Вхідні, вихідні та внутрішні параметри.
6. Керований (варійований) або керовані (варійовані) параметри, які виділяються з числа внутрішніх параметрів.

Приклад 2. Однопараметрична однокритерієва оптимізація режимів різання.

Припустимо, що потрібно визначити оптимальну подачу $S_{\text{опт}}$, при цьому глибина різання стала ($t = \text{const}$).

1. Критерій оптимізації – сила різання P_Z .
2. Цільова функція – залежність між критерієм (критеріями) оптимізації та параметрами, які підлягають оптимізації з вказівкою напрямку (вигляду) екстремуму. В нашому прикладі вона має наступний вигляд:

$$P_Z = C_{PZ} \cdot t^{X_{PZ}} \cdot s^{Y_{PZ}} \cdot K_{\text{заг}} \rightarrow \max. \quad (3.8)$$

3. Система обмежень включає лише одне з них:

$$0,07 \leq s \leq 4,16 \text{ мм/об}. \quad (3.9)$$

4. Система рівнянь. Математична модель в нашому прикладі включає одне рівняння:

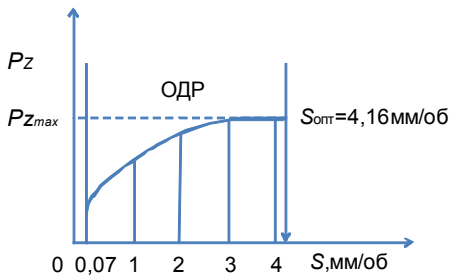
$$P_Z = C_{PZ} \cdot t^{X_{pz}} \cdot s^{Y_{pz}} \cdot K_{zag}; \quad (3.10)$$

5. Вхідні параметри – t, s .

6. Вихідний параметр – P_Z .

7. Внутрішні параметри – $C_{PZ}, X_{pz}, Y_{pz}, K_{zag},$.

8. Керований (варійований) параметр – s .



Задача оптимізації розв'язується в два етапи (рис. 3.2):

Етап 1. Визначення області допустимості рішень (ОДР).

Етап 2. Визначення оптимального параметра $S_{\text{опт}}$.

Рис. 3.2. Графічна ілюстрація вирішення задачі оптимізації

Контрольні питання

1. Які етапи включає життєвий цикл технічної системи?
2. Які основні вимоги PLM-рішень до технічних систем?
3. Що розуміють під концепцією PLM-рішень?
4. Що називається математичною схемою?
5. Які типові схеми використовуються під час моделювання технічних систем?
6. Які умови та особливості використання під час розробки моделей систем різних типових схем?
7. Що називається синтезом технічних систем?

4. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Єдиної концепції розробки математичних моделей немає та й не повинно бути із-за різноманіття задач і ситуацій, що виникають, напрямів, математичних методів та шляхів їх вирішення. Якість моделі значною мірою визначається творчими здібностями та уявою як окремого інженера, так і всього колективу інженерів.

Інтуїція, знання, досвід та інші інтелектуальні здібності не піддаються чіткому алгоритмуванню, проте відіграють головну роль у процесі побудови моделі. Тому неможливо написати конкретну інструкцію чи підручник з побудови моделей, адже це творчий, індивідуальний процес кожного дослідника та інженера. Якби такий підручник був написаний, то він скоріше обмежував би творчі можливості, ніж їх розвивав.

Разом з тим, незважаючи на різноманіття технічних систем і широкі можливості моделювання на сучасних персональних комп'ютерах, можна виділити основні закономірності переходу від побудови концептуальної математичної моделі об'єкта моделювання до проведення комп'ютерного моделювання технічних систем та подальшої обробки його результатів.

Аналіз накопиченого досвіду побудови моделей та проведення комп'ютерного моделювання дозволяють виділити вимоги до математичної моделі й дати загальну рекомендаційну послідовність дій. До математичних моделей технічних систем пред'являють такі основні вимоги []:

1. Повнота моделі повинна надавати користувачу можливість отримання вичерпних характеристик системи з заданою точністю та достовірністю.

2. Процес розробки та реалізації моделі технічної системи повинен зводитись до мінімальних затрат часу.

3. Структура моделі має складатись із блоків, що зручно у випадку перебудови моделі.

4. Гнучкість системи повинна дозволяти відтворювати різні ситуації при зміні її структури, алгоритмів і параметрів моделі.

5. Інформаційне забезпечення процесу моделювання має надавати можливість ефективної роботи моделі з базами даних пакетів прикладних систем та спеціалізованих САЕ-систем.

6. Програмні й технічні засоби повинні забезпечувати швидке створення комп'ютерної моделі та зручну роботу дослідника з нею.

Загальна схема математичного моделювання технічних систем включає такі основні узагальнені етапи:

1. Схематизація реальних процесів, що відбуваються в технічній системі, визначення їх (її) структури, складу дій та операцій з метою постановки задачі.

2. Теоретичний аналіз елементарних операцій та побудова концептуальної моделі системи для знаходження залежності між вхідними та вихідними величинами.

3. Побудова математичної моделі технічної системи (за необхідності програмування) та комп'ютерне моделювання.

4. Експериментальна перевірка отриманих результатів та коригування математичної моделі з метою корегування моделі й отримання достовірних результатів моделювання.

5. Аналіз та представлення результатів моделювання технічної системи.

Загалом, послідовність етапів математичного моделювання залежить від складності технічної системи, досвіду дослідника, багатьох інших причин та обумовлена, у першу чергу, використанням допоміжних інструментів – комп'ютера та розрахункових пакетів прикладних програм або САЕ-систем.

Розглянемо більш детально способи організації процесу математичного моделювання, від якого і залежить вибір тих чи інших етапів і підетапів моделювання.

4.1. Способи організації процесу математичного моделювання

Як було зазначено у підрозділі 1.3, математичне моделювання є методом дослідження технічних систем шляхом побудови їх математичних моделей з подальшим аналізом та дослідженням цих моделей. Разом із тим, використання сучасних мов програмування, персональних комп'ютерів та інформаційних технологій значно розширило можливості математичного моделювання.

Тому можна виділити три типові способи організації процесу математичного моделювання. Перший – «традиційний», базується на побудові математичної моделі з подальшим її аналізом та аналітичним дослідженням.

Для технічних систем, простих за структурою і процесом функціонування, побудова математичної моделі з подальшим її дослідженням є достатньою умовою для отримання результатів моделювання. Дослідник, під час аналізу моделі, у кожному ітераційному циклі виконує порівняння показників отриманої моделі з їх допустимими значеннями. За умови невиконання обмежень проводиться вибір нових параметрів та корегування моделі, після чого цикл дослідження повторюється. Схема «традиційного» математичного моделювання матиме вигляд, як на рис. 4.1.

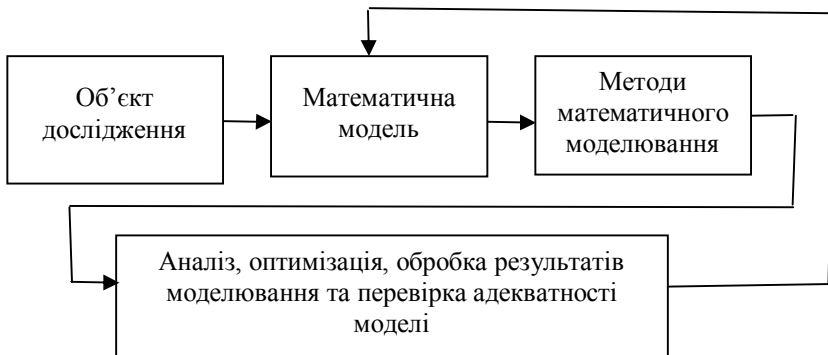


Рис. 4.1. Загальна схема процесу «традиційного» математичного моделювання

Процес моделювання за цією схемою реалізується для тих технічних систем, для яких були відомі основні закони їх функціонування та які зберігаються під час переходу від моделі до реального об'єкту моделювання. Ці закони (знання) дозволяють апіорно задати типовий клас моделей, що використовуються, та звести задачу дослідження до знаходження параметрів моделі по експериментальним даним.

До другого типового способу організації процесу математичного моделювання віднесемо спосіб, при якому

дослідник, незважаючи на наявність **у цей час** великого арсеналу математичних алгоритмів та прикладних програм, самостійно займається розробленням комп'ютерних програм.

Для цього він має знати мову програмування й мати навички програмування, проектувати структуру програми, а також програмувати, тестувати й налагоджувати програми.

На рис. 4.2 наведена схема типового способу організації математичного моделювання з використанням комп'ютера як інструментального засобу.

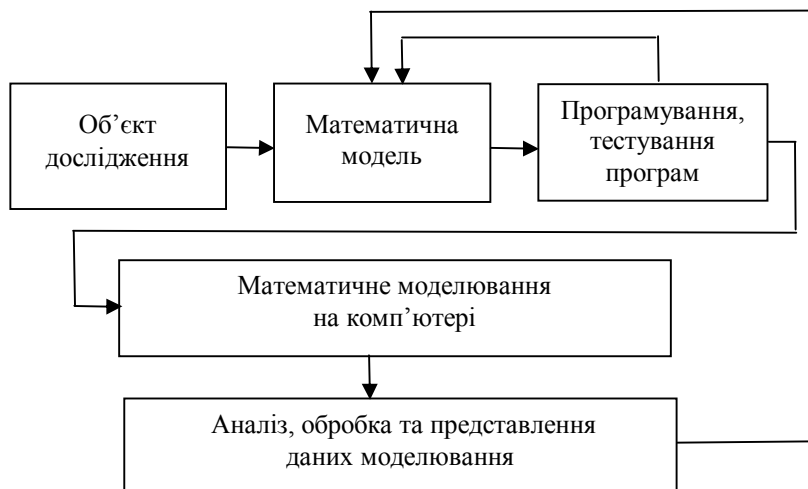


Рис. 4.2. Загальна схема процесу математичного моделювання з використанням комп'ютера

Дослідник у процесі математичного моделювання може використовувати сучасні інформаційні технології для проведення багатоваріантних досліджень, що залежать від різних управляючих факторів та впливу факторів зовнішнього середовища. З алгоритмічної точки зору організація моделювання – це процес математичної обробки вихідних даних з метою отримання певного набору результатів. Процес дослідження складних динамічних об'єктів (зміна стану та просторового положення в часі) може потребувати проведення багатопараметричних, багаторазових та

ітераційних (що повторюються) розрахунків **при незмінному класі (виді)** отриманих математичних моделей. Саме для таких розрахунків розроблена велика кількість пакетів прикладних програм математичного моделювання та розрахункових CAE-систем.

Суттєвою особливістю таких пакетів прикладних програм та систем є те, що в них більшість або всі допоміжні параметри математичних моделей можуть бути без (або ж принципово не мають) фізичної інтерпретації.

Виходячи з вищенаведеного, на рис. 4.3 представлено третій типовий спосіб організації процесу математичного моделювання з використанням пакетів прикладних програм та CAE-систем.

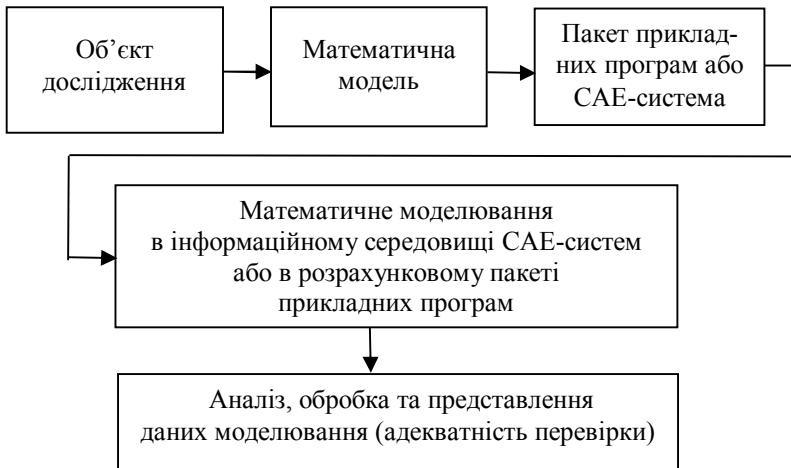


Рис. 4.3. Загальна схема процесу математичного моделювання з використанням розрахункових комп'ютерних програм або CAE-систем

Наведені схеми організації процесу математичного моделювання є узагальненими й не містять всієї сукупності можливих дій дослідника. Таку сукупність дій (етапів та підетапів) можна представити у вигляді формалізованої загальної методики математичного моделювання технічних систем, яку опишемо як послідовність із семи етапів.

4.2. Послідовність математичного моделювання

Процес математичного моделювання є творчим ітераційним процесом, який починається з відомої інформації про об'єкт моделювання та продовжується доти, доки не буде отримана модель, адекватна вимогам поставленої задачі.

Весь комплекс робіт із математичного моделювання, відповідно до наведених вище загальних схем, можна розділити на етапи та підетапи:

1. Постановка задачі.
 - 1.1. Встановлення вимог до початкової інформації про об'єкт моделювання.
 - 1.2. Визначення структури та параметрів технічної системи.
 - 1.3. Декомпозиція технічної системи.
 - 1.4. Аналіз інформації, гіпотез і припущень.
 - 1.5. Формулювання задачі моделювання технічної системи.
 - 1.6. Підготовка технічної інформації (документації) по 1-му етапу.
2. Розробка концептуальної математичної моделі.
 - 2.1. Встановлення параметрів і змінних математичної моделі.
 - 2.2. Встановлення основного змісту моделі.
 - 2.3. Обґрунтування критеріїв оцінки ефективності математичної моделі технічної системи.
 - 2.4. Визначення процедур апроксимації.
 - 2.5. Опис концептуальної математичної моделі.
 - 2.6. Перевірка достовірності концептуальної моделі.
 - 2.7. Підготовка технічної інформації (документації) по 2-му етапу.
3. Побудова та аналіз математичної моделі технічної системи.
 - 3.1. Побудова логічної схеми математичної моделі.
 - 3.2. Отримання математичних співвідношень.
 - 3.3. Перевірка достовірності та адекватності моделі технічної системи.
 - 3.4. Використання розрахункового пакету прикладних програм чи САЕ-систем для комп'ютерного

моделювання згідно етапу 5 або виконання робіт із програмування моделі згідно етапу 4 з переходом до етапу 8.

Для нескладних математичних моделей перехід до виконання підетапів 3.5, 3.6 та етапу 6.

3.5. Тестування моделі параметрами та змінними даними.

3.6. Підготовка технічної інформації (документації) по 3-му етапу.

4. Програмування математичної моделі.

4.1. Розробка плану виконання робіт із програмування моделі.

4.2. Побудова схеми програми.

4.3. Програмування математичної моделі.

4.4. Тестування отриманої програми налагодження та перевірка достовірності вихідних даних.

4.5. Математичне моделювання за допомогою комп'ютера.

4.6. Підготовка технічної інформації (документації) по 4-му етапу.

5. Комп'ютерне моделювання в середовищі розрахункових пакетів прикладних програм або САЕ-систем.

5.1. Визначення початкових умов моделювання технічної системи.

5.2. Задання граничних умов моделі технічної системи.

5.3. Опис поведінки технічної системи на основі фундаментальних законів (стосовно предметної області дослідження).

5.4. Знаходження чисельного, аналітичного та інших рішень системи вихідних рівнянь, що визначають математичну модель.

5.5. Підготовка технічної інформації (формування звіту про роботу) по 5-му етапу.

6. Експериментальна перевірка моделі та оптимізаційні експерименти.

6.1. Планування експерименту з моделлю системи.

6.2. Встановлення відповідності критеріям оптимізації системи.

6.3. Оцінка ефективності функціонування об'єктів та процесів системи.

6.4. Підготовка технічної інформації (документації) по 5-му етапу.

7. Аналіз та інтерпретація результатів моделювання технічної системи.

7.1. Комплексний аналіз результатів моделювання.

7.2. Представлення результатів моделювання.

7.3. Підведення підсумків моделювання та підготовка заключних рекомендацій.

7.4. Підготовка загальної інформації (документації) за результатами математичного моделювання.

Представлена методика математичного моделювання включає названі вище етапи та підетапи, які можуть використовуватись послідовно, ітераційно чи паралельно в часі. При отриманні нової або додаткової інформації про об'єкт дослідження потрібно провести її аналіз і при необхідності провести перегляд отриманих раніше результатів.

Більшість, із представлених вище, етапів загальної методики математичного моделювання в достатній мірі розкриті в підручниках та навчальних посібниках []. Разом з тим, вважаємо за необхідне більш детально розкрити слабоформалізовані та недостатньо розкриті в навчальній літературі етапи моделювання, а саме – постановку задачі та концептуальне моделювання, а також надати коротку інформацію по іншим етапам і підетапам математичного моделювання.

4.3. Постановка задачі математичного моделювання

На вибір математичної теорії та методу моделювання впливає, перш за все, постановка задачі та наявність вихідних даних. Не дарма вважають, що правильно поставлена задача – це вже половина її вирішення. Тому, спочатку розглянемо суть самого поняття «задача».

Для вирішення будь-якої задачі спочатку потрібно розібратися в ситуації, що склалася, поставити та чітко сформулювати питання, на які потрібно отримати відповіді після моделювання. Для цього потрібно зрозуміти, у чому полягає задача та необхідність її вирішення методом математичного моделювання.

Розгляд умов, що призводять до виникнення задачі, дозволяє виділити деякі з них по характеру ситуацій, в яких знаходиться дослідник:

1. Є один або декілька кінцевих результатів, яких прагнуть досягти при вирішенні технічного питання.
2. Існує дві чи більше стратегій досягнення потрібних результатів, які мають неоднакову ефективність при досягненні заданої мети.
3. Існує сумнів щодо того, яка стратегія є найкращою тобто «оптимальною».

Інакше кажучи, задача виникає тоді, коли суб'єктові (технічна система чи процес) потрібно досягти заданої мети та існують шляхи її досягнення, кожен з яких характеризується різною ефективністю, причому невідомо, яким шляхом досягнути та вибрати стратегію.

Залежно від наших знань стосовно характеру вихідних даних або результату ухвалення рішення, існують три типи задач:

1. Детерміновані задачі. Це задачі, що виникають у ситуаціях, коли кожна стратегія приводить до єдиного результату.

2. Імовірнісні задачі (задачі з ризиком). Задачі, при вирішенні яких можуть бути отримані різні результати, ймовірності досягнення яких відомі або можуть бути оцінені.

3. Задачі в умовах невизначеності. Задачі, що виникають у ситуаціях, коли невідомо, які результати можуть бути отримані. Тому не можна порівняти ймовірності з результатами.

Наведемо приклади цих типів задач та їх комбінацій, що виникають в інженерній практиці.

1. Державне науково-технічне об'єднання має 25 підприємств і щорічно одержує бюджетне фінансування на закупівлю обладнання. Кожний директор підприємства складає заявку на необхідне йому обладнання. Як правило, сума бажаного ними фінансування набагато вища виділеної. Задача полягає в тому, щоб знайти спосіб вибору із загальної заявки тієї номенклатури обладнання, яка найбільш необхідна та яку потрібно закупити.

2. Вашому підприємству потрібно виконати важливе замовлення до певного терміну. Але згідно раніше затвердженого

плану робоче обладнання підлягає профілактиці та ремонту, які можуть затягнутись на невизначений термін. Є декілька варіантів досягнення результату роботи в заданий термін: відмовитись (поки що) від профілактичних робіт; провести профілактику згідно плану чи в обмеженому обсязі. Але ступені ризику (ймовірності) досягнення кінцевого результату різні, різні їх економічні та стратегічні наслідки.

3. Ви плануєте впровадити у виробництво вимірювальних комплексів новітні методи механічної обробки полімерних матеріалів. Зовсім невідомо, якої якості заготовки будуть постачатись спеціалізованим підприємством. Можливо, необхідність в механічній обробці буде зведена до мінімуму чи зовсім відпаде. Потрібно за три місяці до підписання контракту вибрати конкретні методи обробки та замовити обладнання й інструмент. Невизначеність з обсягами робіт вносить умови невизначеності в процес вибору рішення про вкладення коштів у розвиток виробництва.

Постановка задачі *включає, насамперед, формулювання питань, на які потрібно отримати відповіді під час моделювання та докладне викладення ситуації, що склалась (проблеми, умови задачі, обмеження).* Представлення того, що саме невідомо і що потрібно дізнатися, не тільки дозволяє сформулювати задачу, але й визначає напрям і методи її вирішення.

Постановка задачі повинна включати сукупність основних шляхів її вирішення, але не повинна обмежувати ініціативу дослідників під час пошуку та вибору ними оптимального напрямку дій. Такий підхід припускає можливість використання дослідником математичної моделі для вирішення інших (найчастіше зворотніх) задач з тими ж вихідними даними (або атрибутами моделі), тобто передбачає можливість удосконалення моделювання.

На етапі постановки задачі потрібно одержати відповіді на питання й виконати такі роботи:

1. Підготувати список питань, на які треба відповісти наприкінці моделювання.
2. Вивчити ситуацію (існуючі процеси в сукупності й поагрегатно та інше).
3. Сформулювати списки контрольних і керуючих

параметрів, збурюючих впливів.

4. Сформулювати виробничі дані для основного (початкового) варіанту.

5. Встановити чи достатньо даних для основного (початкового) варіанта? Якщо ні, то провести виробничі (лабораторні) дослідження чи використати додаткові літературні (експериментальні) дані.

6. Вибрати:

- цільову функцію;
- вхідні та вихідні змінні;
- обмеження.

7. Ввести умовні позначення всіх атрибутів майбутньої моделі.

8. Виявити зв'язки та описати поведінку параметрів (змінних) у межах компонентів системи або встановити співвідношення між ними у вигляді функціональних залежностей.

Декомпозиція системи (або розбивка задачі на підзадачі) проводиться для складних систем у випадку, коли побудова набору співвідношень між характеристиками системи є неможливою або складною. Тому систему доводиться розділяти на елементи, математичний опис яких можливо здійснити.

Конкретного способу спрощення (ускладнення) моделі не існує, але є основні принципи. Це:

- компроміс між повнотою, трудомісткістю побудови моделі та складністю експериментування з нею;
- відповідність точності окремих елементів моделі до точності вихідних даних для моделювання;
- розподіл процесів моделювання на послідовні незалежні етапи;
- точне відтворення одних частин системи і спрощене відтворення інших;
- виключення окремих частин системи з заміною їх еквівалентними випадковими впливами;
- організація послідовності моделей зростаючої складності з перевіркою збіжності результатів.

Процес декомпозиції моделі потрібно розглядати, як процес мінімізації її складності, тобто як рішення мінімізаційної задачі на етапі підготовки математичної моделі:

$$L \Rightarrow \min \Rightarrow D^*, \quad D \in \{D\}, \quad (4.1)$$

де L – складність декомпозиційної системи (задачі);

D – операція декомпозиції;

$\{D\}$ – безліч припустимих варіантів декомпозиції;

D^* – оптимальна декомпозиція, яка мінімізує L .

Таким чином, мета декомпозиції моделі полягає у спрощенні попереднього синтезу (постановки задач) моделі об'єкта “розщеплення” її на простіші елементи.

При проведенні теоретичного аналізу об'єкт ділиться на скінчену кількість підсистем, які, у свою чергу, діляться на дрібніші аж поки не стануть достатньо простими для вивчення та математичного опису. Вони і будуть елементами опису складного об'єкта. Оскільки складний об'єкт ділиться зі збереженням зв'язків між виділеними елементами, то математична модель складного об'єкта складатиметься з математичних моделей елементів і математичних моделей зв'язків між ними.

Якщо S_o – технічна система, що декомпозується, то після застосування до S_o декомпозиції D_o отримаємо множину підсистем $S_1, S_2, \dots, S_n$. Отримані підсистеми розчленовуються на підсистеми нижчого рівня, тобто S_i розбивається на $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in}$ і т.д. Кожна підсистема допускає декомпозицію процесів, котрі, у свою чергу, можуть розділитись на функції, тобто кожний процес може бути представлений у вигляді вектора:

$$MF_{ij} = \{MF_{ij1}, MF_{ij2}, \dots, MF_{ijm}\}, \quad (4.2)$$

де MF_{ijm} – i -та функція j -го процесу;

m – кількість процесів.

Розглянемо приклад (рис. 4.4), який відображає методичні проблеми, що виникають при діленні об'єкта для його математичного опису.

Опис кожного способу розділення матиме такий вигляд:

– три паралельних бруска, розділені двома короткими поперечинами, що трохи відстають від країв об'єкта;

- два паралельних бруска, розділені тавром, що трохи відстає від країв об'єкта;
- два дзеркально симетричних елемента, що мають профіль швелера;
- три паралельних бруска, об'єднані зверху однією поперечиною, що трохи відстає зверху.

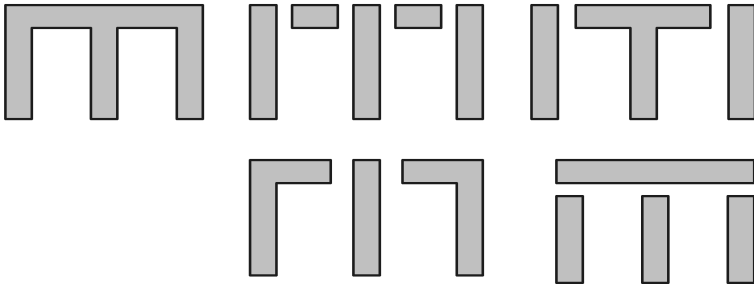


Рис. 4.4. Варіанти розділення декомпозиції об'єкту

Звідси можна зробити такі висновки:

1) виділення більш складних елементів для опису і моделювання об'єкта дослідження ускладнює їх опис, але спрощує опис зв'язків між ними і навпаки;

2) декомпозиційний об'єкт можна використовувати як елемент для опису і моделювання більш складних технічних систем.

Таким чином, математичне моделювання технічних систем ґрунтується на реальних процесах, які відбуваються в них під час функціонування. Їх ділять на елементарні дії або операції, які описуються простими математичними залежностями, що встановлюють зв'язок між вхідними та вихідними впливами.

Із-за складності процесів функціонування реальних технічних систем можна будувати математичні моделі, які описують лише їх основні характеристики. При математичному описі елементів технічної системи мають інтерес ті з їх властивостей, які безпосередньо впливають на властивості всієї технічної системи. На всіх етапах моделювання (виділення простих елементів, визначення їх зв'язків) математичний опис об'єкта спрощують шляхом прийняття певних припущень.

4.4. Розробка концептуальної математичної моделі технічної системи

Концептуальність, як система поглядів на процеси досліджень та розробки, властива й математичному моделюванню їх предметної галузі. Тому сукупність таких моделей називають концептуальною математичною моделлю предметної галузі технічних систем.

Побудова концептуальної моделі відповідає переходу від описового представлення знань до їх формального представлення на декларативній мові, яка допускає єдину інтерпретацію. Після формалізованої постановки задачі дослідник (або колектив розробників) може виконувати підетапи 3-го етапу. Але математичне моделювання технічних систем, наприклад, складних сучасних інформаційно-вимірювальних комплексів, виробничих процесів промислових підприємств, сучасних приладів із вбудованими мікросхемами та інше безумовно потребує проведення робіт згідно 2-го етапу (етапу концептуального моделювання).

Прийнято вважати, що концептуальне моделювання використовується у тих випадках, коли технічна система не може бути описана кількісними характеристиками, які дозволили б зробити опис закономірностей її функціонування чи опис розробки у вигляді аналітичних залежностей.

Розглянемо детальніше методологічні аспекти цього виду моделювання. Концептуальна модель разом з описом структури технічної системи (об'єкту дослідження процесів як функціонування об'єкту, так і процесів обробки інформації), способів взаємодії структурних елементів відображає такі властивості як приналежність технічної системи до певного типу та її кількісні характеристики. Тому, крім поділу елементів моделі на об'єкти та відношення між ними, можна виділити клас атрибутів (властивостей), які вступають з елементами моделі (інформаційними об'єктами та процесами) в бінарні (взаємно однозначні) відношення, які можуть бути описані функціонально.

Таким чином, концептуальна математична модель технічної системи містить такі складові:

- множину елементів моделі (об'єктів і процесів);

- відношення, які задаються над множиною елементів моделей;
- множину атрибутів об'єктів і відношень;
- множину функцій (функціональних відношень між інформаційними об'єктами, процесами та їх атрибутами).

Два перших, із наведених вище компонентів, утворюють схему об'єктів і процесів технічної системи, а два останніх – моделі атрибутів і кількісні характеристики.

Формалізація концептуальної математичної моделі (КММ) може бути представлена кортежем

$$S_{kmm} = \langle P, O, H_p, H_o, I_n, O_{ut}, S \rangle,$$

- де $P = \{p_i\}$ – множина процесів обробки інформації;
- $O = \{o_j\}$ – множина інформаційних об'єктів (даних);
- H_p, H_o – відношення ієрархії інформаційних об'єктів;
- $I_n : P \rightarrow B(o)$ – відповідність $\ll I_n \gg$ множини вхідних інформаційних об'єктів $B(o)$ множині процесів p (I_n – інформаційна відповідність $\ll$ вхідні інформаційні об'єкти процесу – процес $\gg$);
- $O_{ut} : P \rightarrow B(o)$ – відповідність $O_{ut} \ll$ процес – вихідні інформаційні об'єкти $\gg$ множини вхідних інформаційних об'єктів $B(o)$ множині процесів P ;
- $\delta : P \rightarrow B(P)$, $\{p_m\} = s\{p_i\}$ – відношення проходження процесів (відповідність підмножини вхідних інформаційних процесів $B(p)$ множини P на цю множину, де $\{p_m\}$ – множина процесів, виконання яких має строго передувати виконанню певного процесу $p_i (p_m \in S(p_i))$;
- $S = \{s_k\}$ – множина компонентів концептуальної математичної моделі;

$i = \overline{1, \dots, I}; j = \overline{1, \dots, J}; m = \overline{1, \dots, M}; k = \overline{1, \dots, K}$ – лічильники ?

Подана формалізація відображає суть концептуального моделювання, яка полягає в тому, що під цим процесом розуміють певне перетворення (i_n, O_{ut}) вхідної підмножини об'єктів (даних про них) на іншу підмножину, яку називають вихідною.

Під час побудови КММ процес розглядають як декларативне представлення задачі, вирішення якої полягає в описі причинно-наслідкових зв'язків щодо виробленого в предметній області перетворення інформації.

Кожен із перерахованих компонентів КММ має свою семантичну інтерпретацію – декларативну чи процедурну. Взаємна несуперечність цих видів інтерпретації дозволяє сумістити два даних підходи та використовувати перший для побудови опису об'єктів предметної області, а другий – для отримання на їх основі процедурних специфікацій і самих алгоритмів.

Кожній трійці <<вхідні об'єкти процесу – процес – вихідні об'єкти процесу>> можна поставити у відповідність вираз

$$I_{n(p_i)} \xrightarrow{p_i} O_{ut(p_i)}.$$

Цей вираз означає відповідність процедурного процесу p_i відношення $O_{ut(p_i)}$ відношенню $I_{n(p_i)}$. Відповідність p_i є відношенням обчислюваності під час вирішення задачі, яке може розглядатись у двох аспектах: як аксіома обчислюваності для процесів нижнього рівня ієрархії та як теорема обчислюваності для процесів проміжної ієрархії, доказом існування якої є одна з умов коректності моделі, що перевіряється в процесі аналізу розв'язності концептуальної математичної моделі.

Контрольні питання

1. Які етапи включає життєвий цикл технічної системи?
2. Які основні вимоги PLM-рішень до технічних систем?
3. Що розуміють під концепцією PLM-рішень?
4. Що називається математичною схемою?
5. Які типові схеми використовуються під час моделювання технічних систем?
6. Які умови та особливості використання під час розробки моделей систем різних типових схем?

7. Що називається синтезом технічних систем?

5. СИНТЕЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Використання математичних моделей в інженерній практиці (дослідницькій, конструкторській, розрахунковій, технологічній та ін.) дозволяє забезпечити ефективність та якість розробок за рахунок всебічного аналізу процесів та об'єктів, що вже діють або розробляються. За допомогою комп'ютерних інформаційних систем і прикладних програм математичного моделювання інженер за короткий термін може розглянути декілька варіантів технічних рішень і з наперед заданою ймовірністю вибрати найкращий.

Залежно від складності задачі та глибини проникнення в її структуру існують такі методи використання отриманих моделей: аналіз, розрахунок, синтез та оптимізація. Методи аналізу та розрахунку допускають використання менш точної моделі, але більш потрібної для практики. Тому при створенні моделей доводиться вирішувати суперечливу задачу. З одного боку, потрібно розробити модель, на якій найпростіше одержати числові рішення, а з іншого боку – забезпечити максимально можливу точність (об'єктивність) моделі. З метою спрощення моделі використовують такі прийоми як: виключення змінних, зміна характеру змінних, зміна функціональних співвідношень між змінними (наприклад, лінійна апроксимація), зміна обмежень (їх модифікація, поступове введення обмежень в умову задачі).

Моделі, будучи ефективним засобом дослідження реальних об'єктів, дозволяють знайти принципово нові стратегії розвитку технічної системи та її вдосконалення.

Так, алгоритми, методики та програми аналізу й розрахунку технічних систем з розвитком комп'ютерних інформаційних технологій стали дуже популярні та доступні для дослідників і студентів. У наступному параграфі коротко описані деякі з САЕ-систем інженерного аналізу та деякі з пакетів прикладних програм математичного моделювання, які є ефективними для отримання конкретних розрахунків параметрів технічної системи.

Разом з тим, використання отриманих моделей для задач

синтезу та оптимізації дуже трудомістке та недостатньо описане в навчальній літературі. Пояснюється це труднощами формалізації методів синтезу технічних систем, які в основному створені на евристичних прийомах і великими обчислювальними витратами, потрібними для успішного розв'язання задач синтезу. Останнім часом, із розвитком інформаційних технологій створені ефективні алгоритми оптимізації, які значно зменшують витрати на пошук рішень та розширення взаємодії дослідників з комп'ютером при вирішенні задач синтезу технічних систем.

5.1. Задачі синтезу технічних систем та математичні методи їх вирішення

Задачі синтезу вирішуються за два етапи. Перший, спрямований на створення структури проєктованого об'єкта, називається структурним синтезом, другий – на пошук параметрів спроектованої структури, за якими об'єкт функціонуватиме при дії всіх дестабілізуючих факторів, називається параметричним синтезом.

Структурний аналіз набагато складніший за параметричний. Він займає особливе місце в загальному процесі проєктування об'єктів різного виду та виконується в першу чергу.

Структурний синтез складається з трьох основних етапів: генерації або пошуку варіанта, прийняття рішення щодо його придатності або непридатності, а також щодо продовження або припинення подальшого пошуку варіантів.

Робота інженера на етапі структурного синтезу має творчий характер, а отримані рішення в багатьох випадках розглядаються як винаходи. Пояснюється це надзвичайною різноманітністю структур, невизначеним об'ємом врахованих вихідних даних і факторів, великим об'ємом евристики.

Відміною рисою структурного синтезу є дискретний характер, тому структурна (дискретна) оптимізація є змістом будь-якого структурного синтезу. Значний розвиток методів структурної (дискретної) оптимізації дає надію на успішне застосування методів для задач структурного синтезу.

Мета параметричного синтезу – визначити область працездатності в просторі внутрішніх і вихідних параметрів та який об'єкт правильно функціонуватиме протягом необхідного

строку за наявності дестабілізуючих факторів. Параметричний синтез дає можливість уточнити та остаточно визначити технічне завдання на об'єкт, яке до цього носило ескізний характер. Пошук оптимальних параметрів знайденої структури в даній області працездатності з формалізованими критеріями оптимальності та обмеженнями є задачею наступного етапу роботи дослідника чи розробника – параметричної оптимізації.

Для розв'язання задач структурного синтезу потрібно:

1. Формалізувати структурний аналіз, тобто визначити різноманітність типових структурних елементів, при конкретному наборі яких може бути визначена проєктована структура. Наприклад, структурним базисом найпростіших автоматичних ліній для обробки корпусних деталей є агрегатні верстати, а для автоматичної лінії – багатоопераційні верстати, транспортні роботи тощо. Опис елементів структурного базису представляє моделі елементів, які використовуються для формування математичної синтезованої структури.

2. Формалізувати структурні зв'язки, тобто визначити обмеження на можливості з'єднань елементів структурного базису в синтезованій структурі. Результат формалізації зображується у вигляді орієнтованого графа, ребра якого є можливими з'єднаннями або матрицями допустимих зв'язків, або списків парних сполучень.

3. Формалізувати структурну або цільову функцію. Структурні функції крім структурних елементів можуть мати цілу систему функцій тобто обмежень, пов'язаних зі складністю структури або затратами на її функціонування, що значно ускладнює формалізацію даного етапу. Якщо звичайні цільові функції при схемо-технічному проєктуванні формалізуються за допомогою узагальнених критеріїв оптимальності, то структурні функції можна описати за допомогою числення (алгебри), заснованого на певному алфавіті. Використовуючи операції над словами даного алфавіту, отримаємо в явному вигляді залежність функції від структури.

4. Формалізувати вихідне завдання на структуру технічної системи. Цей процес істотно залежить від проведення трьох попередніх етапів формалізації, а також від використаного методу

синтезу. Чим досконаліший метод синтезу, тим меншим буде об'єм попередньої розробки вихідного завдання.

За рівнем складності всі задачі структурно-дискретного синтезу можна поділити на три групи.

До першої групи відносять найпростіші задачі, в яких вибір структури або однозначний, або отримується з кінцевої множини варіантів, які піддаються повному перегляду та порівнянню за прийнятий час. Повний перелік варіантів структури в даному випадку задається в інформаційному забезпеченні проектів технічних систем у вигляді каталогів типових варіантів, наприклад, перелік типових технічних систем, використаних у підсистемі проектування для синтезу будь-якої технічної системи.

До другої групи відносять задачі, для яких неможливим є безпосереднє перебирання варіантів. Синтез таких задач знижує рівень складності ще на стадії формування вихідних даних. Це виключає можливість отримання принципово нового варіанта структури. Припустимим є застосування методів спрямованого перебору.

До третьої групи складності відносять задачі, створені на застосуванні теорії евристичних рішень, яка використовується у випадках, коли вихідної інформації недостатньо для точного рішення. Такі методи погано піддаються формалізації, і поки що не знайшли широкого практичного застосування в синтезі технічних систем. Тому для розв'язання задач третьої групи необхідна активна участь розробника в процесі проектування, яка реалізується в діалоговому режимі обміну інформацією між людиною та комп'ютером. Прикладом задачі третьої групи складності є проектування функціональної схеми автоматичної лінії з величезним переліком використовуваних елементів. При цьому з'являється безліч варіантів пристрою, які відрізняються між собою кількістю елементів та їх структурними зв'язками.

Для полегшення синтезу задач третьої групи складності намагаються формалізувати евристичні прийоми, використані у процесі творчості, які можуть стати основою каталогу творчих прийомів для подальшого застосування проектів технічних систем. Це прийоми поділу об'єкта на частини, суміщення в одне ціле окремих елементів об'єкта, перенесення розв'язку з іншої області техніки, спрощення елементів або з'єднання їх один з одним,

змінення умов роботи та навколишнього середовища, прийоми кількісних змін тощо.

Крім зниження рівня складності задачі при структурному синтезі та зменшення кількості розглянутих варіантів, за рахунок цілеспрямованого перебирання, ще одним із підходів до розв'язання задач синтезу є використання спрощених математичних моделей об'єктів, які дозволяють прискорити аналіз об'єкта на етапі розглядуваного варіанта структурного синтезу.

Для чіткого розв'язання задачі структурного дискретного синтезу потрібен повний перебір усіх варіантів проектованої структури. Однак це можливо лише для задач, що належать до першої групи складності. Для більш складних задач треба скоротити кількість спроб при перебиранні, що здійснюється завдяки ієрархічному підходу до дискретного синтезу. Ієрархічний підхід полягає в поділі всього складного процесу синтезу на кілька рівнів, на кожному з яких синтезується певний ранг складної системи. Наприклад, при синтезі автоматичної лінії на I рівні синтезується структурна схема, на II рівні – функціональні зв'язки між структурними блоками, на III рівні – функціональна схема та конструкції блоків, на IV рівні – найдрібніші функціональні та конструктивні одиниці – елементи.

Найефективнішим методом, що застосовується при розв'язанні задач дискретного структурного синтезу, є метод гілок і границь, який добре пристосований для розв'язування задач ієрархічного виду []. Другим розповсюдженим підходом до розв'язування задач структурного дискретного синтезу є послідовні еволюційні алгоритми, створені на поступовому нарощуванні структури від першого основного елемента додаванням нових елементів []. Послідовні методи належать до класу евристичних, вимагають активної участі людини (звичайно у формі діалогового режиму спілкування з комп'ютером), як правило, не приводять до оптимальної структури, зате більш економічні, оскільки не вимагають багатократного прорахунку багатьох варіантів структури.

Прикладами задач, розв'язуваних у процесі проектування за допомогою послідовних алгоритмів, є задачі трасування промислового робота, розміщення обладнання та компоновання всіх елементів автоматичних ліній.

Параметричний синтез об'єктів з безперервно змінюваними параметрами базується на методах, які є основою і для параметричної оптимізації. Основна відмінність цих двох процесів проектування полягає в тому, що в процесі параметричного синтезу об'єкт є ще погано вивченим, немає достовірної інформації про вид цільової функції, її диференційованості, наявність і вид обмежень на внутрішні та вихідні параметри, характер взаємозв'язків між параметрами. Ці причини значно ускладнюють вибір ефективного методу оптимізації та підбір його правильних параметрів, наприклад, початкової точки та початкового кроку пошуку. Внаслідок цього, для параметричного безперервного синтезу найбільш придатними є методи випадкового пошуку, а серед детермінованих – методи нульового порядку, що не вимагають обчислення похідних цільової функції, є найменш критичними для вибору параметрів і дозволяють досить ефективно знаходити якщо не оптимальні, то досить прийнятні рішення з реальними затратами.

У цьому випадку, коли не всі елементи проектного об'єкта характеризуються неперервними параметрами, застосування неперервних методів оптимізації для параметричного синтезу стає неможливим. Як уже зазначалося, при проектуванні технічних систем часто треба враховувати дискретні шкали дозволених номіналів, наприклад, для агрегатних або багатоопераційних верстатів, транспортерів, роботів, у яких набір геометричних розмірів активних елементів значно відрізняється тощо. Задачі параметричного синтезу такого виду вирішуються методами дискретного математичного програмування.

Якщо частина параметрів об'єкта є неперервною, а частина має дискретний характер, то задача параметричного синтезу вирішується методами часткового дискретного програмування. Задачі дискретного структурного параметричного синтезу є значно складнішими від задач математичного програмування. Внаслідок цього, для розв'язання задачі дискретного синтезу потрібні більш складні програми, створені на евристичних методах, значних обчислювальних витратах та важче піддаються формалізації.

Структурному синтезу піддаються: технологічний об'єкт, набори технологічних операцій, маршрутів технологічного процесу, типи та характеристики технологічних і транспортних

засобів. Усі ці моделі генерують альтернативні варіанти технічних рішень і дозволяють виконати оптимальний відбір технічних засобів, необхідних для здійснення технічної задачі. Подальшою системною задачею є реалізація алгоритму функціонування та компонування технічних засобів з метою отримання заданої продуктивності на визначеному раніше наборі технологічного і транспортного обладнання.

Наступний етап системного синтезу складається з розробки оптимальної структурної схеми технічної системи, а багатоваріантний аналіз отримуваних рішень дозволяє враховувати надійність проектного варіанта.

Реалізація алгоритму моделювання етапів системного синтезу виконується на основі технологічного завдання і дозволяє отримати оптимальне технічне рішення за кількома критеріями, що регламентують якість та ефективність проектованої технічної системи.

5.2. Формалізоване представлення процесу синтезу проектних варіантів технічної системи

Однією з найбільш складних і слабоформалізованих задач в процесі концептуального проектування є задача генерації та вибору ПВ. Вихідними даними для неї служать сукупність вимог до технічної системи і набір структурних моделей. Завдання генерації та вибору проектних варіантів полягає в генерації вихідної множини ПВ і виборі оптимального варіанта за багатьма критеріями. Любий ПВ у вихідній множині повинен задовольняти всі вимоги до системи, а оптимальний повинен бути найкращим за сукупністю критеріїв. Як правило, основою для генерації ПВ служать часткові варіанти задоволення вимог (ВЗВ) до технічної системи, що описують конкретні способи модифікації (чи створення) компонентів системи. Крім вибору єдиного ПВ часто потрібно оцінити найбільш важливі показники проекту (такі, як вартість, складність реалізації і т.п.). Проте, повністю формалізувати процес генерації ПВ на даний момент не вдається. Тому, обраний проектний варіант слід розглядати як базовий і дати особі, що приймає рішення додаткову можливість самостійного

вибору ПВ. Це доцільно робити на множині не домінуючих (Парето-оптимальних) [15] варіантів.

У плані оптимізації задачі генерації та вибору ПВ необхідно знизити трудомісткість генерації множини варіантів, підвищити кількість різноманітних варіантів, що генеруються, знизити вимоги до необхідної кваліфікації розробників. Також треба забезпечити можливість знижувати трудомісткість операцій генерації та вибору ПВ по мірі виконання проектів (у міру накопичення досвіду). Тому операції генерації та вибору ПВ повинні бути формалізовані.

Основою моделі варіантів технічної системи служить ідея, що для задоволення кожної вимоги до системи необхідна модифікація (або створення) відповідних компонентів. У загальному випадку, для кожної вимоги таких варіантів задоволення (ВЗВ) може бути декілька. У свою чергу, може задовольняти одну або декілька вимог до технічної системи і припускати модифікацію одного або декількох компонентів. Кілька ВЗВ можуть вимагати модифікації одного і того ж компонента. Графічно це можна проілюструвати наступним чином (рис. 5.1.). Крім того, деякі ВЗВ можуть бути взаємовиключними (реалізація одного виключає можливість реалізації іншого).

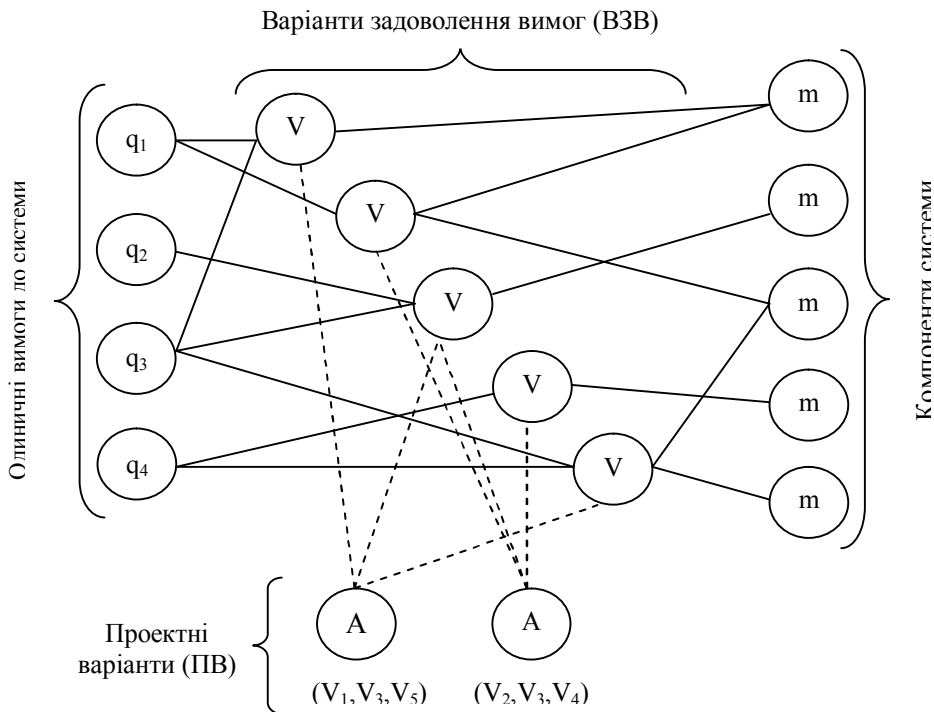


Рис. 5.1. Основа моделі варіантів технічної системи

Тоді ПВ будуть являти собою деяку підмножину множини варіантів задоволення вимог, таку, щоб задовольнялися всі вимоги до проєктованої технічної системи. У загальному випадку буде існувати кілька ПВ. Вибір найкращого проєктного варіанта здійснюється за сукупністю критеріїв: задоволення вимог до технічної системи, вартості реалізації ПВ, об'єму модифікації компонентів. Для цього, кожен ВЗВ оцінюється відповідними показниками.

Зазвичай множина одиничних вимог становить десятки пунктів. Тому необхідно згрупувати його і структурувати у вигляді дерева вимог (рис. 2.3, а). На нижньому рівні розміщуються поодинокі вимоги, які об'єднуються у вимоги більш високого рівня

- комплексні вимоги. В якості комплексних вимог найвищого рівня доцільно використовувати загальносистемні вимоги. Кожній одиничній вимозі (у дереві) ставляться у відповідність ВЗВ.

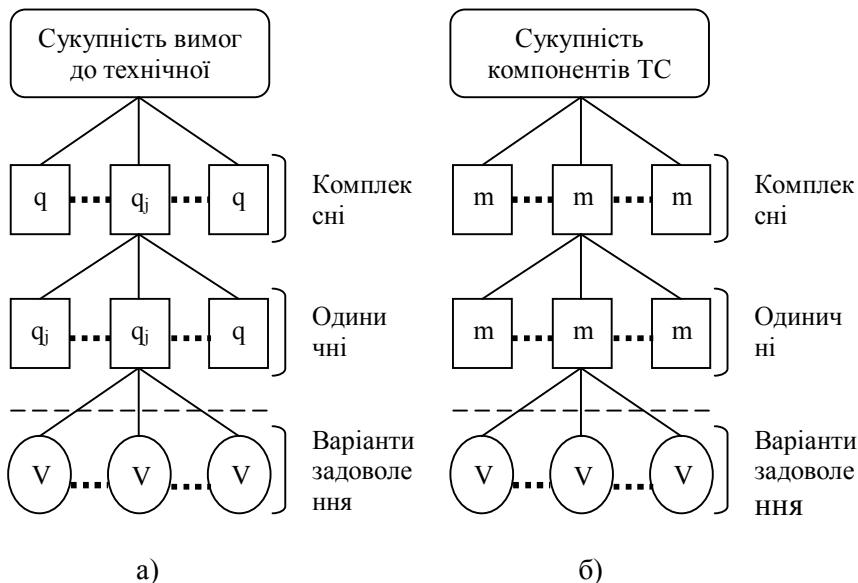


Рис. 5.2. Дерева вимог до компонентів:

а – дерево вимог до технічної системи; б – дерево компонентів

Аналогічно дереву вимог групується і структурується множина компонентів інформаційної системи (рис. 1.3, б).

Оскільки основою для моделі варіантів служать сукупність вимог до і структурні моделі, доцільно оцінювати проектні варіанти по критеріям задоволення вимог і модифікації (компонентів). Для особи, що приймає рішення також важливий критерій вартості реалізації проектного варіанта. ВЗВ необхідно оцінювати по однойменних показникам. Це дозволяє формалізувати обчислення значень критеріїв ПВ на основі показників ВЗВ.

Формально концептуальну модель варіантів (КМВ) можна представити кортежем у наступному вигляді:

$$S_{kmv} = \langle Q, V, M, R \rangle, \quad (2.1)$$

де $Q = \{q_j \mid j = 1..J\}$ – множина вимог до технічної системи літака;

$V = \{v_j \mid i = 1..I\}$ – множина варіантів задоволення;

$M = \{m_k \mid k = 1..K\}$ – множина компонентів системи;

$R = \{r_s \mid s = 1..S\}$ – множина взаємозв'язку між елементами $\{Q, V, M\}$ моделі.

Виділяють наступні види відношень:

– $r_{VQ}(V, Q)$ – відношення «ВЗВ – вимога» (кожен кортеж цього відношення визначає задоволення ВЗВ вимоги до системи);

– $r_{VM}(V, M)$ – відношення «ВЗВ – компонент» (кожен кортеж цього відношення визначає компонент технічної системи, що вимагають модифікації чи створення для реалізації ВЗВ);

– $r_{VV}(V, V)$ – відношення «ВЗВ – ВЗВ» (кожен кортеж цього відношення визначає взаємовиключні ВЗВ);

– $r_{QQ}(Q, Q)$ – відношення групування вимог до технічної системи;

– $r_{MM}(M, M)$ – відношення групування компонентів технічної системи.

Формалізовано КМВ описується за допомогою множин $\{Q, V, M\}$, а також:

– булевих матриць суміжності

$VQ = \|vq_{ij}\|$, $VM = \|vm_{ik}\|$, $QQ = \|qq_{it}\|$, $MM = \|mm_{ks}\|$, що описують відповідні відношення в R ;

– векторів показників ВЗВ $E = \|e_{ij}\|$, $W = \|w_{ik}\|$, $C = \|c_i\|$ (задоволення вимог модифікації компонентів, вартості відповідно);

– векторів пріоритету вимог $\mu = \|\mu_p\|$ і об'єму компонентів технічної системи $\pi = \|\pi_y\|$.

Позначимо множину одиничних вимог до технічної системи літака $Q_E \subset Q$, а множина проектних варіантів $A = \{A_l \mid l = 1..L\}$.

Кожному ПВ A_l ставиться у відповідність деяка унікальна

множина ВЗВ a_l , що задовольняє всі вимоги до системи і не містить взаємовиключних ВЗВ:

$$A_l \rightarrow a_l \subseteq V : ((\forall v_i \in a_l, \forall q_i \in Q_E)[vq_{ij} = 1]) \wedge ((\forall v_i, v_k \in a_l)[vn_{ik} = 0])$$

Приклад КМВ в графічному вигляді можна зобразити на рис. 2.4.

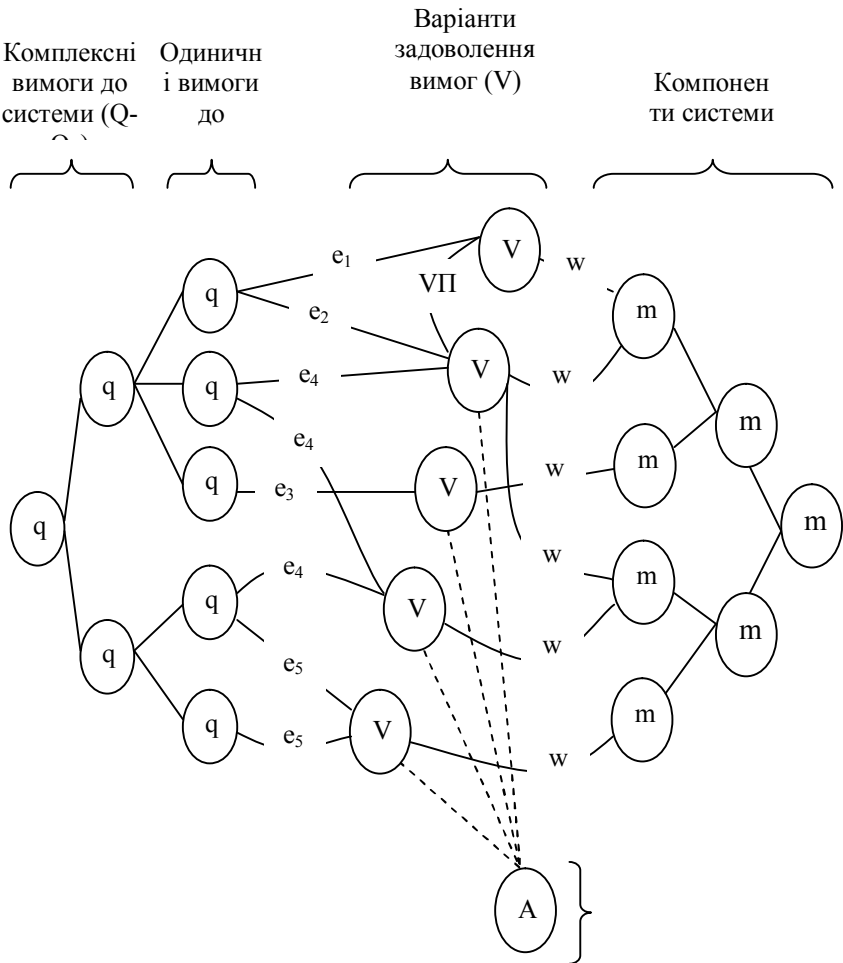


Рис. 5.3. Приклад графічного представлення КМВ

Розроблена КМВ має наступні обмеженнями. ВЗВ в складі моделі повинні бути незалежними. Одержувані оцінки інтегральних критеріїв мають суб'єктивну основу (оскільки побудовані на основі експертних оцінок показників ВЗВ). Хоча вплив цієї особливості дещо знижується із зростанням кількості статистичних випробувань. Можна припустити, що якість оцінок інтегральних критеріїв при використанні КМВ буде більш високим, ніж при оцінці проектних варіантів експертними методами [13], оскільки експертам простіше оцінювати більш часткові варіанти задоволення конкретних вимог до технічної системи, ніж цілі проектні варіанти.

Крім того, розроблена КМВ володіє додатковим властивістю інваріантності. У контексті даної роботи термін «інваріантність» трактується в сенсі незалежності (в певних межах) розробленої моделі варіантів системи від основних умов задачі вибору варіантів технічної системи. Це властивість проявляється як незмінність загального вигляду КМВ для широкого спектру конкретних проектів різних технічних систем літака і як незалежність від методів генерації та вибору варіантів.

КМВ володіє властивістю інваріантності по відношенню до:

- 1) виду інформаційних технічних систем;
- 2) видам структурних моделей, що використовуються для опису технічних систем;
- 3) способу пошуку рішення (методом розв'язку оптимізаційної задачі);
- 4) методам отримання оцінок показників ВЗВ;
- 5) методам генерації проектних варіантів.

У розробленій моделі варіантів відсутня явна залежність від певного виду структурних моделей. Така структурна модель повинна дозволяти:

- моделювання технічної системи в цілому (на формалізованій мові);
- декомпозицію системи на компоненти;
- відображати структуру технічної системи (взаємозв'язки між компонентами).

Для вибору проектного варіанту на основі КМВ може використовуватися широкий спектр формальних методів. Операція вибору в цій моделі зводиться до багатокритеріальної задачі

прийняття рішення, яка може бути вирішена різними способами (наприклад, методами математичного програмування). Можливо також зведення операції вибору до задачі багатомірної оптимізації.

Не залежить КМВ і від способу отримання вихідних оцінок показників варіантів. Для цієї моделі не важливо: отримані оцінки в результаті аналізу накопиченої статистики або сформовані експертними методами. Бажано, щоб ці оцінки були досить об'єктивними. Конкретний же метод їх отримання не має принципового значення. Замість експертних методів, можуть використовуватися інші (наприклад, метод функціонально-вартісного аналізу).

У КМВ відсутні явним чином обмеження по частині методів генерації ВЗВ. Без істотної зміни загального вигляду КМВ може бути доповнена іншими показниками варіантів. Наприклад, явними оцінками часу реалізації варіанту, що дозволить складати плани реалізації проекту концептуального проектування технічної системи. Також в КМВ можна ввести зв'язку між компонентами, що відображають взаємодію компонентів.

Таким чином, розроблена КМВ може бути використана широким колом фахівців в області створення технічних систем. Робота з такою моделлю може вестися на різних рівнях деталізації і з різних точок зору на технічну систему. Ця модель не пред'являє жорстких обмежень по частині використання засобів структурного моделювання, а також по частині методів вибору проектних варіантів.

Разом з тим ми отримали тільки якісні функціональні залежності. Необхідно формалізувати критеріальні оцінки і довести КМВ до кількісних залежностей. Тому можна сформулювати наступні критерії оцінки.

5.3. Оптимізація процесу синтезу технічних систем

5.3.1. Критерій задоволення проектних вимог. На основі дерева вимог до технічної системи будується дерево критеріїв задоволення цих вимог, що схематично показано на рис. 2.5. Кожній вимозі відповідає критерій задоволення цієї вимоги, а інтегральним буде критерій задоволення всіх поставлених вимог.

Тобто структура взаємозв'язків цього дерева критеріїв ідентична структурі взаємозв'язків дерева вимог. Дерево критеріїв доповнюється функціональними зв'язками для інтегральної оцінки задоволення вимог певним проектним варіантом, яка обчислюється за допомогою операторів агрегування. Таким чином дерево критеріїв дозволяє оцінити проектний варіант за характеристикою задоволення сукупності поставлених вимог.

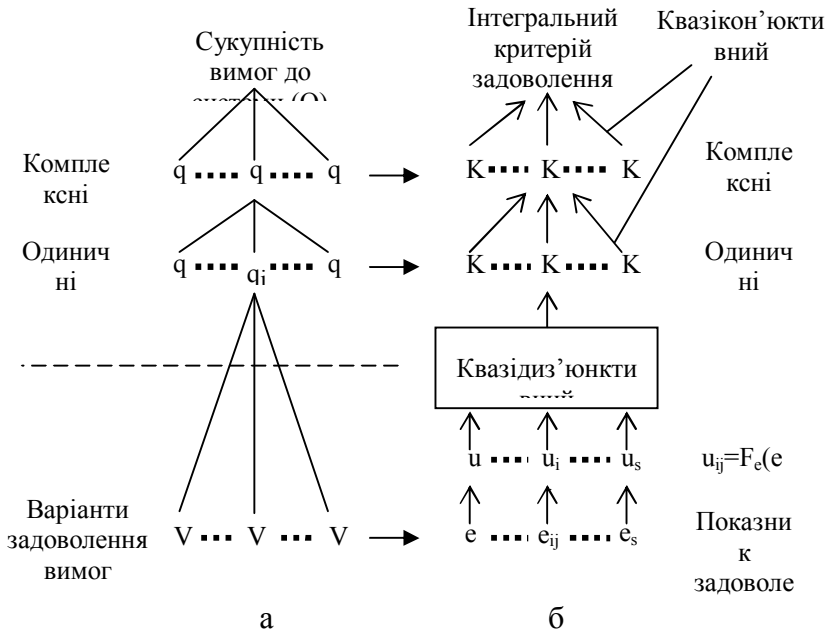


Рис. 5.5. Побудова дерева критеріїв задоволення вимог:
а – вихідне дерево вимог; б – дерево критеріїв задоволення вимог

Вимоги до ТС мають різну важливість, тому для кожної вимоги визначається пріоритет μ_j . Його кількісне значення визначається експертними методами [13] і задається за допомогою лінгвістичної змінної, з метою спрощення роботи експертів. На основі пріоритетів вимог обчислюються ваги критеріїв $\tilde{\mu}_j \in (0,1)$, крім інтегрального. Сума ваг критеріїв - безпосередніх нащадків будь якого критеріїв повинна дорівнювати одиниці. Вага j -го

критерію задоволення вимоги до технічної системи обчислюється за формулою

$$\tilde{\mu}_j = \mu_j / \sum_{i \in I(j)} \mu_i,$$

де $I(j)$ –

множина індексів критеріїв безпосередніх нащадків того ж критерію, який є батьківським для j -го критерію.

Показник задоволення i -м варіантом задоволення вимог j -ї вимоги e_{ij} зручно вимірювати у відсотках (значення 100% відповідає повному задоволенню вимоги). Перехід від фізичних одиниць вимірювання цього показника до відносних здійснюється за допомогою функції переходу $F_E(x)$. Дерево критеріїв задоволення вимог використовується для оцінки об'єктів одного типу по одному показнику (задоволення вимоги), тому можна використовувати єдину функцію перекладу. Ця функція повинна бути зростаючою монотонною. Оскільки при оцінці задоволення вимоги не настільки важливі зміни цього показника в областях високих і низьких значень, обрана гаусівська функція переходу (задається функцією нормального розподілу). Робочий інтервал аргументу $F_E(x)$ заданий від $x_{\min} = 0$ до $x_{\max} = 100$. Виходячи з цих умов, визначаються значення параметрів функції нормального розподілу: $m = 50$, $\sigma = 50/3$. Таким чином, відносне значення показника задоволення i -м ВЗВ j -ї вимоги $\tilde{e}_{ij}$ і обчислюється за формулою $\tilde{e}_{ij} = F_E(e_{ij}) = N(e_{ij}, m, \sigma)$.

Як зазначалося вище, в загальному випадку часткових варіантів задоволення однієї і тієї ж вимоги може бути кілька. Агрегування показників таких ВЗВ у відповідний одиничний критерій проводиться за допомогою оператора. Оскільки для високого значення такого критерію достатньо високого значення показника хоча б одного з ВЗВ, обраний квазідиз'юнктивний оператор.

Значення одиничного критерію задоволення j -ї вимоги $h_E(q_j)$ обчислюється за формулою:

$$h_E(q_j) = \frac{1}{n_E^j} \sum_{i=1}^I vq_{ij} \cdot \varphi_E^{-1}(\tilde{e}_{ij}), \quad (2.2)$$

де n_E^j – нормуючий коефіцієнт $n_E^j = \sum_{i=1}^I vq_{ij}$, $\varphi_E(x)$ – генеруюча функція $\varphi_E(x) = x^2$.

Агрегування комплексних (і інтегрального) критеріїв задоволення вимог до технічної системи проводиться квазікон'юнктивним оператором, оскільки для високої корисності ПВ важлива висока ступінь задоволення всіх вимог) з генеруючою функцією $\varphi_E(x) = \sqrt{x}$.

5.3.2. Критерій модифікації компонентів. Оцінка проектного варіанта за інтегральним критерієм модифікації проводиться аналогічно оцінці по критерію задоволення вимог. Проте є відмінності в способі відображення нерівнозначності компонентів, вигляді генеруючої функції, вигляді функції переходу, вигляді оператора агрегування.

Дерево критеріїв модифікації компонентів технічної системи будується на основі дерева компонентів. Нерівнозначність компонентів відображається шляхом присвоєння кожному компоненту деякого показника «об'єму». У рамках даного дослідження оцінка обсягу компонента проводиться за допомогою експертних методів на основі лінгвістичної змінної. Для перекладу якісних значень в кількісні зручно використовувати шкалу.

На основі показників обсягу компонентів технічної системи π_k визначаються ваги критеріїв модифікації компонентів $\tilde{\pi}_k$. Обчислення проводиться як і у випадку з критерієм задоволення вимог, тільки по іншим деревам (замість дерева вимог і критеріїв вимог відповідно дерево компонентів і дерево модифікації компонентів) і замість пріоритетів вимог використовуються показники об'єму компонента.

Показник обсягу модифікації i -м ВЗВ k -го компонента системи W_{ik} зручно вимірювати у відсотках. Значення 100% відображає необхідність повністю переробити компонент (фактично, створити заново). При створенні нового компонента

показник обсягу модифікації можна приймати рівним 100%. Перехід від фізичних одиниць виміру цього показника до відносних здійснюється з допомогою функції переходу $F_W(x)$.

Робочий інтервал аргументу $F_W(x)$ задано від $x_{\min} = 0$ до $x_{\max} = 100$. У міру збільшення значення показника модифікації, його внесок у корисність ПВ зменшується. Функція $F_W(x)$ повинна бути спадною монотонною. Несуттєві зміни цього показника в області низьких значень, але його внесок досить різко зростає в області високих значень. Тому, вибрана функція $F_W(x) = 1 - F'_W(x)$, де $F'_W(x)$ – опукла вниз функція виду $F'_W(x) = \frac{1}{1-e} (1 - e^{x/x_{\max}})$. Таким чином, відносне значення показника

модифікації i -м ВЗВ k -го компонента технічної системи W_{ik} обчислюється за формулою $\tilde{w}_{ik} = F_W(w_{ik}) = 1 - \frac{1}{1-e} (1 - e^{w_{ik}/w_{\max}})$.

Як зазначалося вище, в загальному випадку кілька ВЗВ можуть одночасно вимагати модифікації одного і того ж компонента технічної системи. Агрегування показників таких ВЗВ у відповідний одиничний критерій проводиться за допомогою оператора. Оскільки для високого значення такого критерію необхідно, щоб значення $\tilde{w}_{ik}$ всіх таких ВЗВ було високим, обраний квазікон'юнктивний оператор. Значення одиничного критерію модифікації k -го компонента $h_W(m_k)$ обчислюється за формулою:

$$h_W(m_k) = \frac{1}{n_W^k} \sum_{i=1}^I v m_{ik} \cdot \varphi_W^{-1}(\tilde{w}_{ik}), \quad (2.3)$$

де n_W^k – нормуючий коефіцієнт $n_W^k = \sum_{i=1}^I v m_{ik}$, $\varphi_W(x)$ –

генеруюча функція $\varphi_W(x) = \sqrt{x}$.

Агрегування комплексних (і інтегрального) критеріїв обсягу модифікації компонентів (так само, як і для критерію задоволення вимог) проводиться квазікон'юнктивним оператором (оскільки

більш корисний ПВ, що має низький інтегральний обсяг модифікації компонентів) з генеруючою функцією $\varphi_E(x) = \sqrt{x}$.

5.3.3. Критерій вартості. Оцінка ПВ за критерієм вартості простіше, ніж по двом попереднім. Показник вартості i -м ВЗВ C_i може вимірюватися в грошових одиницях (або в людино-годинах). Робочий інтервал аргументу функції переходу $F_C(x)$ для показника вартості заданий від $x_{\min} = \min(c_i)$ до $x_{\max} = \max(c_i)$. Вибрана лінійна функція переходу наступного вигляду: $F_C(x) = (x_{\max} - x)/(x_{\max} - x_{\min})$. Високе значення критерію вартості i -го ВЗВ $\tilde{c}_i$ досягається при низькому значенні показника вартості C_i .

Для високого значення інтегрального критерію вартості ПВ необхідно високе значення критеріїв вартості всіх ВЗВ, що входять в такий ПВ. тобто, достатньо одного дорогого ВЗВ у складі ПВ, щоб визнати такий проектний варіант досить дорогим. Тому, значення інтегрального критерію вартості l -го ПВ $h_C(A_l)$ обчислюється за допомогою квазікон'юнктивного оператора за наступною формулою:

$$h_C(A_l) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I r_v(i, l) \cdot \varphi_C^{-1}(\tilde{c}_i), \quad (2.4)$$

де $\varphi_C(x)$ – генеруюча функція $\varphi_C(x) = \sqrt{x}$, $r_v(i, l)$ – індикаторна функція вигляду $r_v(i, l) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v_i \in A_l \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$.

5.4 Метод оптимального синтезу проектних варіантів технічної системи

Для ухвалення рішення про синтез нової структури системи і для вибору ПВ необхідно визначити:

- 1) граничні ПВ для технічної системи;
- 2) оптимальний ПВ;

3) множину недомінуючих ПВ (Парето-оптимальну множину).

Граничні ПВ (з максимальним задоволенням вимог, з мінімальною модифікацією компонентів, з мінімальною вартістю) становлять великий інтерес, дозволяючи оцінити загальні параметри проекту. Малоімовірно, що такі граничні ПВ будуть реалізовані. В результаті рішення задачі вибору варіантів необхідно отримати один ПВ, оптимальний по сукупності трьох критеріїв. В силу складності завдання вибору варіанти, знайдений ПВ слід вважати базовим. Необхідно надати особі, що приймає рішення можливість самостійної оцінки і вибору ПВ на основі неформальних способів. Такий ПВ слід шукати серед множини недомінуючих ПВ (в Парето-оптимальній множині). Використовуючи формальний опис КМВ можна формально поставити ці завдання.

Використовуючи позначення множини ВЗВ, що входять в l -й ПВ, a_l інтегральних критеріїв задоволення вимог $H_E(a_l)$, модифікації компонентів $H_W(a_l)$ вартості реалізації $H_C(a_l)$ можна сформулювати вимоги для пошуку граничних ПВ:

– з максимальним задоволенням вимог
 $A^E : H_E(a^E) = \max_A H_E(a_l) ;$

– з мінімальною модифікацією компонентів
 $A^W : H_W(a^W) = \max_A H_W(a_l) ;$

– з мінімальною вартістю реалізації
 $A^C : H_C(a^C) = \max_A H_C(a_l) .$

Для вибору оптимального проектного варіанта проводиться обчислення критерію оптимальності ПВ в цілому шляхом агрегування трьох інтегральних критеріїв (задоволення вимог, вартості, модифікації компонентів) за допомогою адитивного оператора [12]. Для обчислення значення цього критерію необхідно задати важливість кожного інтегрального критерію. Вона задається за допомогою масових характеристик a_E , a_W , a_C (задоволення вимог, модифікації компонентів системи, вартості ПВ, відповідно),

що задовольняють умовам: $a_E \in (0,1)$, $a_W \in (0,1)$, $a_C \in (0,1)$, $a_E + a_W + a_C = 1$. Маси інтегральних критеріїв визначаються експертними методами. Значення інтегральних критеріїв обчислюються за формулами (1.2)-(1.4).

Умову формування Парето-оптимальної множини проектних варіантів $A_{ПО}$ можна записати наступним чином:

$$A_{ПО} = \{A_s\} \subseteq A : (\forall A_s, A_l \in A) [(H_W(a_s) \geq H_W(a_l)) \vee (H_E(a_s) \geq H_E(a_l)) \vee (H_C(a_s) \geq H_C(a_l))]$$

Введемо вектор булевих змінних, що описують реалізацію ВЗВ

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_l), \quad \text{де}$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v_i \text{ входить в ПВ (реалізується)} \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases} \quad \text{Позначимо}$$

$x^t = (x_1^t, x_2^t, \dots, x_l^t)$ t -ту конфігурацію вектора x . Тоді кожному ПВ можна поставити у відповідність конфігурацію цього вектора $A_l \leftrightarrow x^t$, $a_l \leftrightarrow x^t$, що описують склад ВЗВ у проектному варіанті.

Вимога непустої множини ВЗВ в складі l -го ПВ можна записати як $\sum_{i=1}^l x_i^t > 0$. Умова задоволення l -им ПВ j -ї вимоги можна

записати як $\sum_{i=1}^l x_i^t \cdot vq_{ij} > 0$, а задоволення всіх вимог — як

$\prod_{j=1}^J \sum_{i=1}^l x_i^t \cdot vq_{ij} > 0$. Відсутність в складі l -го ПВ взаємовиключних ВЗВ

можна записати як $\sum_{i=1}^l \sum_{y=1}^l vn_{iy} \cdot x_i^t x_y^t > 0$.

Множина ПВ утворюється множиною конфігурацій $\tilde{X} = \{x^t\}$, що задовольняють вимоги допустимості:

$$\sum_{i=1}^l x_i^t > 0, \prod_{j=1}^J \sum_{i=1}^l x_i^t \cdot vq_{ij} > 0, \sum_{i=1}^l \sum_{y=1}^l vn_{iy} \cdot x_i^t x_y^t > 0.$$

Умови граничних вирішень задачі вибору проектного варіанту (A^E, A^W, A^C) можна записати в наступному вигляді:

$$A^E : \forall x^t \in \tilde{X}, x^t \neq x^E \Rightarrow H_E(x^E) > H_E(x^t) \text{ або } H_E(x^t) \rightarrow \max ;$$

$$A^W : \forall x^t \in \tilde{X}, x^t \neq x^W \Rightarrow H_W(x^W) > H_W(x^t) \text{ або } H_W(x^t) \rightarrow \max ;$$

$$A^C : \forall x^t \in \tilde{X}, x^t \neq x^C \Rightarrow H_C(x^C) > H_C(x^t) \text{ або } H_C(x^t) \rightarrow \max$$

Умову пошуку оптимального ПВ A^* можна записати в наступному вигляді $A^* : \forall x^t \in \tilde{X}, x^t \neq x^* \Rightarrow Z(x^*) > Z(x^t)$ або $Z(x^t) \rightarrow \max$, де $Z(x^t)$ – критерій оптимальності ПВ, і визначається за формулою:

$$Z(x^t) = a_E H_E(x^t) + a_W H_W(x^t) + a_C H_C(x^t).$$

Таким чином, умову формування Парето-оптимальної множини ПВ $A_{ПО}$ можна записати наступним чином:

$$A_{ПО} = \{A_s\} : (\forall x^s, x^t \in \tilde{X}) [(H_E(x^s) \geq H_E(x^t)) \vee (H_W(x^s) \geq H_W(x^t)) \vee (H_C(x^s) \geq H_C(x^t))]$$

5.5. Розробка методу синтезу проектних варіантів концептуального проектування

Як сказано вище, склад ПВ може бути описаний вектором булевих змінних $x = (x_1, x_2, \dots, x_I)$. Для отримання множини ПВ необхідно згенерувати всі можливі конфігурації вектора x (по суті, всі можливі поєднання нулів і одиниць у всіх позиціях вектора) і виключити з них такі, які містять взаємовиключні ВЗВ і задовольняють не всі вимоги.

Найбільш простий алгоритм генерації множини ПВ може бути розроблений на методі простого перебору [14]. Вектор x подібний бітовому вектору тієї ж розмірності або бінарного числа,

що містить так ж кількість розрядів. В такому випадку одержання конфігурацій можливо шляхом покрокового збільшення такого двійкового числа на одиницю. Недоліком такого алгоритму є велика кількість конфігурацій ($2^l - 1$), які необхідно розглядати кожного разу.

Тому розроблено евристичний алгоритм синтезу ПВ. Основою цього алгоритму служить розщеплення вектора x на два вектора, що не перетинаються між собою. Для кожного з них формується множина допустимих конфігурацій, які потім об'єднуються (в конфігурацію вектора x). Поліпшення досягається за рахунок:

- виключення завчасно непридатних конфігурацій ВЗВ;
- покрокової процедури складання конфігурації вектора x з конфігурацій двох таких векторів (це дозволяє обривати генерацію некоректних конфігурацій на ранніх стадіях).

Вектор x розщеплюється на два вектори x_l і x_N :
 $x_l \cup x_N = x$, $x_l \cap x_N = 0$. Змінні вектора x_l відповідають ВЗВ, які задовольняють тільки одну якусь

вимогу $(\forall x_t \in x_N) \left[\sum_{j=1}^J vq_{tj} > 1 \right]$. Змінні вектори x_N навпаки,

відповідають ВЗВ, що задовольняють більше однієї вимоги. Якщо позначити через $X_l = \{x_l^t\}$ множину всіх конфігурацій вектора

x_l , через $X_N = \{x_N^s\}$ множину всіх конфігурацій вектора x_l ,

то $X = \{x^t\} = X_l \times X_N$. При скороченні вихідних множин

конфігурацій векторів x_l і x_N до допустимих множин

$\tilde{X}_l \subseteq X_l, |\tilde{X}_l| \leq |X_l|, \tilde{X}_N \subseteq X_N, |\tilde{X}_N| \leq |X_N|$, відповідно,

отримаємо $|\tilde{X}_l \subseteq \tilde{X}_N| \leq |X|$.

Евристичний алгоритм працює наступним чином. Спочатку формуються два вектори x_l і x_N . Потім формується множина взаємовиключних ВЗВ, що містяться у векторі x_N . З його врахуванням формується множина допустимих (не містять взаємовиключних ВЗВ) конфігурацій вектора $x_n (\tilde{X}_N \subseteq X_N)$.

Для кожної конфігурації $x_N^t \in \tilde{X}_N$ викликається процедура «деформування» вектора x . У ній для кожної вимоги (починаючи з 1-го і закінчуючи J-им) формується вектор ВЗВ, що задовольняють тільки цю вимогу. Потім формується множина допустимих (що не містять взаємовиключних ВЗВ) конфігурацій такого вектора. Якщо досягнута остання J-та вимога, то поточна конфігурація вектора x додається в множину $\tilde{X}_N$. Якщо дотримується умова задоволення j-ї вимоги системи, то здійснюється перехід до наступної вимоги (j+1) і викликається ця ж процедура «деформування» з поточною конфігурацією частини вектора x .

Порівняння продуктивності двох розглянутих алгоритмів показало середньостатистичну перевагу в п'ять-шість разів продуктивності евристичного алгоритму над алгоритмом простого перебору.

Методика синтезу і вибору ПВ повинна містити певний набір кроків, щоб із вхідної множини даних виконати створення результуючої інформації, яка піде на подальші етапи проектування.

Таким чином, вхідними даними для цієї методики є:

- сукупність вимог до технічної системи з оцінками пріоритету;
- структурні моделі технічної системи з оцінками обсягу її компонентів;
- перелік ВЗВ (з оцінками за показниками задоволення вимог, вартості, обсягу модифікації компонентів технічної системи).

Результатами застосування цієї методики є:

- множина ПВ;

- оцінки проекту створення технічної системи (максимальне задоволення вимог, мінімальна вартість, мінімальний обсяг модифікації компонентів технічної системи);

- оптимальний ПВ;

- Парето-оптимальна множина ПВ.

Метод синтезу та вибору ПВ концептуального проектування технічної системи включає наступні етапи:

1. Первинне наповнення КМВ (дерево вимог до системи, дерево компонентів технічної системи);

2. Введення ВЗВ, прив'язка їх до вимог і компонентам;

3. Генерація і оцінка ПВ (формальними способами);

4. Аналіз граничних ПВ;

5. Вибір найкращого ПВ.

Розглянемо, які саме дії виконуються на кожному з етапів методу синтезу і вибору проектних варіантів. Технології збору вимог до технічних системи і побудови структурних моделей зараз добре опрацьовані [91, 107], тому операція первинного наповнення концептуальної моделі проектних варіантів може бути ефективно автоматизована. Операція додавання варіантів задоволення вимог припускає якусь технологію їх генерації. У межах даного дослідження операція генерації ВЗВ не формалізована, але пропонуються підходи до її реалізації. Операція оцінки ВЗВ (в межах даного дослідження) побудована на основі експертних методів. Операції генерації та вибору ПВ формалізовані і можуть бути ефективно автоматизовані. Зазвичай, операція наповнення та використання варіантів задоволення вимог для генерації та вибору проектного варіанту має ітеративний характер. Більш того, на підставі результатів застосування КМВ можуть коригуватися вихідні вимоги до технічної системи.

Операція первинного наповнення призначена для створення в КМВ дерева вимог до технічної системи і дерева компонентів. Черговість створення цих дерев істотної ролі не грає. Вони служать основою для подальшого наповнення КМВ варіантами задоволення вимог, для генерації і оцінки проектних варіантів технічної системи. Операція може виконуватися ітераційно (в декілька прийомів).

Створення дерева вимог до технічної системи зручно проводити на основі документа типу «Специфікації вимог» [107].

При цьому в КМВ повинні бути занесені унікальний ідентифікатор, назва, пріоритет вимоги до технічної системи. Вершина дерева вимог до технічної системи в КМВ (вузол, батьківський для всіх вимог верхнього рівня) вводиться штучно і служить для уніфікації операцій агрегування критеріїв по дереву вимог (комплексний критерій самого високого рівня і є інтегральний критерій). Для випадку проведення експрес-аналізу проекту створення технічної системи доцільно обмежитися групами вимог.

Створення дерева компонентів технічної системи зручно проводити на основі структурних моделей. Вид таких моделей істотної ролі не грає; важливо, що з їх допомогою можна провести декомпозицію. В даний час широко застосовуються [40] функціональна, інформаційна, об'єктно-орієнтована, структурна моделі. У КМВ необхідно відобразити відносини ієрархії (вкладеності) компонентів технічної системи. Для випадку проведення експрес-аналізу проекту доцільно обмежитися головними підсистемами технічної системи.

Зазвичай, вкладеність компонентів технічної системи властива функціональним, а іноді об'єктно-орієнтованим і структурним моделям систем. В інформаційних моделях всі компоненти розташовуються на одному рівні. Відношення взаємодії компонентів в КМВ не відображаються. У неї повинні бути занесені: унікальний ідентифікатор, найменування, об'єм компонента. Оцінка обсягу компонента технічної системи також здійснюється експертними методами.

Оцінка пріоритету вимоги проводиться експертними методами на основі методу лінгвістичних змінних [32, 73, 81]. Для цього в КМВ вводиться шкала, яка ставить у відповідність якісним значенням пріоритетів кількісні значення. В більшості випадків зручно користуватися лінійною шкалою, що узгоджується з рекомендаціями, наприклад [81]. Аналогічним чином в КМВ вводиться шкала для оцінки обсягу компонента.

Як зазначалося раніше, генерація ВЗВ є найбільш складною і найменш формалізованою операцією в складі процесу створення технічної системи. Кількість і якість ВЗВ сильно залежить від досвіду та інтелектуального рівня розробників. Для генерації ВЗВ доцільно скористатися методами інженерної творчості, що дозволяють підвищити інтелектуальний потенціал розробників.

Зокрема, методом морфологічного ящика (Цвіккі), оскільки ідеї цього методу лягли в основу КМВ. Слід також зазначити, що КМВ не залежить від конкретних методів, застосовуваних для генерації ВЗВ.

Синтезовані ВЗВ пов'язують одиничні вимоги з одиничними компонентами. Аналіз несумісності доцільно проводити серед ВЗВ, що вимагають модифікації одних і тих же компонентів. Крім того, несумісними можуть бути ВЗВ, в основі яких лежать взаємовиключні концепції. Виявити такі варіанти формальними методами важко.

Оцінка показників синтезованих ВЗВ проводиться експертними методами. Кожен ВЗВ необхідно оцінити за показником вартості і по показниками: задоволення вимог до технічної системи (для кожної вимоги, що задовольняється), модифікації компонентів технічної системи (для кожного компонента, що модифікується). Вартість ВЗВ може оцінюватися в будь-яких одиницях, наприклад, у грошах чи людино-годинах. Показники задоволення вимог до технічної системи і модифікації компонентів технічної системи оцінюються у відсотках. В останньому випадку оцінка 100% означає необхідність повністю переробити компонент технічної системи або створити новий. Від експерта вимагається вказати три значення показника: мінімальне, максимальне і найбільш ймовірне. Для оцінки показників ВЗВ доцільно залучати (в якості експертів) провідних розробників (системних архітекторів).

По частині вимог до технічної системи доцільно вводити в КМВ не всі вимоги із специфікації, а обмежитися деяким рівнем (наприклад, комплексними вимогами найнижчого рівня). По частині функціональних компонентів технічної системи доцільно обмежитися рівнем підсистем і великих модулів. При збільшенні кількості вимог до технічної системи, компонентів технічної системи в КМВ виникає потреба у великій кількості різноманітних ВЗВ, кожен з яких необхідно оцінити за трьома показниками. Це призводить до збільшення часу, необхідного для побудови КМВ, і до зниження її переваг по частині експрес-аналізу проекту. Але для проекту технічної системи середнього рівня КМВ зазвичай містить близько 20-30 одиничних вимог і близько 40-50 компонентів технічної системи, що не є великою складністю.

Операції первинного наповнення КМВ можуть бути оптимізовані шляхом використання шаблонів. Кожен шаблон являє собою КМВ в якій введені типові вимоги до технічної системи, типові компоненти технічної системи, типові ВЗВ, а також зв'язку між ними. При такому підході, наповнення КМВ зводиться до корегування складу чи рідше структури вимог, компонентів, ВЗВ і до подальшої оцінки ВЗВ. Таким чином, можна поступово створити базу даних шаблонів КМВ.

Операції генерації ПВ на основі КМВ формалізовані і можуть бути ефективно автоматизовані. Звичайна послідовність наступна: проводиться перша генерація ПВ. При цьому переконуються в наявності оцінок для всіх показників всіх ВЗВ. Проводиться аналіз граничних ПВ (з максимальним задоволенням вимог до технічної системи, мінімальною вартістю, мінімальною модифікацією компонентів). Внаслідок такого аналізу можуть бути виявлені неправильні оцінки показників ВЗВ. Можуть бути скориговані вимоги до технічної системи і їх пріоритети, оцінки обсягу компонентів технічної системи.

Потім задаються ваги інтегральних критеріїв, коефіцієнт ризику та проводиться вибір оптимального ПВ. Зазвичай виконується декілька ітерацій, в ході яких коригуються ваги і коефіцієнт ризику. В ході ітерацій також можуть бути скориговані вимоги до технічної системи, їх пріоритети, а також оцінки обсягу компонентів.

Якщо в результаті вибору на основі такого загального критерію оптимальності не вдається вибрати задовільний ПВ (з якихось причин найкращий ПВ не влаштовує), проводиться аналіз Парето-оптимальної множини ПВ. Один з цих проектних варіантів береться за основу і допрацьовується неформальними методами. У будь-якому випадку, вибраний ПВ слід розцінювати, як базовий, що вимагає уточнення і доопрацювання. Однак вибір одного з ПВ дозволяє досить чітко визначити концептуальну побудову створюваної технічної системи.

Контрольні питання

1. Які етапи включає життєвий цикл технічної системи?
2. Які основні вимоги PLM-рішень до технічних систем?
3. Що розуміють під концепцією PLM-рішень?

4. Що називається математичною схемою?
5. Які типові схеми використовуються під час моделювання технічних систем?
6. Які умови та особливості використання під час розробки моделей систем різних типових схем?
7. Що називається синтезом технічних систем?

6. ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА КОМП'ЮТЕРНІ ПРОГРАМИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

6.1. Сучасні пакети прикладних програм математичного моделювання

Для вирішення задач із дослідження технічних систем, їх елементів та параметрів, а також внутрішніх і зовнішніх процесів популярними серед дослідників є такі пакети прикладних програм моделювання, як MATRIX, MathCAD, MathLAB, LabView та ін.

Надзвичайна простота інтерфейсу MathCAD зробила його одним із найпопулярніших математичних пакетів. Він надає користувачу широкий набір інструментів для реалізації графічних, аналітичних і числових методів вирішення математичних задач на комп'ютері. Виконуючи рутинні чи несуттєві операції, пакет дозволяє самостійно виконати громіздкі обчислення, розв'язати змістовні задачі, набути та закріпити навички з вирішення прикладних задач.

MathCAD – це математично орієнтована універсальна система комп'ютерної математики, призначена для автоматизації рішення масових математичних завдань у різних галузях науки, техніки й утворення. Назва системи походить від двох слів – Mathematics (математика) і CAD (Computer Aided Design – системи автоматичного проектування або САПР). Так що, цілком правомірно вважати MathCAD математичними САПР.

MathCAD – це програмний засіб або середовище для виконання на комп'ютері різноманітних математичних і технічних розрахунків, що надає користувачу інструменти для роботи з формулами, числами, графіками й текстами та забезпечене простим в освоєнні графічним інтерфейсом.

Крім числових та аналітичних обчислень, вони блискуче вирішують складні оформлювальні завдання, які ледве вдасться вирішити популярним текстовим редакторам або електронним таблицям. За допомогою MathCAD можна, наприклад, готувати статті, книги, дисертації, наукові звіти, дипломні й курсові проекти, що складаються не тільки з текстів, але й зі складних математичних формул, із вишуканим графічним поданням результатів обчислень і багатьма «живими» прикладами. Застосування бібліотек і пакетів розширення забезпечує професійну орієнтацію MathCAD на будь-яку галузь науки, техніки й освіти.

При вирішенні завдань інтеграції ця система забезпечує справжню інтеграцію з іншими математичними, графічними та офісними системами. Для цього до її складу входить спеціальний системний інтегратор MathConnex.

У середовищі MathCAD доступні більше сотні операторів і логічних функцій, призначених для числового і символьного вирішення технічних проблем різної складності. MathCAD включає:

- велику бібліотеку вбудованих математичних функцій;
- інструменти побудови графіків різних типів;
- засоби створення текстових коментарів та оформлення звітів;
- конструкції, подібні до програмних конструкцій мов програмування, що дозволяють писати програми для вирішення задач, які неможливо чи дуже складно розв'язати стандартними інструментами пакету;
- зручно організовану інтерактивну систему отримання довідки та оперативної підказки;
- засоби обміну даними з іншими windows-додатками через механізм OLE (Object Linking and Embedding – зв'язок і впровадження об'єктів);
- засоби переадресації готових робочих документів електронною поштою або через Інтернет у вигляді, представленому на екрані.

При проектуванні MathCAD ставилась мета – створити потужний, гнучкий та простий в користуванні засіб для проведення інженерних розрахунків.

Основною відмінністю MathCAD від інших програмних засобів цього класу є те, що математичні вирази на екрані комп'ютера представлені в загально прийнятній математичній нотації та мають такий вигляд, як в оригіналі. Записавши у звичній формі математичний вираз, можна виконати з ним найрізноманітніші символні або числові математичні операції, можна забезпечити обчислення текстовими коментарями, ілюстраціями, побудованими в інших додатках та отримати повний звіт про виконані обчислення.

Характерним представником цих систем також є MatLab.

Система MatLab це сучасний програмний засіб для матричних обчислень. Це продукт високої якості, що включає в себе обчислення, візуалізацію й програмування в зручному вигляді, де завдання та їх рішення виражаються у формі, близькій до математичного. MatLab складається з п'яти основних частин.

1. Мова MatLab. Мова матриць високого рівня з керуванням потоками, функціями, структурами даних, введенням-виводом і особливостями об'єктно-орієнтованого програмування, що дозволяє створювати нескладні програми та більш складні додатки.

2. Середовище MatLab. Набір інструментів і пристосувань, з якими працює користувач або програміст MatLab. Вона містить засоби для керування змінними в робочому просторі MatLab, введенням і виводом даних, а також створенням, контролем і налагодженням файлів і додатків MatLab.

3. Керована графіка. Графічна система MatLab, що містить команди для візуалізації дво- і тривимірних даних, обробки зображень, анімації та ілюстрованої графіки.

4. Бібліотека математичних функцій. Велика колекція обчислювальних алгоритмів від елементарних функцій, таких, як: сума, синус, косинус, комплексна арифметика до більш складних, таких як: обіг матриць, знаходження власних значень, функції Бесселя, швидке перетворення Фур'є.

5. Програмний інтерфейс. Бібліотека, що дозволяє писати програми на мовах програмування Сі та Фортрані, взаємодіючи з MatLab. Вона також містить засоби для виклику програм з MatLab (динамічний зв'язок).

Крім названих основних частин, в MatLab є доповнення Simulink, яке представляє собою супутню програму, що є інтерактивною системою для моделювання нелінійних динамічних систем. Воно представляє середовище, яке дозволяє моделювати процес за допомогою блоків діаграм на екрані та їхній маніпуляції. Simulink працює з лінійними, нелінійними, безперервними, дискретними та багатомірними системами.

Головна перевага системи MatLab у тому, що в ній реалізовані численні ефективні математичні алгоритми практично для всіх областей інженерної діяльності. Програмні засоби цього типу у вітчизняній літературі називають *універсальними математичними пакетами чи системами*.

Система LabView, розроблена фірмою „National Instruments”, є системою автоматизованого проектування, що має засоби для створення віртуальних обладнань різного призначення, отриманих як в режимі реального часу від фізичного об’єкта, так і у вигляді файлів. Ця фірма існує більше 25 років і є лідером з виробництва контрольно-вимірювальної техніки.

Основним принципом побудови систем збору, обробки й управління на базі обладнання та програмного забезпечення фірми „National Instruments” є можливість перетворення персонального комп’ютера у вимірювальний комплекс із необхідними метрологічними характеристиками.

Конфігурувати вимірювальні комплекси в системі LabView можна як від датчиків і виконавчих механізмів (вимірювальна частина), так і від обробки даних (вимірювальна частина). Дуже важливо, що алгоритм обробки сигналів і для першого і для другого підходу є одним і тим же.

Поява програми LabView дозволила суттєво спростити та зробити універсальним комплекс об’єкт – вимірювання. З’явилась можливість на основі датчика, аналого-цифрового перетворювача та відповідних програмних засобів здійснювати функції множини вимірювальних пристроїв різного призначення, а також функції обробки результатів вимірювань. Усе це в сукупності є характерною рисою так званого віртуального приладу. Запис великих масивів даних дозволяє запам’ятовувати результати експерименту, що дає можливість проводити ретроспективний аналіз, статичну обробку та ін.

LabView – програма, яка включає велику кількість бібліотек для розширеного аналізу сигналів. Програмування в LabView відбувається графічно, тобто відсутній звичний текстовий опис алгоритму на мові програм високого рівня. Сама програма LabView повністю відкрита, дозволяє отримати доступ до будь-якого компоненту всередині її.

Як універсальна система програмування, програма LabView має величезні бібліотеки для роботи з периферійним зовнішнім обладнанням, засобами обробки, аналізу та представлення даних.

На базі LabView можлива навіть побудова засобів дистанційного навчання.

Система жорсткого реального часу LabView Real Time застосовується в системах збору/обробки інформації/управління, коли треба жорсткий детермінізм і коли звичайні операційні системи не можуть бути використані.

Різні види аналізу, що виконуються в комп'ютерних системах першої, другої та третьої груп, засновані на класичних інженерних підходах до розробки математичних моделей поведінки виробу при різних впливах. При кінцево-елементній постановці задачі моделювання досліджувана область попередньо розбивається на обмежену множину кінцевих елементів, зв'язаних між собою кінцевою кількістю вузлів. Шуканими змінними рівнянь математичних моделей є переміщення, повороти, температура, тиск, швидкість, потенціали електричних чи магнітних полів. Ці змінні визначають степені вільності вузлів. Їх конкретний зміст залежить від типу (фізичної природи) елемента, зв'язаного з даним вузлом. Наприклад, у задачах аналізу на міцність для кожного елемента, з урахуванням степенів вільності його вузлів, можуть бути сформовані матриці мас, жорсткості (чи теплопровідності) та опору (чи питомої теплоємності). Множину степенів вільності, що визначає стан усієї системи в даний момент, називають хвильовим фронтом, який може розширюватись чи звужуватись залежно від того, як невідомі змінні вводяться до сукупності, що розглядається, чи виводяться з неї. Після проходження хвильового фронту через усі елементи та вирахування всіх шуканих змінних можна аналізувати отримані результати і будувати гіпотези про поведінку досліджуваної системи.

6.2 CAE-системи комп'ютерного моделювання

Розвиток сучасних комп'ютерних систем з інженерних розрахунків або CAE-систем дозволяє проводити моделювання окремих технічних систем, їх елементів та процесів. Різноманіття фізичних процесів, суб'єктивність в постановці задач аналізу, у підходах до формалізації та алгоритмізації процесів й елементів систем, у виборі методів моделювання та інші причини привели до створення багатьох спеціальних методик, алгоритмів, комп'ютерних програм та систем, призначених для вирішення задач інженерного аналізу та математичного моделювання.

Можна умовно виділити чотири основні групи комп'ютерних систем (програм) інженерного аналізу:

- універсальні системи моделювання, проектування та інженерного аналізу – CAD/CAM/CAE-системи;
- універсальні системи інженерного аналізу – CAE-системи;
- спеціалізовані системи інженерного аналізу – CAE-системи;
- системи та пакети програм математичних методів аналізу й моделювання.

До першої групи відносять системи, що об'єднують процеси проектування та аналізу в єдиний комплекс: CATIA v5 (Франція), UNIGRAPHICS (США) та ін. При їх використанні не виникають труднощі зі створенням складної та математично точної моделі виробу, бо тільки вони мають найпотужніші засоби геометричного моделювання. Організація обміну між підсистемами конструювання та аналізу непомітна для користувача. Обидві підсистеми взаємодіють з однією базою даних або мають внутрішні формати даних. Склад різних видів аналізу обмежений, порівняно зі складом універсальних програм, і, в основному, призначений для вирішення таких задач, як структурний аналіз, лінійний статичний аналіз, модальний аналіз, аналіз (поздовжніх) деформацій, тепловий аналіз, аналіз стійкого стану (електропровідність, лінійна конвекція) та ін.

До другої групи входять універсальні CAE-системи, такі як ANSYS (США), SAMTECH (Бельгія), MacNeal Schwendler Corporation (MSC) (США).

Фірмою Ansys Inc. розроблено сімейство програм аналізу. Основною багатоцільовою програмою цього сімейства є ANSYS/Mytlphysics. Доповненням до неї є створена підмножина автономних спеціалізованих пакетів, які збільшують можливості основної програми. Серед них можна виділити такі:

- ANSYS/Mechanical – рішення задач міцності, теплопередачі та акустики. Розрахунок та оптимізація конструкції, визначення переміщень, напруг, зусиль, тиску і температур можна виконати за допомогою цього пакету;

- ANSYS/Structural – аналіз міцності виробу, що проектується з урахуванням геометричних і фізичних нелінійностей, нелінійної поведінки кінцевих елементів і втрати стійкості;

- ANSYS/LinearPlus – спрощена версія пакету ANSYS/Mechanical, призначена для рішення задач лінійної статички, динаміки та стійкості конструкції;

- ANSYS/Thermal – може використовуватись для аналізу теплових стаціонарних і нестаціонарних процесів;

- ANSYS/PrePost – призначений для побудови кінцево-елементної сітки на стадії підготовки задачі та обробки результатів рішення до потрібного вигляду.

Компанією Samtech у співпраці з Лабораторією аерокосмічних технологій **Львівського** університету розроблена універсальна система аналізу SAMCEF, усі розрахункові модулі якої зв'язані з єдиним графічним пре- і постпроцесором BACON.

Універсальна комплексна система програм SAMCEF також має модульну структуру, включаючи:

- THERNL – нелінійний температурний аналіз стаціонарних і перехідних режимів, розрахунок задач електропровідності, конвекції, випромінювання. Дослідження електричних і теплових явищ, пов'язаних з ударом блискавки чи іскровим розрядом;

- ASEF – лінійний статичний аналіз з урахуванням нелінійних умов;

- SPECTRAL – розрахунок випадкових характеристик руйнувань від **утомленості**, що базується на спектральному аналізі;

- REPDYN – аналіз перехідних, гармонічних і сейсмічних процесів;

- STABI – визначення умов втрати стійкості конструкції;

– DYNAM – розрахунок особистих частот пружних систем.

Серед додаткових розробок цієї фірми можна виділити такі програми:

– FOURIER – лінійний статичний аналіз задач Фур'є;

– MECANO/STRUCTURE – нове програмне середовище, що відкриває можливості спільного нелінійного аналізу структури та податливості елементів механізмів. Уперше була використана для дослідження авіаційної та космічної техніки;

– ROTOR – унікальний інструмент динамічного аналізу обертальних механізмів;

– BOSS/QUATTRO – пакет, призначений для оптимізації роботи програмного середовища SAMCEF та ін.

Основні програмні розробки фірми MSC:

– MSC.NASTRAN – аналіз лінійної й нелінійної статистики та динаміки, стійкості, теплопередачі, акустики, аеропружності, оптимізації конструкцій;

– MSC.PATRAN – інтегроване середовище систем моделювання, аналізу – та проектування на основі сучасного графічного інтерфейсу користувача;

– MSC.DYTRAN – аналіз високонелінійних швидкопротікаючих динамічних процесів. Зіткнення конструкцій з руйнуванням, попадання предметів в авіадвигун, обрив лопатки, вибухи, штампування металу та ін.;

– MSC.MARC – комплексний нелінійний аналіз конструкцій та рішення складних задач термоміцності.;

– MSC.FATIGUE – нові методи аналізу ресурсу та довговічності. Утома, поява і ріст тріщин, оптимізація конструкції за критерієм довговічності;

– MSC.CFDesign – газо- і гідродинаміка в середовищі MSC.NASTRAN. Задачі стікання рідини та газу з урахуванням теплових процесів;

– MSC.Working FEA – розрахунки на міцність в пакетах AutoCAD, SolidWorks і SolidEdge;

– MSC.NVII_Manager – комплексний аналіз акустики, вібрації та стійкості автомобіля;

– MSC.AMS – пре- і постпроцесор для моделювання конструкції автомобіля;

- MSC.Flight Loads&Dynamics – комплексний аналіз аеропружних, динамічних і міцнісних характеристик літальних апаратів;

- MSC.MVISION – дані про властивості матеріалів.

Третю групу систем складають численні спеціалізовані системи. До них можна віднести: пакет MSC.SuperForge (фірма MSC), призначений для об'ємного моделювання процесів штамповки і кування. Результати аналізу можуть бути використані для проектування оснастки і технологічних процесів. Крім американської фірми MSC, визнаними лідерами в області моделювання процесів штамповки і кування є американська компанія SFTS (система DEFORM), французька компанія TRANVALOR (система FORGE) і російська фірма „Квантор-Софт” (система Qform).

В області розробки програмних середовищ інженерного аналізу значних результатів досягнуто російськими фірмами. Наведемо приклади пакетів і фірм, що виконали розробку, та перелік основних задач, які вирішуються з їх допомогою:

- Euler (АвтоМеханіка) – динамічний аналіз багатокомпонентних механічних систем;

- ИСПА (АЛЕКСОФТ) – розрахунок й аналіз на міцність;

- ПОЛІГОН (ЦНДІ матеріалів) – система моделювання ливарних, гідродинамічних, теплових та усадочних процесів в 3D-постановці;

- РИМАН (ПроПроГрупа) – розрахунок та аналіз напружено-деформованого стану конструкції, вирішення пружних і пластичних задач, штампування та ударних напруг;

- APM WinMachine (НТЦ АПМ) – комплекс програм для проектування і розрахунків деталей машин, аналізу напружено-деформованого стану конструкцій та їх елементів;

- ДІАНА (НДЦ АСК) – аналіз конструкцій та їх елементів.

Для дослідження динамічних процесів, що протікають в системах автоматичного регулювання та управління, а також для вирішення інших задач аналізу, широкого використання набули спеціальні програмні комплекси MATRIX, Simulink, VisSim, EASY5 та інші.

ABAQUS - кінцево-елементний комплекс загального призначення для проведення багатоцільового інженерного

прочностного аналізу. ABAQUS дозволяє розраховувати складний нелінійний напружено-деформований стан будівельних споруд і оцінювати їх міцність і стійкість з урахуванням багатofакторного навантажування, в тому числі сейсмічного, теплового та вибухового. Споруди можуть моделюватися з урахуванням впливу попередньо навантаженої арматури з одночасним розрахунком підстав і сполучень навантажень, з контактними взаємодіями і моделюванням руйнувань.

До переваг даного програмного комплексу відноситься також наявність великої кількості нелінійних моделей матеріалів, зокрема матеріалів металевої арматури, бетонів, ґрунтів, пористих матеріалів тощо, що дозволяє ефективно і з великою точністю вирішувати завдання, що містять дані типи матеріалів, з урахуванням їх реологічних властивостей.

Серед розв'язуваних за допомогою ABAQUS завдань слід відзначити:

- розрахунок **усталостной** міцності й довговічності конструкцій під впливом довільного за часом навантажування з урахуванням пластичного стану;
- оптимізацію конструкцій до зміни параметрів - можна, наприклад, оптимізувати геометрію конструкції по напруженням, що виникають в конструкції при заданих навантаженнях;
- розрахунок конструкцій на статичні, динамічні, сейсмічні й вітрові навантаження, а також на поєднання комбінацій навантажень (багатofакторність навантажування);
- розрахунок тріщиноутворення і концентраторів напружень;
- завдання з прогресуючого руйнування.

Відмінною особливістю ABAQUS є можливість використання власних підпрограм, що дозволяє створювати свої моделі поведінки різних матеріалів, кінцеві елементи і типи навантажень.

ABAQUS є надійним, якісним кодом з зручним інтерфейсом. Наявність вбудованої мови програмування PYTHON дозволяє створювати власні графічні оболонки, адаптовані для вирішення конкретних типів завдань.

Програмний комплекс ABAQUS являє собою повністю паралельний код і може використовуватися на всіх

обчислювальних платформах, включаючи багатоядерні обчислювальні системи і кластери.

COSMOS / Works - кінцево-елементний комплекс розроблений спеціально для спільного використання з системою твердотілого параметричного моделювання SolidWorks. Комплекс являє собою відкриту систему модулів, призначених для рішення задач міцності, стійкості, динаміки конструкцій, а також завдань оптимізації, гідродинаміки і магнітного випромінювання. Функціональні можливості комплексу можуть бути доповнені за допомогою спеціалізованих модулів: Assemblies – розрахунок складних збірок; OPTSTAR-оптимізація і аналіз чутливості; Translators - перетворення звичайно-елементних форматів; Dynamic Designer / Motion - моделювання руху; COSMOS / HFS Suite - розрахунок височастотних електромагнітних полів; COSMOS / Flow - газо-і гідродинаміка; FlowPlus - газо-і гідродинаміка.

DesignWorks - являє собою комплекс повністю інтегрованих в SolidWorks систем інженерних розрахунків, розроблених фірмою CADSI (США). DesignWorks включає в себе три самостійних програмних продукту: DesignWorks / Motion для кінематичного аналізу збірок, створених в SolidWorks; DesignWorks / Structure для розрахунків на міцність; DesignWorks / Thermal для теплових розрахунків.

MSC / NASTRAN для Windows - це система інженерних розрахунків, заснована на методі кінцевих елементів. Геометричні моделі для MSC / NASTRAN можна як формувати за допомогою внутрішнього препроцесора системи, так і імпортувати з будь-якої іншої CAD - системи. MSC / NASTRAN для Windows має прямий інтерфейс з системою твердотілого параметричного моделювання SolidWorks. Крім того, система може працювати з готовими кінцевоелементними моделями, які були створені за допомогою інших систем інженерних розрахунків і потім передані в MSC / NASTRAN.

MSC / Working Model - модуль розроблений фірмою MSC / Working Knowledge (відділення американської компанії MSC / Software Corporation). Цей модуль служить для проведення експрес-аналізу міцності і динамічних характеристик виробу, а також вирішення завдань оптимізації. Він являє собою складову частину комплексу, що об'єднує, крім MSC / Working Model

наступні модулі:

Working Model Motion - кінематика і динаміка механізмів;

Working Model Studio - анімація і фотореалістичні зображення;

Working Model View-обробка та візуалізація даних з CAD / CAE систем;

Working Model 4D - спільне рішення задач динаміки механізмів і міцності.

Part Adviser - це перший програмний продукт з розроблюваної MoldFlow Corporation серії програм Plastic Adviser. Part Adviser дає можливість швидкої перевірки будь-якої деталі, одержуваної за допомогою лиття пластмас під тиском, на максимальну відповідність умовам виробництва. Система створена на основі неньютонівського неізотермічного математичного вирішувача, що враховує реальну поведінку пластмаси при литті під тиском. Разом з системою поставляється база даних матеріалів, що включає в себе більше 4000 різних полімерів, використовуваних у всьому світі.

ANSYS - універсальна програмна система кінцево-елементного (KE) аналізу, яка впродовж останніх 30 років є одним зі світових лідерів у галузі комп'ютерного інжинірингу (CAE, Computer-Aided Engineering) і KE рішення лінійних і нелінійних, стаціонарних і нестаціонарних просторових задач механіки деформівного твердого тіла і механіки конструкцій (включаючи нестаціонарні геометрично і фізично нелінійні задачі контактної взаємодії елементів конструкцій), задач механіки рідини і газу, теплопередачі і теплообміну, електродинаміки, акустики, а також механіки зв'язаних полів.

Система ANSYS - це гнучкий і надійний засіб проектування та аналізу. Особливістю програмної системи є файлова сумісність всіх членів сімейства ANSYS для всіх використовуваних платформ. Багатоцільова спрямованість програми (тобто реалізація в ній засобів для опису відгуку або реакції складної системи на впливи різної фізичної природи) дозволяє використовувати одну й ту ж модель для вирішення таких пов'язаних завдань, як міцність при теплових навантаженнях, вплив магнітних полів на міцність конструкції, тепломасоперенос в електромагнітному полі. Як новачкам, так і досвідченим користувачам ця програма пропонує безперервно зростаючий перелік розрахункових засобів, які дозволяють:

- Врахувати різноманітні конструктивні нелінійності;
- Вирішити самий загальний випадок контактної взаємодії для просторових тіл складної конфігурації;
- Допускають наявність великих (кінцевих) деформацій, переміщень і кутів повороту;
- Виконати багатопараметричну оптимізацію в інтерактивному режимі;
- Аналізувати вплив електромагнітних полів;
- Вирішувати завдань гідро-і аеродинаміки,
- А також багато іншого - разом з параметричним моделюванням, адаптивним перестроюванням сітки, використанням р-елементів і обширними можливостями створення макрокоманд за допомогою мови параметричного проектування системи ANSYS - APDL.

Patran є інтегруючим середовищем і графічною оболонкою для MD Nastran, MSC Nastran, Marc, Dytran, Sinda та інших звичайно-елементних систем аналізу. Patran забезпечує імпорт геометричних моделей з CAD-систем, створення розрахункових моделей, запуску їх на розрахунок, графічне відображення та обробку отриманих результатів. Patran за допомогою повністю керованого графічного інтерфейсу і інтерактивної довідкової системи забезпечує краще рішення завдань по створенню розрахункової моделі та обробці результатів. Patran включає в себе великі функції створення та модифікації геометричних моделей, в тому числі твердотільне моделювання (включаючи Булеві операції), створення серединних поверхонь, автоматичне розпізнавання і параметризацію отворів, заокруглень і фасок. Patran надає великий набір можливостей для завдання навантажень, граничних умов, властивостей матеріалів та елементів, параметрів розрахунку, а також для візуалізації, обробки та перетворення результатів рахунку. Є також можливості запуску розрахунку (у тому числі віддаленого і в гетерогенних комп'ютерних мережах, включаючи багатопроцесорні режими роботи), відстеження та контролю процесу рішення задач. Функції "Групи", "Списки", "суперелементів", "Області" та ін дозволяють створювати і обробляти повнорозмірні докладні моделі складних виробів, таких як літак, автомобіль і т.п., що включають мільйони кінцевих елементів. Ці функції, також як і стандартні інтерфейси Patran, широко використовуються при веденні міжнародних проектів кількома компаніями або при організації робіт на

розподілених робочих місцях при веденні великих проектів у рамках одного підприємства.

Adams - найбільш широко використовуваний програмний комплекс для віртуального моделювання складних машин і механізмів. Adams використовується для розробки та вдосконалення конструкцій фактично всього, що рухається - від простих механічних і електромеханічних пристроїв до автомобілів і літаків, залізничної техніки і космічних апаратів і т.д. За допомогою Adams можна швидко створити повністю параметризовану модель виробу, будуючи її безпосередньо в препроцесорі або імпортуючи з найбільш поширених CAD-систем. Задавши зв'язки компонентів моделі, приклавши навантаження, визначивши параметри кінематичного впливу і запустивши розрахунок можна отримати дані, повністю ідентичні результатами натурних випробувань системи. Таким чином, уявлення про роботу виробу з'являється ще до початку розкрою металу або відливання пластика для виготовлення дослідного зразка.

Користувачеві доступні:

- визначення параметрів виробу, що визначають його працездатність і точність;
- ідентифікація зіткнень компонентів машини, визначення габаритних розмірів простору, необхідного для її рухомих частин;
- визначення рівня діючих навантажень, необхідної потужності приводів;
- оптимізація параметрів виробу.

Adams відрізняють:

- широкий набір видів кінематичних зв'язків, пружних і дисипативних ланок, навантажень, кінематичних впливів;
- дружній, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс - якщо Ви знайомі з іншими програмними засобами CAE, то швидко освоїте роботу з Adams;
- повна параметризація віртуальних моделей - будь-які параметри прототипу можуть бути пов'язані функціональною залежністю, модифікація-якого розміру моделі автоматично призводить до зміни її конфігурації тощо;
- ефективні засоби візуалізації результатів моделювання, включаючи анімацію і побудова графіків.

APM WinMachine являє собою комплексне програмне забезпечення для розрахунку та автоматизованого проектування деталей машин, механізмів, елементів конструкцій і вузлів. Вона адресована інженерам і конструкторам, зайнятим розробкою нового і модернізацією існуючого механічного устаткування. APM WinMachine складається з наступних підсистем: підсистема розрахунку зубчастих, черв'ячних, ремінних ланцюгових передач з можливістю автоматичної генерації креслень елементів передач; підсистема розрахунку і проектування з'єднань деталей машин і елементів конструкцій, комплексний розрахунок всіх типів різьбових, зварних, клепаных з'єднань і з'єднань деталей обертання; підсистема розрахунку, аналізу і проектування валів і осей; підсистема розрахунку неідеальних підшипників кочення; підсистема розрахунку і проектування пружин та інших пружних елементів машин; підсистема розрахунку і проектування кулачкових і мальтійських механізмів підсистема розрахунку і проектування важільних механізмів довільної структури; підсистема розрахунку і аналізу радіальних і наполегливих підшипників, що працюють в умовах рідинного і напіврідинного тертя; підсистема розрахунку неідеальних передач поступального руху, розрахунок гвинтових передач ковзання, кулько-гвинтових і планетарних гвинтових передач; підсистема розрахунку і проектування плоских ферменних конструкцій методом кінцевих елементів; підсистема розрахунку напружено-деформованого стану плоских деталей методом кінцевих елементів; підсистема розрахунку і проектування балочних елементів конструкцій; підсистема розрахунку напружено-деформованого стану тривимірних рамних конструкцій; підсистема розрахунку і проектування пластинчастих, оболонкових і стрижневих конструкцій, а також їх довільних комбінацій; модуль зберігання та редагування стандартних та інформаційних даних, необхідних для функціонування кожної з перерахованих вище підсистем; електронний підручник "Основи проектування машин".

GEARS - система розрахунку зубчастих, черв'ячних, ланцюгових і ременних передач. В системі GEARS реалізовані геометричний розрахунок і розрахунок на прочність й довговічність механічних передач різних класів - циліндричних зубчастих передач зовнішнього і внутрішнього зачеплення,

конічних зубчатих передач з прямими і круговими зубами, циліндричних черв'ячних передач, ланцюгових передач з втулочно - роліковим ланцюгом та ін. Крім того, система виконує розрахунок наладок на зубообробні станки.

СТАРТ призначена для розрахунку міцності і жорсткості розгалужених просторових трубопроводів різного призначення при статистичному навантаженні. Програма розраховує трубопроводи будь-якої складності - плоскі, просторові, розгалужені, із замкнутими контурами, з різними конструкціями кінцевих і проміжних опор, і т.д. У програмі є нормативна база по розділах "МАТЕРІАЛИ", "ПРУЖИНИ" і "ГРУНТИ". СТАРТ має сертифікат відповідності Держстандарту Росії ГОСТ Р RU.9011.1.3.0013.

Intermech Gear система проектування зубчастих коліс, являє собою комплекс програмних та інформаційних засобів, які забезпечують проектування циліндричних зубчастих коліс зовнішнього і внутрішнього зачеплення на етапі розробки складальних і робочих креслень. Система передбачає можливість проектування наступних типів зубчастих коліс, що розрізняються за кількістю зубчастих вінців і геометрії зуба: за кількістю зубчастих вінців: одновінцеві зубчасті колеса; блоки зубчастих коліс без обмеження кількості зубчастих коліс в блоці; з геометрії зуба: прямозубі; косозубі; шевронні; зубчасті колеса зі зміщенням; зубчасті колеса з нестандартним вихідним контуром зуба.

САМ ЛП "Полігон" дозволяє провести відпрацювання деяких найбільш важливих технологічних параметрів ливарних процесів не на реальній литві, а на її моделі, програмно реалізованої на персональному комп'ютері. САМ ЛП "Полігон" призначена для моделювання процесів затвердіння, визначення усадочних раковин і макропористості, визначення мікропористості, розвитку деформацій для прогнозу кристалізаційних тріщин, формування та розрахунок будь-яких "критеріїв якості" для прогнозу структури, ліквіацію, механічних властивостей і т.п.

6.3. Функціональне моделювання технічних систем

Одним із перших та основних етапів з опису виробничих процесів підприємства є вибір методів та засобів моделювання. В

даний час на ринку програмного забезпечення існує велика кількість інструментальних засобів, які призначені для моделювання виробничих процесів. В основу кожного з них покладено певну методологію.

В цілому виділяють два окремі підходи до моделювання.

Структурно-алгоритмічний – основними блоками моделі при використанні даного підходу є функції (процедури). Модель являє собою побудовану послідовність функцій, при цьому є можливість їх декомпозиції на складові частини; на вхід кожної функції поступають деякі дані, на виході отримуємо певні результати її виконання та необхідні для цього ресурси – працівники, обладнання, інформаційні системи та ін. До цього підходу відносять методологію IDEF. Інструментом, який реалізує дану методологію є BPWin.

Об'єктно-орієнтований підхід передбачає використання об'єктів – сутностей, які визначаються ідентичністю, станом та поведінкою. Модель в даному випадку являє собою всебічний опис об'єкту дослідження. Вона має опис: організаційної структури підприємства, структури інформаційних систем, операційних та регламентуючих документів. При моделюванні у відповідності до об'єктно-орієнтованого підходу створюється єдина база даних об'єктів моделі, завдяки цьому є можливість відстеження взаємозв'язків між об'єктами.

Методології, які підтримують об'єктно-орієнтований принцип: методологія ARIS (група інструментальних засобів IDS Sheer «ARIS») та методологія UML (інструментальний засіб Rational Rose). Методологія UML в основному орієнтована на розробку програмного забезпечення, ARIS використовується для опису виробничих процесів підприємства. ARIS, в тому числі, забезпечує можливість оцінки процесів за заданими параметрами, наприклад з точки зору часу та вартості їх виконання.

На вітчизняних авіабудівних, суднобудівних та машинобудівних підприємствах для моделювання і аналізу виробничих процесів широко використовуються наступні засоби моделювання: Rational Rose, Oracle Designer, AllFusion Process Modeller (BPWin) та AllFusion ERwin Data Modeler (ERWin), ARIS, Power Designer. За кордоном, окрім вище згадуваних, активно використовуються такі засоби, як System Architect, Ithink Analyst,

ReThink та ін. Розглянемо можливості інструментальних засобів моделювання, які масово використовуються добре зарекомендували себе на підприємствах України.

BPWin/ERWin

BPWin та ERWin компанії Computer Associates International, Inc. (CA) входить в п'ятірку провідних виробників програмного забезпечення, який пропонує засоби моделювання, резервного копіювання, управління інфраструктурою підприємства (мережею, серверами та ін.). Пакет BPWin ґрунтується на методології IDEF та призначений для функціонального моделювання і аналізу діяльності підприємства. Функціональна модель IDEF0 відображає функціональну структуру об'єкту, тобто дії, які він виконує та зв'язки між цими діями.

Можливості BPWin:

- ✓ підтримує одразу три стандарти нотації - IDEF0 (функціональне моделювання), DFD (моделювання потоків даних) та IDEF3 (моделювання потоків робіт);
- ✓ дозволяє оптимізувати процедури на підприємстві;
- ✓ повністю підтримує методи розрахунку собівартості за об'ємом господарської діяльності (функціонально-вартісний аналіз, ABC);
- ✓ дозволяє полегшити сертифікацію на відповідність стандартам якості ISO9000;
- ✓ інтегровано з ERWin (для моделювання БД), Paradigm Plus (для моделювання компонентів ПЗ) та ін.;
- ✓ інтегровано з засобами імітаційного моделювання Arena;
- ✓ має власний генератор звітів;
- ✓ дозволяє ефективно маніпулювати моделями – об'єднувати їх та розділяти;
- ✓ має широкий набір засобів документування моделей, проектів.

Пакет ERWin – це засіб концептуального моделювання БД. Використовується при моделюванні і створенні БД довільної складності на основі діаграм «сутність-зв'язок». На даний момент ERWin є найбільш популярним пакетом моделювання даних завдяки підтримці широкого спектру СУБД самих різних класів. Можливості ERWin:

- ✓ підтримує методологію структурного моделювання SADT та наступні нотації: стандартну нотацію IDEFX для ER-діаграм

моделей даних, нотацію ІЕ і спеціальну нотацію, яку призначено для проектування сховищ даних – Dimensional;

- ✓ підтримується пряме (створення БД на основі моделі) та зворотне (генерація моделі за існуючою БД) проектування для 20 типів СУБД: реляційні і спеціалізовані СУБД, які призначені для створення сховищ даних;
- ✓ інтегровано із засобами Computer Associates для підтримки всіх стадій розробки ІС, CASE-засобами Oracle Designer, Rational Rose та ін.;
- ✓ дозволяє повторно використовувати компоненти створених раніше моделей;
- ✓ можлива спільна робота групи проектувальників над однією моделлю (за допомогою AllFusion Model Manager);
- ✓ дозволяє переносити структуру БД (не самі дані!) з СУБД одного типу в СУБД іншого ;
- ✓ дозволяє документувати структуру БД.

Oracle Designer

Oracle Designer компанії Oracle. Набір інструментальних засобів Oracle Designer пропонує інтегроване рішення для розробки прикладних систем корпоративного рівня для Web і клієнт серверних/додатків. Oracle Designer приймає участь у кожній фазі життєвого циклу розробки ПЗ – від моделювання виробничих процесів до їх впровадження. Метою Oracle Designer є збір даних про потреби користувачів та автоматизація побудови гнучких графічних додатків. Інструментальні засоби побудовані на базі загальновідомих методик, які охоплюють весь життєвий цикл розробки та дозволяють користувачам здійснювати побудову моделей звичним для їх підприємства способом. Засоби концептуального проектування Oracle Designer включають в себе:

- ✓ ER-діаграми (діаграми інформаційної структури предметної області, яка представлена у вигляді об'єктів та їх взаємозв'язків);
- ✓ діаграми функціональної ієрархії, які описують функції, що виконує система;
- ✓ діаграми потоків даних, які циркулюють на підприємстві.

Такі моделі являють собою інформаційні потреби в зручному та наглядному для сприйняття вигляді, що робить їх продуктивним засобом комунікації між проектувальниками та

користувачами в процесі уточнення постановки завдання. Будь-які зміни у виробничих процесах можуть бути внесені в моделі та буде згенеровано модифікований додаток, який базуватиметься на нових схемах виробничих процесів. Oracle Designer автоматично створює звіти, які містять всю інформацію про проект і можуть бути використані як набір документів, що відображають поточний стан проекту.

Rational Rose

Rational Rose компанії IBM. IBM Rational Rose входить до складу пакету IBM Rational Suite та призначено для моделювання програмних систем з використанням широкого кола інструментальних засобів і платформ. Rational Rose є одним з провідних інструментів візуального моделювання в програмній індустрії завдяки повноцінній підтримці мови UML та багатомовній підтримці командної розробки. Інструментальний засіб повністю підтримує компонентно-орієнтований процес створення ІС. Інтеграція Rational Rose з Rational RequisitePro дозволяє на базі візуальної моделі розробити повний набір вимог, які необхідно реалізувати при створенні кінцевої моделі. Інтеграція Rational Rose з Rational TestManager дає можливість створювати сценарії тестування на базі візуальної моделі.

Power Designer

Power Designer компанії Sybase. Компанія Sybase з дня свого заснування традиційно є провідним постачальником інформаційних технологій на світовому ринку фінансових інститутів: технології Sybase використовують 90% компаній світового ринку цінних паперів, 60% світових банків та 68% компаній Wall Street. Power Designer є комплексним вирішенням для моделювання та розробки додатків і виробничих процесів для підприємств, які потребують швидкого, послідовного та ефективного з точки зору витрат підходу.

Остання версія продукту, Power Designer, має нові можливості по моделюванню виробничих процесів, об'єктному моделюванню, яке базується на UML і підтримує як традиційні, так і

нові технології моделювання в рамках однієї розвиненої графічного середовища. Це дозволяє значно скоротити витрати та час реалізації проекту, який повинен функціонувати на різних платформах і інструментальних середовищах.

ARIS

ARIS компанії IDS Sheer AG. В даний час спостерігається тенденція інтеграції різних методів моделювання та аналізу систем, яка проявляється у формі створення інтегрованих засобів моделювання. Одним з таких засобів є ARIS, який розроблено німецькою фірмою IDS Sheer. Система ARIS являє собою комплекс засобів аналізу та моделювання діяльності підприємства. Її методичну основу складає сукупність різних методів моделювання, які відображають різні погляди на досліджувану систему. ARIS підтримує чотири типи моделей, що відображають різні аспекти досліджуваної системи:

- ✓ організаційні моделі, які представляють структуру системи – ієрархію організаційних підрозділів, посад та конкретних осіб, зв'язки між ними, а також територіальну прив'язку структурних підрозділів;
- ✓ функціональні моделі, які демонструють ієрархію цілей, що стоять перед фахівцями, з сукупністю дерев функцій;
- ✓ інформаційні моделі, які відображають структуру інформації, що необхідна для реалізації всієї сукупності функцій системи;
- ✓ моделі управління, які забезпечують комплексний погляд на реалізацію виробничих процесів в рамках системи.

Для побудови перерахованих типів моделей використовуються як власні методи моделювання ARIS, так і різні відомі методи та мови моделювання (ER та UML). ARIS не накладає обмежень на послідовність побудови вказаних вище типів моделей. Моделі в ARIS являють собою діаграми, елементами яких є різні об'єкти – *«функція»*, *«подія»*, *«структурний підрозділ»*, *«документ»* та ін. між об'єктами встановлюються різні зв'язки. Кожному об'єкту відповідає певний набір атрибутів, які дозволяють ввести додаткову інформацію про конкретний об'єкт. Значення атрибутів можуть використовуватись при імітаційному моделюванні або для проведення вартісного аналізу.

Основна нотація ARIS – eEPC (extended Event-driven Process Chain – розширена модель ланцюга процесів, які керують подіями). Нотація eEPC розширює можливості IDEF0, IDEF3 та DFD, маючи всі їх переваги та недоліки. Порівняльний аналіз нотацій ARIS, IDEF0 та IDEF3 приведений в таблиці 1.

Таблиця 1.

Порівняння нотацій моделювання процесів отримання даних

№	Порівняльний критерій	ARIS	IDEF0	IDEF3
1	2	3	4	5
1	Принцип побудови діаграм/логіка процесу	Часова послідовність виконання процедур	Принцип домінування (ст. IDEF0)	Часова послідовність виконання процедур
2	Опис процедур процесу	Об'єкт на діаграмі	Об'єкт на діаграмі	Об'єкт на діаграмі
3	Вхідний документ	Використовується окремий об'єкт для опису («документ»)	Стрілка зліва, стрілка справа	Немає (може бути відображений в моделі тільки прив'язкою об'єкта-коментаря)
4	Вхідна інформація	Використовується окремий об'єкт для опису («кластер», «технічний термін»)	Стрілка зліва, стрілка зверху	Немає (може бути відображений в моделі тільки прив'язкою об'єкта-коментаря)
1	2	3	4	5
5	Вихідний документ	Використовується окремий об'єкт для опису («документ»)	Стрілка справа	Немає (може бути відображений в моделі тільки прив'язкою об'єкта-коментаря)
6	Вихідна інформація	Використовується окремий об'єкт для	Стрілка справа	Немає (може бути відображений в моделі тільки

		опису («кластер», «технічний термін»)		прив'язкою об'єкта-коментаря)
7	Виконавець процедури	Використовуєть ся окремий об'єкт для опису («позиція», «організаційна одиниця»)	Стрілка знизу	Немає (може бути відображений в моделі тільки прив'язкою об'єкта-коментаря)
8	Обладнання	Використовуєть ся окремий об'єкт для опису	Стрілка знизу	Немає (може бути відображений в моделі тільки прив'язкою об'єкта-коментаря)
9	Управління процедурою	Немає. Може відображатися як символ логіки	Стрілка зверху	Тільки часова послідовність виконання процедур та логіка процесу
10	Контроль виконання процедур	Немає. Може бути відображений вказівкою вхідного документу	Стрілка зверху	Немає
11	Зворотній зв'язок управління, контроль	Немає. Може відображатися символами логіки	Стрілка зверху	Немає

В системі ARIS є внутрішня база даних, яка дозволяє перевіряти модель на суперечливість, цілісність, проводити верифікацію моделі. ARIS – єдиний інструментальний засіб, який орієнтовано на опис процесів, де присутні різні погляди на систему, яку ми можемо оцінити і розглянути з різних сторін, чого немає в інших програмних продуктах. В останні п'ять років ARIS впевнено лідирує серед засобів моделювання. Для функціонального моделювання виробничих процесів на підприємстві доцільно використовувати в залежності від поставленої мети одну з

двох інструментальних засобів – ARIS Toolset 7.0 або BPWin 4.0. Порівняння функціональних можливостей систем наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння функціональних можливостей
інструментальних систем моделювання

№	<u>Можливості/ Інструментальне середовище</u>	<u>ARIS Toolset 7.0</u>	<u>BPWin 4.0</u>
1	2	3	4
1	Стандарт, який підтримується	Частково – DFD, ERM, UML	DFD, IDEF0, IDEF3
2	Система зберігання даних моделі	Об'єктна база даних	Моделі зберігаються в файлах
3	Обмеження на розмір бази даних	Немає	Немає
4	Спроможність групової роботи	Є, використовується ARIS Server	Є, використовується Model Mart
5	Обмеження на кількість об'єктів на діаграмі	Немає	Від 2 до 8
6	Можливість декомпозиції	Необмежена декомпозиція. Можлива декомпозиція на різних типах моделей.	Необмежена декомпозиція. Можливий однократний перехід на іншу нотацію в процесі декомпозиції.
7	Формат представлення моделей	Не регламентується	Стандартний бланк IDEF з можливістю його відключення
8	Зручність роботи по побудові моделей	Складна панель керування. Є вирівнювання об'єктів, є undo.	Проста панель. Нема вирівнювання об'єктів, нема undo.
1	2	3	4
9	UDP–властивості об'єктів, які визначає користувач	Велике, проте обмежена кількість властивостей і кількість типів.	Кількість UDP необмежена. Кількість типів обмежена.
10	Можливість аналізу вартості процесу	Є, можливість використання ARIS	Спрощений аналіз вартості за частотою використання

		ABC.	в процесі. Можливість експорту в Easy ABC.
11	Генерація звітів	Створення звітів на основі стандартних та налагодженим користувачем макросів Visual Basic	RPT Win. Можливість візуального налагодження звітів, включаючи розрахунків за формулами з використанням UDP
12	Складність розробки нестандартних звітів	Складно	Просто

Приклад функціональної моделі виробничого процесу з отримання даних по замовленню, що надійшло на підприємство представлено на рис. 1.

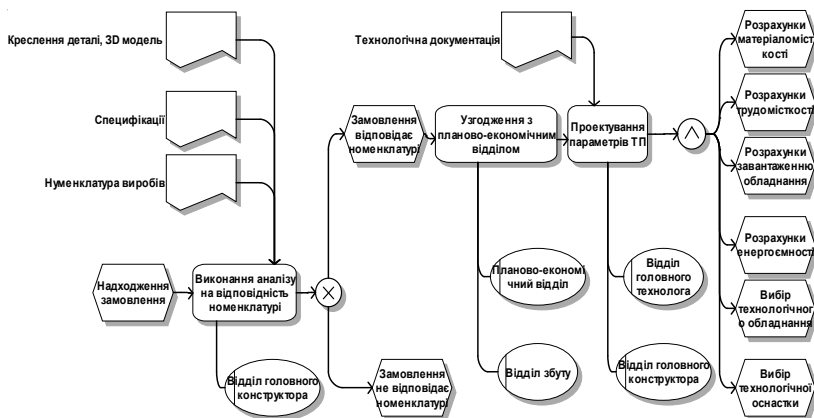


Рис. 1. Процес отримання виробничих даних для аналізу та оцінки замовлення

Функціональну модель побудовано за допомогою інструментального засобу ARIS Toolset 7.0. На моделі показано: початкова подія «Надходження замовлення»; функції по визначенню необхідних даних «Виконання аналізу на відповідність номенклатурі», «Узгодження з планово-економічним відділом» та «Проектування параметрів технологічного процесу»; для виконання кожної функції потрібна відповідна інформація, яку показано на моделі у вигляді направлених на кожну функцію стрілок та відповідні

підрозділи і служби підприємства, що задіяні в даному процесі, які розташовані на моделі внизу кожної функції. Кожний процес породжений певною подією, подією він і повинен завершуватись. В даному випадку кінцевими подіями є: «Розрахунок матеріаломісткості», «Розрахунок трудомісткості», «Розрахунок завантаження обладнання», «Розрахунок енергоємності», «Вибір технологічного обладнання», «Вибір технологічної оснастки».

6.4. Ефективність використання технічних систем

Розглянемо методику оцінки економічної ефективності діяльності РВ від упровадження автоматизованих систем. Для цього розглянемо, з одного боку, вплив кожної автоматизованої системи на ефективність виробничих процесів, а з іншого — вплив засобів і методів впровадження АС. Так ми зможемо сформулювати задачу вибору оптимальних етапів впровадження АС, які забезпечують максимальний ефект їх використання.

Необхідно встановити, якими методами та засобами необхідно реалізувати АС, щоб загальний економічний ефект $\dot{A}_c$ в розрахунку на один промисловий виріб був максимальним:

$$\dot{A}_c = \dot{\Delta I}^{\Delta N} - (C^* - C^a) \rightarrow \max, \quad (6.1)$$

де $\dot{\Delta I}^{\Delta N}$ — додатковий прибуток підприємства від упровадження АС за рахунок скорочення тривалості розробки технологічного проекту і термінів упровадження нового виробу:

$$\dot{\Delta I}^{\Delta N} = \sum_i \sum_j (\Delta T_{ij}^{AC} \cdot x_{ij}), \quad (6.2)$$

де ΔT_{ij}^{AC} — скорочення тривалості проходження i -го процесу j -м засобом за впровадження АС;

x_{ij} — керуюча змінна, що забезпечує вибір варіанта автоматизації;

$x_{ij} = 1$, якщо i -й процес автоматизується j -м засобом, $x_{ij} = 0$, якщо ні;

C^a — витрати на реалізацію процесів освоєння промислового виробу до впровадження АС, обчислюються за традиційними

методиками, які враховують специфіку кожного конкретного підприємства.

ζ — витрати на реалізацію процесів освоєння промислового виробу після впровадження АС, розраховуються так:

$$\zeta = \sum_i \sum_j (\zeta_{ij}^{\delta i} + \zeta_{ij}^{\delta i \text{ á}}) \dot{O}_{ij} x_{ij}, \quad (6.3)$$

де $\zeta_{ij}^{\delta i}$ — витрати на автоматизацію i -го процесу j -м способом (комплекс технічних і програмних засобів) за впровадження АС;

$\zeta_{ij}^{\delta i \text{ á}}$ — витрати на виконання робіт з автоматизації i -го процесу j -м засобом;

T_{ij} — трудомісткість створення i -го процесу j -м засобом;

$x_{ij} = 1$, якщо i -й процес автоматизується j -м засобом, $x_{ij} = 0$, якщо ні;
за обмежень

$$\sum x_{ij} = 1. \quad (6.4)$$

Упровадження АС охоплює всі процеси виробничої діяльності кожного конкретного виробництва. Це є кінцевою метою впровадження сучасних CALS-технологій на підприємствах, головна мета яких — створення ПС та повна автоматизація ЖЦВ у межах цього середовища. Проте ця мета може бути недосяжна за значних обмежень часових та фінансових ресурсів. У такому разі процес створення та впровадження АС можна розподілити на окремі етапи. Для кожного з них потрібно сформулювати своє завдання оптимізації за обмежень на часові та фінансові ресурси даного періоду.

Завдання полягає в тому, що потрібно визначити, для яких виробничих процесів розробки й освоєння промислових виробів має бути впроваджено АС з інформаційною інтеграцією на кожному етапі їх упровадження за умови, що загальний ефект від упровадження на даному етапі, за обмежених ресурсів $E_z^{\text{обм}}$, буде максимальним.

Цільова функція дорівнює різниці додаткового прибутку від скорочення тривалості процесу розробки проекту й освоєння нового промислового виробу за рахунок автоматизації певних етапів ЖЦВ та витрат на реалізацію цих процесів новими методами з використанням сучасних інформаційних технологій. Математично цільова функція має такий вигляд:

$$\hat{A}_{\zeta}^{\hat{i} \hat{a} \hat{i}} = \Delta \tilde{I}^{\hat{A} \hat{N}} - (\zeta^{\hat{i}} - \zeta^{\hat{a}}) \rightarrow \max, \quad (6.5)$$

за обмежень:

$$\sum_i \sum_j (x_{ij} \cdot \zeta_{ij}^{\hat{a} \hat{i} \hat{o}}) \leq \zeta^{\hat{a} \hat{i} \hat{i}}, \quad (6.6)$$

де $i \in I$; I — множина процесів, що автоматизуються; $j(i) \subset J_i$; J_i — множина можливих засобів (варіантів) автоматизації процесів за впровадження АС; $\zeta_{ij}^{\hat{a} \hat{i} \hat{o}}$ — вартість упровадження автоматизованих систем для i -го процесу j -м способом; $\zeta^{\hat{a} \hat{i} \hat{i}}$ — допустима величина витрат на впровадження автоматизованих систем на даному етапі створення ІС.

У загальному випадку вартість упровадження АС, ураховуючи формулу (5.3), розраховують за такою формулою:

$$\zeta_{ij}^{\hat{a} \hat{i} \hat{o}} = \sum_i \sum_j (\zeta_{ij}^{\hat{o} \hat{i}} + \zeta_{ij}^{\hat{o} \hat{a}}) \delta_{ij}. \quad (6.7)$$

Обмеження під час автоматизації полягає в тому, що сума витрат на впровадження необхідних CAD/CAM/CAE- та PDM-систем має не перевищувати наявні фінанси підприємства.

Витрати на впровадження АС у загальному вигляді охоплюють: вартість ліцензій на програмне забезпечення, вартість технічного забезпечення (сервери для зберігання інформації, автоматизовані робочі місця, мережеве обладнання), вартість розробки інтерфейсів для прикладних програм та систем, вартість робіт щодо створення баз даних і наповнення інформацією систем, витрати на підготовку кадрів, підготовку стандартів підприємства тощо.

Для побудови багатоагентних систем необхідний інструментарій, що складається із двох компонентів:

- 1) засобів розробки;
- 2) середовища агентно-орієнтованих програм.

Перший компонент спрямований на підтримку процесів аналізу предметної галузі, створюваної багатоагентної системи, і проектування агентів із заданим поведінням. Другий – забезпечує ефективне середовище для виконання агентно-орієнтованих програм.

Агентно-орієнтовані додатки в нотації мови UML мають засоби для організації предметної галузі, яка створюється багатоагентною системою, засоби побудови архітектури агентів і їх

поводження, а також засоби налагодження агентних додатків і спостереження за поведінням створених агентів.

У контексті теорії штучного інтелекту поняття онтології визначається множиною (словником) використовуваних термінів []. Тобто онтологія визначає імена сутностей предметної галузі (класи, відношення, функції та інші об'єкти) з текстом природною мовою, який описує, що визначають ці імена, і формальними аксіомами, які обмежують інтерпретацію і коректне використання термінів.

Процес обробки інформації агентом охоплює такі основні кроки:

- обробка нових повідомлень;
- визначення того, які правила поведінки можна застосувати в поточній ситуації;
- виконання дій, визначених цими правилами;
- відновлення імітаційної моделі відповідно до заданих правил;
- планування.

У межах цієї моделі множина правил поведінки утворює безліч можливих відгуків агента на зовнішній запит.

Правила поведінки для даної моделі описуються конструкціями виду «коли – якщо – то» []. Частина правила «коли» адресована новим подіям, що виникають в оточенні агента, й охоплює нові повідомлення, отримані від інших агентів. Частина «якщо» порівнює поточну імітаційну модель з умовами, в яких правила поведінки можуть бути застосовані. Зразки в частині «якщо» працюють на намірах, гіпотезах, зобов'язаннях і можливостях, які застосовуються в імітаційній моделі. Частина «то» визначає дії у відповідь на поточні події, стани моделі й зовнішнього оточення.

Найбільш багатообіцяючими є багатоагентні системи на основі розподіленого штучного інтелекту [], які будуються на базі систем, заснованих на правилах і міркуваннях на основі прецедентів. У них кожен агент розглядається як система, заснована на знаннях з додаванням компонентів, що забезпечують безпеку, мобільність, якість обслуговування, взаємодію з іншими агентами, мережевими ресурсами й користувачами. Такі

багатоагентні системи характеризуються скоординованим інтелектуальним поведінням у співтоваристві інтелектуальних агентів.

По суті справи багатоагентні системи можна розглядати як сукупність взаємозалежних програмних модулів (агентів), що є фрагментами знань, доступних іншим агентам. Їх називають «програмними роботами», які задовольняють різні інформаційні й обчислювальні потреби кінцевих користувачів. Вони координують свої знання, цілі, уміння й плани під час розв'язання проблем. Тож багатоагентні системи можна розглядати як програмно-виконавчі пристрої [1].

Отже, кожне підприємство (як головне, так і підрядники) через Інтернет за допомогою багатоагентної експертної системи організовує опис замовлень, послуг або продукції, які воно пропонує на ринок. Агенти багатоагентної системи здійснюють відбір пропозицій на основі запроголозованих критеріїв.

Щоб забезпечити ефективнішу роботу розширеного виробництва, деякі з його учасників (організатори) повинні взяти на себе функції зі створення єдиного інформаційно-управлінського середовища. Для підприємств розглянутого типу до таких функцій належать:

- оперативне інформування учасників про хід робіт, виконуваних в активних мережах, про проблеми, що виникають, і про результати робіт;
- упровадження єдиних базових засобів автоматизації (CAD/CAM-, CAE- і PDM-систем) на підприємствах, що беруть участь у створюваних віртуальних структурах; завдяки цьому досягається скорочення часу та поліпшення якості виконання замовлень, підвищення рівня взаєморозуміння підприємств-учасників;
- регулярне проведення семінарів для фахівців-учасників розширеного підприємства з метою їх ознайомлення з новими технічними рішеннями та для обміну досвідом;
- розміщення технічної і презентаційної інформації в Інтернет і з метою пошуку нових замовлень та залучення нових учасників.

Як уже зазначалося, за допомогою програмних агентів багатоагентної системи здійснюється пошук підрядних організацій,

проводиться узгодження технічних умов на виріб, його функцій та конструкції з замовником. БЕП з'єднана з автоматизованими робочими місцями керівника підприємства, головного конструктора та технолога через інтелектуальний інтерфейс, інтегрований у PDM-систему, створюючи єдиний канал обміну інформацією.

Кінцеве рішення на прийняття замовлення у виробництво, здійснення кооперації з обраними БЕП підрядниками приймає керівник підприємства за допомогою власного АРМ, на який виводиться вся необхідна інформація для стратегічного планування, можуть виводитися дані з CAD/CAM/MRP II та ERP-додатків. Рішення на внесення конструктивних змін до виробу вносить конструктор.

Блок моделювання є однією з головних складових БЕП. За його допомогою здійснюється наповнення бази даних, бази знань та бази прецедентів; формується загальна модель поведінки агентів; здійснюється загальне управління процесом моделювання; забезпечується, у разі потреби, відбір додаткової інформації з бази знань; організовується прогнозування розвитку розподіленої АСППВ.

Блок управління процесом обробки інформації та прийняття рішення безпосередньо виконує роботу агентів експертної підсистеми. У нього програмно зашиті моделі поведінки кожного агента. На цей блок із зовнішнього середовища (Інтернету) через інтелектуальний інтерфейс надходить вхідна інформація від можливих підрядників та клієнтів, він формує також вихідні сигнали у вигляді програм-відповідей на запит. Модуль управління процесом обробки інформації після отримання вхідного запиту (звернення замовника, відповідь БЕП підрядника і т. ін.) здійснює його обробку (ідентифікацію, класифікацію, оцінювання), використовуючи бази даних, знань і прецедентів [1].

База знань за допомогою моделей відображає знання експерта про предметну галузь, способи аналізу фактів, які надходять, і методи виведення, тобто породження нових знань на основі тих, які є, і тих, що надходять.

У базі даних містяться інформаційні дані (графіки, таблиці, звук, тексти), які використовуються базою знань та іншими блоками експертної підсистеми.

Блок програмних засобів, які розширюють можливості програми, на основі використання елементів штучного інтелекту забезпечує виконання додаткових завдань розподіленої АСТПВ. До таких завдань належать: багатокритеріальна оптимізація завантаження устаткування розширеного виробництва; навчання нового, перепідготовка й підвищення кваліфікації досвідченого персоналу; комплекс підтримки прийняття рішення провідними керівниками; проведення аналітичних розрахунків; прогнозування подій тощо. Як мови програмування використовуються мови об'єктно-орієнтованого проектування в середовищах Visual Basic і Delphi [1]. Для опису правил (логіки) поведінки агентів БЕП використовується моделювання в середовищі UML.

Цілісний опис ситуації диспетчером-експертом забезпечується за наявності повного набору показників, що характеризують цю ситуацію. Найбільш зручною й надійною формою для надання вихідних експертних знань є пари «інформаційний опис ситуацій» – «висновок по ситуації», які здобуваються у процесі завчасного аналізу експертом можливих ситуацій або в процесі практичної роботи з оцінювання конкретної ситуації. За допомогою блоку моделювання диспетчер організовує наповнення баз даних, знань і прецедентів, здійснюючи моделювання ймовірних «проблемних» ситуацій та синтез їх рішень.

Для врахування безлічі факторів функціонування розподіленої АСТПВ вихідний набір показників розбивають на фрагменти, які поєднують у своєму складі показники, що утворюють відносно самостійну значеннєву групу. Завдання оцінювання ситуації розподіляють на ряд часткових завдань. Висновки, які формуються окремими завданнями, становлять показники вищого ступеня узагальнення, які є вихідними даними для завдань наступного рівня ієрархії й т. д. Такий процес декомпозиції загального завдання оцінювання приводить до утворення багаторівневої ієрархії, зв'язаної за входом-виходом часткових завдань, а її рішення дає змогу сформувати систему висновків щодо окремих аспектів і загальний висновок про ступінь відповідності сформованої ситуації цілям управління.

З використанням підсистеми логічного висновку узагальненої оцінки ситуації й формування пояснень будують правила й

поповнюють базу знань. Рішення прикладного завдання здійснюється шляхом застосування правил з бази знань до даних про поточну ситуацію.

Висновки про ситуації формуються шляхом логіко-аналітичної обробки даних про ситуації в цілому й об'єкти проблемної галузі. При цьому вважають, що щодо ситуацій, характерних для даної проблемної галузі, ці дані попередньо формуються інформаційними джерелами на основі первинної інформації, здобутої ними, про стан і діяльність об'єктів спостереження.

Для виявлення закономірностей процесу формування висновків про ситуації використовують методи індуктивного узагальнення якісної інформації.

БЕП забезпечує в діалозі з диспетчером автоматизоване налаштування на досліджувану проблемну галузь шляхом введення в систему основних понять, атрибутів, їхніх можливих значень, зв'язків між ними, а також типів можливих ситуацій, характерних процесів та інтерактивну взаємодію з користувачем у процесі її функціонування. У підсистемі передбачено використання (адаптація) різних моделей процесів для досліджуваної проблемної галузі з можливими послідовностями процесів і взаємозв'язків між ситуаціями. Модель процесу задається у вигляді сукупності ситуацій.

Ситуація представляється сукупністю подій. Подія означає встановлення певного значення або досягнення деякої межі значення одного або кількох атрибутів об'єкта (об'єктів). Отже, подія характеризується зміною стану одного або кількох об'єктів. Можлива послідовність перебігу процесів задається їхньою послідовністю й відношенням передумови між ситуаціями. Формування інформаційних повідомлень імітує процес збирання від зовнішніх джерел (операторів системи або автоматичних датчиків) повідомлень про зміни досліджуваної проблемної галузі.

Під час моделювання процесу прогнозування механізм логічного висновку запускається автоматично через установлені проміжки часу. Зіставляючи задані моделі процесів із вхідними інформаційними повідомленнями, він видає рекомендації в реальному часі користувачеві. Одержувана інформація дає об'єктивну оцінку процесів, що відбуваються, і дозволяє

здійснювати прогнозування їхнього перебігу, здійснювати контроль за виконанням керуючих впливів.

Переваги розглянутого підходу, який використовує методи багатоагентних технологій, полягають у більшій гнучкості підсистеми і прискоренні її роботи за рахунок паралельного вирішення завдань програмами-агентами []. Однак реалізація запропонованої БЕП висуває значно вищі технічні вимоги до рівня організації відкритого інформаційного середовища для промислових підприємств, що беруть участь у спільному вирішенні завдань ТПВ.

Контрольні питання

1. Які етапи включає життєвий цикл технічної системи?
2. Які основні вимоги PLM-рішень до технічних систем?
3. Що розуміють під концепцією PLM-рішень?
4. Що називається математичною схемою?
5. Які типові схеми використовуються під час моделювання технічних систем?
6. Які умови та особливості використання під час розробки моделей систем різних типових схем?
7. Що називається синтезом технічних систем?

ЛІТЕРАТУРА

1. Энгельке У.Д. Как интегрировать САПР и АСТПП. Управление и технология / Пер. с англ. под ред. Д.А. Корягина. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
2. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства: В 2 т. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1983. – Т.1: Организация группового производства. – 408 с.
3. Шпур Г., Краузе Ф.Л. Автоматизированное проектирование в машино-строении / Пер. с нем. под ред. Ю.М. Соломенцева, В.П. Виденко. – М.: Машиностроение, 1988. – 648 с.

4. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, А.Ф. Прохоров и др.; Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
5. Автоматизация технологической подготовки заготовительного производства / Г.П. Гырдымов, Л.И. Зильбербург, И.Д. Савченко, В.Н. Шалыгин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1990. – 350 с.
6. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении / Под ред. Н.М. Капустина. – М.: Машиностроение, 1985. – 317 с.
7. Гельмерих Р., Швиндт П. Введение в автоматизованное проектирование / Под ред. В.Н.Фролова; пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1990. – 176 с.
8. Hoda A. ElMaraghy Evolution and Future Perspectives of CAPP, Annals of the CIRP. – 1993. – Vol. 42, №2. – P. 739-749.
9. Кьюсиак Э. Искусственный интеллект: Применение в интегрированных производственных системах / Под ред. С.Н. Дашенко, Е.В. Леввнера; Пер. с англ. А.П. Фомина. – М.: Машиностроение, 1991. – 544 с.
10. Компьютерно-интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении: Учеб. пособ. / Т.А. Альперович, В.В. Баранов, А.Н. Давыдов и др.; Под ред. Б.И. Черпакова. – М.: ГУП "ВИМИ", 1999. – 512 с.
11. Bouzeghoub M. Using Expert Systems in Schema Design // Conceptual Modelling, Databases and CASE: An Integrated View of Information Systems Development. – 1992. – P. 465-487.
12. Управление жизненным циклом продукции / А.Ф. Колчин, М.В. Овсянников, А.Ф. Стрекалов, С.В. Сумароков; Под ред. А. Пальчикова. – М.: Анахарсис, 2002. – 304 с.
13. Павлов В.В. CALS-технологии в машиностроении (математические модели). – М.: Изд-во МГТУ „Станкин”, 2002. – 187 с.
14. CALS в авиастроении / А.Г. Братухин, Ю.С. Давыдов, Ю.С. Елисеев и др. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 304 с.

15. Интеграция данных об изделии на основе ИПП/CALS-технологий. – М.: Европейский центр по качеству, 2002. – Ч. 1. – 174 с.
16. Computer Integrated Manufacturing // IBM CIM Architecture. Principles for Implementation: Data Integration. – Milfort: IBM Corp. CT06460, 1993. – 56 p.
17. Martin J. Information Engineering // Planning and Analysis. – New York: Prentice-Hall, 1990. – Book II. – 540 p.
18. O'Connor A.D. Successful Strategic Information Systems Planning // Journal of Information Systems. – 1993. – №3 (2). – P. 71-83.
19. S. Vajna u.a. Interdisziplinäres und neutrales CIM-Modell // ZwF. – 2001. – № 10. – P. 561-565.
20. Volck R. Entscheidungsverhalten bei der CAD-Einführung // CAD/CAM Report. – 1995. – № 10. – P. 89-97.
21. Grant J., Cullen R. Creation of a “Shared” Design Environment, Using 3D Product Modelling and Visualisation Technologies // 9th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding. – Yokohama: ICCAS’97, 1997. – P. 261-284.
22. Alex G., Alex S. A Formal Model for Oriented Design of Shipbuilding Database // 9th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding. – Yokohama: ICCAS’97, 1997. – P. 173-188.
23. Jari S. CALS. – Stockholm: Magnusson Torbjorn Holm., 1996. – 182 p.
24. Smith J.M. CALS. An introduction to CALS: The Strategy and the Standards. – Dublin: The Cromwell Press Ltd, 1990. – 143 p.
25. Handbook of Life Cycle Engineering: Concept, Tools and Techniques / Edited by A. Molina, J.M. Sanchez, A. Kusiak. – London: Chapman & Hall, 1998. – P.37- 59.
26. Chung L., Katalagarianos P. From Information System Requirements to Designs: A Mapping Framework // Information Systems. – 1991. – №6 (4). – P. 429-461.
27. Kahu G. Some Strategical Aspects and Proposals Concerning Information Technology Development in Romanian Shipbuilding Industry // International Conf. on Inform. and Commun. Technol. in black Sea Area-Galati. – 1999. – November, 15-17. – P. 18-23.

28. Barkmeyer E.J., Feeney A.B., Denno P., Flater D.W. Concepts for Automating Systems Integration // National Institute of Standards and Technology. – 2003. – February. – P. 90-95.
29. Дмитров В.И., Макаренков Ю.М. CALS-стандарты // Автоматизация проектирования. – 1997. – №2. – С. 17-25.
30. Дмитров В.И., Макаренков Ю.М. Аналитический обзор международных стандартов STEP, P_LIB, MANDATE // Информационные технологии. – 1996. – №1. – С. 6-11.
31. Дмитров В.И., Макаренков Ю.М. Аналитический обзор международного стандарта ISO 13584 (P_LIB) // Автоматизация проектирования. – 1997. – №3. – С. 15-18.
32. Industrial Automation Systems and Integration. PARTS LIBRARY. ISO TC 184/SC4/WG2 ISO CD 13584 - 1. – 1995. – 33 p.
33. Дмитров В.И., Макаренков Ю.М. Аналитический обзор международных стандартов ISO 10303 STEP // САПР и графика. – 1997. – № 11. – С. 6-11.
34. Овсянников М.В., Шильников П.С. Глава семьи информационных CALS- стандартов ISO 10303 STEP // САПР и графика. – 1997. – № 11. – С. 76-82.
35. Овсянников М.В., Шильников П.С. Информационная модель производственно-логической системы в стандарте STEP // Вестник МГТУ. – 1995. – № 3. – С. 17-21.
36. Kirkley J., Seitz B. STEP Framework Concepts and Principls // ISO TC184/SC4/WG5. – 1991. – P. 117-141.
37. Wenzel B. A Data Integration Architecture for SC4 // ISO TC184/SC4/WG10. – 1997. – № 89. – P. 10-32.
38. Danner William F. Developing Aps using the architecture and methods of STEP: Fundamentals of the STEP methodology // ISO TC184/SC4/WG10. – 1997. – № 87. – P. 10-33.
39. ISO 7372:1993. Trade data interchange – Trade data elements directory (Endorsement of document: United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Trade Facilitation, Trade Data Elements Directory (TDDED)). – Geneva: International Organization for Standardization, 1993. – Vol.1, №7. – P. 39-44.
40. ISO 8879:1986(E). Information processing – Text and Office Systems. Standard Generalized Markup Language (SGML). –

- Geneva: International Organization for Standardization, 1986. – P. 71-93.
41. Choi S.I. CAD/CAM Systems for Halla Shipyard // Papers presented for the KCS User's Meeting 1996. – Newcastle upon Tyne, 1996. – 18 p.
 42. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе и др.; Под ред. Н.М. Капустина. – М.: Высшая школа, 2004. – 415 с.
 43. Kestelyn J. The Future of Enterprise Applications // Intelligent Enterprise. – 2003. – April. – P. 27-39.
 44. Tu Y. Production Planning and Control in a virtual Scheduling and Control in a Virtual Scheduling. – Computers in Industry, 1997. – Vol.34. – P. 271-283.
 45. Найшулер Б.И., Трутнев В.В., Куршин В.И., Авдеев В.А. Создание интегрированной информационной среды промышленного предприятия средствами CALS-технологий // Инновационные технологии в проектировании, производстве и испытаниях изделий машиностроения. – Казань: Изд-во Казанского университета, 2004. – С. 10-26.
 46. Yamato H., Koyama T., Fushimi A., Tanaka Y. GPME Extension on the Network for the Virtual Enterprise // 9th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding. – Yokohama: ICCAS'97, 1997. – Vol.2. – P. 461-474.
 47. Кошкин К.В., Петриненко И.В. Организация виртуальных производств в судостроении на основе GPME // Вестник Херсонского государственного технического университета. – 2000. – №1(7). – С. 217-221.
 48. CIMdata Reports Continuing Strong PLM Market Growth // ANN ARBOR. – Michigan, 2005. – P. 47-54.
 49. Кузнецов П.М. Многообъектное технологическое проектирование с интеллектуальным управлением в распределенных производственных системах: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / Моск. гос. техн. ун-т. „МАМИ”. – М., 2001. – 32 с.
 50. Куликов Д.Д. Моделирование объектов и процессов в автоматизированных системах технологической подготовки

производства в машино- и приборостроении: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ленингр. ин-т точн. механ. и опт. – Л., 1993. – 43 с.

51. Судов Е.В., Левин А.И. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России. – М.: НИЦ CALS “Прикладная логистика”, 2002. – 130 с.
52. Ковалевский В.Б., Стрелков П.В. Внедрение программных систем: миф или вынужденная необходимость? // CAD/CAM/CAE Observer. – 2004. – №1. – С. 22-26.
53. Организация прикладных научно-исследовательских работ в аэрокосмическом комплексе США. Техническая информация УкрНИИАТ / Под ред. Г.А. Кривова. – К.: УкрНИИАТ, 1999. – 45 с.