

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

О.Л. Коренівська, Б.В. Бенедицький

**Надійність, експлуатація та ремонт
радіоелектронної та телекомунікаційної техніки**

Навчальний посібник

Друкується за рішенням
Вченої ради
Державного університету
«Житомирська політехніка»
(протокол № ____
від «__» _____ 2020р.)

**Житомирська політехніка
2020**

УДК

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Державного університету «Житомирська політехніка»
(протокол № ____ від « ____ » _____ 2020 р.)*

Рецензенти: д.т.н., проф. Фріз С.П. (Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова),
д.т.н., проф. Манойлов В.П. (Державний університет «Житомирська політехніка»),
к.т.н., с.н.с. Колос Ю.О. (Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова).

О.Л.Коренівська, В.Б. Бенедицький. Теорія надійності, експлуатації та ремонту радіоелектронної та телекомунікаційної техніки. Навчальний посібник. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. – 180 с.
ISSN

Обсяг 180 стор.; іл.; табл.; бібліогр. назв.

УДК

ISBN©, 2020 р.

© О.Л. Коренівська, 2020 р.
© В.Б. Бенедицький, 2020 р.

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	7
1.1 Основні поняття та визначення теорії надійності.....	7
1.2. Відмови, збої та ушкодження в технічних об'єктах.....	15
1.3. Класифікація показників надійності.....	19
1.4. Показники безвідмовності.....	21
1.5. Показники ремонтпридатності.....	29
1.6. Показники збережуваності.....	31
1.7. Показники довговічності.....	32
1.8. Комплексні показники надійності.....	35
РОЗДІЛ 2.. ОСНОВНІ ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ.....	40
2.1. Поняття про випадкові величини та випадкові процеси.....	40
2.2. Розподіл Вейбулла.....	42
2.3. Експоненціальний розподіл.....	44
2.4. Розподіл Релея.....	45
2.5. Нормальний та логарифмічно нормальний закони розподілу.....	46
2.6. Гамма-розподіл.....	49
2.7. Біноміальний розподіл дискретних випадкових величин.....	52
2.8. Розподіл Пуассона дискретних випадкових величин.....	53
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	56
3.1. Поняття структурної надійності.....	56
3.2. Класифікація методів розрахунку надійності.....	58
3.3. Аналітичні методи розрахунку надійності.....	59
3.4. Повний розрахунок безвідмовності.....	63
3.5. Розрахунок за поступовими відмовами.....	64
3.6. Методика повного розрахунку надійності з врахуванням реальних навантажень.....	66

3.7. Види з'єднань елементів в теорії надійності та методи їх розрахунку.	
Системи з послідовним з'єднанням елементів.....	73
3.8. Системи з паралельним з'єднанням елементів.....	76
3.9. Системи з паралельно-послідовним з'єднанням.....	77
3.10. Системи типу " m з n ".....	79
3.11. Мостові схеми.....	81
3.12. Перетворення схем складних комбінованих систем.....	92
РОЗДІЛ 4. ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ НАДІЙНІСТЬ ТА МЕТОДИ	
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ.....	94
4.1. Вплив різних факторів на показники надійності.....	94
4.2. Вибір і обґрунтування показників надійності.....	102
4.3. Забезпечення надійності.....	105
4.4. Шляхи підвищення надійності.....	108
4.5. Методи підвищення надійності. Основні поняття та види резервів...	109
4.6. Розрахунок надійності систем з резервуванням.....	117
4.7. Методи оптимального резервування.....	125
4.8. Метод невизначених множників Лагранжа.....	127
4.9. Градієнтний метод оптимального резервування.....	128
4.10. Метод прямого перебору та динамічного програмування.....	130
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ І	
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ АПАРАТУРИ.....	134
5.1. Задачі експлуатації, її складові і характеристики.....	134
5.2. Технічне та профілактичне обслуговування.....	137
5.3. Визначення періодичності профілактики.....	141
5.4. Склад і вимоги до документації з технічного обслуговування і ремонту	
радіоелектронних систем.....	144
5.5. Поняття ремонту. Види та методи ремонту.....	148
5.6. Пошук несправних елементів в системі.....	153

5.7. Загальна характеристика методів розрахунку надійності ремонтіваних систем.....	162
5.8. Обчислення функцій готовності та простою систем.....	163
5.9. Особливості розрахунку зарезервованих систем.....	166
Список літератури.....	171
Глосарій.....	173
Предметний покажчик.....	176

ВСТУП

Розширення кола питань, які розв'язуються радіоелектронною апаратурою в медицині, обумовлює широкий спектр типів та складність апаратури. У зв'язку з цим розширюється клас вимог до експлуатації радіоелектронної апаратури. Проблема експлуатації радіоелектронної апаратури об'єднує найрізноманітніші питання – від безпосереднього використання апарату до його ремонту, до забезпечення його надійного функціонування.

Мета вивчення дисципліни – набути знання з наукових та методичних основ експлуатації та ремонту радіоелектронної (РЕА) та телекомунікаційної апаратури, здійснювати профілактичні заходи по обслуговуванню РЕА, прогнозувати надійність РЕА в процесі її експлуатації.

Протягом навчання студент повинен набути теоретичних та практичних знань з наукових та методичних основ експлуатації та ремонту радіоелектронної апаратури (РЕА), прогнозувати надійність РЕА в процесі її експлуатації, вміти здійснювати та проектувати профілактичні заходи по обслуговуванню та ремонту РЕА.

В результаті вивчення дисципліни студент повинен вміти:

- проводити розрахунок надійності РЕА;
- володіти знаннями щодо шляхів забезпечення та підвищення надійності РЕА на різних етапах її життя;
- розраховувати та планувати час на профілактичні та ремонтні роботи;
- проводити ремонт РЕА;
- розраховувати комплекти запасних елементів для комплектації РЕА.
- вміти оптимізовувати показники надійності на стадії експлуатації технічних об'єктів.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1. Основні поняття та визначення теорії надійності

Теорія надійності – наукова дисципліна, що вивчає методи забезпечення ефективної роботи технічних об'єктів у процесі їх життєвого циклу. Роль та завдання теорії надійності – встановити і стандартизувати показники надійності, обґрунтувати вимоги до надійності, розробити методи аналізу та забезпечення заданих вимог під час проектування, виробництва та експлуатації об'єктів.

Наука про надійність вивчає закономірності зміні показників працездатності об'єктів з часом, а також фізичну природу відмов і на цій основі розробляє методи, що забезпечують потрібну довговічність та безвідмовність роботи об'єктів з найменшими витратами часу й коштів або дають можливість покращити ці показники.

Предмет дослідження теорії надійності як наукової дисципліни має різні аспекти. У *технічному аспекті* теорія надійності встановлює закономірності виникнення відмов і відновлень працездатності об'єктів, розглядає вплив зовнішніх і внутрішніх факторів на процеси, що відбуваються у виробках, створює методи розрахунку надійності й прогнозування відмов, знаходить способи підвищення надійності під час проектування і виготовлення об'єктів, а також способи збереження надійності у процесі експлуатації, визначає методiku збирання, обліку та аналізу статистичних даних, які характеризують надійність, розробляє методи проведення випробувань на надійність, оброблення та оцінювання результатів випробувань.

В *економічному аспекті* всі заходи щодо підвищення надійності на всіх етапах функціонування об'єкта повинні забезпечувати максимальний

економічний ефект або задану надійність з мінімальними витратами. Для досягнення цього теорія надійності встановлює зв'язок між кількісними показниками надійності та економічною ефективністю, розробляє методи встановлення оптимальних значень показників надійності і вибору оптимальних конструктивних рішень, режимів експлуатації, технічного обслуговування і ремонту.

Вплив надійності техніки на безпеку роботи відображає *соціальні аспекти* теорії надійності. У *правовому аспекті* слід проводити роботи зі стандартизації та уніфікації у сфері надійності на основі створення комплексу загальних технічних стандартів надійності та регламентації норм надійності у стандартах і технічних умовах на конкретні види техніки.

При аналізі і оцінці надійності, конкретні технічні пристрої іменуються узагальненим поняттям "об'єкт". **Об'єкт** – це предмет певного цільового призначення, який розглядається в періоди проектування, виробництва, експлуатації, вивчення, дослідження і випробувань на надійність. Об'єктами можуть бути системи і їх елементи, зокрема технічні вироби, пристрої, апарати, прилади, їх складові частини, окремі деталі тощо

Для будь-якого об'єкта на кожному етапі його життя задаються певні технічні вимоги. Бажано, щоб об'єкт завжди відповідав цим вимогам. Проте в об'єкті можуть виникнути несправності, що порушують зазначену відповідність. Тоді завдання надійності полягає в тому, щоб створити на етапі виробництва або відновити порушену несправність (яка може з'явитися на етапах експлуатації або зберігання) у відповідності з заданими технічними вимогами на об'єкт.

Дослідження поведінки об'єкта під час експлуатації та оцінка його експлуатаційних якостей складає предмет теорії надійності.

Стан об'єкта визначається його надійністю. Стан об'єкту характеризується ступенем відповідності вимогам або параметрами, встановленими в нормативно-технічній документації на нього. Всі **вимоги** можна розділити на **задані** – визначають здатність об'єкта виконувати задані функції і **інші**, що

визначають зручність роботи, зовнішній вигляд, характер забарвлення не впливають на виконання заданих функцій.

Об'єкт може знаходитися в фазах підготовки до використання (транспортування, зберігання, обслуговування, ремонт) і використання за призначенням. Залежно від характеру чергування фаз експлуатації, розрізняють об'єкти разового та багаторазового використання.

Якщо об'єкт не підлягає середньому або капітальному ремонту, то його експлуатація продовжується.

Термін служби – календарна тривалість експлуатації об'єкта від початку роботи або після ремонту до настання його граничного стану.

Основними об'єктами вивчення теорії надійності є різні технічні об'єкти (ТО): радіоелектронна апаратура (РЕА), телекомунікаційна техніка (ТК) та засоби зв'язку, засоби відеоспостереження, біомедичні апарати (БМА) та прилади, телемедична техніка тощо.

Будь-який технічний об'єкт за час свого існування проходить різні етапи і стадії життєвого циклу – неперервного у часі процесу перетворення ідеї, матеріальних та інших ресурсів у продукцію, включаючи її реалізацію, експлуатацію і утилізацію.

Таким чином повний життєвий цикл ТО складається з періоду його створення, виробництва, експлуатації та утилізації ТО.

У перший період життєвого циклу ТО включається повний комплекс робіт зі створення нової техніки, що складається з кількох стадій і окремих робіт, виконуваних для забезпечення її існування.

Перша стадія життєвого циклу нового виробу – науково-дослідна робота (НДР). У процесі цієї стадії виникають і проходять усебічну перевірку нові ідеї, реалізовані іноді у вигляді відкриттів і винаходів. Теоретичні передумови вирішення наукової проблеми перевіряються в ході дослідно-експериментальних робіт.

Друга стадія – дослідно-конструкторська робота (ДКР) – перехідна від наукових досліджень до виробництва. На ній ідеї, що виникають у процесі НДР, практично перетворюються в технічну документацію і дослідні зразки.

На *третьій стадії* конструкторської підготовки виробництва здійснюється проектування нової техніки: розробка креслень і технічної документації.

Четверта стадія – технологічна підготовка виробництва, на якій розробляються і перевіряються нові технологічні процеси, проектується і виготовляється технологічне оснащення для виробництва нової техніки.

П'ята стадія – організаційна підготовка виробництва. На ній обираються методи і перевіряються моделі процесу переходу підприємства на випуск нової продукції, проводяться розрахунки потреб в матеріалах і комплектуючих виробах, визначаються календарно-планові нормативи (тривалість виробничого циклу виготовлення нового виробу, розміри партій, період чергування партій виробів та інше).

На *шостій стадії* – відпрацьовування в дослідному виробництві нової конструкції виробу – освоюється випуск дослідного зразка, проводиться налагодження нових технологічних процесів, перевірка й оцінка "життєздатності" нової продукції.

У другий період життєвого циклу виробу розпочинається *сьома стадія* – освоєння його в промисловому виробництві. На ній створюються умови для такого виробництва нового виробу. Практика показує, що іноді на ній виникають конструкторські зміни та викликані ними або незалежні від них зміни в технологічних процесах. Тому на стадії освоєння виробництва виникає необхідність визначення раціонального ступеня відпрацьовування технологічної документації, доцільного рівня оснащеності виробництва спеціальними видами оснащення й устаткування.

Стадія освоєння є сполучною ланкою з фазою виробництва і реалізації виробу, у процесі якої здійснюють виготовлення деталей і складальних одиниць, складання і випробування виробу відповідно до технологічної і конструкторської документації, затвердженої керівництвом підприємства.

Точне дотримання технологічного процесу – одна з найважливіших організаційних умов боротьби за ефективне впровадження нової техніки, підвищення якості продукції і техніко-економічних показників виробництва.

Важливим елементом виробничої фази є реалізація нової продукції. Реалізація охоплює наступні процеси: зберігання продукції на складах підприємства; транспортування; монтаж продукції у споживача; налагодження продукції; передачу в експлуатацію.

Завершальною стадією життєвого циклу є експлуатація продукції – період, коли ця продукція використовується відповідно до призначення і дає економічний ефект, до моменту утилізації, яка обумовлена настанням граничного стану об'єкту. *Останній етап* – утилізація, обов'язково розглядається на етапі проектування, коли прогнозується терміни настання граничного стану та списання приладу.

Період експлуатації, окрім прямого використання за призначенням, включає в себе систему сервісного обслуговування, ремонту, модернізації, постачання матеріально-технічних ресурсів.

Технічні об'єкти характеризуються якістю, тобто певною сукупністю властивостей, що істотно відрізняють даний виріб від інших і визначають ступінь його придатності для експлуатації за своїм призначенням. Якість приладу визначається низкою параметрів. В процесі експлуатації РЕА внаслідок зносу і старіння характеристики виробу, а відповідно, і його якість будуть змінюватися. Зміна якості у часі характеризується одним із головних його показників – надійністю.

Кожному виробу притаманні свої властивості, особливі показники якості, які проявляються в процесі його застосування. Надійність пов'язана з усіма властивостями виробу та характеризує прояв всіх показників якості виробу в процесі роботи. Сама по собі надійність виробу ще не говорить про його високу якість (виріб може бути надійним, але володіти низькими технологічними характеристиками). Але якщо виріб має високі технологічні характеристики,

але не володіє високою надійністю, то він втрачає своє практичне значення, оскільки не може бути повноцінно використаний в роботі.

Забезпечення якості та надійності розглядається у всьому світі як важлива проблема національної економіки від якої залежать темпи промислового розвитку, її національний престиж, підвищення конкурентоспроможності виробу. Проблема надійності є складною і складність вирішення проблеми визначається її комплексним характером, оскільки технічна, економічна та соціальна сторони розглядаються в ній разом. Причини, що пов'язані з проблемою надійності:

1. Різке зростання складності сучасної техніки;
2. Інтенсивність режимів роботи систем або їх складових частин;
3. Складність умов експлуатації технічних засобів (низькі або високі температури, висока вологість вібрації, прискорення, радіація, використання при зміні температур (-70 до +60 °C), при відносній вологості 98-100%, при наявності високої сонячної та космічної радіації);
4. Вимоги до якості роботи технічних засобів (висока точність, ефективність, швидкодія);
5. Підвищення відповідальності формування технічних засобів (дуже висока технічна та економічна ціна відмови);
6. Людський фактор.

Сучасна нормативна база України з питань надійності ґрунтується на ДСТУ 2860.94 “Надійність техніки. Терміни та визначення” Згідно ДСТУ **надійність** визначається, як *«властивість об'єкта зберігати в часі в встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування»*.

Експлуатаційні показники надійності мають відповідати нормативно-технічній документації, на протязі необхідного відрізка часу при дотриманні режимів експлуатації, зберігання і технічного обслуговування.

*Надійність технічних об'єктів є комплексною властивістю, яка об'єднує поняття чотирьох властивостей: **довговічність, безвідмовність, ремонтпридатність, збережуваність.***

Безвідмовність – властивість виробу безперервно зберігати працездатність на протязі заданого проміжку часу.

Ремонтпридатність – властивість виробу бути пристосованим до попередження, виявлення та усунення відмов за допомогою технічного обслуговування та ремонту.

Довговічність – властивість виробу тривалий час зберігати працездатність до настання граничного стану при встановлених правилах обслуговування і ремонту.

Збережуваність – здатність виробу зберігати показники довговічності, безвідмовності і ремонтпридатності на протязі часу зберігання та транспортування.

Сьогодні можна виділити чотири групи об'єктів, які відрізняються показниками та методами оцінки надійності.

Обслуговуваний об'єкт – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування передбачено нормативно-технічною документацією або конструкторсько-проектною документацією.

Необслуговуваний об'єкт – це об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування не передбачено нормативно-технічною документацією та конструкторсько-проектною документацією.

Ремонтований об'єкт – це об'єкт, ремонт якого передбачений та можливий ремонтною, нормативною та конструкторською документаціями.

Неремонтований об'єкт – це об'єкт, ремонт якого не передбачений нормативною ремонтною та конструкторською документацією.

Відновлюваний об'єкт – це ремонтований об'єкт, який після відмови та усунення несправностей знову стає здатним виконувати потрібні функції, що задані кількісними показниками надійності.

Готовність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції в даних умовах протягом заданого інтервалу часу за умови забезпечення необхідними зовнішніми ресурсами.

Виріб або прилад, система, апарат, вузол можуть бути охарактеризовані з боку надійності технічним станом об'єкту. Виділяють п'ять основних станів ТО: працездатний, непрацездатний, справний, несправний та граничний стан та критичний стан. Кожен з цих станів характеризується сукупністю значень параметрів та якісних ознак, що встановлюються нормативно-технічною (НТК) або конструкторською (КД) документацією.

Справний стан – це стан об'єкта, за яким він здатний виконувати всі функції задані в НТД та КД.

Несправний стан – це стан об'єкта, за яким він не здатний виконувати хоча б одну із заданих функцій в НТД та КД. Несправність може бути: незначною, частковою, значною, повною, прихованою, маскованою.

Працездатний стан – це стан об'єкта, при якому він відповідає всім параметрам, що характеризують здатність об'єкта виконувати задані (в НТД та КД) функції.

Непрацездатний стан – це стан об'єкта, при якому він не відповідає хоча б одному параметру, що характеризує здатність об'єкту виконувати задані (в НТД та КД) функції.

Працездатний об'єкт на відміну від справного задовольняє лише вимогам нормативно-технічної документації, виконання яких забезпечує його здатність виконувати задані функції. У зв'язку з цим поняття "справний стан" ширше, ніж поняття "працездатний стан". Об'єкт може бути несправним, але працездатним. Наприклад: прилад нормально функціонує, але на передній панелі у нього відсутня кришка кнопки та тріснув екран. Ці дефекти не впливають на виконання заданих функцій, але параметри об'єкту не відповідають всім нормам НТД. Таким чином прилад працездатний, але несправний.

Критичний стан – це стан об’єкта, що може призвести до травмування людей, значних матеріальних збитків та інших неприйнятних наслідків.

Граничний стан – це стан об’єкта, за яким його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне. Як вже зазначалося, саме з настанням граничного стану пов’язано закінчення етапу експлуатації виробу. Перехід з одного стану в інший пов’язаний з певними подіями: відмовами, збоями та uszkodженнями.

1.2. Відмови, збої та uszkodження в технічних об’єктах

Відмова – це випадкова подія, що призводить до порушення працездатності об’єкту.

Тенденція вивчення відмов, які виникають в апаратурі, та факторів, які впливають на надійність апаратури виникла в 49-50 роках 20 століття. В приладах 40-45% відмов виникає внаслідок помилок при проектуванні, 20% – відмови внаслідок помилок виробництва, 30% – помилки при експлуатації обслуговуючим персоналом, 5-7% – відмови через деградацію матеріалів при експлуатації і зберіганні пристроїв та елементів (старіння елементів, часові відмови).

Наведемо класифікацію відмов за різними ознаками.

За типом відмови розділяють на такі:

- *відмови функціонування* (виконання основних функцій об’єктом припиняється; це функціональна надійність;
- *відмови параметричні* (деякі параметри об’єкта змінюються у неприпустимих межах); це параметрична надійність.

За можливістю та швидкістю появи розрізняють раптові і поступові відмови. Раптова відмова не є прогнозованою та може виникати за різних, найчастіше механічних, причин (тріщини, обрив проводу, коротке замикання, пробій ізоляції). Раптова відмова характеризується стрибкоподібною зміною

значень одного чи декількох параметрів об'єкта і незалежністю моменту настання від часу попередньої роботи.

Поступова відмова виникає як наслідок поступової зміни основних параметрів виробу через знос та старіння. Ці відмови можна передбачити дослідженням чи технічним оглядом, а також її інколи можна відвернути заходами технічного обслуговування.

Старіння – процес поступової зміни параметрів, викликаний дією різних факторів, незалежних від режиму роботи об'єкту. Зношування – процес поступової зміни параметрів, викликаний дією факторів, наявність яких залежить від режиму роботи об'єкту;

За причиною виникнення виділяють:

- *конструкційну відмову*, викликану недоліками, недосконалістю або невдалою конструкцією об'єкта;

- *виробничу відмову*, пов'язану з помилками під час виготовлення об'єкта через недосконалість або порушення технології, невідповідність процесу виробництва установленим виробничим нормам і процесам, заданим у проекті;

- *експлуатаційну відмову*, викликану порушенням правил та умов експлуатації об'єкта, виникненням непередбачених зовнішніх впливів під час використання чи незапланованої високої інтенсивності застосування.

За способом появи відмови бувають:

- *випадкові*, обумовлені непередбачуваними подіями, наприклад, випадковими перевантаженнями, дефектами матеріалу, помилками персоналу або збоями системи керування і т.п. Випадковими зазвичай бувають раптові відмови;

- *систематичні*, що виникають з поступовим нагромадженням ушкоджень і обумовлені закономірними та неминучими явищами: зношуванням, старінням, корозією, втомою матеріалів і т.п. Систематичними найчастіше бувають поступові відмови.

За характером усунення відмови бувають:

– *стійкі відмови*, які неможливо усунути легким або швидким способом, для відновлення працездатності потрібен тривалий ремонт або заміна елементів, вузлів чи структури об'єкта;

– *самоусувні відмови* – легкі відмови, що легко усуваються. Самоусувні відмови можуть виникати багаторазово (самі виникають та зникають), тоді їх відносять до повторюваних (перемежованих) відмов. Повторювана відмова – це самоусувна відмова одного й того самого характеру, що виникає багаторазово. До самоусувних відмов належить збій або одноразова відмова.

Збій – це одноразова відмова, яка сама зникає або яку незначним втручанням усуває оператор. Збій усувається в результаті природного повернення об'єкта у працездатний стан без участі, чи за нетривалої участі оператора, причому час усунення відмови малий або близький до нуля.

За наслідками виділяють:

– *важку відмову* (викликає вторинні відмови суміжних вузлів);
– *середню відмову* (не викликає відмови суміжних вузлів);
– *легку відмову* (для відновлення працездатності не потребує тривалого ремонту або заміни елементів, вузлів чи структури об'єкта).

За наслідками по працездатності розрізняють повну та часткову відмови. Повна відмова призводить до втрати працездатності (відмови) всього приладу. Часткова – до відмови елемента або блока приладу, а об'єкт можна частково використовувати (об'єкт може виконувати частину заданих функцій).

За характером виявлення відмови вирізняють:

– *явні (очевидні) відмови* – відмови, що виявляються візуально чи штатними методами і засобами контролю та діагностування під час підготовки об'єкта до використання чи у процесі його використання за призначенням;

– *неявні (приховані, латентні) відмови* – відмови, що не виявляються візуально чи штатними методами і засобами контролю та діагностики, але виявляються під час проведення технічного обслуговування чи спеціальними методами діагностики. Затримка у виявленні неявної відмови може спричинити

некоректну обробку інформації, неправильне спрацювання алгоритмів, вироблення помилкових керівних впливів та інших несприятливих наслідків.

За взаємозв'язком відмови можуть бути *залежні* (відмова одного елемента призводить до відмови іншого) і *незалежні* (поява кожної наступної відмови не пов'язана з виникненням попередньої відмови).

Механізм відмови може бути пов'язаний із фізичними, хімічними та іншими процесами, що привели до відмови.

Наслідки відмови – явища, процеси, події, обумовлені виниканням відмови об'єкта.

Пошкодження – це подія, яка полягає у порушенні справного стану об'єкта, коли зберігається його працездатність.

Дефект – це кожна окрема невідповідність об'єкта встановленим вимогам. Сам дефект не призводить до втрати працездатності приладу, але з часом може бути причиною відмови.

За можливістю усунення відмов та відновленням справності та працездатності технічні об'єкти поділяють на:

Невідновлювані – об'єкти, справність яких не може бути відновлена.

Відновлювані – об'єкти, справність яких може бути відновлена.

Ремонтований об'єкт – об'єкт, ремонт якого можливий і передбачений нормативно-технічною, ремонтною і (чи) конструкторською (проектною) документацією.

Об'єкт, що не ремонтується – об'єкт, ремонт якого неможливий або непередбачений нормативно-технічною, ремонтною і (чи) конструкторською (проектною) документацією.

Всі перераховані поняття теорії надійності є якісними показниками надійності, які описують експлуатаційні властивості об'єктів та характеризують їх стани. Для кількісної оцінки властивостей надійності вводять кількісні показники, які називають просто показниками надійності.

1.3. Класифікація показників надійності

Показник надійності – це комплексна характеристика однієї або декількох властивостей, які у сукупності складають надійність об'єкта.

Показники надійності можна класифікувати наступним чином.

За кількістю властивостей надійності:

- *одиничні* – це показники надійності, що характеризують одну з властивостей надійності об'єкта;
- *комплексні* – це показники надійності, що характеризують декілька властивостей надійності об'єкта.

За джерелом отримання інформації:

- *експлуатаційні* – це показники надійності, точкову чи інтервальну оцінку якого визначають за результатами експлуатації;
- *експериментальні* – це показники надійності, точкову чи інтервальну оцінку якого визначають за даними випробувань;
- *розрахункові* – це показники надійності, точкову чи інтервальну оцінку якого визначають шляхом розрахунків.
- *екстрапольовані* – це показники надійності, точкову чи інтервальну оцінку якого визначають шляхом розрахунків, експерименту або в результаті експлуатації, а потім переносять (екстраполюють) на нові умови використання, час роботи, тощо.

За властивістю надійності:

- *показники безвідмовності;*
- *показники ремонтпридатності;*
- *показники збережуваності;*
- *показники довговічності.*

За кількістю характеризуємих об'єктів:

- *групові показники* - показники, які можуть бути визначені і встановлені тільки для сукупності об'єктів; рівень надійності окремого примірника об'єкта вони не регламентують;

- *індивідуальні показники* – показники, які встановлюють норму надійності для кожного екземпляра об'єкта з розглянутої сукупності (або одиничного об'єкта);

- *змішані показники* - можуть виступати як групові або індивідуальні.

Слід враховувати, що одиничні показники надійності для відновлюваних і невідновлюваних об'єктів можуть бути різними.

Показники безвідмовності

Невідновлювальні об'єкти:

- 1) імовірність безвідмовної роботи;
- 2) інтенсивність відмов;
- 3) середнє напрацювання до відмови;

Відновлюваний об'єкт:

- 1) імовірність безвідмовної роботи;
- 2) параметр потоку відмов;
- 3) середнє напрацювання на відмову.

Показники ремонтпридатності

- 1) імовірність відновлення;
- 2) середній час відновлення;
- 3) інтенсивність відновлення.

Показники зберігання

- 1) середній термін зберігання;
- 2) гама-процентний термін зберігання.

Комплексні показники надійності.

- 1) коефіцієнт готовності;
- 2) коефіцієнт технічного використання;
- 3) коефіцієнт оперативної готовності;
- 4) середня і питома сумарна трудомісткість технічного обслуговування;
- 5) середня і питома сумарні трудомісткості ремонтів.

Показники довговічності

Невідновлювальні об'єкти:

- 1) середній термін служби;
- 2) середній термін служби до списання;
- 3) гама-процентний термін служби;
- 4) призначений ресурс;
- 5) середній ресурс;
- 6) гама-процентний ресурс.

Відновлюваний об'єкт:

- 1) середній термін служби;
- 2) середній термін служби до списання;
- 3) гама-процентний термін служби;
- 4) середній термін служби до середнього (капітального) ремонту;
- 5) середній термін служби між середніми (капітальними) ремонтами;
- 6) призначений ресурс;
- 7) середній ресурс;
- 8) гама-процентний ресурс;
- 9) середній ресурс між середніми (капітальними) ремонтами;
- 10) середній ресурс до списання;
- 11) середній ресурс до середнього (капітального) ремонту.

Показники надійності дозволяють проводити розрахунково-аналітичну оцінку кількісних характеристик окремих властивостей при виборі різних

схемних і конструктивних варіантів обладнання (об'єктів) при їх розробці, випробуваннях і експлуатації. Комплексні показники надійності використовуються головним чином на етапах випробувань і експлуатації при оцінці і аналізі відповідності експлуатаційно-технічних характеристик технічних об'єктів (пристроїв) заданим вимогам. На стадіях експериментального відпрацювання, випробувань і експлуатації, як правило, роль показників надійності виконують статистичні оцінки відповідних імовірнісних характеристик.

1.4. Показники безвідмовності

Один з основних показників надійності технічних об'єктів є **імовірність безвідмовної роботи** $P(t)$ або $p(t)$ за проміжок часу. Це **імовірність того, що за певних умов експлуатації в межах заданого проміжку часу роботи відмова не виникне**. Час t називають **напрацюванням** – тривалість роботи виробу, що вимірюється часом, циклами. Імовірність безвідмовної роботи це спадаюча функція, яка змінюється в межах від 1 до 0 (рис. 1) та має наступні властивості:

$$0 \leq P(t) \leq 1; P(0) = 1; P(\infty) = 0.$$

$$p(t) = \text{Вер}(T \geq t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt.$$

де $f(t)$ – функція густини розподілу; $F(t)$ – інтегральна функція розподілу випадкового напрацювання.

Графік зміни імовірності безвідмовної роботи та інтегральної функції розподілу випадкового напрацювання наведено на рис.1.1.

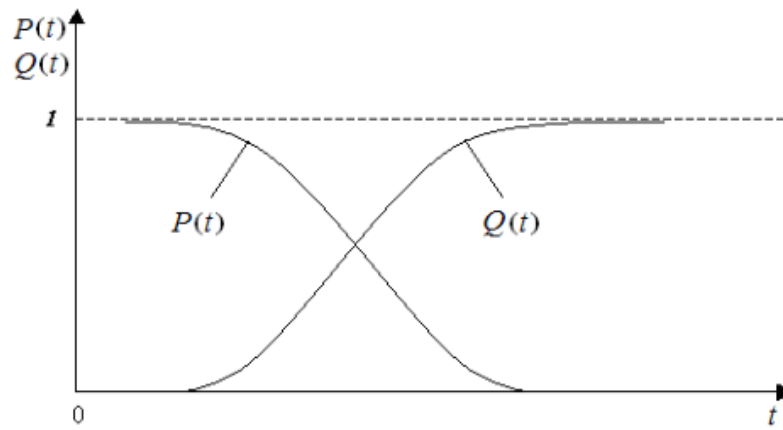


Рис.1.1. – Графік зміни $P(t)$ та $Q(t)$

Імовірність безвідмовної роботи виробу $p(t)$ за проміжок часу t можна розрахувати на основі показників надійності елементів, що складають даний виріб, або на основі статистичної обробки результатів випробувань великої кількості виробів даного типу. В цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи можна визначити за формулою:

$$p(t) \approx \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0},$$

де N_0 – кількість виробів поставлених на випробування на протязі часу t ; $N(t)$ – кількість працездатних за час випробування виробів; $n(t)$ – кількість виробів, що відмовили за час випробування.

Іноді практично доцільно користуватися не поняттям імовірності безвідмовної роботи, а імовірністю відмови $Q(t)$ або $q(t)$. Це величина обернена імовірності безвідмовної роботи та показує імовірність того, що на протязі певного часу t в об'єкті виникне відмова. Це монотонно зростаюча функція, яка змінюється від 1 до 0.

$$q(t) = \text{Вер}(T \leq t) = 1 - p(t) = F(t).$$

Імовірність безвідмовної роботи виробу $p(t)$ за проміжок часу t пов'язана з імовірністю відмов $q(t)$ за той же проміжок часу співвідношенням:

$$p(t) + q(t) = 1.$$

Звідси

$$q(t) = 1 - p(t);$$

Імовірність відмови за результатами статистичних випробувань, можна визначити за формулою:

$$q(t) \approx \frac{n(t)}{N_0},$$

де $n(t)$ – кількість виробів, що відмовили за час t ; N_0 – кількість виробів, що випробовувалися на протязі часу t .

У якості показника надійності невідновлюваних виробів використовується густина розподілу напрацювання до відмови $f(t)$.

Похідна імовірності відмови $q(t)$ за часом t характеризує щільність розподілу напрацювання до відмови (часу безвідмовної роботи виробу), або швидкість «спадання» безвідмовності виробу:

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}.$$

Отриманий вираз дозволяє записати

$$p(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_0^\infty f(t)dt.$$

Таким чином, знаючи густину імовірності $f(t)$, легко знайти величину $P(t)$. $P(t)$ та $q(t)$ величини безрозмірні.

З урахуванням виразу для $f(t)$ маємо:

$$f(t) = \frac{dn(t)}{dt \cdot N_0} \approx \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot N_0}.$$

Останній вираз застосовується в тому випадку, коли всі вироби однотипові і випробовуються у однаковому режимі.

Густина імовірності $f(t)$ також є показником надійності, що називається **частотою відмов** – густина розподілу, який показує розподіл відмов у часі:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{d[1 - p(t)]}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}.$$

Очевидно, що вона характеризує швидкість зменшення імовірності безвідмовної роботи в часі.

Найбільш розповсюдженим кількісним показником надійності є **інтенсивність відмов**, що являє собою відношення щільності розподілу напрацювання до відмови до імовірності безвідмовної роботи виробу, взяті для одного і того ж моменту часу:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}.$$

Функції $f(t)$ та $\lambda(t)$ вимірюються в 1/год.

Для визначення $\lambda(t)$ використовують наступну статистичну оцінку:

$$\lambda(t) = \frac{N_0(\Delta t)}{N_{cp}(\Delta t)};$$

де $N_0(\Delta t)$ – число виробів, що відмовили за інтервал часу (Δt) , $N_{cp}(\Delta t)$ – середнє число справних виробів в інтервалі часу (Δt) .

$$N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2};$$

де N_i – число виробів, які справно працюють на початку інтервалу (Δt);
 N_{i+1} – число виробів, які справно працюють в кінці інтервалу (Δt).

Проінтегруємо вираз для імовірності безвідмовної роботи та отримаємо:

$$p(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] + C.$$

значення постійної інтегрування C знайдемо використавши початкові умови
 $t = 0, p(0) = 1 \Rightarrow C = 0$

$$p(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right].$$

Цей вираз називають основним законом надійності. Він дозволяє встановити часову зміну імовірності безвідмовної роботи при будь-якому характері зміни інтенсивності відмов у часі. В окремому випадку сталості інтенсивності відмов $\lambda(t) = \text{const}$, вираз переходить у відомий в теорії імовірності експоненціальний розподіл:

$$\begin{aligned} p(t) &= \exp(-\lambda t); & F(t) &= 1 - \exp(-\lambda t); \\ f(t) &= \lambda \exp(-\lambda t) \end{aligned}$$

Залежність інтенсивності відмов від часу, що представлена на рис. 1.2.

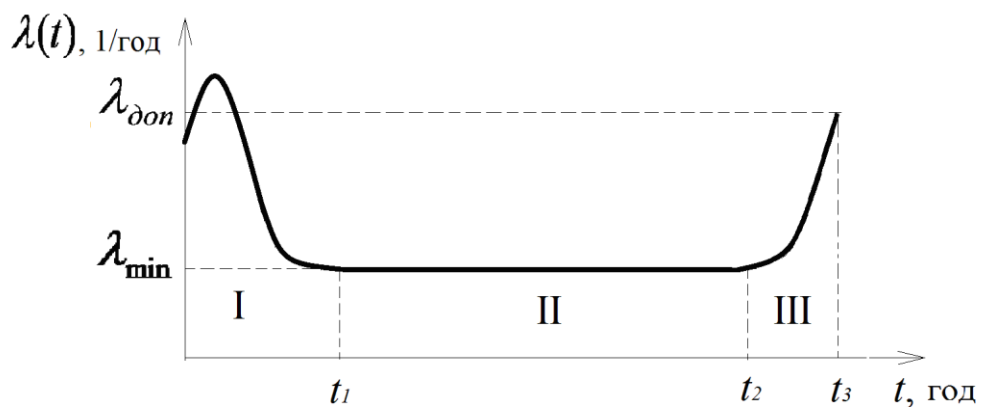


Рис. 1.2. Залежність інтенсивності відмов від часу

Як бачимо, на графіку можна виділити три періоди часу.

I період – період приробітку ($0 - t_1$). Цей період характеризується високою інтенсивністю відмов, що обумовлено виходом з ладу виробів, які мають приховані дефекти, які не вдалося виявити при їх виготовленні. Тривалість періоду приробітку складає частку відсотка часу нормальної роботи виробу. Період приробітку вважається завершеним, коли інтенсивність відмов наближується до $\lambda_{\min}$. Виникнення відмови на цьому періоді може бути наслідком конструктивних, технологічних та експлуатаційних помилок. В більшості цей процес відбувається на етапі виробництва і дефекти виявляються під час випробувань на надійність.

II період – період нормальної експлуатації ($t_1 - t_2$). Цей період характеризується мінімальною і постійною інтенсивністю відмов. Величина $\lambda_{\min}$ тим менша, а інтервал тим більший, чим досконаліша конструкція, вища якість її виготовлення і більш ретельно дотримані режими експлуатації. Цей період складає десятки тисяч годин. Ознакою періоду нормальної експлуатації технічного об'єкту є сталість інтенсивності відмов у часі $\lambda(t) = \text{const}$.

III період – період зносу і старіння ($t_2 - t_3$). Цей період характеризується різким зростанням інтенсивності відмов через появу зносу і старіння матеріалів. Завершується період і припиняється експлуатація виробу, коли інтенсивність відмов наближається до максимально допустимого значення $\lambda_{\text{дон}}$.

Ще одним показником надійності невідновлюваних виробів є **середній час безвідмовної роботи або середнє напрацювання до відмови T або $t_{\text{сер}}$** , що визначається за виразом:

$$t_{\text{сер}} = \int_0^{\infty} p(t) dt.$$

Для експоненціального розподілу

$$t_{\text{сер}} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda.$$

Тоді

$$p(t) = e^{-t/t_{\text{сер}}}.$$

Математичне сподівання напрацювання до відмови це математично очікуваний наробіток до відмови однотипних елементів, тобто усереднене напрацювання до першої відмови.

Статистично (за результатами випробувань) $t_{\text{сер}}$ визначається як відношення суми часу безперервної роботи кожного виробу до загальної кількості виробів, що випробовуються:

$$t_{\text{сер}} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{t_i}{N_0},$$

де t_i – час безперервної роботи i -го виробу.

Для відновлювальних об'єктів використовують параметр **середнього напрацювання на відмову T_0** – сумарне середнє напрацювання об'єкту за весь час експлуатації (сума часів експлуатації між відмовами).

Часто використовують характеристику, звану **гама(γ)-процентне напрацювання** – час, протягом якого відмова в об'єкті не настане з імовірністю $\gamma\%$:

$$T_{\gamma} = -\frac{\ln P_{\gamma}}{\lambda} = -T_0 \ln P_{\gamma}, P_{\gamma} = \frac{\gamma}{100}.$$

Вибір параметра для кількісної оцінки надійності визначається призначенням, режимами роботи виробу, зручністю застосування в розрахунках на стадії проектування.

Усі розглянуті показники надійності невідновлюваних виробів є рівноправними. Проте на практиці перевага віддається інтенсивності відмов,

оскільки ця функція легко визначається експериментально. Для розрахунків цей параметр беруть з довідника.

Другою характеристикою відновлювальних технічних об'єктів є **параметр потоку відмов** – густина імовірності виникнення відмови відновлюваного об'єкта в даний момент.

Для ординарних потоків без післядії параметр потоку відмов пов'язаний з математичним очікуванням числа відмов:

$$M(t) = \int_0^t \omega(t) dt .$$

Цей показник характеризує відновлювані об'єкти і за статистичними даними визначається за допомогою формули:

$$\omega(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1} .$$

де $n(t_1)$ і $n(t_2)$ – кількість відмов об'єкта, зафіксованих відповідно, після закінчення часу t_1 і t_2 .

Якщо використовуються дані про відмови певної кількості відновлюваних об'єктів, то

$$\omega(t) = \frac{N_0(\Delta t)}{N_1 \cdot \Delta t} ,$$

де $N_0(\Delta t)$ – кількість відмов по всіх об'єктах за інтервал часу Δt ; N_1 – кількість однотипних об'єктів, що беруть участь в експерименті.

При експоненціальному розподілі $\omega(t) = \lambda$.

Відмови об'єктів виникають у випадкові моменти часу і протягом заданого періоду експлуатації спостерігається потік відмов. Потік відмов – послідовність подій, які відбуваються один за іншим в довільний момент часу. Існує безліч математичних моделей потоків відмов. Найбільш часто використовують **найпростіший потік відмов – Пуасонівський потік.**

Найпростіший потік відмов задовольняє одночасно трьома умовами: стаціонарності, ординарності, відсутності післядії.

Стаціонарність випадкового процесу (часу виникнення відмов) означає, що на будь-якому проміжку часу Δt імовірність виникнення m відмов залежить тільки від m і величини проміжку Δt .

Ординарність випадкового процесу означає, що відмови є подіями, випадковими і незалежними. Ординарність потоку означає неможливість появи в один і той же момент часу більше однієї відмови.

Відсутність післядії означає, що для двох відрізків часу $\Delta t_1, \Delta t_2$ число відмов в одному з них не залежить від числа відмов, що потрапили в інший.

Досвід експлуатації складних технічних систем показує, що відмови елементів відбуваються миттєво і якщо старіння елементів відсутнє, то потік відмов в системі можна вважати найпростішим.

1.5. Показники ремонтопридатності

Ремонтотпридатність – властивість об'єкта, що полягає в пристосованості до попередження і виявлення причин виникнення його відмов, пошкоджень та усунення їх шляхом ремонту і технічного обслуговування.

Технічне обслуговування передбачає сукупність технічних і організаційних заходів, що забезпечують підтримання об'єкта в працездатному стані на різних фазах та етапах експлуатації.

Під ремонтом розуміють організацію і виконання робіт з відновлення працездатності та ресурсу роботи.

Ремонтотпридатність – якісна характеристика. Для кількісної характеристики застосовують показники ремонтотпридатності: імовірність відновлення в заданий час і середній час відновлення. Ці показники відносять до відновлюваних об'єктів.

Імовірність відновлення $P_B(t)$ – це імовірність того, що непрацездатний ТО буде відновлено протягом часу t .

$$P_B = \frac{n_B}{N_{OB}},$$

де n_B – кількість виробів час відновлення яких було менше заданого часу t , N_{OB} – число виробів, що залишилися на відновленні.

Імовірність відновлення розглядається як функція розподілу випадкової величини t_B .

Інтенсивність відновлення $\mu(t)$ – *умовна густина розподілу часу відновлення для моменту часу t за умові, що до цього моменту відновлення об'єкту не сталося* (імовірність відновлення працездатності об'єкта в одиницю часу t за умови, що відновлення не відбулося). Для простоти припускають, що час розподілено за експоненціальним законом $\mu(t) = \mu = \text{const}$. При реалізації зазначеного будемо розглядати умови відновлення об'єкта в проміжку часу $t, t + \Delta t$. Імовірність цієї події може бути розглянута як імовірність реалізації двох несумісних подій: відновлення об'єкта до моменту t та відновлення об'єкта за проміжок часу $t, t + \Delta t$. Тоді

$$P_B(t, \Delta t) = P_B(t) + [1 - P_B(t)]\mu\Delta t.$$

Перейшовши до лімітів отримаємо диференціальне рівняння першого порядку.

$$\frac{dP_B(t)}{dt} = [1 - P_B(t)]\mu.$$

Розв'язавши рівняння з урахуванням початкових умов $t = 0, P(0) = 0$ отримаємо

$$P_B = 1 - e^{-\mu t}.$$

Розрахунок інтенсивності відновлення за статистичними даними відбувається за формулою:

$$M(t) = \frac{n_{\epsilon}(\Delta t)}{N_{\text{вср}}(\Delta t)};$$

де $n_{\text{в}}(\Delta t)$ – кількість відновлених виробів за час Δt , $N_{\text{в.ср}}(\Delta t)$ – середнє число виробів, які не були відновлені протягом часу Δt .

Середній час відновлення $T_{\text{вср}}$ – це математичне очікування відновлення.

$$T_{\text{вср}} = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt;$$

де $f_B = P'_B(t)$ – густина розподілу величини часу відновлення.

Для експоненціального закону розподілу

$$T_{\text{вср}} = \int_0^{\infty} t P'_B(t) dt = \int_0^{\infty} t \mu e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu}.$$

Ремонтопридатність об'єкту в значній мірі визначається заходами, передбаченими і проведеними при його проектуванні і виготовленні та може прямо впливати на його безвідмовність і може ефективно підвищувати її для ряду об'єктів. Чималий вплив на ремонтпридатність надає також експлуатація об'єкта, оскільки в цей період діють такі фактори, як організація технічного обслуговування і відновлення, підготовка операторів, постачання запасними елементами тощо.

1.6. Показники збережуваності

Важливою, особливо для об'єктів з тривалими термінами зберігання, є властивість об'єкта зберігати на етапах зберігання та транспортування свої задані експлуатаційні властивості. Ці властивості об'єкта визначаються поняттям «збереженість». Згідно з визначенням збереженість може

розглядатися як специфічний випадок безвідмовності, розповсюджуваний тільки на етапи зберігання і транспортування.

В якості одиничних показників, що дозволяють кількісно визначити збереженість, використовують середній термін зберігання і гамма-процентний термін зберігання.

Середній термін зберігання $T_{сохр.ср}$ – математичне очікування терміну зберігання

$$T_{зб.ср} = \int_0^{\infty} t_{зб.ср} f(t_{зб}) dt,$$

де $t_{зб.ср}$ – збережуваність i -го об'єкта; $f(t_{зб})$ – функція густини розподілу величини $t_{зб}$.

Гама-процентний термін зберігання $t_{зб\gamma}$ – термін зберігання, який буде досягнутий об'єктом із заданою вірогідністю у γ відсотків.

$$T_{\gamma} = -\frac{\ln P_{\gamma}}{\lambda} = -T_0 \ln P_{\gamma}, P_{\gamma} = \frac{\gamma}{100}.$$

1.7. Показники довговічності

Довговічність – *властивість об'єкта зберігати працездатність до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонтів.*

Для невідновлюваних елементів (електровакуумні прилади, резистори, конденсатори тощо) значення довговічності збігається з часом їх експлуатації до відмови.

Одиничні показники довговічності: термін служби і ресурс.

Термін служби визначається календарною тривалістю експлуатації об'єкта від початку експлуатації чи її поновлення після середнього (капітального) ремонту до настання граничного стану.

Для відновлюваних і не відновлюваних об'єктів розрізняють середній термін служби, середній термін служби до списання і гамма-процентний термін служби.

Середній термін служби $T_{cp.cl}$ – математичне очікування терміну служби:

$$T_{cp.cl} = \int_0^{\infty} t_{cli} f(t_{cl}) dt ,$$

де t_{cli} – термін служби i -го об'єкта, $f(t_{cl})$ – функція щільності розподілу часу терміну служби.

Середній термін служби до списання $T_{cp.cl.cn}$ – середній термін служби від початку експлуатації до його списання, обумовленого настанням граничного стану.

Середній міжремонтний термін служби – середній термін служби між суміжними капітальними ремонтами об'єкта.

Середній термін служби до капітального ремонту – середній термін служби від початку експлуатації об'єкта до його першого капітального ремонту.

Гама-процентний строк служби – строк служби, протягом якого об'єкт не досягає граничного стану з заданою ймовірністю у γ відсотків.

Гама-процентний термін служби визначається виразом

$$1 - q(T_{cl\gamma}) = P(T_{cl\gamma}) = \gamma / 100$$

де $q(T_{cl\gamma})$ – функція розподілу терміну служби.

Вважаючи закон розподілу часу безвідмовної роботи елементів об'єкта експоненціальним і скориставшись виразами для цього закону, запишемо

$$\exp(-\lambda T_{cl\gamma}) = \gamma / 100 .$$

Логарифмуючи цей вираз, отримаємо

$$T_{cлy} = -\frac{1}{\lambda} \ln(\gamma / 100) = -T_0 (-\ln(\gamma / 100)).$$

Цей вираз дозволяє зв'язати безвідмовність комплектуючих об'єкт елементів з його довговічністю.

Стосовно до відновлюваних об'єктів розрізняють також середній термін служби між середніми (капітальними) ремонтами і середній термін служби до середнього (капітального) ремонту.

Середній термін служби між середніми (капітальними) ремонтами – середній термін служби між суміжними середніми (капітальними) ремонтами.

Середній термін служби до середнього (капітального) ремонту – середній термін служби від початку експлуатації об'єкта до його першого середнього (капітального) ремонту.

Всі значення термінів служби визначаються на підставі статистичних даних експлуатації апаратури.

Друга група показників довговічності це ресурси.

Ресурсом називають напрацювання об'єкта від початку його експлуатації чи поновлення після середнього або капітального ремонту до настання граничного стану.

Для відновлюваних і невідновлюваних об'єктів розрізняють призначений ресурс, середній ресурс і гамма-процентний ресурс.

Призначений ресурс R_n – сумарне напрацювання об'єкта, при досягненні якої експлуатація повинна бути припинена незалежно від його стану.

Середній ресурс – математичне очікування ресурсу:

$$R_{cp} = \int_0^{\infty} r_i f(r) dt$$

де r_i – ресурс роботи i -го елемента (об'єкта): $f(r)$ – функція щільності розподілу величини r .

Гама-процентний ресурс – напрацювання, протягом якого об'єкт не досягає граничного стану із заданою ймовірністю гама відсотків.

Для визначення гамма-відсоткового ресурсу можна скористатися виразом попередньою формулою, підставляючи замість функції розподілу терміну служби значення функції розподілу ресурсу.

Крім розглянутих показників для відновлюваних об'єктів розрізняють середній ресурс між середніми (капітальними) ремонтами, середній ресурс до списання і середній ресурс до середнього (капітального) ремонту.

Середній ресурс між середніми (капітальними) ремонтів (ремонтний ресурс) – середній ресурс між суміжними середніми (капітальними) ремонтами.

Середній ресурс до списання – середній ресурс об'єкта від початку експлуатації до його списання, обумовленого граничним станом.

Середній ресурс до середнього (капітального) ремонту – середній ресурс від початку експлуатації об'єкта до його першого середнього (капітального) ремонту.

Всі значення ресурсів визначаються на підставі статистичних даних експлуатації апаратури.

1.8. Комплексні показники надійності

У ряді випадків для оцінки експлуатаційних якостей об'єкта одних одиничних показників надійності буває недостатньо. Виникає необхідність у більш складних показниках, які б описували відразу декілька властивостей, складових надійності об'єкта. Такі показники називають комплексними показниками надійності.

До них відносяться: коефіцієнт готовності, коефіцієнт технічного використання і коефіцієнт оперативної готовності.

Процес функціонування відновлюваного об'єкта можна представити як послідовність чергування інтервалів працездатності і відновлення (простою).

Коефіцієнт готовності K_{Γ} – ймовірність того, що об'єкт виявиться працездатним в довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачається.

За статистичними даними експлуатації коефіцієнт готовності об'єкта визначається як відношення сумарного часу перебування спостережуваного об'єкта в працездатному стані до всього часу його експлуатації.

Якщо взяти найпростішу систему експлуатації об'єкта (робота – відновлення – робота), то для визначення значення коефіцієнта готовності можна записати

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_B}$$

де T – напрацювання на відмову; T_B – середній час відновлення.

Коефіцієнт готовності може бути визначений як для одиночного об'єкта, так і для групи об'єктів.

З наведеного виразу випливає, що збільшити значення коефіцієнта можна, збільшуючи безвідмовність об'єкта або ж всіляко скорочуючи час відновлення. Коефіцієнт готовності об'єкта може бути підвищений за рахунок збільшення напрацювання на відмову і зменшення середнього часу відновлення. Для визначення коефіцієнта готовності необхідний досить тривалий календарний термін функціонування об'єкта.

Коефіцієнт оперативної готовності K_{OG} визначається як ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу (крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається) і, починаючи з цього моменту, буде працювати безвідмовно протягом заданого інтервалу часу.

З визначення випливає, що

$$K_{OG} = K_{\Gamma} \cdot p(t).$$

Коефіцієнт простою K_{Π} – коефіцієнт, що визначає імовірність того, що об'єкт буде непрацездатним у довільно обраний момент часу. Коефіцієнт простою визначається як

$$K_{\Pi} = \frac{T_B}{T + T_B} \Rightarrow K_P = 1 - K_{\Pi}.$$

Коефіцієнт технічного використання – відношення математичного очікування часу перебування об'єкта в працездатному стані T за деякий період експлуатації до суми математичних сподівань часу перебування об'єкта в працездатному стані T , часу простоїв $T_{\text{пр}}$, обумовлені технічним обслуговуванням, і часу ремонтів T_B за той же період експлуатації.

$$K_{\text{ТВ}} = \frac{T}{T + T_B + T_{\text{пр}}}.$$

Як видно з виразу коефіцієнт технічного використання характеризує частку часу перебування об'єкта в працездатному стані щодо загальної (календарній) тривалості експлуатації.

Середня сумарна трудомісткість технічного обслуговування – математичне сподівання сумарних витрат на проведення технічного обслуговування об'єкта за певний період експлуатації. Відношення цього показника до математичного очікування сумарного напрацювання об'єкта за той же період експлуатації називають питоною сумарною трудомісткістю технічного обслуговування.

Для оцінки трудомісткості ремонтів використовують аналогічний показник – **середню сумарну трудомісткість ремонтів**, розуміючи під цим математичне сподівання сумарних затрат на всі види ремонтів об'єкта за певний період експлуатації. Відношення цього показника до математичного очікування сумарного напрацювання об'єкта за той же період експлуатації називають питоною сумарною трудомісткістю ремонтів.

Важливим для оцінки умов експлуатації об'єкта є коефіцієнт навантаження, що дозволяє враховувати вплив різних факторів на об'єкт у період його експлуатації.

Коефіцієнт навантаження – відношення реального робочого навантаження H_p , що діє на об'єкт (елемент) в даних умовах, до номінального навантаження H_H , передбаченого для даного об'єкта (елемента) в заданих умовах експлуатації:

Формула розрахунку коефіцієнта навантаження наступна

$$K_H = \frac{H_p}{H_H}.$$

Крім розглянутих показників, у ряді випадків використовують і інші комплексні показники надійності. Наприклад, для оцінки вартості експлуатації: вартість технічного обслуговування, вартість ремонтів тощо.

Питання для самоконтролю

Які властивості містить в собі поняття надійності РЕА?

- А) безвідмовність, довговічність;
- Б) ремонтпридатність, збережуваність;
- В) працездатність та справність;
- Г) всі властивості що перелічені вище;
- Д) варіанти А) і Б).

Який стан об'єкту полягає у здатності виконувати задані функції, зберігаючи значення основних параметрів в межах установлених НТД?

- А) справність;
- Б) безвідмовність;
- В) працездатність;
- Г) всі властивості що перелічені вище;
- Д) інший варіант.

Що таке частота відмов?

- А) інтегральна характеристика об'єкту;
- Б) диференціальна функція об'єкту;
- В) точкова характеристика об'єкта;
- Г) інтенсивна функція об'єкту;
- Д) немає вірної відповіді.

Які поняття визначають надійність?

- А) безвідмовність;
- Б) ремонтпридатність;
- В) довговічність;
- Г) збережуваність;
- Д) всі зазначені поняття.

Властивість об'єкту зберігати працездатний стан при зберіганні та транспортуванні це –

- А) Довговічність;
- Б) Ремонтпридатність;
- В) Безвідмовність;
- Г) Надійність;
- Д) Збережуваність.

Що за подія полягає в порушенні працездатного стану об'єкту?

- А) збій;
- Б) ушкодження;
- В) дефект;
- Г) відмова;
- Д) інший варіант.

Напрацювання до відмови це -

- А) напрацювання до першої відмови з моменту початку експлуатації;
- Б) напрацювання у годинах до настання граничного стану;
- В) тривалість перебування в справному стані з моменту початку або поновлення експлуатації;
- Г) сумарне напрацювання системи;
- Д) календарна тривалість роботи.

До яких показників надійності відносять наступні показники: коефіцієнт готовності, коефіцієнт оперативної готовності, коефіцієнт технічного використання?

- А) безвідмовність;
- Б) ремонтпридатність;
- В) збережуваність;
- Г) довговічність;
- Д) комплексні показники.

Що характеризує коефіцієнт готовності?

- А) безвідмовність апаратури;
- Б) ремонтпридатність апаратури;
- В) довговічність та зберігаємість апаратури;
- Г) як безвідмовність так і ремонтпридатність;
- Д) варіанти А), Б), В) разом.

Як позначається імовірність відмови?

- А) $P(t)$;
- Б) $f(t)$;
- В) $Q(t)$;
- Г) $\lambda(t)$;
- Д) $\mu(t)$.

Яка властивість надійності полягає у попередженні виникнення відмов?

- А) Довговічність;
- Б) Ремонтпридатність;
- В) Безвідмовність;
- Г) Надійність;
- Д) Збережуваність.

Що за подія полягає в порушенні справного стану при збереженні працездатного стану об'єкту?

- А) збій;
- Б) відмова;
- В) дефект;
- Г) ушкодження;
- Д) інший варіант.

Що за властивість полягає в здатності зберігати працездатність до настання граничного стану при заданій системі технічного обслуговування та ремонтів?

- А) безвідмовність;
- Б) ремонтпридатність;
- В) збережуваність;
- Г) довговічність;
- Д) комплексні показники.

Яким умовам відповідає простіший потік відмов?

- А) стаціонарність;
- Б) ординарність;
- В) відсутність післядії;
- Г) в залежності від випадків комбінація варіантів А), Б), В);
- Д) завжди одночасно всім трьом умовам.

Що таке граничний стан?

- А) стан об'єкту коли його подальша експлуатація неможлива або недоцільна;
- Б) повне зношення системи;
- В) стан об'єкту коли його працездатність відновлюється на заводі-виробнику;
- Г) стан об'єкту коли напрацювання скінчилося;
- Д) немає такого поняття.

Властивість об'єкту зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонтів це –

- А) Довговічність;
- Б) Ремонтпридатність;
- В) Безвідмовність;
- Г) Надійність;
- Д) Збережуваність.

РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

Відмови в системах виникають під впливом різноманітних факторів. Оскільки кожен фактор у свою чергу залежить від багатьох причин, то відмови елементів, що входять до складу системи, належать, як правило, до випадкових подій, а час роботи до виникнення відмов – до випадкових величин. В інженерній практиці можливі і не випадкові (детерміновані) відмови (відмови, виникнення яких відбувається в певний момент часу, тобто в момент виникнення причини, оскільки існує однозначний і певний зв'язок між причиною відмови і моментом її виникнення). Наприклад, якщо в ланцюзі апаратів помилково поставлений елемент, не здатний працювати при піковому навантаженні, то всякий раз, коли виникає це навантаження, він обов'язково перейде в стан відмови. Такі відмови виявляються і усуваються в процесі перевірки технічної документації та при випробуваннях.

При аналізі надійності об'єктом дослідження є випадкові події та величини. В якості теоретичних розподілів напрацювання до відмови можуть бути використані будь-які застосовувані в теорії імовірності неперервні розподіли. В принципі можна взяти будь-яку криву, площа під якою дорівнює одиниці, і використовувати її в якості кривої розподілу випадкової величини. Тому перш ніж приступити до інженерних методів розрахунку надійності і випробувань на надійність, слід розглянути закономірності, яким вони підпорядковуються.

2.1. Поняття про випадкові величини та випадкові процеси

Випадкова подія – подія, яка в результаті досвіду може відбутися або не відбутися. Випадкові події утворюють випадкові потоки та випадкові процеси.

Потік подій – послідовність подій, які відбуваються одна за одною в певному відрізку часу. Наприклад, відмови відновлюваного пристрої утворюють потік подій (потік відмов). Під дією потоку відмов і потоку відновлень технічний пристрій може перебувати в різних станах (повної відмови, часткової відмови, працездатний). Перехід виробу з одного стану в інше являє собою випадковий процес.

Випадкова величина – величина, яка в результаті досліду може прийняти те або інше значення, причому заздалегідь невідомо, яке саме. Випадкова величина може бути дискретною (число відмов за час t), або безперервною (час напрацювання елемента до відмови, час відновлення працездатності).

Закон розподілу випадкової величини – співвідношення, що встановлює зв'язок між значеннями випадкової величини та її імовірністю.

В теорії надійності за випадкову величину зазвичай приймають час роботи об'єкту. У цьому випадку функція густини розподілу $f(t)$ буде служити повною характеристикою розсіювання термінів служби елементів. Вид цієї функції залежить від закономірностей процесу втрати об'єктом працездатності.

В теорії надійності найбільше поширення одержали наступні закони розподілу випадкових величин $f(t)$:

для дискретних випадкових величин – біноміальний закон; закон Пуассона;

для неперервних випадкових величин – експоненціальний закон; нормальний закон; гамма-розподіл; закон Вейбулла та інші.

Час безвідмовної роботи елементів апарату є безперервна випадкова величина і для опису її роботи в теорії надійності використовують наступні закони розподілу: Вейбула, експоненціальний, Релея, нормальний та ін.

Розглянемо більш детально основні закони розподілу, що зустрічаються при розрахунках надійності та величини які вони описують. Також визначимо в яким випадках варто застосовувати той чи інший закон розподілу.

2.2. Розподіл Вейбулла

Досвід експлуатації дуже багатьох електронних приладів і значної кількості електромеханічної апаратури показує, що для них характерні три види залежностей інтенсивності відмов від часу (рис. 2.1), що відповідають трьом періодам життя цих пристроїв.

Зазначені три види залежностей інтенсивності відмов від часу можна отримати, використовуючи для імовірнісного опису випадкового напрацювання до відмови двопараметричний розподіл Вейбулла. Згідно з цим розподілом функція густини розподілу

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} e^{-(t/a)^b},$$

де a – параметр закону розподілу, b – параметр форми розподілу.

Знайдемо імовірність безвідмовної роботи з виразу

$$p(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_0^\infty f(\tau) d\tau.$$

$$p(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = 1 - \int_0^t \frac{b}{a} \left(\frac{\tau}{a} \right)^{b-1} e^{-(\tau/a)^b} d\tau.$$

Проінтегруємо вираз, отримаємо імовірність безвідмовної роботи ($\lambda = 1/a$)

$$p(t) = e^{-(t/a)^b} = e^{-(\lambda t)^b}.$$

Використовуючи співвідношення

$$\lambda(t) = f(t) / p(t),$$

отримаємо інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1}.$$

Середнє напрацювання до відмови

$$T_0 = \int_0^{\infty} p(t) dt,$$

$$T_0 = \int_0^{\infty} t \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} e^{-(t/a)^b} dt = a \Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right),$$

де $a \Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right)$ – табульована гамма-функція, визначається з довідника.

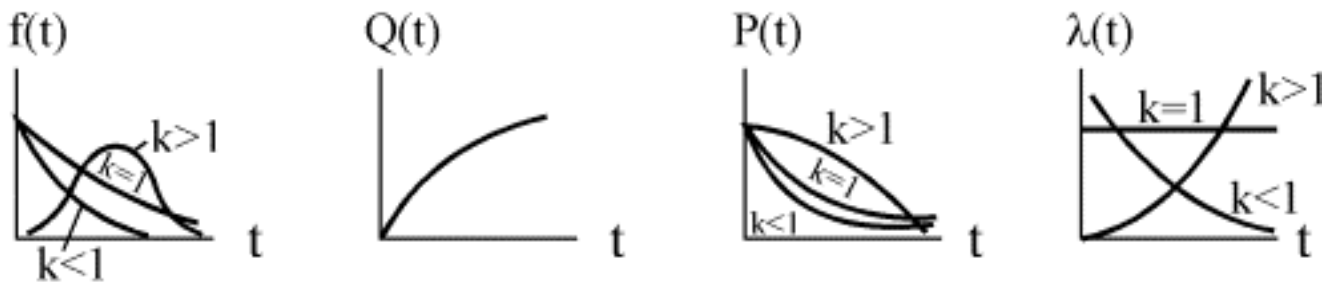


Рис. 2.1. Графіки основних параметрів надійності при розподілі Вейбулла

Відзначимо, що при параметрі $b = 1$ розподіл Вейбулла переходить в експоненціальний, а при $b = 2$ – в розподіл Релея.

Цьому закону добре підкоряються розподіли відмов в об'єктах, що містять велику кількість однотипових невідновлювальних елементів, особливо коли відмова пов'язана з погіршенням їх параметрів. Підходить для опису деяких типів електровакуумних, напівпровідникових і НВЧ-приладів. Розподіл Вейбулла підходить для описання відмов ряду механічних об'єктів. Цей закон застосуємо для відмов пристрою, що складається з послідовно з'єднаних дубльованих елементів і інших подібних випадків. Використовується для оцінки надійності виробів в період їх приробітку, а також при зносі і старінні.

2.3. Експоненціальний розподіл

Експоненціальний розподіл є частинним випадком розподілу Вейбулла, коли параметр форми $b = 1$. Цей розподіл однопараметричний, тобто для запису розрахункового виразу досить одного параметра, $\lambda = \text{const}$. Для цього закону вірно і зворотнє твердження: якщо інтенсивність відмов постійна, то імовірність безвідмовної роботи як функція часу підпорядковується експоненціальному закону:

$$f(t) = 1/a \cdot e^{-t/a} = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$p(t) = e^{-t/a} = e^{-\lambda t}$$

$$\lambda(t) = 1/a = \lambda = \text{const}$$

$$T_0 = a = 1/\lambda$$

Таким чином, знаючи середній час безвідмовної роботи T (або постійну інтенсивність відмов), можна в разі експоненціального розподілу знайти імовірність безвідмовної роботи для інтервалу часу від моменту включення об'єкта до будь-якого заданого моменту t .

Даний розподіл (рис. 2.2.) описує напрацювання до відмови об'єктів, у яких у результаті здавальних випробувань (вихідного контролю) відсутній період припрацювання, а призначений ресурс встановлений до закінчення періоду нормальної експлуатації. Ці об'єкти можна віднести до «не старіючих», для них $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$. Коло таких об'єктів широке: складні технічні системи з безліччю компонентів, засоби обчислювальної техніки, системи автоматичного регулювання і т.п.

Модель експоненціального розподілу часто використовується для апіорного аналізу, оскільки він дозволяє не дуже складними розрахунками отримати прості співвідношення для різних варіантів створюваної системи. На стадії апостеріорного аналізу (досвідчених даних) повинна проводитися перевірка відповідності експоненціальної моделі результатам випробувань.

Даний розподіл характерний для складних систем, які містять велику кількість різних невідновлювальних елементів, що мають переважно раптові відмови. Застосовується до відновлюваних об'єктів з найпростішим потоком відмов або для наближеної оцінки безвідмовності. На практиці цей закон логічно застосовувати в тому випадку, коли процеси старіння і зносу протікають достатньо повільно, тобто для періоду нормальної роботи виробу. Цей закон можна використовувати і в тих випадках, коли у виробках мають місце приховані дефекти, що призводять до раптових відмов.

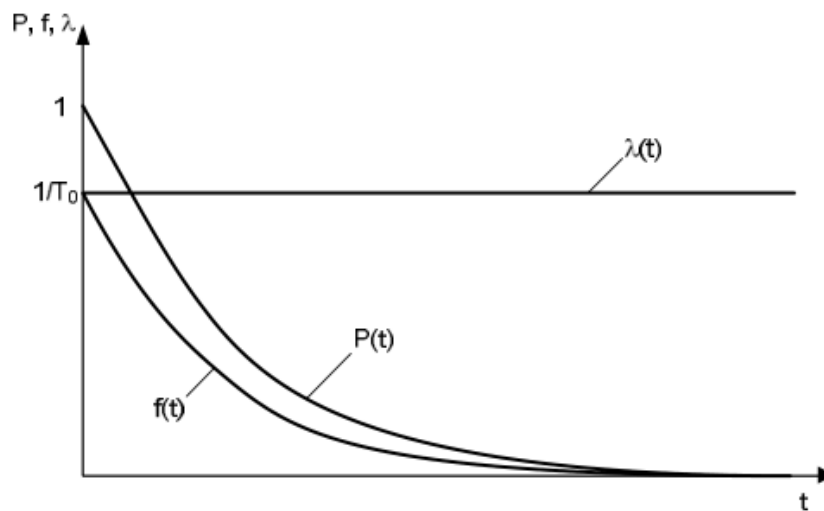


Рис. 2.2. Графіки зміни основних параметрів надійності при експоненціальному розподілі

2.4. Розподіл Релея

Розподіл Релея є частинним випадком розподілу Вейбулла, коли параметр форми $b = 2$. Основні параметри надійності за законом Релея мають наступний вигляд

$$f(t) = \frac{2t}{a^2} \cdot e^{-(t/a)^2} = 2t\lambda^2 e^{-(\lambda t)^2}$$

$$p(t) = e^{-(t/a)^2} = e^{-(\lambda t)^2}$$

$$\lambda(t) = 2t/a^2 = 2t\lambda^2 = \text{const}$$

$$T_0 = a \frac{\sqrt{\pi}}{2} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\lambda}$$

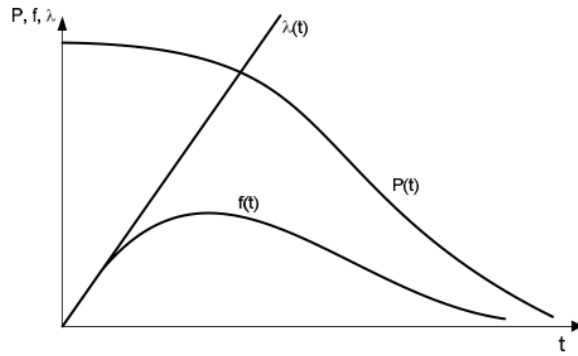


Рис. 2.3. Графіки зміни основних параметрів надійності при розподілі Релея

Розподіл Релея придатний для опису поведінки об'єктів яким характерне зношення або старіння, а зміна його основних характеристик наведена на рис. 2.3.

2.5. Нормальний та логарифмічно нормальний закони розподілу

Нормальний закон розподілу (розподіл Гауса) найчастіше зустрічається на практиці. Його використовують, коли випадкова величина залежить від великої кількості випадкових факторів, однорідних за своїм впливом, при цьому вплив кожного з них у порівнянні з усією їхньою сукупністю незначний.

Цим законом розподілу добре описуються результати незалежних вимірювань фізичних величин, а також користуються при оцінці надійності виробів в процесі їхнього зносу і, відповідно, старіння. Його використовують для визначення часу напрацювання до відмови.

Нормальний закон розподілу характеризується густиною імовірності

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-t_{cp})^2}{2\sigma^2}\right),$$

де t_{cp} – математичне очікування часу появи першої відмови, σ – середньоквадратичное отклонение, σ^2 – дисперсія випадкових величин.

Формули для нормального закону розподілу часу безвідмовної роботи об'єкту:

$$p(t) = 0,5 - \Phi(U) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - t_{cp}}{\sigma}\right)$$

$$\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

$$f(t) = \frac{\Phi(U)}{\sigma}$$

$$\lambda(t) = \frac{\Phi(U)}{\sigma} \cdot \frac{1}{0,5 - \Phi(U)}$$

де $\Phi(U)$ – функція Лапласа, яка володіє наступними властивостями:

$$\Phi(0) = 0;$$

$$\Phi(-U) = -\Phi(U);$$

t_{cp} – середнє значення випадкової величини T ;

σ^2 – дисперсія випадкової величини T .

Монотонне зростання інтенсивності відмов з плином часу (рис. 2.4.) – характерна ознака нормального розподілу. Нормальний розподіл істотно відрізняється від експоненціального.

Описує поведінку об'єктів яким типове зношення. Іноді описується час відновлення ремонтіваних об'єктів і сумарне напрацювання до середнього ремонту.

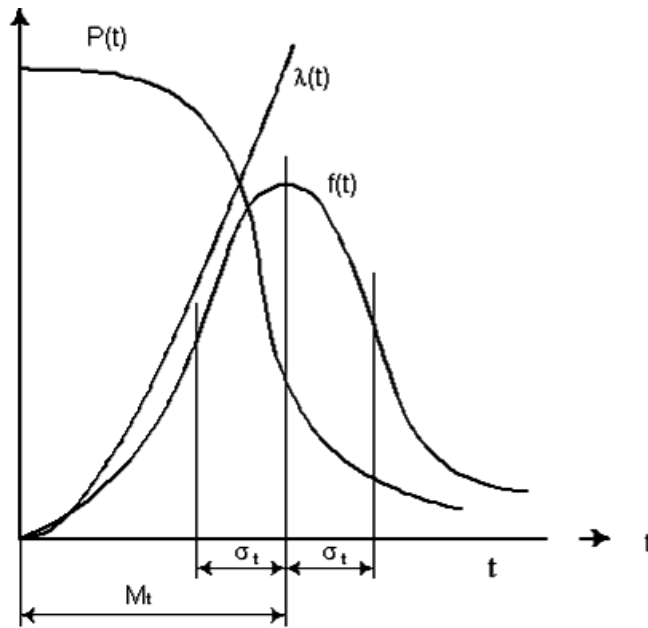


Рис. 2.4. Графіки зміни основних параметрів надійності при нормальному законі розподілу

Логарифмічно нормальний закон розподілу

Логарифмічно нормальний закон розподілу використовується при оцінці відмов через зношення в тих випадках, коли відмова виникає через пошкодження.

Показники надійності виробу при логарифмічно нормальному законі розподілу мають вид:

- функція розподілу:

$$f(t) = \frac{0.4343}{t\sigma} \phi\left(\frac{\lg t - \lg t_0}{\sigma}\right);$$

- імовірність безвідмовної роботи:

$$p(t) = \int_{-\infty}^t \phi\left(\frac{\lg t - \lg t_0}{\sigma}\right) dt;$$

- інтенсивність відмов:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)};$$

2.6. Гамма-розподіл

Гамма-розподіл використовується при оцінці надійності елементів і систем у початковий період експлуатації, при дослідженні надійності електромеханічних і механічних пристроїв, елементів високонадійної апаратури з інтенсивністю відмов, що зменшується в часі. Крім того, даний розподіл описує розподіл часу відмов систем, резервованих способом заміщення, якщо напрацювання на відмову основної та резервних систем підпорядковане показовому закону.

Випадкова величина напрацювання до відмови T має гамма-розподіл із параметрами λ (масштабний параметр) і δ (параметр форми), де $\lambda, \delta > 0$, причому δ – ціле число, якщо її щільність розподілу відмов описується виразом

$$f(t) = \frac{\lambda^\delta t^{\delta-1}}{\Gamma(\delta)} \exp(-\lambda t),$$

де $\Gamma(\delta) = (\delta-1)!$ – гамма-функція Ейлера.

Вочевидь, при $\delta=1$ вираз спрощується до вигляду, який відповідає експоненціальному розподілу.

Гамма-розподіл найкраще описує розподіл суми незалежних випадкових величин, кожна з яких розподілена за експоненціальним законом. Гамма-розподіл при цілих значеннях δ іноді називають розподілом Ерланга. Для

такого розподілу ймовірність безвідмовної роботи на інтервалі $(0, t)$ визначається так:

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \sum_{i=0}^{\delta-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}.$$

Щільність розподілу відмов:

$$f(t) = \lambda \frac{(\lambda t)^{\delta-1}}{(\delta-1)!} \exp(-\lambda t).$$

Інтенсивність відмов:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda (\lambda t)^{\delta-1}}{(\delta-1)! \sum_{i=0}^{\delta-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}}.$$

Середнє напрацювання до відмови:

$$T = \delta / \lambda.$$

Прикладом використання гамма-розподілу є резервована система, що складається з δ однакових елементів. При цьому під навантаженням знаходиться один елемент. Інші елементи по чергові автоматично включаються в роботу після відмови працюючого елемента.

Графіки зміни показників надійності при гамма-розподілі наведені на рис. 2.5.

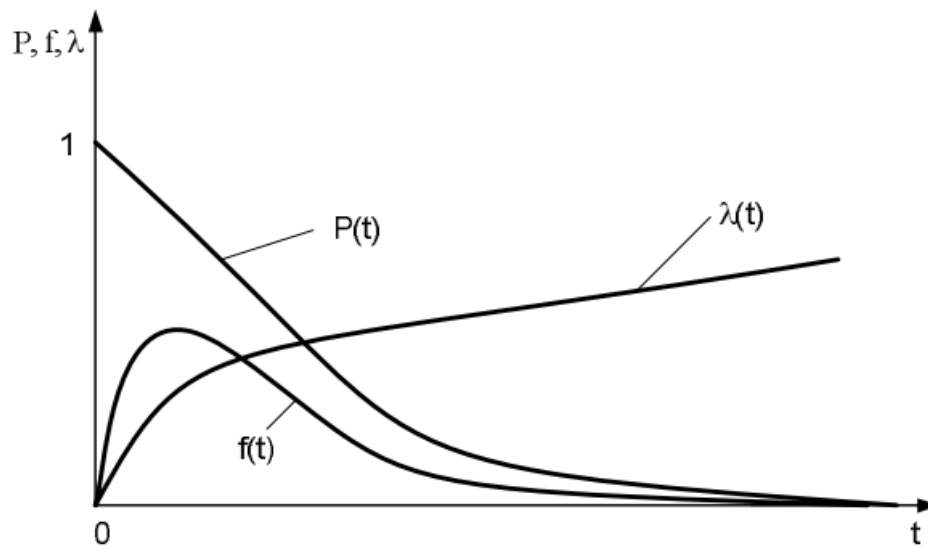


Рис. 2.5. Графіки зміни основних параметрів надійності при логарифмічному нормальному законі розподілу

Для опису характеристик надійності в широкому інтервалі часу експлуатації, що включає в себе періоди початкових відмов і старіння, використовуються композиції законів розподілів. Звичайно для початкового періоду експлуатації застосовують закони Вейбулла і гамма-розподіл, для періоду нормальної експлуатації – експоненціальний розподіл, а для періоду старіння – нормальний, логарифмічно нормальний або розподіл Релея.

В даному посібнику показані тільки найбільш поширені закони розподілу випадкової величини. Відомий цілий ряд законів, які так само використовуються при розрахунках надійності: біноміальний розподіл, χ -розподіл, розподіл Максвелла, розподіл Ерланга та інші.

Якщо згадати графік зміни інтенсивності відмов технічного об'єкту з часом, то можна визначити, що поведінка об'єктів на першій ділянці описується законом Вейбулла, на другій ділянці – експоненціальним розподілом, на третій ділянці – розподілом Релея. Оскільки основним етапом роботи приладу є етап нормальної експлуатації, яка показана на другій ділянці графіка, то основним законом розрахунку безвідмовності є експоненціальний закон розподілу.

2.7. Біноміальний розподіл дискретних випадкових величин

Наведені вище розподіли характеризують неперервні випадкові величини, наприклад, час безвідмовної роботи або час відновлення. Але в ряді випадків при розрахунку надійності ТО виникає необхідність оцінки дискретних випадкових величин, наприклад, кількості відмов протягом заданого інтервалу часу.

Тому розглянемо закони розподілу які найбільш часто використовують при розрахунках надійності дискретних випадкових величин.

Для такого розподілу можливі значення випадкової величини $0, 1, 2, 3, \dots, n$. Імовірність появи m сприятливих подій із загальної кількості n подій дорівнює

$$P_n(m) = C_n^m P^m (1 - P)^{n-m}$$

$$C_n^m = \frac{n!}{m! (n - m)!}$$

При перевірці виконання умови нормування використовується формула біному Ньютона, тому закон розподілу називають біноміальним

$$\sum_{m=0}^n P_m = \sum_{m=0}^n C_n^m P^m (1 - P)^{n-m}$$

Функція розподілу:

$$F(t) = \begin{cases} 0, t \leq 0, \\ \sum_{m=0}^n C_n^m P^m Q^{n-m}, t \in [0, n], \\ 1, t > n. \end{cases}$$

Математичне сподівання і дисперсія відповідно дорівнюють:

$$M(m) = n \cdot P$$
$$\sigma_T^2(m) = n \cdot P \cdot Q$$

де P – ймовірність здійснення події при одноразовому випробуванні.

2.8. Розподіл Пуассона дискретних випадкових величин

Розподіл Пуассона зустрічається в задачах при повторних випробовуваннях, в яких ймовірність очікуваної події дуже мала. Це закон рідкісних подій. В техніці цей розподіл використовується при визначенні числа телефонних дзвінків в одиницю часу, числа рідкісних компонентів на одиницю площі або об'єму, числа дефектів металізації на новій друкованій платі, числа атмосферних завад при радіоприйманні, числа поломки нових ТЗ під час їх експлуатації тощо. А також коли ми маємо справу із числом подій, що з'являються на проміжку часу. Наприклад, число поломок надійного технічного пристрою за певний період часу, наприклад, за місяць.

Можливі значення випадкової величини для такого розподілу $0, 1, 2, \dots, n$. Ймовірність появи m подій дорівнює

$$P_m = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}.$$

Математичне сподівання і дисперсія відповідно дорівнюють:

$$M(m) = \lambda,$$
$$\sigma_T^2(m) = \lambda,$$

де λ – параметр розподілення.

Функція розподілу (рис. 2.6.):

$$F(t) = \begin{cases} 0, t \leq 0, \\ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}, t > 0 \end{cases}$$

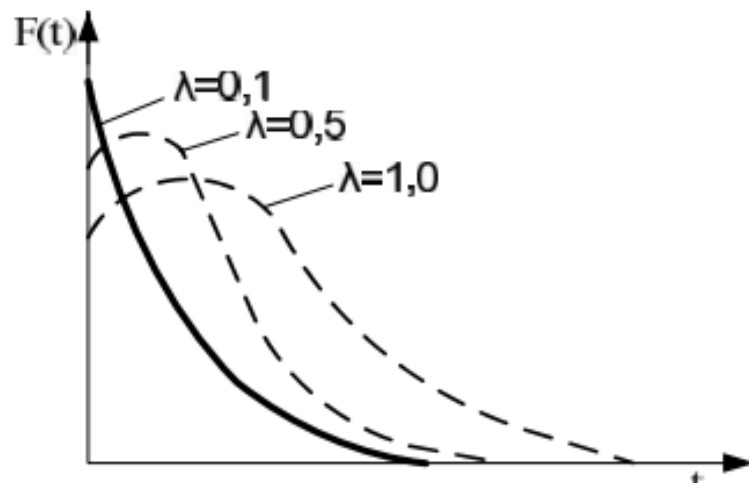


Рис. 2.6. Розподіл Пуассона

Про вибір закону розподілу відмов при розрахунку надійності

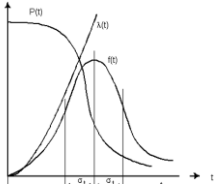
Визначення закону розподілу відмов має велике значення при дослідженнях і оцінках надійності.

Закон розподілу відмов можна визначити за експериментальними даними, але для цього необхідно проведення великого числа дослідів в ідентичних умовах. Практично ці умови, як правило, важко забезпечити. Крім того, таке рішення містить риси пасивної реєстрації подій.

Разом з тим у багатьох випадках за час експлуатації встигає відмовити лише незначна частка об'єктів. Більш раціонально – вивчення умов, фізичних процесів при яких виникає той чи інший розподіл. При цьому складаються моделі виникнення відмов і відповідні їм закони розподілу часу до появи відмови, що дозволяє робити обґрунтовані припущення про закон розподілу.

Такий підхід необхідний для оцінки надійності нових виробів, для яких статистичний матеріал дуже обмежений.

Питання для самоперевірки

Експоненційний закон розподілу є частинним випадком: b – параметр закону розподілу. А) закону розподілу Релея у випадку коли $b^*=1$; Б) нормального закону розподілу; В) закону розподілу Вейбула при $b=1$; Г) гама-розподілу; Д) інший варіант.	При якому законі розподілу інтенсивність відмов є сталою величиною? А) нормальний закон розподілу; Б) закон розподілу Вейбула; В) гама-розподіл; Г) закон розподілу Релея; Д) експоненційний закон.
До якого типу розподілу відносять наступні графіки функцій розподілу?  А) нормальний закон розподілу; Б) закон розподілу Вейбула; В) гама-розподіл; Г) закон розподілу Релея; Д) експоненційний закон.	Який розподіл використовують при описанні надійності об'єктів при випробуваннях на етапі виробництва? А) Експоненційний; Б) Релея; В) Біноміальний; Г) Ерланга; Д) Вейбула.
Який закон розподілу часу безвідмовної роботи треба використовувати при відмові в технічному забезпеченні в результаті зношування елементів? А) Нормальний; Б) Експоненційний; В) Вейбулла; Г) Ерланга; Д) Біноміальний.	Який розподіл використовується для описання надійності дискретних випадкових величин? А) Експоненційний; Б) Релея; В) Біноміальний; Г) Ерланга; Д) Вейбула.
Який розподіл використовують при описанні надійності об'єктів для яких характерне старіння та зношення? А) Експоненційний; Б) Релея; В) Біноміальний; Г) Ерланга; Д) Вейбула.	Який закон розподілу найчастіше використовують для розрахунку надійності при нормальних умовах експлуатації? А) нормальний закон розподілу; Б) закон розподілу Вейбула; В) гама-розподіл; Г) закон розподілу Релея; Д) експоненційний закон.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

3.1. Поняття структурної надійності

Під розрахунком надійності будемо розуміти визначення числових значень показників надійності за тими чи іншим вихідним даним. Певні значення показників надійності дозволяють оцінити експлуатаційні властивості технічного об'єкта на етапі його проектування або експлуатації.

Сутність розрахунку зводиться до визначення основних показників надійності ТО за відомими показниками надійності його елементів. Відповідні показники комплектуючих елементів беруться на підставі довідкових даних або результатів експлуатації і спеціально планованих експериментів.

Розрахунок надійності складається з таких етапів.

1. Визначення складу показників надійності, що розраховуються.
2. Складання структурної схеми надійності, що базується на аналізі функціонування системи (які блоки увімкнені, у чому полягає принцип їх роботи, перелік властивостей справної системи і т. п.), вибір методу розрахунку надійності.
3. Складання математичної моделі, що пов'язує показники надійності системи, які розраховуються, з показниками надійності її елементів.
4. Виконання розрахунку, аналіз отриманих результатів, коригування розрахункової моделі.

Для розрахунку надійності необхідно складання моделі надійності системи, яка зазвичай складається на основі функціональної, принципової або структурної схеми. В якості моделі надійності застосовуватися логічні схеми або графи переходів.

У графах переходів стани позначають прямокутниками і кружечками, переходи між станами – стрілочками. Біля кожної стрілочки вказують інтенсивності переходів (відмов).

Але при застосуванні графів станів складаються диференціальні рівняння, які в більшості випадків громіздкі при вирішенні, а в деяких випадках не мають аналітичного розв'язку. Число рівнянь дорівнює числу станів. Зліва стоять похідні відповідних станів від часу. Кожен член правої частини рівнянь отримують шляхом множення інтенсивності переходу, що стоїть над стрілкою, пов'язаною з даним станом, на відповідну ймовірність стану. Знак залежить від напрямку стрілки. «+» – стрілка спрямована вістрям до стану, «-» – стрілка спрямована в протилежну сторону. Сума членів правих частин рівняння має дорівнювати нулю. Система доповнюється нормувальною умовою: $\sum_{j=1}^n P_j(t) = 1$.

$P_j(t)$ – ймовірність знаходження ТО в j -тому стані.

$m+1$ – число можливих станів.

Ймовірність станів знаходять в результаті розв'язку диференціальних рівнянь. Ймовірність безвідмовної роботи протягом напрацювання визначається сума всіх ймовірностей працездатних станів $p(t_i) = \sum_{j=0}^{n-1} P_j(t_i)$.

Варто пам'ятати:

1. в результаті розв'язання систем диференціальних рівнянь визначаються ймовірності знаходження системи в певному стані, а не ймовірність її безвідмовної роботи.
2. схеми станів можуть використовуватися тільки при припущенні показникового розподілу (експоненціальний) напрацювання до відмови.
3. логічні схеми дозволяють простіше і швидше визначити всі необхідні показники.

Тому на практиці використовують модель структурної надійності, яка базується на побудові логічних схем. Цей метод більш простий.

Перед складанням логічних схем вважають, що відмови елементів незалежні і елемент може перебувати в одному з двох станів: працездатному і не працездатному. Далі проводиться оцінка впливу відмови кожного елемента на стан системи. При складанні логічної схеми електричні зв'язку заміняю логічними. Елементи відмова яких призводить до відмови схеми включають послідовно (відмова системи відбувається при відмові будь-якого елемента). Елемент, відмова якого не призводить до відмови схеми включають паралельно.

Порядок складання логічних схем:

1. складається логічна схеми системи, яка складається з блоків.
2. для кожного блоку, складається логічна схеми системи, яка складається з вузлів.
3. для кожного вузла, складається логічна схеми системи, яка складається з елементів, які входять до її складу.

3.2. Класифікація методів розрахунку надійності

Всі методи розрахунку надійності можна поділити на дві групи за видами відмов: за раптовими відмовами та за поступовими відмовами. За джерелом отримання інформації розрізняють аналітичні методи розрахунку надійності (розрахункові) та методи за даними експлуатації (статистичний розрахунок). За повнотою розрахунку та інформації, яка в результаті цього розрахунку отримана методи поділяються на повні та наближені. Більш детальна класифікація наведена на рис. 3.1. Далі розглянемо більш детально кожен метод.

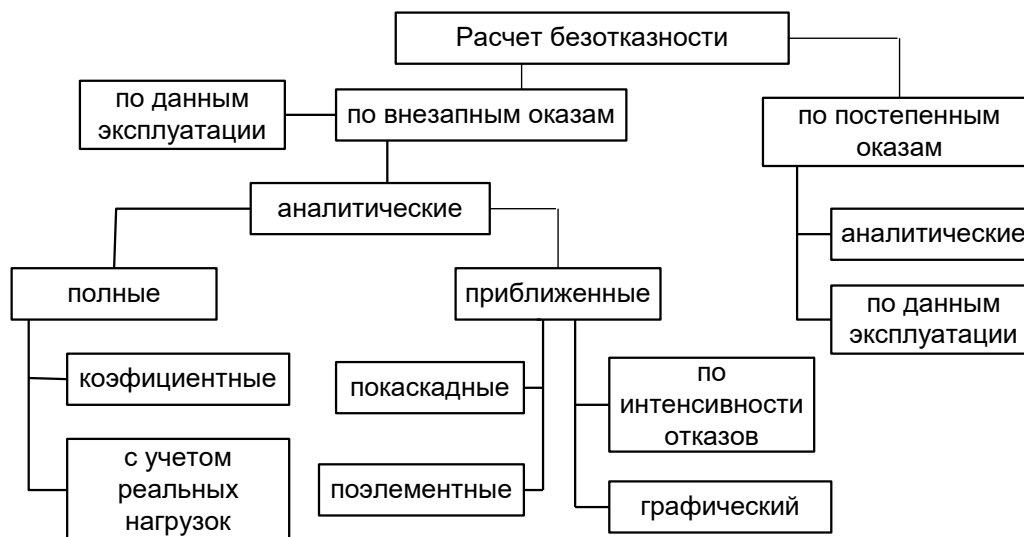


Рис. 3.1. Класифікація методів розрахунку надійності

3.3. Аналітичні методи розрахунку надійності

Для розрахунку безвідмовності об'єкт необхідно представити у вигляді розрахункової логічної схеми. Залежно від повноти вихідних даних розрізняють наближений і повний розрахунки безвідмовності. Для наближеного розрахунку безвідмовності досить знання функціональної схеми об'єкта (до каскаду). При повному розрахунку безвідмовності необхідне знання принципової схеми об'єкта (до елемента), їх режими роботи і навантаження, що діють на елемент.

Наближені методи

Застосовуються на етапі проектування, коли принципова схема ще не розроблена. Застосовують з метою перевірки виконуваності вимог технічного завдання за показниками надійності і з метою порівняння різних варіантів реалізації схем.

Розрахунок безвідмовності за раптовими відмовами

Для наближеного розрахунку безвідмовності можуть бути використані покаскадний, поелементний, графічний методи та метод розрахунку за інтенсивностями відмов.

Покаскадний метод розрахунку дає оцінку безвідмовності в першому наближенні, застосовують його на самих ранніх етапах проектування. В якості

вихідних даних використовуються число каскадів в спроектованій апаратурі і належність апаратури до певної групи.

Розрахунок показників надійності здійснюється за допомогою виразів справедливих для послідовного з'єднання. Для оцінки значення сумарної інтенсивності відмов використовується вираз

$$\Lambda_{1/\psi} = 10^{-4} \frac{n_k^*}{k_a}$$

де n_k – кількість каскадів в спроектованій РЕА; k_a – коефіцієнт що враховує умови експлуатації РЕА в залежності від її приналежності до тієї чи іншої групи, він дорівнює:

для наземної РЕА 1,8,

для літакової РЕА 0,25,

для корабельної РЕА 1,4.

Поелементний метод розрахунку дозволяє отримати більш точну оцінку безвідмовності, його застосовують на наступних етапах проектування. В якості вихідних даних використовують загальне число елементів в складі спроектованої апаратури і їх тип, а також дані експлуатації аналогічного типу апаратури (по схемному використанню елементів і їх навантажень).

Розрахунок показників безвідмовності здійснюється за допомогою виразів що і в першому випадку. Для оцінки значення сумарної інтенсивності відмов використовують дані, отримані при експлуатації аналогічної РЕА. Для цього випадку справедливо

$$\Lambda_{1/\psi} = \frac{\Lambda_{\Sigma.a}}{n_{\Sigma.a}} = \frac{\Lambda_{n.a}}{n_{n.a}}$$

де Λ – сумарна інтенсивність експлуатуємого и проєктуємого аналога, n – кількість елементів в приладах.

$$\Lambda_{n.a} = \frac{n_{n.a}}{n_{\varepsilon.a}} \Lambda_{\varepsilon.a}.$$

Розрахунок за інтенсивностями відмов

Вихідні дані: реальна схема РЕА, відомості про кількість груп і типів комплектуючих елементів і їх інтенсивності відмов для легких і важких умов застосування.

Розрахунок показників безвідмовності здійснюється за допомогою виразів що і раніше. Порядок проведення розрахунку наступний:

1) відповідно до принципової схеми і специфікації на неї проводять розбивку всіх елементів РЕА на групи, що мають приблизно однакові інтенсивності відмов. Підраховують число елементів в кожній групі;

2) за довідковими даними для використовуваних елементів знаходять максимальні і мінімальні значення інтенсивностей відмов – $\lambda_{imax}, \lambda_{imin}$.

3) визначають максимальні і мінімальні групові інтенсивності відмов $n_i \lambda_{imax}, n_i \lambda_{imin}$;

Таблиця 3.1.

Тип елемента	Інтенсивність відмов елемента, λ , 1/год	Кількість елементів в групі, n , шт	Групова інтенсивність відмов, n 1/ год
--------------	--	---------------------------------------	--

4) визначають загальну інтенсивність відмов за виразом $\Lambda(t) = \sum_{i=1}^n n_i \lambda_i(t)$;

5) використовуючи цей же вираз, визначають ймовірність безвідмовної роботи і середній час напрацювання до відмови.

$$P(t) = \exp\left[-n_i \int_0^t \lambda_i(t) dt\right] = \exp[-t / T_0]$$

$$T_0 = 1 / \Lambda$$

Графічний метод розрахунку безвідмовності

Застосовують цей метод, якщо відома залежність інтенсивності появи відмов від часу. У цьому випадку розрахунок показників безвідмовності також здійснюється за допомогою виразу

$$P(t) = p_1(t) + p_2(t) + \dots + p_n(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t)$$

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \exp\left[-\int_0^t \lambda_i(t) dt\right] = \exp\left[-\int_0^t \lambda_i(t) dt\right] = \exp\left[-\int_0^t \Lambda(t) dt\right]$$

$$\Lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$$

Розрахунок сумарної інтенсивності відмов об'єкта виконують графічно за відомими залежностями. З цією метою проводять підсумовування ординат характеристики рис.3.2. Потім визначають площу кривої рис. 3.2.

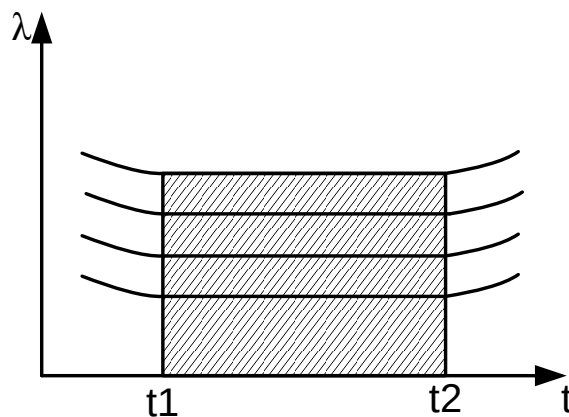


Рис. 3.2. Визначення надійності графічним методом

$$S_{\lambda} = \int_{t1}^{t2} \Lambda(t) dt$$

$$p(t) = \exp\left[-\int_{t1}^{t2} \Lambda(t) dt\right] = \exp[-S_{\lambda}]$$

3.4. Повний розрахунок безвідмовності

Повний розрахунок безвідмовності передбачає облік режимів роботи комплектуючих об'єкт елементів. Залежно від повноти обліку розрізняють коефіцієнтний метод і метод врахування реальних навантажень елементів. Всі перераховані методи розрахунку припускають наявність повних відомостей про об'єкт та умови його експлуатації.

Коефіцієнтний метод дозволяє отримати досить повні і достовірні дані при наявності повних даних про коефіцієнти надійності застосовуваних елементів. Коефіцієнтний метод передбачає наявність найпростішого потоку відмов.

Коефіцієнт надійності являє собою відношення інтенсивності відмов елементів i -ї групи λ_i , за даних умов експлуатації до інтенсивності відмов деякого основного елемента λ_0 , кількісні характеристики якого в досить близьких умовах експлуатації достовірно відомі:

$$K_i = \lambda_i / \lambda_0.$$

Цей вираз передбачає однаковий вплив режимів роботи як на основний елемент, так і на всі інші.

В якості основного елемента, як правило, використовують резистор $K = 1$.

$$\Lambda = \lambda_0 \sum_{i=1}^k n_i K_i.$$

Облік умов експлуатації в коефіцієнтний метод здійснюється за допомогою обліку впливу цих умов на поведінку основного елемента:

$$\Lambda(z) = \lambda_0(z) \sum_{i=1}^k n_i K_i,$$

де $\lambda_0(z)$ – інтенсивність відмов основного елемента з урахуванням впливу z -го фактора.

Для підвищення достовірності та точності оцінки безвідмовності необхідно значення коефіцієнтів K уточнювати, погоджуючи їх з реальною конструкцією РЕА, умовами її експлуатації і реальними режимами роботи елементів. Розрахунок безвідмовності доцільно вести по блоках з метою виявлення слабких місць даного типу РЕА.

Метод врахування реальних навантажень елементів дозволяє отримати результати, які найближчі до дійсності, оскільки в розрахунок вводиться справжнє значення інтенсивності відмов з урахуванням реальних режимів роботи і впливу відповідних факторів.

В якості вихідних даних використовують всі наявні дані про досліджуваний об'єкт РЕА, а також залежність інтенсивності відмов комплектуючих його елементів від впливу реально діючих в заданих умовах експлуатації факторів $\lambda_i(z)$. В цьому випадку вираз набуде вигляду

$$\Lambda(z) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(z)$$

В іншій частині розрахунок не відрізняється від раніше описаного.

3.5. Розрахунок за поступовими відмовами

Поряд з раптовими відмовами, особливо для складних об'єктів РЕА, характерна значна кількість поступових відмов, особливо в період старіння. Число таких відмов може досягати до 50% від загального числа всіх відмов.

Облік старіння елементів особливо важливий для РЕА та ТК з великим терміном зберігання.

Основою розрахунку є дані про закономірності зміни визначальних параметрів даного об'єкта в часі, а також встановлені на них допуски.

Дослідження поведінки параметрів численних типів об'єктів РЕА показують, що розподіл часу безвідмовної роботи при поступових відмовах відповідає нормальному закону, отже, для кожного параметра можуть бути знайдені свої значення t_{cp} , σ_i .

Як було показано ймовірність безвідмовної роботи по i -му параметру буде визначатися виразом

$$p_{ni}(t) = \frac{F_0\left(\frac{t_{cpi} - t}{\sigma_i}\right)}{F_0\left(\frac{t_{cpi}}{\sigma_i}\right)}.$$

У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи всього об'єкта РЕА та ТК за поступовими відмовами, якщо вважати відмови елементів незалежними, можна знайти з виразу

$$P_{II}(t) = \prod_{i=1}^L P_{Ili}(t).$$

де L – число визначальних параметрів об'єкта.

Значення, як правило, знаходять на підставі статистичних даних експлуатації подібного типу технічних об'єктів.

В кінці варто відзначити, що загальна ймовірність безвідмовної роботи об'єкта з урахуванням раптових і поступових відмов визначається виразом

$$P_{\Sigma}(t) = P_B(t)P_{II}(t) = \exp\left[-t \sum_{i=1}^k n_i \lambda_i\right] * \prod_{j=1}^L P_{Ilj}(t).$$

3.6. Методика повного розрахунку надійності з врахуванням реальних навантажень

Розглянемо приклад розрахунку надійності розробленого приладу (методика розрахунку надійності в дипломну роботу). Нехай студент розробив схему приладу і стоїть задача визначити основні показники надійності. Складові елементи схеми та їх кількість взяті згідно специфікації. Розрахунок надійності полягає у визначенні показників надійності виробу за відомими характеристиками надійності складових компонентів та умовами експлуатації. Для розрахунку надійності необхідно скласти логічну схему системи. При її складанні враховуємо, що відмови елементів схеми незалежні, а елементи схеми та система можуть знаходитись в одному з двох станів: працездатному та непрацездатному. Елемент схеми, при відмові якого відмовляє вся система на логічній схемі включається послідовно з'єднанням з іншими елементами. Елемент схеми, відмова якого не веде до відмови системи, вважається паралельно з'єднанням.

Проведемо розрахунок надійності приладу за раптовими відмовами. Складемо логічну схему надійності розроблюваного пристрою. Виходячи з того, що розроблюваний блок застосовується для конкретних цілей і відмова будь-якого з вузлів схеми веде до невиконання поставленої мети, а також враховуючи, що блок не має систем резервування, будемо вважати, що всі елементи схеми з'єднані послідовно і вихід з ладу одного вузла схеми веде до виходу з ладу всієї системи.

Визначимо інтенсивності відмов елементів з урахуванням умов експлуатації виробу. Для цього скористаємося формулою

$$\lambda_i = \lambda_{0i} k_1 k_2 k_3 k_4 a(T, k_n),$$

де λ_{0i} – номінальна інтенсивність відмов i -го елемента, обирається з довідника;

k_1, k_2 – поправочні коефіцієнти в залежності від дії механічних факторів (удари, вібрації);

k_3 – поправочний коефіцієнт в залежності від дії температури та вологості;

k_4 – поправочний коефіцієнт в залежності від дії від атмосферного тиску;

$a(T, k_n)$ – поправочний коефіцієнт в залежності від температури T та коефіцієнта навантаження k_n .

Значення номінальної інтенсивності відмов елементів наведені у табл. 3.1.

Табл. 3.1

Елемент схеми	$\lambda_{0i} \cdot 10^6, \text{ год}^{-1}$
Резистори С2-11-0,125Вт	0,01
Конденсатори К10-17-25 В	0,01
Конденсатори К52-1-25 В	0,1
Резонатор кварцовий РК154	0,01
Операційний підсилювач К140УД9	0,2
Цифро-аналоговий перетворювач К572ПА1А	0,35
Регістр К555ИР23	0,12
Аналоговий комутатор КР590КНЗ	0,17
Оперативний запам'ятовувальний пристрій К537РУ17	0,23
Мікроконтролер Р83С550ЕВАА	0,2

В таблицях 3.2-3.5 наведені значення коефіцієнтів $k_1 \dots k_2$ [16].

Табл.3.2

Умови експлуатації	Вібрація k_1	Ударні навантаження k_2	Сумарна дія $k_{\Sigma} = k_1 k_2$
Лабораторні	1,0	1,0	1,0
Стаціонарні (польові)	1,04	1,03	1,07
Корабельні	1,3	1,05	1,37
Автомобільні	1,35	1,08	1,46
Залізничні	1,4	1,1	1,54
Авіаційні	1,46	1,13	1,65

Табл. 3.3

Вологість, %	Температура, °C	k_3
60-70	20-40	1,0
90-98	20-25	2,0
90-98	30-40	2,5

Табл. 3.4

Тиск, кПа	k_4
0,1-1,3	1,45
1,3-2,4	1,4
2,4-4,4	1,36
4,4-12	1,35
12-24	1,3
24-32	1,25
32-42	1,2
42-50	1,16
50-65	1,14
65-80	1,1
80-100	1,0

Коефіцієнт електричного навантаження визначається за даними табл. 3.5 в залежності від типу елемента.

Табл. 3.5

Елементи схеми	Рекомендовані значення в режимі	
	імпульсному	статичному
Резистори	0,2	0,1
Конденсатори	0,2	0,1
Операційні підсилювачі	0,5	0,2
Цифро-аналогові перетворювачі	0,3	0,3
Регістри	0,3	0,3
Оперативні запам'ятовувальні пристрої	0,6	0,6
Аналогові комутатори	0,2	0,2
Резонатори	0,15	0,15
Мікроконтролери	0,6	0,6

Табл.3.6

Середні значення інтенсивності відмов елементів РЕА

Групи ІМС	Середньо групові значення інтенсивності відказів $\lambda, 1 \cdot 10^{-6} [1/ч]$
1. Інтегральні мікросхеми	
Мікросхеми інтегральні гібридні	0,42
Мікросхеми інтегральні напівпровідникові цифрові	0,21
Мікросхеми інтегральні напівпровідникові аналогові	0,22
2. Напівпровідникові прилади	
Діоди:	
випрямні	0,85
універсальні	0,1
імпульсні	0,043
Діодні зборки	0,045
Стабілітрони	0,07
Транзистори біполярні	0,29
Транзисторні зборки	0,28
Транзистори польові	0,3
Оптопари:	
діодні	0,14
транзисторні	0,29
резисторні	0,8
Діоди випромінюючі інфрачервоного діапазону	0,19
Вид елементів	$\lambda \cdot 10^{-6} [1/ч]$
3. Резистори	
Резистори постійні не дровові	
металодіелектричні	0,22
вуглеродні	0,015
Резистори постійні дровові та метало фольгові	0,01
Резистори змінні не дровові	
плівкові	0,01
композиційні плівкові	0,007
композиційні об'ємні	0,024
Резистори змінні дровові	0,02
Терморезистори	0,0013
Набори резисторів	0,02
Резисторні мікросхеми	0,01
4. Конденсатори	
Конденсатори постійної ємності:	
керамічні	0,03
склокерамічні	0,02
Склокерамічні з необмеженим діелектриком	0,02
Слюдяні	0,01
Паперові та метало паперові	0,01
Оксидно-електролітичні	0,3
Оксидні-напівпровідникові	0,06
З органічним синтетичним діелектриком	0,02

Вид елементів	$\lambda \cdot 10^{-6}$ [1/ч]
3. Резистори	
Резистори постійні не дровові металодіелектричні	0,22
вуглеродні	0,015
Резистори постійні дровові та метало фольгові	0,01
Резистори змінні не дровові плівкові	0,01
композиційні плівкові	0,007
композиційні об'ємні	0,024
Резистори змінні дровові	0,02
Терморезистори	0,0013
Набори резисторів	0,02
Резисторні мікросхеми	0,01
4. Конденсатори	
Конденсатори постійної ємності: керамічні	0,03
склокерамічні	0,02
Склокерамічні з необмеженим діелектриком	0,02
Слюдяні	0,01
Паперові та метало паперові	0,01
Оксидно-електролітичні	0,3
Оксидні-напівпровідникові	0,06
З органічним синтетичним діелектриком	0,02
Конденсатори підстроювальні з твердим діелектриком	0,015
Склокерамічні з необмеженим діелектриком	0,02
Слюдяні	0,01
Паперові та метало паперові	0,01
Оксидно-електролітичні	0,3
Оксидні-напівпровідникові	0,06
З органічним синтетичним діелектриком	0,02
Конденсатори підстроювальні з твердим діелектриком	0,015
5. Елементи комутації	
Реле електромагнітні мало об'ємні (на 1 контактну пару)	0,8
Реле електромагнітні нормальні (на 1 контактну пару)	0,4
Магнітокеруємі контакти	0,00074
Рознімачі циліндричні нормальних об'ємів	0,0065
малогабаритні для друкованого монтажу	0,0016
Рознімачі прямокутні нормальних об'ємів для друкованого монтажу	0,0027
малогабаритні для друкованого монтажу	0,0014
Перемикачі галетні	0,06
Тумблери	0,1
Кнопки	0,16
Мікроперемикачі	0,045
Перемикачі на базі герконів	0,13
Запобіжники	0,2

6. Трансформатори та дроселі	
Трансформатор живлення	1,0
Трансформатор імпульсний	1,0
Трансформатор узгодження	0,2
Дроселі	0,033
Котушки індуктивності	0,01
7. Індикатори	
Індикатори напівпровідникові:	
одиничні	0,13
цифрові	0,07
буквено-цифрові	0,12
шкальні	0,36
графічні	0,53
мнемонічні	0,10
Індикатори газорозрядні:	
одиничні	2,50
шкальні	10,00
графічні	2,20
Індикатори люмінесцентні:	
цифрові одно розрядні	0,92
цифрові багато розрядні	10,00
Буквено-цифрові	0,34
шкальні	0,76
мнемонічні	1,20
Індикатори LCD	0,88
одиничні	2,50
шкальні	10,00
графічні	2,20
Індикатори люмінесцентні:	
цифрові одно розрядні	0,92
цифрові багато розрядні	10,00
Буквено-цифрові	0,34
шкальні	0,76
мнемонічні	1,20
Індикатори LCD	0,88
8. Інші елементи	
Друкований монтаж	0,0004
Навісний монтаж	0,00260
Ручна пайка з друкованим монтажем	0,0006 – 0,15
Ручна пайка з об'ємним монтажем	0,0002 – 0,04
Пайка хвилею припою	0,0001 – 0,03
Клемне з'єднання	0,0003 – 0,05
Точечна контактна зварка	0,002 – 0,03
Обжимка	0,00005 – 0,0015
Безпаяне з'єднання закруткою	0,00006 – 0,002
Закрутка з пайкою	0,0003 – 0,05

У табл. 3.7 наведені інтенсивності відмов елементів проектуємого блоку для нормальних умов експлуатації приладу (лабораторні, температура 20 °С, вологість 60%, атмосферний тиск 100кПа).

Табл. 3.7

Елементи схеми	$\lambda_{0i} \cdot 10^6, \text{ год}^{-1}$	$k_1 k_2 k_3 k_4$	$a(T, k_n)$	$\lambda_{0i} \cdot 10^6, \text{ год}^{-1}$
Резистори С2-11-0,125 Вт	0,01	1,0	0,8	0,008
Конденсатори К10-17-25 В	0,01	1,0	0,8	0,008
Конденсатори К52-1-25 В	0,1	1,0	0,8	0,08
Резонатор кварцовий	0,01	1,0	0,5	0,005
Операційні підсилювачі	0,2	1,0	1,2	0,24
Цифро-аналоговий перетворювач	0,35	1,0	0,9	0,32
Регістри	0,12	1,0	1,3	0,16
Аналоговий комутатор	0,17	1,0	1,2	0,2
Оперативний запам'ятовувальний пристрій	0,23	1,0	1,6	0,37
Мікроконтролер	0,2	1,0	1,2	0,24

Загальна інтенсивність відмов приладу $\Lambda = \sum \lambda_i$

Згідно специфікації (враховуючи кількість однакових елементів у схемі):

$$\Lambda = (12 \cdot 0,008 + 6 \cdot 0,008 + 0,08 + 0,005 + 4 \cdot 0,24 + 0,32 + 0,16 + 0,2 + 0,37 + 0,24) \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1} = 2,48 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

Середній час напрацювання на відмову $T = \frac{1}{\Lambda}$.

Для розробленого блоку $\Lambda = 2,48 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$, то

$$T = 1 / 2,48 \cdot 10^{-6} \text{ год} = 4,03 \cdot 10^5 \text{ год} = 403000 \text{ год}.$$

Розрахуємо імовірність безвідмовної роботи блоку на протязі заданого напрацювання. Для незарезервованих систем ця величина розраховується за формулою :

$$P(T_p) = \exp(-\sum_i \lambda_i T_p) = \exp(-\Lambda T_p). \quad (5.4)$$

$$P(T_p) = \exp(-2,48 \cdot 10^{-6} \cdot 514) = 0,997.$$

3.7. Види з'єднань елементів в теорії надійності та методи їх розрахунку. Системи з послідовним з'єднанням елементів

Структурна надійність – результуюча надійність системи при заданій структурі і відомих значеннях надійності всіх вхідних в неї блоків.

Розрахунки показників безвідмовності ТО зазвичай проводяться в припущенні, що вся система, так і будь-який її елемент можуть перебувати лише в одному з двох можливих станів – працездатному і непрацездатному, а відмови елементів незалежні один від одного. Стан системи (працездатний або непрацездатний) визначається станом елементів та їх поєднанням. Тому теоретично можливо розрахунок безвідмовності будь ТО звести до перебору всіх можливих комбінацій станів елементів, визначення ймовірності кожного з них і складання ймовірностей працездатних станів системи. Це метод прямого перебору. Він практично універсальний і може використовуватися при розрахунку будь-яких ТО. Однак при великій кількості елементів системи n такий шлях стає нереальним з-за великого обсягу обчислень (наприклад, при $n=10$ число можливих станів системи становить $N = 2^n = 1024$, при $n=20$ перевищує 10^6). Тому на практиці використовують більш ефективні і економічні методи розрахунку, не пов'язані з великим обсягом обчислень. Можливість застосування таких методів пов'язана зі структурою ТО.

При розрахунку структурної надійності, структура системи замінюється логічною схемою.

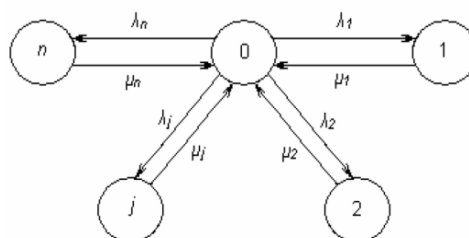


Рис. 3.3

Розрізняють системи з такими типами з'єднання

Системи з послідовним з'єднанням елементів

Системою з послідовним з'єднанням елементів називається система, в якій відмова будь-якого елементу призводить до відмови всієї системи. Таке з'єднання елементів в техніці зустрічається найбільш часто, тому його називають основним з'єднанням.

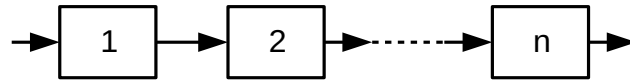


Рис. 3.4. Послідовне з'єднання елементів на логічній схемі надійності

В системі з послідовним з'єднанням для безвідмовної роботи протягом деякого напрацювання t необхідно і достатньо, щоб кожен з n елементів працював безвідмовно протягом цього напрацювання. Вважаючи відмови елементів незалежними, імовірність одночасної безвідмовної роботи n елементів визначається за теоремою множення імовірностей: імовірність спільної появи незалежних подій дорівнює добутку імовірностей цих подій:

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)).$$

Відповідно, імовірність відмови такого ТО

$$Q = 1 - P = 1 - \prod_{i=1}^n p_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i).$$

Середній час безвідмовної роботи

$$T = 1 / \sum_{i=1}^n \lambda.$$

Якщо система складається з рівнонадійних елементів ($p_i = p$), то

Рівними за надійністю називають елементи інтенсивності відмов або імовірності відмов у яких однакові.

$$P = p_i^n, \quad Q = 1 - (1 - q)^n.$$

З формул видно, що навіть при високій надійності елементів надійність системи при послідовному з'єднанні зменшується зі збільшенням числа елементів. Крім того, оскільки всі співмножники в правій частині першого виразу не перевищують одиниці, імовірність безвідмовної роботи ТО при послідовному з'єднанні не може бути вищою імовірності безвідмовної роботи самого ненадійного з її елементів (принцип "гірше гіршого"). Із малонадійних елементів не можна створити високонадійної системи з послідовним з'єднанням.

Якщо всі елементи системи працюють в періоді нормальної експлуатації і має місце найпростіший потік відмов, напрацювання елементів і системи підкоряються експоненціальному розподілу і можна записати

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right] = \exp(-\Lambda t),$$

де

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const}$$

є сумарна інтенсивність відмов системи. Таким чином, інтенсивність відмов системи при послідовному з'єднанні елементів і найпростішому потоці відмов дорівнює сумі інтенсивностей відмов елементів. Для системи з n рівнонадійних елементів

$$\Lambda = n\lambda, \quad T_0 = \frac{T_{0i}}{n},$$

тобто інтенсивність відмов в n разів більше, а середнє напрацювання в n разів менше, ніж у окремого елемента.

3.8. Системи з паралельним з'єднанням елементів

Системою з паралельним з'єднанням елементів називається система, відмова якої відбувається тільки у випадку відмови всіх її елементів. Такі схеми надійності характерні для технічних систем, в яких елементи дублюються або резервуються, тобто паралельне з'єднання використовують як метод підвищення надійності. Однак такі системи зустрічаються і самотійно.

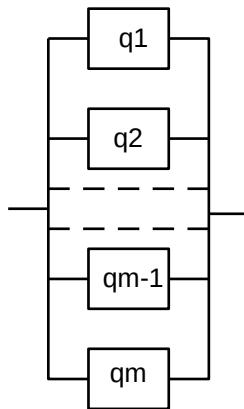


Рис. 3.5. Паралельне з'єднання елементів

Для відмови системи з паралельним з'єднанням елементів протягом напрацювання t необхідно і достатньо, щоб всі її елементи відмовили протягом цього напрацювання. Так що відмова системи полягає в спільній відмові всіх елементів, імовірність чого (при допущенні незалежності відмов) може бути знайдена за теоремою множення імовірностей як добуток імовірностей відмови елементів:

$$Q = q_1 q_2 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i).$$

Відповідно, імовірність безвідмовної роботи

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i).$$

Для систем з рівнонадійними елементами

$$Q = q^n = (1-p)^n, \quad P = 1 - (1-p)^n,$$

тобто надійність системи з паралельним з'єднанням підвищується при збільшенні числа елементів.

Оскільки $q_i < 1$ добуток у правій частині завжди менше будь-якого із співмножників, тобто імовірність відмови системи не може бути вище імовірності самого надійного її елемента ("краще кращого") і навіть з порівняно ненадійних елементів цілком можлива побудова надійної системи.

При експоненціальному розподілі напрацювання

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n,$$

звідки визначається середнє напрацювання до відмови системи

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i},$$

де $T_{0i} = 1 / \lambda_i$ – середнє напрацювання елемента. При великих значеннях n справедлива наближена формула

$$T_0 = T_{0i} (\ln n + \frac{1}{2n} + 0.577).$$

Таким чином, середнє напрацювання системи з паралельним з'єднанням більше середнього напрацювання її елементів.

3.9. Системи з паралельно-послідовним з'єднанням

Часто зустрічаються складні схеми, в яких поєднано паралельне та послідовне з'єднання. Більш поширені два типи таких систем (рис. 3.6):

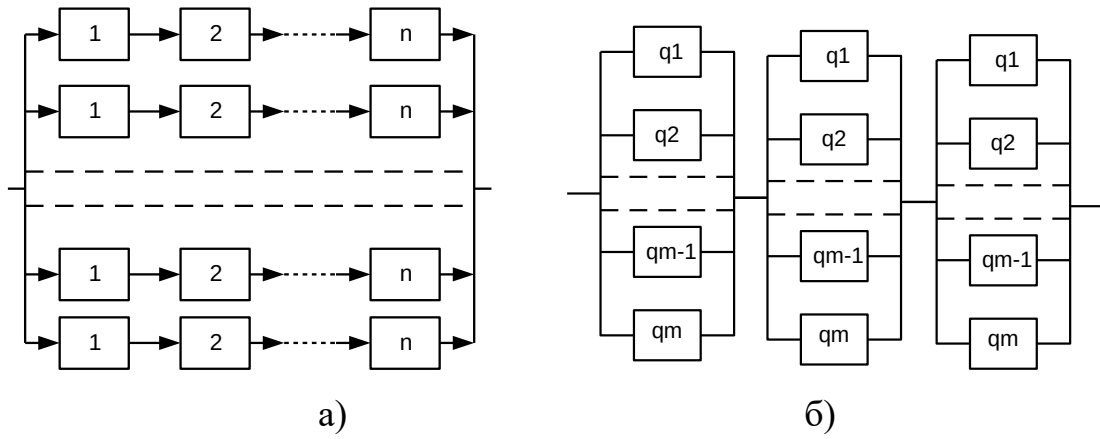


Рис. 3.6. Паралельно-послідовне та послідовно-паралельне з'єднання

У першому випадку є m паралельних ланок з n однаковими по надійності частинами. Надійність ланки $p'_{\Sigma} = p^n$, $q' = 1 - p^n$. Надійність всієї системи:

$$p_{\Sigma} = 1 - (1 - p^n)^m = 1 - (q')^m.$$

Збільшуючи число паралельних ланок отримаємо, що $m \rightarrow \infty$, $p \rightarrow 1$, тобто паралельне з'єднання ланок з однакових частин збільшує надійність схеми. При $n \rightarrow \infty$, $p \rightarrow 0$; $n \rightarrow \infty$, $m \rightarrow \infty$, $p \rightarrow 0$.

У другому випадку пов'язано n груп з m однакових частин. Надійність групи:

$$p'_{\Sigma} = 1 - (1 - p)^m \quad p_{\Sigma} = \left(p'_{\Sigma} \right)^n = \left[1 - (1 - p)^m \right]^n.$$

$$m \rightarrow \infty, p \rightarrow 1, n \rightarrow \infty, p \rightarrow 0; n \rightarrow \infty, m \rightarrow \infty, p \rightarrow 1.$$

У загальному випадку, коли кількість елементів з'єднаних не однакова, то надійність буде різною і звідси:

$$q_i = \prod_{j=1}^m q_j = \prod_{j=1}^m (1 - p_j)$$

$$p_i = 1 - q_i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j)$$

$$p_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n p_i = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j) \right]$$

3.10. Системи типу " m з n "

Систему типу " m з n " можна розглядати як варіант системи з паралельним з'єднанням елементів, відмова якої відбудеться, якщо з n елементів, з'єднаних паралельно, працездатними виявляться менш m елементів ($m < n$). Особливістю даної системи є те, що всі елементи що входять до її складу рівні за надійністю. Число m елементів виділено штрих пунктиром, n – загальна кількість елементів (рис. 3.7).

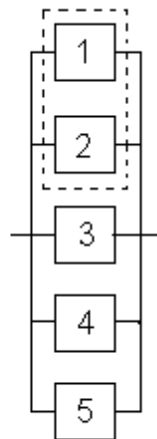


Рис.3.7. Система типу "2 з 5"

На рис. 3.7 представлено систему "2 з 5", яка працездатна, якщо з п'яти її елементів працюють будь-які два, три, чотири або п'ять (на схемі пунктиром виділені функціонально необхідні два елементи, причому виділення елементів 1 і 2 зроблено умовно, оскільки всі п'ять елементів рівнозначні). Системи типу

" m з n " найбільш часто зустрічаються в електричних і телекомунікаційних системах, технологічних лініях, а також при структурному резервування.

Для розрахунку надійності систем типу " m з n " при порівняно невеликій кількості елементів можна скористатися методом прямого перебору. Він полягає у визначенні працездатності кожного з можливих станів системи, які визначаються різними поєднаннями працездатних і непрацездатних станів елементів.

Табл.3.8.

Таблиця станів системи "2 з 5"

N стану	Стан елементів					Стан системи	Імовірність стану системи
	1	2	3	4	5		
1	+	+	+	+	+	+	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p^4 q^1 = p^4(1-p)$
3	+	+	+	-	+	+	
4	+	+	-	+	+	+	
5	+	-	+	+	+	+	
6	-	+	+	+	+	+	
7	+	+	+	-	-	+	$p^3 q^2 = p^3(1-p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	
9	+	-	+	+	-	+	
10	-	+	+	+	-	+	
11	+	+	-	-	+	+	
12	+	-	+	-	+	+	
13	-	+	+	-	+	+	
14	+	-	-	+	+	+	
15	-	+	-	+	+	+	
16	-	-	+	+	+	+	
17	+	+	-	-	-	+	$p^2 q^3 = p^2(1-p)^3$
18	+	-	+	-	-	+	
19	-	+	+	-	-	+	
20	+	-	-	-	+	+	
21	-	+	-	-	+	+	
22	-	-	-	+	+	+	
23	+	-	-	+	-	+	
24	-	+	-	+	-	+	
25	-	-	+	-	+	+	
26	-	-	+	+	-	+	
27	+	-	-	-	-	-	$p^1 q^4 = p^1(1-p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	
29	-	-	+	-	-	-	
30	-	-	-	+	-	-	
31	-	-	-	-	+	-	

32	-	-	-	-	-	-	$q^5 = (1-p)^5$
----	---	---	---	---	---	---	-----------------

Всі стани системи “2 з 5” занесені в табл. 3.8. (в таблиці працездатні стани елементів і системи відзначені знаком “+”, непрацездатні – знаком “-”).

Для даної системи працездатність визначається лише кількістю працездатних елементів. По теоремі множення ймовірностей імовірність будь-якого стану визначається як добуток ймовірностей станів, у яких перебувають елементи. Наприклад, у рядку 9 описано стан системи, в якій відмовили елементи 2 і 5, а інші працездатні. При цьому умова “2 з 5” виконується, так що система в цілому працездатна.

Імовірність такого стану

$$P_9 = p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 = p^3 q^2,$$

(передбачається, що всі елементи рівнонадійні). З урахуванням всіх можливих станів імовірність безвідмовної роботи системи може бути знайдена за теоремою додавання ймовірностей всіх працездатних станів. Оскільки в табл. 3.8 кількість непрацездатних станів менше, ніж працездатних (відповідно 6 і 26), простіше обчислити імовірність відмови системи. Для цього додамо імовірності непрацездатних станів (де не виконується умова “2 з 5”)

$$\begin{aligned} Q &= P_{32} + P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31} = q^5 + 5pq^4 = \\ &= (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5. \end{aligned}$$

Тоді імовірність безвідмовної роботи системи

$$P = 1 - q = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5.$$

Розрахунок надійності системи “ m з n ” може проводитися комбінаторним методом, в основі якого лежить формула біноміального розподілу.

Біноміальному розподілу підпорядковується дискретна випадкова величина m – число появ деякої події в серії з n дослідів, якщо в окремому досвіді імовірність появи події дорівнює p . При цьому імовірність появи події рівно m раз визначається

$$P_n(m) = C_n^m p^m (1 - p)^{n-m},$$

де C_n^m – біноміальний коефіцієнт, званий "числом сполучень по m з n " (тобто скількома різними способами можна реалізувати ситуацію " m з n "):

$$C_n^m = \frac{n!}{m! (n - m)!}$$

Значення біноміальних коефіцієнтів наведені в табл. 3.9.

Оскільки для відмови системи " m з n " досить, щоб кількість справних елементів було менше m , імовірність відмови може бути знайдена по теоремі додавання ймовірностей для $m = 0, 1, \dots, (m-1)$, а імовірність безвідмовної роботи для $m = m, m + 1, \dots, n$:

$$\sum_{m=0}^n P_m = \sum_{m=0}^n C_n^m p^m (1 - p)^{n-m}$$

Очевидно, що $Q + P = 1$, тому в розрахунках слід вибирати ту з формул, яка в даному конкретному випадку містить меншу кількість доданків.

Для системи "2 з 5" отримаємо:

$$P = C_5^2 p^2 (1 - p)^3 + C_5^3 p^3 (1 - p)^2 + C_5^4 p^4 (1 - p) + C_5^5 p^5 = 10 p^2 (1 - p)^3 + 10 p^3 (1 - p)^2 + 5 p^4 (1 - p) + p^5 = 10 p^2 - 20 p^3 + 15 p^4 - 4 p^5.$$

Імовірність відмови тієї ж системи:

$$Q = C_5^0(1-p)^5 + C_5^1p(1-p)^4 = (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = \\ = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5,$$

що, як видно, дає той же результат для імовірності безвідмовної роботи.

У табл. 3.10 наведені формули для розрахунку імовірності безвідмовної роботи систем типу " m з n " при $m \leq n \leq 5$. Очевидно, при $m = 1$ система перетворюється в звичайну систему з паралельним з'єднанням елементів, а при $m = n$ – з послідовним з'єднанням.

Табл.3.9

Біноміальні коефіцієнти $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$

n	m										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1										
1	1	1									
2	1	2	1								
3	1	3	3	1							
4	1	4	6	4	1						
5	1	5	10	10	5	1					
6	1	6	15	20	15	6	1				
7	1	7	21	35	35	21	7	1			
8	1	8	28	56	70	56	28	8	1		
9	1	9	36	84	126	126	84	36	9	1	
10	1	10	45	120	210	252	210	120	45	10	1
11	1	11	55	165	330	462	462	330	165	55	11
12	1	12	66	220	495	792	924	792	495	220	66
13	1	13	78	286	715	1287	1716	1716	1287	715	286
14	1	14	91	364	1001	2002	3003	3432	3003	2002	1001
15	1	15	105	455	1365	3003	5005	6435	6435	5005	3003
16	1	16	120	560	1820	4368	8008	11440	12870	11440	8008
17	1	17	136	680	2380	6188	12376	19448	24310	24310	19448
18	1	18	153	816	3060	8568	18564	31824	43758	48620	43758
19	1	19	171	969	3876	11628	27132	50388	75582	92378	92378
20	1	20	190	1140	4845	15504	38760	77520	125970	167960	184756

Табл.3.10

m	Загальне число елементів , n				
	1	2	3	4	5
1	p	$2p - p^2$	$3p - 3p^2 + p^3$	$4p - 6p^2 + 4p^3 - p^4$	$5p - 10p^2 + 10p^3 - 5p^4 + p^5$
2	-	p^2	$3p^2 - 2p^3$	$6p^2 - 8p^3 + 3p^4$	$10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5$
3	-	-	p^3	$4p^3 - 3p^4$	$10p^3 - 15p^4 + 6p^5$
4	-	-	-	p^4	$5p^4 - 4p^5$
5	-	-	-	-	p^5

3.11. Мостові схеми

Мостова структура (рис. 3.8, а, б) не зводиться до паралельного або послідовного типу з'єднання елементів, а являє собою паралельне з'єднання послідовних ланцюгів елементів з діагональними елементами, включеними між вузлами різних паралельних гілок (елемент 3 на рис. 3.8, а, елементи 3 і 6 на рис. 3.8, б). Працездатність такої системи визначається не тільки кількістю елементів, що відмовили, але і їх розміщенням на структурній схемі. Наприклад, працездатність ТО, схема якого наведена на рис. 3.8, а, буде втрачена при одночасній відмові елементів 1 і 2, або 4 і 5, або 2, 3 і 4 і т. д.. У той же час відмова елементів 1 і 5, 2 і 4, або 1, 3 і 4, або 2, 3 і 5 до відмови системи не приводить.

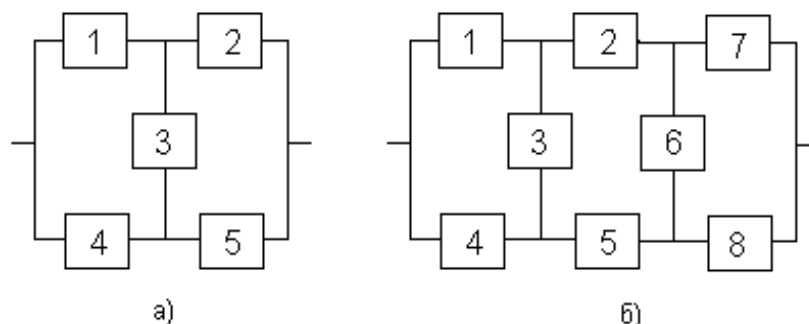


Рис. 3.8. Структура мостової схеми

Для розрахунку надійності мостових систем можна скористатися методом прямого перебору, але при аналізі працездатності кожного стану системи

необхідно враховувати не тільки число елементів, що відмовили, але і їх положення в схемі (табл. 3.11).

Табл.3.11

Таблиця станів мостових схем

N сост .	Стан елементів					Стан системи	Імовірність стану	
	1	2	3	4	5		В загальному випадку	При рівнонадійних елементах
1	+	+	+	+	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	$p^4 q = p^4 (1 - p)$
3	+	+	+	-	+	+	$p_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
4	+	+	-	+	+	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
5	+	-	+	+	+	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
6	-	+	+	+	+	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
7	+	+	+	-	-	+	$p_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	$p^3 q^2 = p^3 (1 - p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
9	+	-	+	+	-	-	$p_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
10	-	+	+	+	-	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	
11	+	+	-	-	+	+	$p_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	
12	+	-	+	-	+	+	$p_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
13	-	+	+	-	+	-	$q_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
14	+	-	-	+	+	+	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
15	-	+	-	+	+	+	$q_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
16	-	-	+	+	+	+	$q_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
17	+	+	-	-	-	+	$p_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	$p^2 q^3 = p^2 (1 - p)^3$
18	+	-	+	-	-	-	$p_1 q_2 p_3 q_4 q_5$	
19	-	+	+	-	-	-	$q_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	
20	+	-	-	-	+	-	$p_1 q_2 q_3 q_4 p_5$	
21	-	+	-	-	+	-	$q_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	
22	-	-	-	+	+	+	$q_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
23	+	-	-	+	-	-	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	

24	-	+	-	+	-	-	$q_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	$p q^4 = p (1-p)^4$
25	-	-	+	-	+	-	$q_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
26	-	-	+	+	-	-	$q_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
27	+	-	-	-	-	-	$p_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	
28	-	+	-	-	-	-	$q_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	
29	-	-	+	-	-	-	$q_1 q_2 p_3 q_4 q_5$	
30	-	-	-	+	-	-	$q_1 q_2 q_3 p_4 q_5$	
31	-	-	-	-	+	-	$q_1 q_2 q_3 q_4 p_5$	$q^5 = (1-p)^5$
32	-	-	-	-	-	-	$q_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	

Імовірність безвідмовної роботи системи визначається як сума ймовірностей всіх працездатних станів:

$$\begin{aligned}
 P = & p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 p_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 + p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 + \\
 & + q_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 q_3 q_4 p_5 + p_1 q_2 p_3 q_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + p_1 q_2 q_3 p_4 q_5.
 \end{aligned}$$

У разі рівних за надійністю елементів

$$P = p^5 + 5p^4 q + 8p^3 q^2 + 2p^2 q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.$$

Метод прямого перебору ефективний тільки при малій кількості елементів n . Наприклад, для схеми на рис. 3.8,б кількість станів становитиме вже 256. Деяке спрощення досягається, якщо в таблицю станів включати тільки поєднання, що відповідають працездатному (або тільки непрацездатному) стану системи в цілому.

Для аналізу надійності ТО, структурні схеми яких не зводяться до паралельного або послідовного типу, можна також скористатися методом логічних схем з застосуванням алгебри логіки (булевої алгебри). Застосування цього методу зводиться до складання для ТО формули алгебри логіки, яка

визначає умову працездатності системи. При цьому для кожного елемента і системи в цілому розглядаються дві протилежні події – відмова і збереження працездатності.

Для складання логічної схеми можна скористатися двома методами – мінімальних шляхів і мінімальних перетинів.

Розглянемо **метод мінімальних шляхів** для розрахунку імовірності безвідмовної роботи на прикладі мостової схеми (рис. 3.9,а).

Мінімальним шляхом називається послідовний набір працездатних елементів системи, який забезпечує її працездатність, а відмова будь-якого з них призводить до її відмови.

Мінімальних шляхів в системі може бути один або декілька. Очевидно, що система з послідовним з'єднанням елементів має тільки один мінімальний шлях, що включає всі елементи. В системі з паралельним з'єднанням число мінімальних шляхів співпадає з числом елементів і кожен шлях включає один з них.

Для мостової системи з п'яти елементів (рис. 3.8,а) мінімальних шляхів чотири: (елементи 1 і 4), (2 і 5), (1, 3 і 5), (2, 3 і 4). Логічна схема такої системи (рис. 3.9) складається таким чином, щоб всі елементи кожного мінімального шляху були з'єднані один з одним послідовно, а всі мінімальні шляхи паралельно.

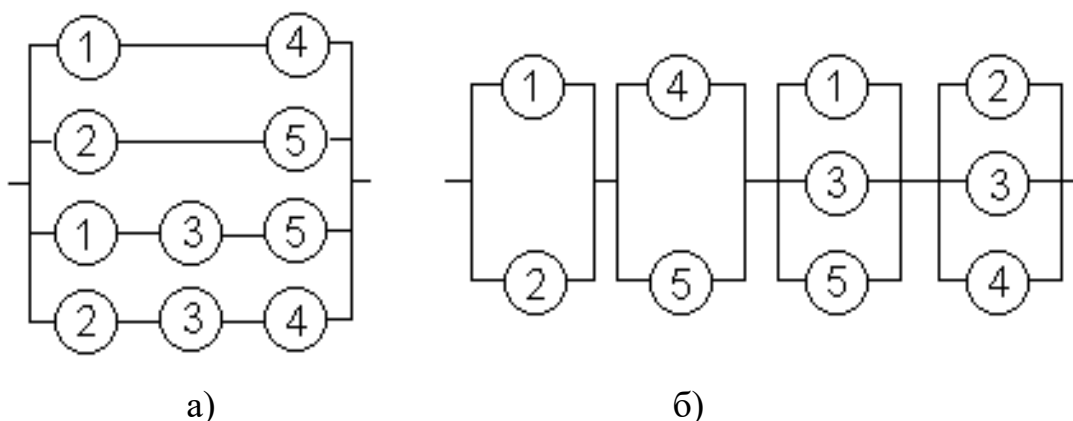


Рис. 3.9. Логічні схеми для розрахунку мостових систем

Потім для логічної схеми складається функція алгебри логіки A за загальними правилами розрахунку ймовірностей безвідмовної роботи, але замість символів ймовірностей безвідмовної роботи елементів і системи P використовуються символи події (збереження працездатності елемента a_i і системи A). Так, "відмова" логічної схеми рис. 3.9 полягає в одночасній відмові всіх чотирьох паралельних гілок, а "безвідмовна робота" кожної гілки – в одночасній безвідмовній роботі її елементів. Послідовне з'єднання елементів логічної схеми відповідає логічному множенню ("І"), паралельне – логічному додаванню ("АБО"). Отже, схема рис. 3.9 відповідає твердженню: система працездатна, якщо працездатні елементи 1 і 4, 2 і 5, або 1,3 і 5, або 2,3 і 4. Функція алгебри логіки запишеться:

$$A = 1 - (1 - a_1 a_4)(1 - a_2 a_5)(1 - a_1 a_3 a_5)(1 - a_2 a_3 a_4).$$

У виразі змінні a розглядаються як булеві, тобто можуть приймати тільки два значення: 0 або 1. Тоді при зведенні в будь-який ступінь k , змінна a зберігає своє значення: $a_i^k = a_i$. На основі цієї властивості функція алгебри логіки може бути перетворена до вигляду

$$A = a_1 a_4 + a_2 a_5 + a_1 a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_5 - 2a_1 a_2 a_4 a_5 - a_2 a_3 a_4 a_5 + 2a_1 a_2 a_3 a_4 a_5.$$

Замінивши у виразі символи подій їх ймовірностями, одержимо рівняння для визначення ймовірності безвідмовної роботи системи

$$P = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_5 - 2p_1 p_2 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2p_1 p_2 p_3 p_4 p_5.$$

Для системи рівнонадійних елементів вираз легко перетворюється у формулу отриману попередній методом

$$P = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 + 2p^2q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.$$

Метод мінімальних шляхів дає точне значення тільки для порівняно простих систем з невеликим числом елементів. Для більш складних систем результат розрахунку є нижньою межею імовірності безвідмовної роботи.

Для розрахунку верхньої межі імовірності безвідмовної роботи системи слугить **метод мінімальних перерізів**.

Мінімальним перерізом називається набір непрацездатних елементів, відмова яких призводить до відмови системи, а відновлення працездатності будь-якого з них – до відновлення працездатності системи. Як і мінімальних шляхів, мінімальних перерізів може бути декілька. Очевидно, система з паралельним з'єднанням елементів має тільки один мінімальний переріз, що включає всі її елементи. В системі з послідовним з'єднанням число мінімальних шляхів збігається з числом елементів, і кожен перетин включає один з них.

У мостовій системі (рис. 3.8, а) мінімальних перерізів чотири (елементи 1 і 2), (4 і 5), (1, 3 і 5), (2, 3 і 4). Логічна схема системи (рис.3.9) складається таким чином, щоб всі елементи кожного мінімального перерізу були з'єднані один з одним паралельно, а всі мінімальні перерізу – послідовно. Аналогічно методу мінімальних шляхів, складається функція алгебри логіки. "Безвідмовна робота" логічної системи рис. 3.8 полягає в "безвідмовній роботі" всіх послідовних ділянок, а "відмова" кожного з них – в одночасній "відмові" всіх паралельних елементів. Як видно, оскільки схема методу мінімальних перерізів формулює умови відмови системи, в ній послідовне з'єднання відповідає логічному "АБО", а паралельне – логічному "І". Схема рис. 3.9 відповідає формулюванню: система вийде з ладу, якщо відмовлять елементи 1 і 2, або 4 і 5, або 1, 3 і 5, або 2, 3 і 4. Функція алгебри логіки запишеться

$$A = [1 - (1 - a_1)(1 - a_2)][1 - (1 - a_4)(1 - a_5)] * \\ * [1 - (1 - a_1)(1 - a_3)(1 - a_5)] * [1 - (1 - a_2)(1 - a_3)(1 - a_4)].$$

Після перетворень з використанням властивостей булевих змінних та після заміни подій їх ймовірностями переходить у вираз

$$P = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 + 2p^2q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.$$

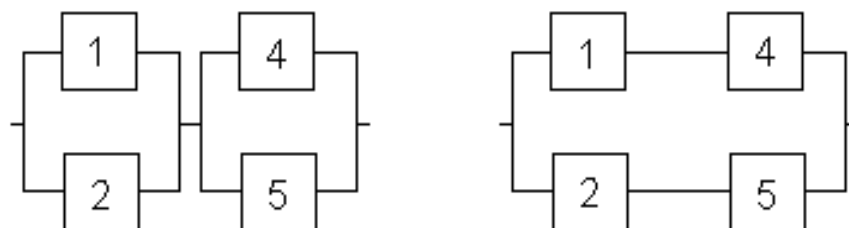
Таким чином, для мостової схеми з п'ятьма елементами верхня і нижня межа імовірності безвідмовної роботи, отримані методами мінімальних перерізів і мінімальних шляхів, співали з точними значеннями, отриманим методом прямого перебору. Для складних систем це може не відбутися, тому методи мінімальних шляхів і мінімальних перерізів слід застосовувати спільно.

Найпростішим методом розрахунку надійності мостової схеми є **метод розкладання відносно особливого елемента**, який базується на відомій в математичній логіці теоремі розкладання функції логіки по аргументу. Згідно теореми, можна записати:

$$P = p_i P(p_i = 1) + q_i P(p_i = 0),$$

де p_i і $q_i = 1 - p_i$ – імовірності безвідмовної роботи і відмови i -го елемента, $P(p_i = 1)$ і $P(p_i = 0)$ – імовірності працездатного стану системи за умови, що i -й елемент абсолютно надійний і абсолютно ненадійним.

Для мостової схеми (рис. 3.8, а) як особливий елемент доцільно вибрати діагональний елемент 3. При його заміні $p_3 = 1$ мостова схема перетворюється в паралельно-послідовне з'єднання (рис. 3.10, а), а при $p_3 = 0$ – в послідовно-паралельне (рис. 3.10, б).



а)

б)

Рис. 3.10. Розрахунок мостової схеми

Для перетворених схем можна записати:

$$P(p_3 = 1) = [1 - (1 - p_3)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)],$$

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5).$$

Тоді на підставі першої формули отримаємо:

$$P = p_3 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)] + \\ + (1 - p_3) [1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)].$$

Легко переконатися, що для рівнонадійних елементів формула перетворюється в вже отриманий попередніми методами вираз.

$$P = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 + 2p^2q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.$$

Цим методом можна скористатися при розкладанні щодо декількох "особливих" елементів. Наприклад, для двох елементів (i, j) запишемо

$$P = p_i p_j P(p_i = 1, p_j = 1) + p_i q_j P(p_i = 1, p_j = 0) + \\ + q_i p_j P(p_i = 0, p_j = 1) + q_i q_j P(p_i = 0, p_j = 0).$$

Імовірність безвідмовної роботи мостової схеми (рис. 3.8, б) при розкладанні відносно діагональних елементів 3 і 6 визначиться:

$$P = p_3 p_6 P(p_3 = 1, p_6 = 1) + p_3 q_6 P(p_3 = 1, p_6 = 0) + \\ + q_3 p_6 P(p_3 = 0, p_6 = 1) + q_3 q_6 P(p_3 = 0, p_6 = 0).$$

3.12. Перетворення схем складних комбінованих систем

Більшість реальних технічних об'єктів, як радіоелектронних так і телекомунікаційних, має складну комбіновану структуру, частину елементів якої утворює послідовне з'єднання, інша частина – паралельне, окремі гілки елементи або гілки структури утворюють мостові схеми або схеми типу "m з n".

Метод прямого перебору для таких систем практично реалізувати не. Більш доцільно в цих випадках попередньо зробити декомпозицію системи, розбивши її на прості підсистеми – групи елементів, методика розрахунку надійності яких відома. Потім ці підсистеми структурної схеми надійності замінюються квазіелементами з імовірністю безвідмовної роботи, рівною обчисленій імовірності безвідмовної роботи цих підсистем. При необхідності таку процедуру можна виконати декілька разів, до тих пір, поки залишилися квазіелементи простої структури, методика розрахунку надійності яких також відома.

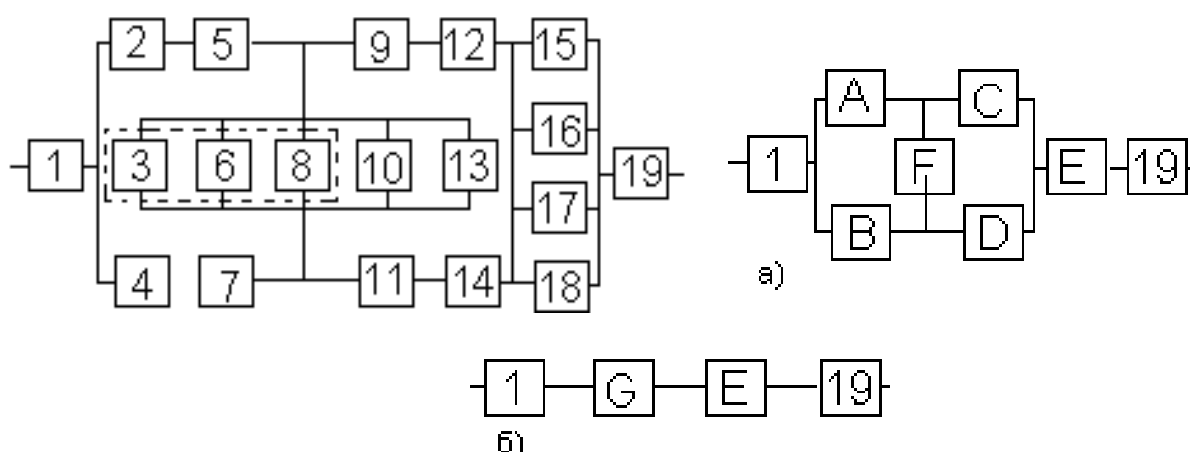


Рис. 3.11. Етапи перетворення складних систем

В якості прикладу розглянемо комбіновану систему, представлену на рис. 3.11. Тут елементи 2 і 5, 4 і 7, 9 і 12, 11 і 14 попарно утворюють один з одним послідовні з'єднання. Замінімо їх відповідно квазіелементами А, В, С, Д, для

яких розрахунків надійності елементарно виконується за формулами п. 3.7. Елементи 15, 16, 17 і 18 утворюють паралельне з'єднання (п. 3.8), а елементи 3, 6, 8, 10 і 13 – систему "3 з 5" (п. 3.10). Відповідні квазіелементи позначимо Е і F. У результаті перетворена схема набуде вигляду на рис. 3.11, а. На ній в свою чергу елементи А, В, С, Д, F утворюють мостову схему (п. 3.11), яку замінюємо квазіелементом 6. Схема, отримана після таких перетворень (рис.3.11, б), утворює послідовне з'єднання елементів 1, G, E, 19, для яких справедливі співвідношення п. 3.7.

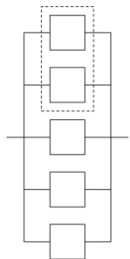
Таким чином, крок за кроком, ми замінили складну схему простою, з відомими надійностями блоків, які пораховано на проміжних етапах.

Питання для самоконтролю

Для визначення показників надійності системи необхідно мати наступну інформацію:

- А) показники надійності всіх елементів системи;
- Б) структурну схему надійності системи;
- В) взаємозв'язок між відмовами системи й відмовами всіх її елементів;
- Г) необхідно володіти всією інформацією а), б), в);
- Д) досить знати а) і б).

Який вид з'єднання наведено на рисунку?



- А) паралельне;
- Б) послідовне;
- В) змішане;
- Г) система типу «m із n»;
- Д) мостова схема.

Для якого виду з'єднання характерна формула

$$T_{0\text{ заг}} = T_0 \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{k+1} \right)$$

- А) паралельне з'єднання;
- Б) послідовне з'єднання;
- В) паралельно-послідовне з'єднання;
- Г) послідовно-паралельне з'єднання;

Яке з'єднання буде мати логічна схема приладу якщо відмова одного елементу приводить до відмови всього приладу?

- А) паралельне ненавантажене;
- Б) паралельне навантажене;
- В) послідовне;
- Г) паралельно-послідовне;
- Д) інша відповідь.

Яке з'єднання буде мати логічна схема приладу якщо умовою безвідмовної роботи є безвідмовна робота хоча б одного елементу, а відмова настає при відмові всіх елементів даного приладу?

- А) паралельне ненавантажене;
- Б) паралельне навантажене;
- В) послідовне;
- Г) паралельно-послідовне;
- Д) інша відповідь.

Для якого виду з'єднання характерна

формула

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_{oi}$$

- А) паралельне з'єднання;
- Б) послідовне з'єднання;
- В) паралельно-послідовне з'єднання;
- Г) послідовно-паралельне з'єднання;
- Д) мостова схема.

Д) мостова схема.

РОЗДІЛ 4. ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ НАДІЙНІСТЬ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

4.1. Вплив різних факторів на показники надійності

У процесі виробництва і експлуатації ТО діє безліч різних факторів, що впливають на її надійність. Всю множину факторів, що впливають на обладнання складних систем, можна розділити на дві групи

1) апаратні (технічні), тобто такі, що залежать від стану апаратури та її елементів;

2) неапаратні, тобто такі, що не залежать від стану апаратури, але впливають на функціональну надійність.

На рис. 4.91. наведено класифікацію цих факторів.

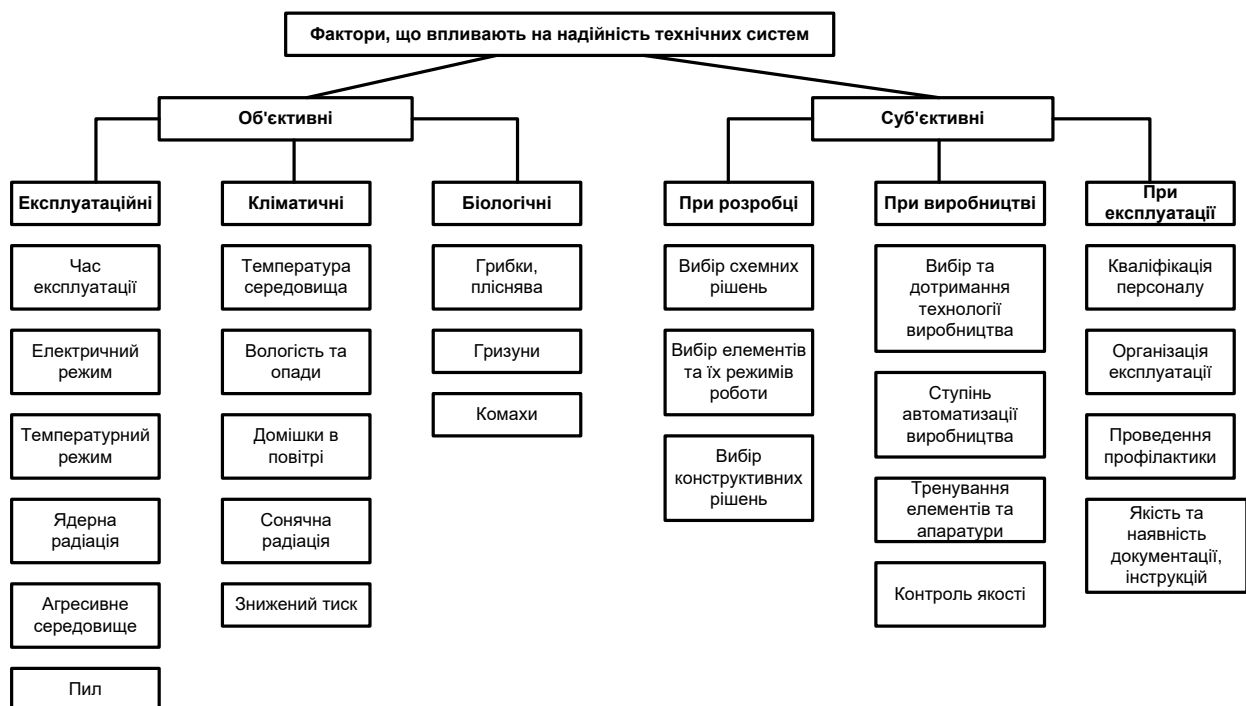


Рис. 4.1. Класифікація факторів впливу на надійність техніки

Всі фактори можна підрозділити на дві групи: об'єктивні чинники і суб'єктивні фактори.

До групи об'єктивних факторів належать експлуатаційні, кліматичні та біологічні.

До групи суб'єктивних факторів належать помилки людей під час розробки, виробництва і експлуатації. До факторів, що визначають надійність ТО на етапах розробки і виробництва, відносяться: вибір схемних рішень, вибір елементів і режим їх роботи, вибір конструктивних рішень, вибір і дотримання технології виробництва, автоматизація виробництва, тренування елементів і апаратури, контроль якості тощо

30% падіння надійності припадає на такі фактори як : час експлуатації, електричні режими, температура середовища, вологість та атмосферні опади, знижений тиск, сонячні та інші види радіації і різного роду домішки в повітрі, механічні навантаження (перевантаження, удари і вібрації), біологічні чинники (грибки, цвіль, комахи і гризуни), діяльність обслуговуючого персоналу (кваліфікація, проведення профілактичних заходів, організація експлуатації, наявність інструкцій з експлуатації даного типу апаратури) і т. п.

Час експлуатації. Час експлуатації є одним з основних факторів, що визначають надійність апаратури на всіх етапах. Технологічні і конструктивні недоліки найчастіше виявляються в перший період експлуатації, коли інтенсивність відмов у багато разів більше, ніж в нормальний період експлуатації; так, наприклад, для електронних ламп вона в 2-5 разів вища. Вихід з ладу конденсаторів в більшості випадків відбувається за пробою діелектрика, в результаті чого до 70% усіх, що вийшли з ладу конденсаторів припадає на цей період експлуатації. Таким чином, у період припрацювання виявляються багато явних та прихованих дефектів апаратури в цілому та її елементів. У цей же період здійснюється вихідний контроль РЕА на виробництві.

Найбільш важливу апаратуру прийнято піддавати попередньому тренуванню протягом певного часу з тим, щоб ще до експлуатації у споживача вона виробила час припрацювання і ненадійні елементи і вузли були своєчасно усунені.

На третьому етапі роботи настає після кілька сотень або тисяч годин зростання інтенсивності відмов, незворотних змін параметрів і характеристик елементів. Причини старіння: складні процеси у діелектриках і провідниках, окислення поверхні провідників, порушення механічної та електричної міцності матеріалів, порушення герметизації, підвищення водопроникності та ін.

До конструктивних факторів належать:

- вибір структурної та функціональної схеми, способів резервування та контролю;
- вибір комплектуючих елементів та матеріалів, а також робочих умов, в яких повинні працювати комплектуючі елементи;
- призначення вимог до допусків на технічні характеристики елементів;
- розробка експлуатаційної документації та ін.

До виробничих факторів належать фактори, що виникають в процесі підготовки виробництва, виготовлення та виробничого контролю виробів:

- вхідний контроль якості матеріалів та елементів, що отримані від підприємств постачальників;
- організація технологічного процесу виготовлення обладнання;
- контроль якості продукції на всіх етапах технологічного процесу;
- кваліфікація виробників;
- забезпечення якості та контроль монтажу та налагодження обладнання систем;
- умови роботи на виробництві та інше.

При проектуванні та конструюванні об'єкту закладається його надійність.

До експлуатаційних факторів відносяться фактори, що з'являються поза сферою проектування та виробництва об'єктів. Вони знижують надійність роботи виробу, коли обслуговування виробу проводиться недостатньо

кваліфіковано, або коли режим його експлуатації не відповідає режиму встановленому при експлуатації. При високій якості обслуговування експлуатаційна надійність може підвищуватись в порівнянні з прогнозованою на етапі проектування та виробництва. За характером дії на об'єкт експлуатації фактори можна поділити на об'єктивні (дії зовнішнього середовища) та суб'єктивні (дія обслуговуючого персоналу). Об'єктивні фактори, що впливають на надійність об'єктів, можна класифікувати на дві групи: зовнішні та внутрішні фактори.

До *зовнішніх факторів* відносяться впливи, що обумовлені зовнішнім середовищем та умовами застосування. Це, по-перше, кліматичні фактори, механічні дії (вібрація, удари), електромагнітні та радіаційні випромінювання, тощо.

Внутрішні фактори пов'язані із зміною параметрів об'єкта та конструкційних матеріалів (старіння, корозія, тощо). Ці зміни відбуваються в часі під впливом зовнішніх факторів.

Під суб'єктивними експлуатаційними факторами, що впливають на надійність, розуміють:

- кваліфікацію обслуговуючого персоналу;
- організацію та якість технічного обслуговування та регламентних робіт;
- методи та способи організації експлуатації об'єктів;
- організація збору та аналізу відомостей про надійність об'єктів.

Неапаратні фактори, які впливають на надійність систем виникають поза сферою проектування та виробництва цифрової техніки.

До них належать:

- якість алгоритмів та програм для виробів з програмним керуванням;
- кваліфікація обслуговуючого персоналу та якість обслуговування апаратури;
- умови роботи апаратури, в тому числі температура, вологість, завади, тощо.

До кліматичних факторів належать:

1. Температура навколишнього середовища. Тепловий вплив навколишнього повітря поширюється на всі складові частини виробу постійно, незалежно від того, працює виріб або знаходиться на зберіганні (не працює). Температура навколишнього середовища залежить від кліматичних зон, в яких відбувається експлуатація технічного об'єкту. На земній кулі розрізняють чотири теплові кліматичні зони: помірну, холодну, гарячу суху і гарячу вологу.

При низьких температурах істотно змінюються властивості багатьох матеріалів: пластмаси втрачають міцність, гумові вироби стають крихкими і розтріскуються, чавун і пружинні сталі стають ламкими, припої, що містять олово, при температурі нижче $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ схильні до відставання від місць спайки. При низьких температурах відбувається загусання мастил і масел, унаслідок чого виникають відмови в гідравлічних системах і заїдання рухомих частин виробу. Високі температури призводять до перегріву приладу і виходу з ладу.

Технічна апаратура потребує особливих режимів роботи:

- температура $(5-40)\text{ }^{\circ}\text{C}$
- вологість $(60-70)\%$
- атмосферний тиск $(750\pm 30)\text{ мм.рт.ст.}$

2. Вологість повітря. Розрізняють підвищену (більше 80 %) і понижену (менше 40 %) відносну вологість повітря, яка залежить від кліматичних зон. Наша країна розташовується в зоні з помірною (ближче до підвищеної) вологістю. Підвищена і знижена вологість повітря негативно впливають на технічні прилади. Знижена вологість у сполученні з високою температурою призводить до висихання деяких матеріалів, в результаті чого відбувається стимуляція процесів старіння деталей, виготовлених з цих матеріалів.

Підвищена вологість є одним з факторів, що найбільш негативно впливають на технічні об'єкти. Вона прискорює корозію металів. Корозія металів – це фізико-хімічний процес, що відбувається між металом і навколишнім середовищем, в результаті якого змінюються властивості, як самого металу, так і властивості середовища, в якому він знаходиться. Продукти корозії чорних металів, яка утворилася у вологому середовищі,

являють собою гідратовані оксиди металів і називаються іржею. Вологість також змінює діелектриків. Зволоження ізоляційних матеріалів в різних блоках і пультах призводить до появи у них відмов і несправностей. Причиною утворення вологи в блоках, пультах, редукторах, коробках і ємностях може бути конденсація парів на холодних поверхнях деталей при значних коливаннях температури. Волога є основною причиною ненадійної роботи трансформаторів, дроселів.

3. Тиск повітря. Знижений тиск, що виникає на висоті 150 м і більше, що викликає погіршення пуску і роботи двигунів внутрішнього згорання. Зниження тиску більшою мірою впливає на працездатність обслуговуючого персоналу.

4. Пісок, пил і інші домішки повітря. На надійність ТО сильний вплив спричиняє забрудненість повітря механічними і хімічними домішками. Пил, проникаючи в мікротріщини ізоляційних матеріалів, значно знижує ізоляційні властивості останніх.

Пил і особливо пісок, що знаходяться в повітрі, руйнують лакофарбові та інші захисні покриття; крім того, потрапляючи в рухливі сполучення механічних вузлів і механізмів, вони викликають прискорене зношення тертьових поверхонь.

Крім пилу в атмосфері можуть бути різні шкідливі хімічні домішки (солі, оксиди, кислоти), що викидаються машинами і промисловими підприємствами. Ці гази збільшують корозію металів, прискорюють процес старіння в пластмасах та інших неметалевих матеріалах. Ступінь впливу цих домішок значно збільшується при наявності підвищеної вологості.

5. Сонячна радіація. В процесі експлуатації ТО на відкритому повітрі всі його зовнішні поверхні піддаються дії прямих сонячних променів, які мають теплове і ультрафіолетове випромінювання.

Теплове випромінювання призводить до підвищення температури всіх складових частин технічних об'єктів. Дія цього фактору температури була розглянуто раніше.

Вплив ультрафіолетового випромінювання призводить до активізації фізико-хімічних процесів старіння багатьох деталей, виготовлених з гуми, пластмаси, а також лакофарбових покриттів і різних експлуатаційних та консерваційних матеріалів. Таким чином, в результаті дії сонячного світла змінюються діелектричні властивості і колір пластичних мас, ряд пластмас стають крихкими, на гумових виробах утворюється тендітна кірка; поверхні таких виробів розтріскуються. Пофарбовані поверхні починають вицвітати і лущитися.

Біологічні фактори викликають особливий вид пошкоджень. Біопошкодження – особливий вид руйнування матеріалів, пов'язаний з впливом біофакторів, таких як мікроорганізми (бактерії, гриби), комахи, гризуни, птахи.

Біофактори можуть проявлятися у вигляді:

- ☐ прямого використання різних матеріалів в якості джерел живлення;
- ☐ безпосереднього впливу продуктів життєдіяльності мікроорганізмів на матеріали;
- ☐ утворення речовин, які каталізують корозійні реакції.

Біопошкодження можуть бути фізичні або хімічні. Фізичні біопошкодження викликаються ссавцями, птахами і т.п., а хімічні — ферментативними реакціями, що лежать в основі вражаючої дії мікроорганізмів.

На активність мікроорганізмів впливають зовнішні фізичні і хімічні фактори.

Фізичні фактори — це вологість середовища, концентрація речовин у водних розчинах, осмотичний тиск, температура навколишнього середовища та радіація.

Хімічні фактори — це склад і реакція середовища, а також її окисно-відновлювальні дії. У навколишньому середовищі можуть бути речовини, які стимулюють чи пригнічують життєдіяльність мікроорганізмів.

До біологічних факторів відносяться:

1. Грибки, цвіль. З усіх біологічних факторів вони є найбільш небезпечними для техніки. Грибки можуть розвиватися на поверхні будь-яких матеріалів, якщо на них є шар органічного пилю.

Найбільш сприятливими умовами розвитку більшості видів плісняви є висока відносна вологість (більш 85 %), температура 20-30 °С і нерухомості повітря. Ці умови відповідають жаркому тропічному клімату. З пониженням температури нижче 7 °С і підвищенням її більш 40 °С, а також при відносній вологості нижче 75 % активність росту і розвитку цвілі значно знижується. Вплив грибків і цвілі на елементи техніки викликає наступні наслідки:

- пошкодження або руйнування натуральних волокнистих матеріалів (текстилю, пряжі, бавовни, вовни, льону, джуту, гуми, багатьох пластичних мас, дерева, шкіри, паперу і картону), оптичних деталей;
- руйнування лакофарбових покриттів, що містять рослинні покрови та тваринні жири;
- прискорення процесу корозії металів;
- порушення контактів, короткі замикання, пробій ізоляції.

Найбільш часто покриваються цвіллю вироби і запасні частини до них, якщо вони зберігаються у сирих, але теплих і не провітрюваних приміщеннях, під брезентом у теплому і вологому місці.

2. Комахи. З комах найбільш небезпечними для елементів є моль і терміти. Моль руйнує пластмаси, дерев'яні деталі, шкіру та інші органічні матеріали. Мокрі продукти розкладання комах, які осідають на струмонесучих частинах електроустаткування, можуть призвести до витоків струму і навіть до коротких замикань.

3. Гризуни. Вони призводять до пошкодження різних кабелів і проводів, це призводить до порушення функціонування електричних ланцюгів і виникненню коротких замикань.

Таким чином вплив зовнішніх та внутрішніх чинників на роботу апаратури необхідно передбачати ще на етапі проектування, вводячи в конструкцію попередні схеми захисту або покращення міцності та правильно

розробляти рекомендації по експлуатації. А працівниками головне – дотримуватися рекомендацій на експлуатацію і не використовувати прилади не за призначенням і в умовах не передбачених для їх роботи.

4.2. Вибір і обґрунтування показників надійності

Боротьба за створення надійних об'єктів повинна починатися ще до початку їх проектування. При складанні технічних завдань на проектування необхідно здійснити ряд заходів по забезпеченню надійності. До числу таких заходів відносяться:

- вибір і обґрунтування принципів технічного обслуговування;
- вибір основного показника надійності;
- призначення норм надійності;
- розподіл норм надійності системи за елементами;
- складання програми забезпечення надійності.

Зміст цих взаємно пов'язаних заходів багато в чому залежить від кінцевої мети, яку прагнуть досягти. Зазвичай цю мету формулюють у вигляді «основного принципу», наприклад: спроектувати виріб відповідно до заданого вартістю терміну служби. При цьому необхідно збалансувати витрати на розробку та проектування виробів з витратами на їх експлуатацію, щоб загальна сума витрат не перевищувала задану при забезпеченні найкращих технічних характеристик виробів,

Принципи технічного обслуговування багато в чому визначають ефективність застосування об'єкта, справляють істотний вплив на його конструкцію.

Існують наступні правила заміни і ремонту окремих блоків або агрегатів технічних об'єктів:

- 1) за календарними термінами незалежно від напрацювання об'єкта;
- 2) з виробленням заздалегідь встановлених міжремонтних ресурсів;
- 3) за технічним станом.

Заміна або ремонт, за календарними строками, коли не враховується, використовувався об'єкт чи ні, зазвичай веде до невиправданих матеріальних втрат. Застосовується вона лише при невмінні або небажанні організувати облік напрацювання об'єктів.

При заміні і ремонті за виробленням ресурсу незначно ускладнюється конструкція об'єкта (можуть встановлюватися вимірювачі напрацювання). Організація технічного обслуговування залишається порівняно простою, але можливості економії сил і засобів використовуються не повністю.

При заміні за технічним станом періодично контролюється визначальний параметр блоку, що характеризує його наближення до відмови або межі допуску. Рішення про заміну, ремонт або більш детальної перевірки блоку (агрегату) приймається за результатами контролю. При цьому значно скорочуються трудовитрати на обслуговування, скорочується витрати дорогих агрегатів і деталей і одночасно підвищується надійність.

Заміна та ремонт агрегатів за технічним станом можливі лише для об'єктів, які спеціально конструюються з урахуванням такої особливості технічного обслуговування. Необхідно заздалегідь знайти визначаючі параметри агрегатів, передбачити вбудовані датчики для їх вимірювання, місця приєднання пересувних засобів контролю тощо Крім того, для повної гарантії безвідмовної роботи об'єкта доцільно передбачити можливі наслідки відмов, з тим, щоб випадкова відмова елемента, агрегату, системи по можливості не призводила до надзвичайної події.

Ще один такий приклад – зонний метод технічного обслуговування, при якому обслуговування об'єктів проводиться за визначеними зонами (відсіках), в кожній з яких розміщуються агрегати однієї-двох систем об'єкта, по можливості подібні за принципами дії. До відповідних зон забезпечується вільний доступ.

Таким чином, технічне завдання на проєктований об'єкт має передбачати застосування передової системи технічного обслуговування і ремонту.

Принципи вибору показників надійності

Показники надійності, які включаються в технічне завдання на проєктований об'єкт, повинні відповідати режиму його використання та конструкції, повинні враховувати наслідки відмов. Крім того, повинна забезпечуватися можливість перевірки цього показника при випробуваннях і експлуатації об'єкта.

При виборі нормованих показників надійності доцільно послідовно аналізувати фактори, що впливають на вибір цих показників.

Спочатку необхідно зібрати відомості про систему в яку входить аналізований об'єкт. Далі необхідно встановити призначення об'єкта. При цьому вагу об'єкту можна розділити на три групи:

- 1) об'єкти, призначені для роботи в системах, ефективність функціонування яких може бути оцінена економічними критеріями;
- 2) об'єкти, функціонування яких пов'язано із забезпеченням безпеки;
- 3) об'єкти, для яких не можна вказати призначення (тип) систем, в яких вони будуть використовуватися.

Для об'єктів першої групи вибір можливих показників надійності визначено режимом використання об'єктів. Тому на першому етапі вибору показників надійності необхідно сформулювати режим використання об'єкта, віднісши його до одного з чотирьох класів, перелічених у розділі 1, тобто неремонтуємі об'єкти; ремонтуємі невідновлювальні об'єкти; ремонтуємі відновлювальні в процесі застосування об'єкти з допустимими перервами в роботі і такі ж об'єкти, але для яких перерви в роботі при відмовах неприпустимі.

На другому етапі для певного класу об'єктів вибирається один з типів показників надійності: інтервальний, миттєвий, числовий. При цьому враховуються економічні міркування: тип показника економічної ефективності і вид залежності цього показника від режиму функціонування об'єкта.

Більшість застосовуваних показників економічної ефективності є функціями від математичних очікувань наведеного корисного ефекту і

приведених витрат на експлуатацію і технічне обслуговування за весь час експлуатації об'єкта.

Таким чином, для відновлюваних об'єктів, у яких допустимі перерви в роботі, основними показниками надійності є числові показники.

Для обґрунтованого вибору номенклатури нормованих показників надійності системи з умов безпеки необхідно виділити основні фактори, що впливають на показники безпеки. Відповідні математичні моделі повинні враховувати випадкові процеси, що протікають в системі після появи відмов.

Для третьої групи об'єктів, для яких не можна вказати тип системи, в якій вони будуть використовуватися, доцільно призначити одну повну характеристику надійності:

для неремонтуємих виробів – функція надійності, густина розподілу напрацювання до відмови або інтенсивність відмов;

для ремонтваних невідновлювальних в процесі застосування виробів (показники надійності обчислюються з напрацювання) – (умовна) імовірність безвідмовної роботи протягом заданого часу або параметр потоку відмов;

для ремонтваних відновлюваних у процесі застосування виробів функція готовності для виробів, перерви в роботі яких припустимі і (умовна) імовірність безвідмовної роботи для виробів, перерви в роботі яких неприпустимі.

На практиці, коли передбачається певний тип закону розподілу часу безвідмовної роботи (напрацювання до відмови) доцільно задавати при показовому розподілі напрацювання (часу) до відмови або між відмовами один з наступних показників: інтенсивність відмов, середнє напрацювання до відмови, ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого інтервалу часу.

4.3 Забезпечення надійності

Надійність виробу закладається в процесі його конструювання і розрахунку й забезпечується в процесі його виготовлення шляхом правильного

вибору технології виробництва, контролю якості вихідних матеріалів, напівфабрикатів і готової продукції, контролю режимів і умов виготовлення.

Надійність зберігається застосуванням правильних способів зберігання виробів і підтримується правильною експлуатацією його, планомірним відходом, профілактичним контролем і ремонтом.

I. При проектуванні виробу повинні бути враховані наступні фактори:

1) якість застосовуваних компонентів і деталей. Вибір комплектуючих компонентів і елементів повинен бути проведений з урахуванням умов роботи виробу (кліматичних і виробничих). Елементи повинні задовольняти вимогам по своїм функціональним властивостям і характеристикам, мати необхідну механічну, електричну і теплову міцності, необхідну точність і надійність в заданих умовах експлуатації. Необхідно прагнути застосовувати ті компоненти і елементи, що входять в схему і конструкцію виробу, які показали у випадках, аналогічних виробів, найкращі результати.

Розробка складних виробів і систем показала, що при використанні уніфікованих компонентів, деталей, вузлів та елементів різко підвищується надійність системи. Це пов'язано з тим, що уніфіковані елементи краще відпрацьовані в схемному та конструктивному відношенні і мають сталу і добре контрольовану технологію виготовлення.

В даний час широко поширено модульно-блочний (агрегатний) принцип побудови схем і конструкцій складних виробів. Складний виріб (система) складається з функціональних елементів, конструктивно оформлених у вигляді типових, стандартних по конструкції модулів або блоків. Стандартизація вхідних і вихідних сигналів, параметрів джерел живлення, габаритних розмірів забезпечує спільну узгоджену роботу їх у виробі;

2) режими роботи компонентів і деталей. Вони повинні відповідати їх фізичним можливостям. Використання компонентів і деталей в режимах, не передбачених для їх застосування, є одним з основних джерел відмов. Не можна допускати режими більш важкі, ніж ті, які зазначаються в офіційній технічній документації на компоненти.

Істотним також є схемне рішення та конструкція виробу в цілому. Наявність перехідних процесів у схемі в окремі моменти її роботи може викликати появу додаткових факторів, що призводять до відмов. Різним варіантам розміщення компонентів, деталей і елементів усередині виробу будуть відповідати різний мікроклімат, різні за величиною впливи вібрації, радіації і т.д.

Таким чином, правильний вибір і застосування компонентів і елементів схем і деталей конструкції, ретельна розробка схеми і її компонування, а також конструкції виробу є важливою умовою в досягненні високої надійності;

3) доступність всіх частин виробу і вхідних в них компонентів, деталей, вузлів, блоків та елементів для огляду, контролю і ремонту або заміни. Це є важливою умовою у підтриманні надійності в період експлуатації. Легкий доступ до приладів, елементів, вузлів, деталей конструкції і компонентам схем для огляду полегшує експлуатацію системи в цілому і забезпечує швидке відновлення її працездатності після появи відмови.

У разі складних виробів і систем знаходять застосування пристрої для автоматичного контролю справності виробу.

4) захисні пристрої. При проектуванні систем для автоматичного регулювання та керування необхідна така побудова схем і конструкцій, щоб відмова в роботі елемента, вузла, виробу не призводила до аварійного стану всього об'єкта. У разі, якщо цього не вдається досягти при побудові основної схеми або конструкції виробу, то необхідно введення спеціальних елементів або пристроїв захисту, що дозволяють запобігти розвитку аварійної ситуації. Одним із шляхів захисту є застосування резервування елементів, приладів і пристроїв, несучих найбільш відповідальні функції.

II. При виробництві технічних систем повинен дотримуватися ряд умов, пов'язаних з підтриманням технологічної дисципліни та дотриманням сталості технологічних процесів при виготовленні виробів.

Належний контроль якості, недопущення порушення сортності матеріалів або недоброякісної заміни комплектуючих виробі; недопущення застосування

комплектуючих виробів, які зазнали зберігання або транспортування в несприятливих умовах; дотримання чистоти обладнання, робочого місця, необхідних санітарних норм роботи; недопущення порушення режимів при складних технологічних процесах; недопущення порушень технології складання і правил електричного монтажу; належний контроль за операціями і при випуску готової продукції; періодична перевірка якості і надійності готової продукції.

При експлуатації виробів основними факторами, що впливають на їх надійність, є умови експлуатації: ретельно продумана система обслуговування.

4.4. Шляхи підвищення надійності

В області конструювання необхідно:

знати фізику роботи (функціонування) виробу;

знати фізику відмов;

використовувати матеріали, комплектуючі елементи високої якості,

мати всі необхідні дані про властивості, характеристики та параметри матеріалів з метою правильного вибору режимів і умов їх застосування;

створювати надійні конструкції виробів з урахуванням умов експлуатації, місця установки на об'єкті, організації обслуговування;

широко використовувати застосування уніфікованих деталей і вузлів високої якості;

використовувати модульно-блочні принципи конструювання;

проводити аналіз і розрахунок функціональних характеристик, розрахунки на надійність по відношенню до основних видів відмов схем і конструкцій всіх основних елементів, приладів і пристроїв, а також всього виробу (системи) в цілому.

В області виробництва необхідний:

суворий вхідний контроль якості матеріалів;

використання сучасних технологічних методів і досконалого технологічного обладнання;

забезпечення чистоти і комфорту у виробничих приміщеннях, суворий контроль технологічних операцій, контроль якості роботи технологічного обладнання;

контроль за якістю виготовлених виробів після кожного основного етапу виготовлення;

повний контроль властивостей, характеристик і параметрів всього виробу після його виготовлення;

застосування сучасних способів упаковки для зберігання і транспортування виробу.

В області експлуатації необхідно:

застосовувати ретельно розроблені і обґрунтовані інструкції та методики щодо експлуатації, а також з профілактики та ремонту виробу;

використовувати тільки кваліфікований обслуговуючий персонал;

організувати на об'єктах збір повних і достовірних статистичних даних про відмови і простої апаратури (виробу);

Дослідження причин відмов і дефектів радіоелектронної апаратури показує, що 40-45% загальної кількості відмов походить від помилок, допущених при проектуванні, 20% від помилок, допущених при виробництві, 30% від експлуатаційних умов і неправильних режимів використання або неправильного обслуговування і близько 5-7% від природного зносу і старіння.

При прогнозуванні показників надійності в процесі проектування звичайно приймається, що показники надійності не збільшуються, не зменшуються в процесі виробництва та експлуатації.

В цьому випадку справедливо наступне: надійність закладається при проектуванні, забезпечується при виробництві та підтримується при експлуатації. Але так буває не завжди. На практиці має місце як погіршення так і покращення показників надійності в процесі виробництва та експлуатації.

4.5. Методи підвищення надійності. Основні поняття та види резервів

Серед методів підвищення надійності, які передбачаються при проектуванні, особливе місце займає використання надмірності, тобто введення додаткових коштів або можливостей понад мінімально необхідних для виконання об'єктом заданих функцій. Сам же метод підвищення надійності об'єкту шляхом введення надмірності прийнято називати **резервуванням**.

Резервування – застосування додаткових засобів і можливостей з метою збереження працездатного стану об'єкта при відмові одного або декількох його елементів.

Принцип резервування подібним розглянутому раніше паралельному з'єднанню елементів і з'єднанню типу " m з n ", де за рахунок надлишковості можливе забезпечення більш високої надійності системи, її елементів.

Класифікація видів резервів

В залежності від типу створюваної в технічному об'єкті надмірності, розрізняють резервування:

структурне, яке передбачає використання надлишкових елементів у структурі об'єкта (введенням додаткових вузлів, блоків та елементів аналогічних наявними);

часове, коли використовується надлишковий час, який може бути закладений на додаткову інформацію або час на проведення додаткових функцій, процесів. Резерви часу можуть бути використані для усунення відмов, технічного обслуговування та інше. Резерв часу в технологічних системах може бути забезпечений різними способами:

а) збільшенням оперативного часу (за рахунок зменшення часу на обслуговування, планованих простоїв, підвищення змінності роботи);

б) створенням запасу продуктивності;

в) наданням системі властивості функціональної інерційності.

Функціональна інерційність – властивість системи, що характеризує її здатність

допускати перерви в роботі без втрати вихідного ефекту. Функціональна інерційність технологічній системі може бути забезпечена застосуванням міждопераційних накопичувачів (буферів).

інформаційне, яке передбачає використання надмірності інформації, що надходить на об'єкт. Реалізується введенням надлишкових кодів і символів при передачі, обробці і відображенні інформації (наприклад, додаткові одиниці інформації, що дозволяють виявляти і усувати помилки в передачі інформації: корегувальні коди, контрольні суми, перевірки на парність тощо).

функціональне, що означає використання здатності елементів і вузлів об'єкта виконувати додаткові функції; резервування з застосуванням функціональних резервів. При цьому способі резервування система будується таким чином, що задана функція може виконуватися різними способами і (або) технічними засобами.

навантажувальне, що передбачає використання здатності об'єкта і його елементів сприймати додаткове навантаження. Суть принципу навантажувального резервування (параметричної надмірності) полягає в розширенні області працездатності об'єкта, при цьому область станів об'єкта віддаляється від меж області працездатності, які визначаються граничними допустимими значеннями вихідних параметрів об'єкта. Це реалізується за рахунок створення запасів міцності, зносостійкості (збільшення допусків на знос, збільшення площі опорних поверхонь, застосування зносостійких матеріалів тощо), жорсткості, вібростійкості, теплостійкості. Навантажувальне резервування дозволяє безперервно підвищувати надійність систем до необхідного рівня за рахунок підвищення працездатності та стійкості до відмов окремих елементів систем

В даному навчальному посібнику розглянемо тільки структурне резервування, оскільки інші види відносяться до специфічних умов експлуатації технічних об'єктів. Варто зауважити, що в деяких випадках в об'єкті може бути використано декілька видів резервування одночасно (структурне і навантажувальне, структурне і часове тощо).

Основними поняттями, які варто розглянути при структурному резервуванні є:

основний елемент – елемент структури об'єкта, мінімально необхідний для виконання об'єктом заданих функцій;

резервний елемент – елемент, призначений для забезпечення працездатності об'єкта в разі відмови основного елемента. Природно, що резервний елемент повинен володіти характеристиками, аналогічними основному елементу. Тому при резервуванні використовують рівні за надійністю елементи.

Резервний елемент завжди включається паралельно до основного. До одного основного елемента може бути підключено безліч резервних. Розумна кількість резервних елементів визначається рівнем надійності, який варто забезпечити, затратами на резервування, масо-габаритними показниками тощо.

Кратність резервування – відношення кількості резервних елементів до кількості основних елементів об'єкта. Розрізняють однократне резервування, кратність якого дорівнює одиниці, і багатократне, кратність якого більше одиниці. Багатократне резервування застосовують у тих випадках, коли необхідно забезпечити досить високі показники надійності.

Резервування одного основного елемента одним резервним (тобто з кратністю 1:1) називається **дублюванням**.

Розглянемо тепер основні види структурного резервування.

За способом включення резерву виділяють:

Пасивне резервування – вид резерву, при якому відмова одного чи кількох об'єктів не впливає на його роботу. Пасивне резервування ще називають постійним резервування, оскільки при виході з ладу основного елемента і переході на резервний не відбувається перебудови в структурі об'єкта (резервні елементи працюють нарівні з основними). При пасивному резервуванні елемент, що відмовив, не відключається, тому на етапі проектування варто врахувати, що може відбутися перерозподіл навантаження на елементи;

За цією ознакою виділяють три види об'єктів з пасивним резервом:

1) *системи з незмінним навантаженням*, у яких при відмові одного або декількох елементів не змінюється навантаження на елементи, що залишилися працездатними;

2) *системи з перерозподілом навантаження*, в яких при відмові хоча б одного елемента змінюється (зазвичай збільшується) навантаження на елементи, що залишилися працездатними;

3) *системи з резервуванням за навантаженням*, у яких при відмові хоча б одного елемента система виходить з ладу, але інтенсивність відмов елементів зменшена за рахунок того, що навантаження, яке повинен був сприймати один елемент, сприймається декількома елементами.

Оскільки резервні елементи функціонують нарівні з основними, тобто несуть навантаження, то такий резерв називають навантаженим.

Основними *перевагами постійного резервування* є: простота включення і миттєва готовність резерву до роботи, оскільки немає необхідності в підключенні резерву замість основного об'єкта (елемента).

Недолік постійного резервування полягає в тому, що з появою відмов у резерві змінюються параметри всієї системи, а це в свою чергу може привести до зміни режимів роботи.

При пасивному резервування найбільший виграш в надійності досягається в системах з незмінним навантаженням, найменший – у системах з резервуванням по навантаженню.

Динамічне резервування, вид резерву, при якому при відмові елемента відбувається перебудова структури схеми. Цей вид резерву ще називають *активним резервуванням*, при якому структура об'єкта така, що при появі відмови вона розбудовується і об'єкт відновлює свою працездатність (відбувається саморемонт об'єкта). При цьому об'єкт активно реагує на появу відмови. У системах з активним резервуванням відбувається порушення роботи системи на час з моменту відмови робочого елемента (ділянки системи) до

моменту включення резервного елемента. Там, де така перерва в роботі неприпустима принципово, метод пасивного резервування є єдино можливим.

Активне резервування свою чергу підрозділяється:

а) **резервування заміщенням**, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного (частинний випадок активного резервування). При резервуванні заміщенням обов'язкова наявність комутуючого пристрою для підключення резервних елементів в момент виходу з ладу основного елемента. Переваги резервування заміщенням полягають в тому, що в більшій мірі може зберігатися ресурс роботи резервних елементів, не змінюються режими роботи об'єкта (елементів) при відмовах, відпадає необхідність у спеціальних регулюваннях при відмовах, з'являється можливість використовувати один резервний елемент для резервування декількох однотипних основних елементів.

До недоліків слід віднести: необхідність комутуючого пристрою для підключення резерву, додаткового часу на перемикання резерву і вихід його на режим (полегшений і ненавантажений резерви). Включення резервних елементів може здійснюватися вручну або автоматично (автоматичне резервування);

б) **ковзке резервування**, при якому декілька основних елементів резервується одним або декількома резервними, кожен з яких може замінити будь-який основний (тобто групи основних і резервних елементів ідентичні). Ковзне резервування дозволяє при відносно невеликих витратах (так як кількість резервних блоків менше кількості основних) і незначних збільшеннях ваги і габаритів приладу підвищити надійність об'єкта.

За станом резерву:

- **навантажене резервування**, при якому резервні елементи (або один з них) постійно працюють в режимі основного елемента, тобто загальне навантаження елемента, блоку чи системи розділене на основні та резервні елементи. Час переходу резервних елементів в робочий стан найменший;

- *полегшене резервування*, при якому резервні елементи (принаймні один з них) працюють в менш навантаженому режимі порівняно з основними. Ресурс роботи резервних елементів витрачається з моменту включення об'єкта в роботу, але інтенсивність витрати до підключення значно нижче ніж у основних елементів. Тому закон розподілу часу їх безвідмовної роботи дещо відрізняється від розподілу часу безвідмовної роботи основних елементів. Час переходу резервних елементів в робочий стан більше, ніж при навантаженому резерві;

- *ненавантажене резервування*, резервування, при якому резервні елементи до початку виконання ними функцій знаходяться в ненавантаженому режимі. Ресурс роботи ненавантаженого резерву починає витрачатися лише з моменту його включення. Закон розподілу часу безвідмовної роботи резервних елементів такий же, як і в аналогічних типів елементів у режимі зберігання. Час переходу резервних елементів в робочий стан найбільший.

За схемою включення резерву виділяють:

Загальне резервування, що передбачає резервування об'єкта в цілому. В даному випадку резервним елементом буде ідентичний об'єкт РЕА;

Загальне резервування має деякі модифікації. *Автономне резервування* є одним з варіантів загального. Воно полягає в застосуванні декількох незалежних об'єктів, що виконують одну і ту ж задачу. Кожен з цих об'єктів має свій вхід та вихід і зазвичай незалежні джерела живлення. Прикладом системи з автономним резервуванням може служити сукупність пристроїв телевимірювання, які виконують одну і ту ж задачу, але кожен пристрій має свої вхідні датчики, записуючі (вихідні) блоки і джерела живлення. Автономне резервування зазвичай застосовується при проведенні експериментів в системах відповідального призначення.

Автономне резервування завжди є пасивним видом резервування. Різниця між загальним і автономним резервуванням наведена на рис. 4.2.



а) Загальне резервування функціональної ланки системи

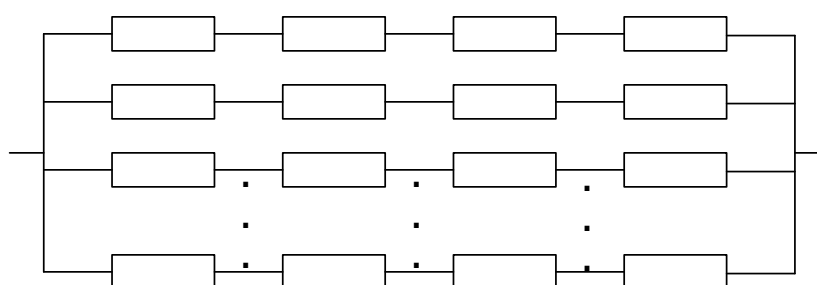


б) Автономне резервування функціональної ланки системи

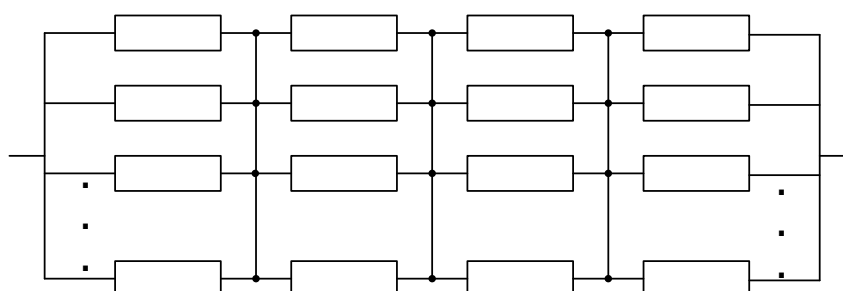
Рис. 4.2. Види загального резервування технічних систем

Роздільне резервування, передбачає резервування окремих елементів об'єкта або груп елементів (рис. 4.3.).

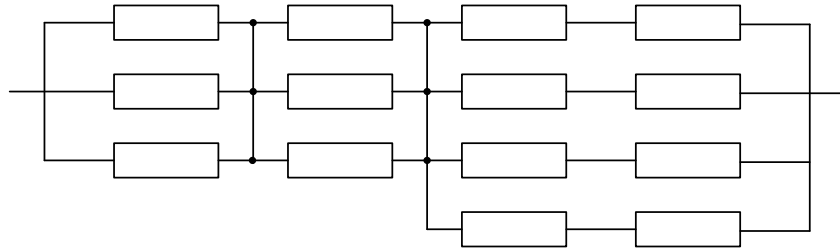
Змішане резервування, яке передбачає поєднання різних видів резервування.



а) Загальний резерв



б) Роздільний резерв



в) Змішаний резерв

Рис. 4.3. Види резервування за схемою включення резерву

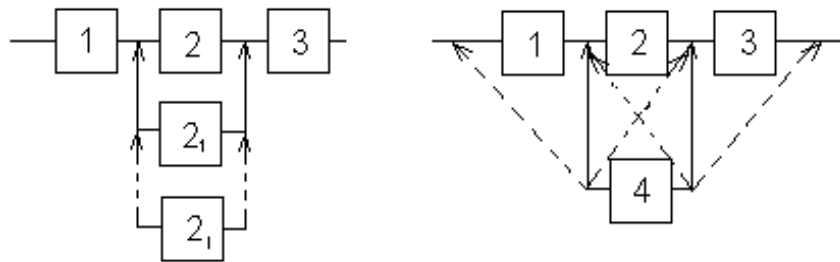


Рис. 4.4. Ковзке резервування

На рис. 4.4 показана схема ковзного резервування.

4.6. Розрахунок надійності систем з резервуванням

Розрахунок кількісних характеристик надійності систем з резервуванням окремих елементів або груп елементів багато в чому визначається видом резервування. Нижче розглядаються схеми розрахунків для найбільш поширених випадків простого резервування, до яких шляхом перетворень може бути приведена і структура змішаного резервування. При цьому розрахункові залежності отримані без урахування надійності перемикаючих пристроїв, що забезпечують перерозподіл навантаження між основними та резервними елементами (тобто для "ідеальних" перемикачів). В реальних умовах введення перемикачів в структурну схему необхідно враховувати і в розрахунку надійності систем.

Розрахунок систем з навантаженим резервом здійснюється за формулами послідовного і паралельного з'єднання елементів аналогічно розрахунку

комбінованих систем. При цьому вважається, що резервні елементи працюють у режимі основних як до, так і після їх відмови, тому надійність резервних елементів не залежить від моменту їх переходу з резервного стану в основний і дорівнює надійності основних елементів.

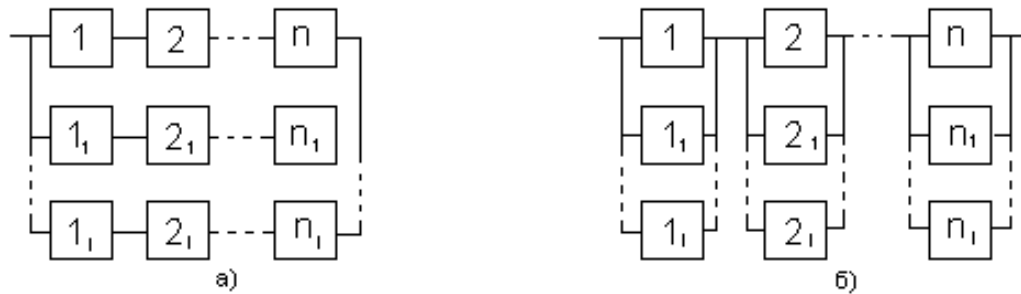


Рис. 4.5. Загальний та роздільний навантажений резерв

$$q_i = \prod_{j=1}^m q_j = \prod_{j=1}^m (1 - p_j) \quad p_i = 1 - q_i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j) \quad p_{\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^m \left[1 - \prod_{j=1}^n p_j \right]$$

для випадку рівнонадійних елементів

$$p_{\Sigma} = 1 - \left[1 - (1 - q)^n \right]^m$$

З отриманих виразів випливає, що імовірність безвідмовної роботи системи з загальним резервуванням при нескінченному числі послідовно з'єднаних елементів гілки зменшується до нуля навіть у тому випадку, коли число паралельних гілок збільшується до нескінченності.

Випадок роздільного резервування представлений на рис. 4.5 б. В даному випадку для окремої групи з m паралельно включених елементів може бути застосоване вираз:

$$p_i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j) = 1 - \prod_{i=1}^m q_i \quad p_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n p_i = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j) \right] = \prod_{j=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^m q_i \right)$$

для випадку рівнонадійних елементів

$$p_{\Sigma} = \left[1 - (1 - p)^m \right]^n = (1 - q^m)^n.$$

З отриманого виразу випливає, що імовірність безвідмовної роботи наближається до одиниці при безмежному збільшенні числа резервних елементів у групах, навіть якщо число послідовно з'єднаних груп також наближається до нескінченності, тобто роздільне резервування володіє певною перевагою перед загальним в сенсі підвищення надійності.

Імовірність появи відмови:

$$Q_{\text{обц}} = \left[1 - (1 - q)^n \right]^m \quad Q_{\text{раз}} = 1 - (1 - q^m)^n.$$

Розкладаючи праві частини рівності в степеневий ряд і враховуючи, що при нормальній експлуатації $q \ll 1$, отримаємо спрощені вирази:

$$Q_{\text{обц}} \approx n^m q^m \quad Q_{\text{раз}} \approx n q^m,$$

остаточно для кількісної оцінки способів резервування можна записати

$$Q_{\text{обц}} / Q_{\text{раз}} \approx n^m q^m / n q^m = n^{m-1}.$$

З отриманого виразу випливає, що роздільне резервування дає вигоду в безвідмовності.

На практиці може виникнути завдання, обернене розглянутим: відома імовірність безвідмовної роботи однієї гілки P , потрібно знайти число паралельних гілок m .

Для випадку загального резервування скористаємося виразом

$$1 - p_{\text{обц}} = (1 - p)^{m_{\text{обц}}} \Rightarrow m_{\text{обц}} = \frac{\lg(1 - p_{\text{обц}})}{\lg(1 - p)}$$

$p_{\text{обц}} = p_z$ – необхідна імовірність безвідмовної роботи зарезервованого об'єкта. Для випадку роздільного резервування скористаємося виразом

$$p^{1/n}_{\text{раз}} = 1 - (1 - p)^{m_{\text{раз}}} \Rightarrow m_{\text{раз}} = \frac{\lg(1 - p^{1/n}_{\text{раз}})}{\lg(1 - p)}$$

$p_{\text{обц}} = p_z$ – необхідна імовірність безвідмовної роботи зарезервованого об'єкта.

Порівнюючи між собою різні системи резервування, неважко прийти до висновку, що при загальному резервуванні для повної відмови об'єкта досить, щоб в кожному з ланцюгів вийшло з ладу по одному елементу.

При роздільному і змішаному резервуванні відмова об'єкта відбувається тільки в тому випадку, якщо в кожній групі вийдуть з ладу всі елементи.

На закінчення відзначимо, що резервування може бути з відновленням будь-якого основного і резервного елемента в процесі експлуатації об'єкта, так зване резервування з відновленням, і без відновлення елементів, так зване резервування без відновлення. Сам резервний елемент може бути відновлюваним і невідновлювальним.

Кількісно підвищення надійності системи в результаті резервування або застосування високонадійних елементів можна оцінити за **коефіцієнтом виграшу надійності**, що визначається як відношення показника надійності до резервування та після резервування системи. Наприклад, для системи з n послідовно з'єднаних елементів після резервування одного з елементів (k -го) аналогічним по надійності елементом коефіцієнт виграшу надійності по імовірності безвідмовної роботи складе

$$G_p = \frac{P'}{P} = \frac{p_1 p_2 \dots p_{k-1} [1 - (1 - p_k)^2] p_{k+1} \dots p_n}{p_1 p_2 \dots p_{k-1} p_k p_{k+1} \dots p_n} = \frac{1 - (1 - p_k)^2}{p_k} = 2 - p_k.$$

З формули випливає, що ефективність резервування тим більша, чим менша надійність резервного елемента. Отже, при структурному резервування максимального ефекту можна досягти при резервуванні найбільш ненадійних елементів або груп елементів.

У загальному випадку при виборі елемента або групи елементів для підвищення надійності або резервування необхідно виходити з умови забезпечення при цьому максимального ефекту.

Представляє практичний інтерес облік впливу надійності пристрою комутації на загальну надійність резервної системи. Будемо вважати відмови комутуючого пристрою і ланцюгів незалежними. Для цього випадку справедливо

$$P_{p.o} = P_{рез} P_{\kappa}$$

де $P_{рез}$ – імовірність безвідмовної роботи ланцюгів резервування; P_{κ} – імовірність безвідмовної роботи комутуючого пристрою.

Скориставшись виразом, для випадку загального резервування можна записати

$$p_{p.o.обш} = 1 - \prod_{u=1}^m \left(1 - p_{\kappa} \prod_{j=1}^n p_j \right) = 1 - \prod_{i=1}^m \left[1 - (1 - Q_k) \prod_{j=1}^n (1 - q_i) \right]$$

для випадку роздільного резервування

$$p_{p.o.раз} = \prod_{j=1}^n p_j = \prod_{j=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{\kappa} p_i) \right) = \prod_{j=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - (1 - Q_{\kappa})(1 - q_i)) \right)$$

$$\text{де } p_j = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{\kappa} p_i)$$

При виведенні вирази передбачалося, що комутуючі пристрої є у всіх ланцюгах і вони всі рівнонадійні. До комутаторів висувають певні вимоги по швидкодії та надійності. В ідеалі, перемикачі повинні бути абсолютно надійними (мати імовірність безвідмовної роботи наближену до одиниці).

Порівнюючи два способи резервування (загальне і роздільне), неважко прийти до висновку, що при роздільному резервуванні знадобиться більша кількість комутуючих пристроїв. У той же час роздільне резервування дозволяє отримати суттєві переваги у підвищенні безвідмовності порівняно з загальним резервуванням, дозволяє застосовувати більш гнучкі та економічні схеми резервування з використанням пристроїв для аналізу відмов і вибору резерву.

Внаслідок цього виникають певні вимоги до надійності комутуючих пристроїв, оскільки їх низька надійність може істотно вплинути на надійність всього об'єкта. Очевидно, що роздільне резервування заміщенням буде виправданим тільки тоді, коли надійність таким чином зарезервованого об'єкта буде не нижче надійності об'єкта з загальним резервуванням, тобто повинна виконуватися нерівність $p_{раз} > p_{общ}$.

Для відновлюваного об'єкта при найпростішому потоці відмов і безвідмовному комутуючим пристрої імовірність безвідмовної роботи при ковзному резервування визначається виразом

$$P_c(k) = \prod_{i=0}^{n-1} \Lambda_j \sum_{i=0}^{n-1} \frac{e^{-\Lambda_i}}{\Lambda_i \prod_{\substack{l=0 \\ l \neq i}}^{n-1} (\Lambda_l - \Lambda_i)}$$

де k – число основних функціонально необхідних елементів;

$n-1$ – число резервних елементів;

Λ_j – інтенсивність переходу об'єкта з стану H_j в стан H_{j+1} . Кількість станів відповідає числу елементів, що вийшли з ладу.

Для випадку рівнонадійних комутуючих пристроїв і ненавантаженого резерву вираз прийме вигляд:

$$P_{c}^{n,n}(k) = e^{-k(\lambda + \lambda_k)t} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{[k(\lambda + \lambda_k)t]^j}{j!}.$$

Доцільність застосування ковзного резервування встановлюється порівнянням надійності об'єкта з резервом і без нього.

Для системи з послідовним з'єднанням n елементів при загальному резервуванні з кратністю l

$$P_{o\delta} = 1 - (1 - P)^{l+1} = 1 - (1 - \prod_{i=1}^n p_i)^{l+1}.$$

Зокрема, при дублюванні ($l=1$)

$$P_{o\delta} = 1 - (1 - P)^2 = P(2 - P).$$

При роздільному резервуванні

$$p_{paz} = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - p_i)^{l+1}],$$

а при роздільному дублювання ($l=1$)

$$p_{paz} = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - p_i)^2] = \prod_{i=1}^n p_i(2 - p_i) = p \prod_{i=1}^n (2 - p_i).$$

Тоді коефіцієнти виграшу надійності по імовірності безвідмовної роботи при дублюванні

$$G_{об} = \frac{P_{об}}{P} = 2 - P, \quad G_{раз} = \frac{P_{об}}{P} = \prod_{i=1}^n (2 - p_i),$$

звідки випливає, що роздільне резервування ефективніше загального.

Якщо резервні елементи до їх включення абсолютно надійні, то для системи з ненавантаженим резервом кратності l (всього елементів $l+1$)

$$Q = \frac{1}{(l+1)!} \prod_{i=1}^{l+1} q_i; \quad P = 1 - \frac{1}{(l+1)!} \prod_{i=1}^{l+1} (1 - p_i),$$

тобто ймовірність відмови в $(l+1)!$ разів менше, ніж при навантаженому.

Для ідентичних по надійності основного і резервного елементів

$$P = 1 - \frac{1}{(l+1)!} (1 - p)^{l+1}.$$

При експоненціальному розподілі напрацювання (найпростішому потоці відмов) в випадку $\lambda t \ll 1$ можна скористатися наближеною формулою

$$P \approx 1 - \frac{(\lambda t)^{l+1}}{(l+1)!}.$$

При ненавантаженому резервуванні середнє напрацювання на відмову

$$T = \sum_{i=1}^{l+1} T_{0i},$$

а для ідентичних елементів $T_0 = n T_{0i}$.

Полегшене резервування використовується при інерційності перехідних процесів, що відбуваються в елементі при його переході з резервного в

основний режим, і недоцільність застосування навантаженого резервування через недостатній виграш в надійності. Очевидно, полегшений резерв займає проміжне положення між навантаженим і ненавантаженим.

Точні вирази для розрахунку надійності систем при полегшеному резервуванні досить громіздкі і неоднозначні, однак при експоненціальному розподілі напрацювання справедлива наближена формула

$$P = \frac{1}{(l+1)!} \lambda (\lambda + \lambda_0)(\lambda + 2\lambda_0) \dots [\lambda + l\lambda_0] \cdot t^{l+1} =$$

$$= \frac{t^{l+1}}{(l+1)!} \prod_{i=0}^l (\lambda + i\lambda_0),$$

де λ_0 – інтенсивність відмов елементів в полегшеному режимі, l – кратність резервування.

Ковзне резервування використовується для резервування кількох однакових елементів системи одним або декількома однаковими резервними. Очевидно, відмова системи станеться, якщо із загальної кількості ідентичних елементів (основних та резервних) число відмовивших елементів перевищує число резервних. Розрахунок імовірності безвідмовної роботи систем з ковзним резервуванням аналогічний розрахунку систем типу " m з n ".

4.7. Методи оптимального резервування

Часто мають місце випадки, коли необхідно забезпечити величину надійності при наявності обмежень по масі, споживанні енергії, габаритах, вартості системи. Рішення подібних завдань базується на методах оптимізації. Завдання оптимізації можуть бути поставлені по-різному. Наприклад, при розробці систем з активним резервуванням в першу чергу необхідно встановити оптимальне число ділянок резервування. При збільшенні числа ділянок резервування імовірність відмови ділянки весь час зменшується через

зменшення кількості елементів у ньому, але при збільшені числа ділянок резервування може виявитися, що система виходить з ладу в основному із-за відмов перемикачів. Таким чином, існує оптимальне число ділянок резервування, при якому імовірність відмови системи виявляється мінімальною.

Разом з тим, кількість ділянок резервування визначається не тільки міркуваннями надійності, але і іншими факторами.

Тому видається доцільним визначати оптимальне число ділянок резервування, вважаючи, що система ділиться на рівнонадійні ділянки і надійність всіх перемикачів однакова. Кількість резервних елементів зазвичай обмежується міркуваннями вартості, маси і об'єму апаратури.

Таким чином, задача полягає у визначенні числа ділянок резервування, на яку треба розбити основну систему, щоб отримати більш надійну зарезервовану систему, якщо відомі імовірність відмови перемикачів та кількість резервних елементів на кожній ділянці.

Велика група задач оптимізації пов'язана з визначенням числа резервних елементів з урахуванням обмежуючих факторів: вартості, маси, об'єму – які визначають як «витрати».

Подібні завачі можуть бути двох видів.

Задачі оптимального резервування першого виду полягають у визначенні необхідної кількості резервних елементів, які необхідно використати у системі для забезпечення заданого значення надійності системи при мінімальних витратах.

Другий вид задач – визначення необхідної кількості резервних елементів, які забезпечують максимально можливе значення показника надійності системи при величині витрат, що не перевищує задані.

Витрати визначаються кількістю резервних елементів, технологічністю їх виготовлення і обслуговування. Як правило, передбачається, що величина витрат на виготовлення і експлуатацію системи лінійно зростає з ростом кількості резервних елементів.

Для випадку декількох обмежуючих факторів задача оптимального резервування зазвичай формулюється так: необхідно визначити таку кількість резервних елементів, щоб забезпечувалося максимально можливе значення показника надійності системи при задоволенні всіх заданих обмежень.

При вирішенні завдань оптимального резервування застосовують метод множників Лагранжа, а також методи прямого перебору і динамічного програмування та градієнтний.

4.8. Метод невизначених множників Лагранжа

Розв'язування задачі полягає в знаходженні екстремуму функції $\varphi(k_1, k_2, \dots, k_m)$, при накладених обмеженнях $\gamma(k_1, k_2, \dots, k_m)$. Для цього складають функцію Лагранжа

$$F(k_1, k_2, \dots, k_m) = \varphi(k_1, k_2, \dots, k_m) + \chi \cdot \gamma(k_1, k_2, \dots, k_m)$$

де χ - Невизначений множник Лагранжа.

Знайдемо частинні похідні і прирівняємо їх до нуля, щоб знайти екстремуми функції:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial k_i} F(k_1, k_2, \dots, k_m) = 0, i = 1, 2, \dots, m; \\ \gamma(k_1, k_2, \dots, k_m) = \gamma_0. \end{cases}$$

Система розв'язків $k_1, k_2, \dots, k_m$, яка задовольняє цим рівнянням дає екстремум функції $\varphi(k_1, k_2, \dots, k_m)$.

Алгоритм методу множників Лагранжа

Етап 1. Складаємо функцію Лагранжа.

Етап 2. Знаходимо частинні похідні від функції Лагранжа по змінним і прирівнюємо їх нулю.

Етап 3. Розв'язуємо систему рівнянь, знаходимо точки, в яких цільова функція задачі може мати екстремум.

Етап 4. Серед точок, підозрілих на екстремум, знаходимо такі, в яких досягається екстремум, і обчислюємо значення функції Лагранжа у цих точках.

Метод множників Лагранжа можна застосовувати лише в тих випадках, коли додаткові умови задані у вигляді рівності, а аргументи k неперервні.

В процесі розв'язку можна отримати нецілочисельне значення k , які необхідно округляти в бік найближчих цілих чисел. Після округлення частина цілочисельних значень відразу ж виключається, оскільки для них не виконується необхідна умова.

Для першого виду задач вибирається те рішення, яке мінімізує витрати, для другого – при якому отримуємо максимальне значення показника надійності системи. Перебір всіх можливих значень, як правило, виявляється досить трудомістким процесом. Якщо задане значення показника надійності системи або необхідна величина витрат будуть змінені, то необхідно визначити нові оптимальні величини k .

4.9. Градієнтний метод оптимального резервування

У загальному випадку рішення задач градієнтним методом полягає в тому, що відшукується значення екстремуму деякої функції шляхом послідовних кроків з початкової точки по напрямку градієнта. Процес створення оптимально-резервованої системи є багатокроковим процесом.

Спочатку розглядається вихідна нерезервована система і на першому кроці відшукується елемент системи, додавання до якого одного резервного елемента дає найбільше відношення приросту показника надійності до приросту затрат.

На другому кроці відшукується наступний елемент системи (включаючи і той, у якого вже є резервний елемент), який характеризується найбільшим відношенням приросту показника надійності до приросту затрат і так далі.

Таким чином, на кожному $(N + 1)$ кроці $(N = 0, 1, 2 \dots)$ відшукується максимальне значення з усіх, що розарховуємо за формулою для кожного елемента системи:

$$\gamma_i^{N+1}(k_i) = \max \frac{P(M^{N+1}) - P(M^N)}{C(M^{N+1}) - C(M^N)}$$

де $P(M^{N+1}), P(M^N)$ – надійності системи на наступному $N+1$ та попередньому N кроках, $C(M^{N+1}) - C(M^N)$ – вартості системи на наступному $N+1$ та попередньому N кроках, M^{N+1}, M^N – вектори складу системи на наступному $N+1$ та попередньому N кроках.

На кожному кроці один резервний елемент добавляється до елемента з максимальним значенням величини $\gamma_i^{N+1}(k_i)$. Процес припиняється на такому N кроці, де виконуються поставлені задачі.

Для задач першого виду

$$P^{N+1} < P_0 < P^N,$$

де P_0 – задане значення показника надійності.

Для задач другого виду

$$C^N < C_0 < C^{N+1},$$

де C_0 – задане значення витрат.

Метод найшвидшого спуску не завжди може дати строго оптимальний розв'язок, оскільки перебір ведеться в обмеженій області можливих рішень. Після кожного кроку в системі обов'язково додається резервний елемент. Перекомпонування резерву між елементами системи не допускається.

4.10. Метод прямого перебору та динамічного програмування

Метод прямого перебору та динамічного програмування є найбільш точним методом оптимального резервування. Метод прямого перебору, який зводиться до перебору всіх можливих рішень, є громіздким і рідко застосовується при проектуванні систем. Тому використовують його модифікацію з методом динамічного програмування (алгоритм Кеттеля). Стосовно до задачі оптимального резервування він зводиться до відшукування домінуючої послідовності рішень, тобто послідовності векторів складу системи, які включають всі множини оптимальних рішень.

Вектор складу системи представляє собою деяку комбінацію розташування резервних елементів в системі з врахуванням основних елементів. Наприклад, система містить 3 послідовно з'єднані елементи. До першого підключено 2 резервних елементи, до другого – 4, до третього лише один. Вектор складу систему тоді запишемо у вигляді (3, 5, 2).

Вважаємо, що один вектор складу системи домінує над іншим, якщо забезпечення одного і того ж рівня надійності системи пов'язано з найменшими затратами. Всі неоптимальні рішення, що не входять до складу домінуючої послідовності просто виключаються з розгляду.

Завдання полягає в побудові домінуючої послідовності для всієї системи, що складається з n підсистем. Для цього беруться дві довільні підсистеми $(n-1)$ і n , для яких будується домінуюча послідовність.

Необхідний вектор складу резервних елементів X_0 вибирається з домінуючої послідовності, виходячи із заданих обмежень, тобто при рішенні

першої задачі оптимального резервування вибирається такий вектор X_0 при якому $P(X_0) \geq P_0$, а при вирішенні другої задачі – такий, при якому $C(X_0) < C_0$.

Для побудови домінуючої послідовності для $n-1$ і n -ої підсистем складається таблиця (табл.). Розмір таблиці визначається за заданим значенням надійності або витрат. В таблиці: x_{n-1} , x_n кількість резервних елементів в $n-1$ і n -ої підсистемах; $P(x_{n-1}, x_n)$, $C(x_{n-1}, x_n)$ – показники надійності і вартості послідовно з'єднаних на логічній схемі " $n-1$ " і " n "-ої систем відповідно при x_{n-1} , x_n резервних елементах.

Таблиця 4.1

$x_n \backslash x_{n-1}$	0	1	2	
0	$P(0,0);$ $C(0,0)$	$P(1,0);$ $C(1,0)$	$P(2,0);$ $C(2,0)$	
1	$P(0,1);$ $C(0,1)$	$P(1,1);$ $C(1,1)$	$P(2,1);$ $C(2,1)$	
2	$P(0,2);$ $C(0,2)$	$P(1,2);$ $C(1,2)$	$P(2,2);$ $C(2,2)$	
.				
..				

Домінуюча послідовність будується наступним чином: для прямої задачі з таблиці знаходиться найменше значення $P_1 > P_0$ (P_0 – задано). Якщо це значення може бути отримане за допомогою декількох варіантів, то вибирається варіант з найменшими витратами C_1 , а решта виключаються з розгляду. Отриманий вектор складу системи з показниками P_1 і C_1 буде першим членом домінуючої послідовності. Далі з таблиці знаходять наступний за величиною показник надійності $P_2 > P_1$ і аналогічно визначається другий член домінуючої послідовності і т.д. Для оберненої задачі члени домінуючої послідовності визначаються показником вартості.

Через m етапів система зводиться до одного умовного елемента з результуючою домінуючою послідовністю. Необхідний вектор складу системи вибирається з домінуючої послідовності виходячи з заданих обмежень, тобто при вирішенні задач першого роду оптимального резервування вибирається

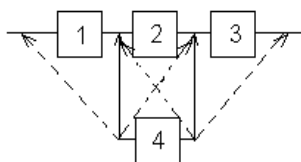
такий вектор складу системи M_0 , при якому $P(M_0) > P_0$, а при розв'язку другої задачі – такий, при якому $C(M_0) < C_0$.

Метод динамічного програмування є надзвичайно точним методом, оскільки пошук охоплює всю можливу область рішень. Обмеженням для застосування методу є його трудомісткість і громіздкість. Тому на етапах попереднього проектування складних систем, де не потрібна висока точність, рекомендовано використовувати простіші методи множників Лагранжа і найшвидшого спуску.

На етапі остаточного проектування, де необхідна достатня точність, доцільно застосовувати метод динамічного програмування. У деяких випадках доцільно використовувати комбінацію методів множників Лагранжа і динамічного програмування: спочатку визначити не цілі значення кількості резервних блоків методом множників Лагранжа, а потім для округлення використовувати метод динамічного програмування.

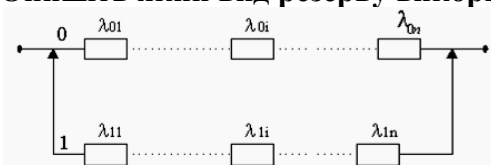
Питання для самоконтролю

Опишіть який вид резерву використано.



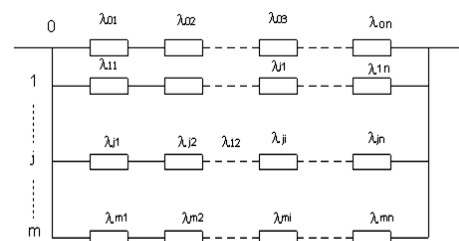
- А) навантажений резерв;
- Б) ненавантажений резерв;
- В) схема заміщення;
- Г) ковзкий резерв;
- Д) активне резервування.

Опишіть який вид резерву використано.



- А) схема дубльована навантаженим резервом;
- Б) схема дубльована ненавантаженим резервом;

Опишіть який вид резерву використано.



- А) роздільне навантажене резервування;
- Б) загальне навантажене резервування;
- В) роздільне ненавантажене резервування;
- Г) загальне ненавантажене резервування;
- Д) змішане резервування.

Як включається резерв відносно резервуємого елементу:

- А) завжди паралельно елементу;
- Б) виходячи з мети резервування або паралельно або послідовно;
- В) завжди послідовно за елементом;
- Г) елемент паралельно, елемент

- В) схема заміщення;
- Г) схема дубльована ковзким резервом;
- Д) пасивне дублювання.

Відношення числа резервних елементів до числа резервуємих це

- А) коефіцієнт виграшу по надійності;
- Б) коефіцієнт надійності;
- В) кратність резервування;
- Г) коефіцієнт профілактичності;
- Д) порядок резерву.

Для якого виду резервування характерна формула $T = 1,5 \times T_0$?

- А) активне дублювання;
- Б) активне;
- В) пасивне дублювання;
- Г) пасивне;
- Д) ковзке.

Яка вимога до перемикачів при активному резервуванні?

- А) їх повинно бути два;
- Б) вони включаються в роботу тільки після виходу з ладу основного елементу;
- В) вони працюють в тому ж режимі, що і основний елемент;
- Г) вони повинні бути абсолютно надійними;
- Д) вони повинні бути.

Для мостових систем з великою кількістю елементів метод мінімальних перерізів є:

- А) найточнішим методом розрахунку надійності;
- Б) нижньою межею значення надійності;
- В) верхньою межею значення надійності;
- Г) не використовується для розрахунку мостових схем;
- Д) свій варіант.

Яка кількість станів буде в системі з 3 елементів при трьох можливих станах елементу?

- А) 3;
- Б) 9;
- В) 6;
- Г) 18;
- Д) 27.

- послідовно;
- Д) інший варіант.

Який метод оптимального резервування рекомендовано використовувати на етапі кінцевого проектування (забезпечує високу точність та простоту розрахунку)?

- А) метод прямого перебору;
- Б) метод невизначених множників Лагранжа;
- В) градієнтний метод;
- Г) метод прямого перебору та динамічного програмування;

Якщо в системі типу « m із n » $m=n$, то вона перетворюється у....

- А) послідовне з'єднання;
- Б) паралельне з'єднання;
- В) мостову схему;
- Г) з'єднання зіркою;
- Д) з'єднання трикутником.

Як називається вид резервування в якому передбачається використання надлишкових елементів в структурі об'єкту?

- А) функціональне;
- Б) часове;
- В) структурне;
- Г) інформаційне;
- Д) навантажувальне.

Для мостових систем з великою кількістю елементів метод мінімальних шляхів є:

- А) найточнішим методом розрахунку надійності;
- Б) нижньою межею значення надійності;
- В) верхньою межею значення надійності;
- Г) не використовується для розрахунку мостових схем;

Система складається з N невідновлювальних елементів. Здійснюється пасивне резервування для всіх елементів системи (кількість резервних елементів для кожного основного однаково). В якому випадку надійність системи буде вищою?

- А) загальне резервування;
- Б) роздільне резервування;

- В) навантажене реєстрування;
- Г) козовий резерв;
- Д) змішане резервування.

РОЗДІЛ 5. ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ І ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ АПАРАТУРИ

5.1. Задачі експлуатації, її складові і характеристики

Як зазначалося на початку посібника, будь-який технічний об'єкт, прилад більшу частину свого життя знаходиться на етапі експлуатації. Розглянемо ряд основних понять і визначень, що застосовуються для характеристики та опису експлуатації.

Експлуатація – це сукупність робіт та організаційних заходів для підтримання технічних об'єктів у постійній технічній справності.

Процес експлуатації складається з ряду етапів. Зазвичай процес експлуатації ТО складається з наступних основних етапів: зберігання, транспортування, підготовка до застосування, застосування за призначенням, технічне обслуговування, ремонт.

Задачами експлуатації технічних об'єктів є:

- організація та проведення різних заходів щодо використання ТО за призначенням;
- підготовка до використання;
- підтримка робочого стану;
- подовження ресурсів апаратури.

Всі заходи, які виконуються при експлуатації, зручно поділити на три групи:

1. використання за призначенням;
2. технічне обслуговування;
3. ремонт.

Підготовка до застосування – це сукупність робіт по підготовці апаратури до нормального функціонування у відповідності з її призначенням і технічними умовами.

Застосування за призначенням – це сукупність робіт, що забезпечують нормальне функціонування апаратури у відповідності з технічними умовами.

При використанні за призначенням апаратура може знаходитись або під струмом (включення живлення, контроль функціонування, налаштування РЕА, виконання основних функцій), або в обезструмленому стані (транспортування, зберігання, очікування). В процесі використання апаратури за призначенням вона може переводитись з одного стану в інший. Наприклад, телефон, який знаходиться в режимі очікування в обезструмленому стані, при знятті трубки починає працювати під струмом. Ступінь відношення даної апаратури, систем поставлених перед нею задач прийнято визначати ефективністю. Тобто, пристосуванням апаратури (системи) до виконання поставлених перед нею задач.

Під зберіганням ТО розуміється підтримка її в технічно справному стані протягом встановленого терміну до реалізації. В процесі зберігання повинні бути створені сприятливі умови утримання техніки, при яких забезпечується збереження її працездатності.

Транспортування — перевезення РЕА в умовах, що забезпечують збереження її працездатності.

Технічне обслуговування – це комплекс робіт (операцій) для підтримки РЕА в справному або працездатному стані при підготовці та застосуванню за призначенням, зберіганні і транспортуванні.

Ремонт – комплекс операцій з відновлення справності або працездатності та відновлення ресурсів РЕА або її складових частин.

Умови експлуатації – це сукупність факторів, діючих на РЕА при експлуатації. До умов експлуатації відносяться кліматичні умови, механічні та електричні навантаження, електромагнітні випромінювання, кваліфікація обслуговуючого персоналу, забезпеченість запасними частинами.

Таким чином, процес експлуатації радіоелектронної апаратури складається з великого комплексу різних заходів, якість виконання яких істотно впливає на експлуатаційні властивості апаратури.

Під експлуатаційними властивостями радіоелектронної апаратури розуміють її безвідмовність, збереженість, довговічність, ремонтпридатність, ступінь готовності до виконання основних функцій і пристосованість до технічного обслуговування, виявлених у конкретних умовах експлуатації.

Розглянуті поняття і визначення дозволяють якісно охарактеризувати експлуатаційні властивості апаратури. Однак для вирішення питань, пов'язаних з аналізом, оцінкою і порівнянням апаратури за експлуатаційними властивостями, раціональної організації експлуатації апаратури, необхідно знати кількісні характеристики (показники) експлуатації.

Показники експлуатаційних властивостей апаратури повинні задовольняти ряду загальних вимог. До них відносяться:

- 1) можливість максимального врахування чинників, що визначають експлуатаційні властивості апаратури;
- 2) можливість задавання числом і використання при інженерних розрахунках;
- 3) можливість задавання експлуатаційного показника в якості технічного параметра чи отримання його з технічного завдання на проектування апаратури;
- 4) можливість зручності і швидкості експериментальної перевірки показника в процесі експлуатації або спеціальних випробувань;
- 5) узгодженість з поняттями і визначеннями надійності;
- 6) можливість застосування в будь-якій радіоелектронній апаратурі.

Для кількісної оцінки експлуатаційних властивостей радіоелектронної апаратури, як уже зазначалося, застосовують відповідні одиничні і комплексні показники, які були розглянуті в першому розділі даного посібника.

Розглянемо більш детально основні етапи експлуатації та процеси, що на них відбуваються.

5.2. Технічне та профілактичне обслуговування

Для підтримки справності та працездатності апаратури та продовження її ресурсів необхідно проводити технічне обслуговування.

Технічним обслуговуванням називають комплекс робіт для підтримання справності або тільки працездатності об'єкта при підготовці та використанні за призначенням, при зберіганні та транспортуванні.

Всі заходи з технічного обслуговування апаратури можна розділити на наступні фази (види):

- 1) контроль технічного стану;
- 2) профілактичне обслуговування;
- 3) забезпечення розхідними матеріалам, приладдям, запасними елементами;
- 4) збір та обробка результатів експлуатації.

Контроль технічного стану проводиться з метою оцінки апаратури. Будь-яка апаратура призначається для виконання певних функцій, а її стан, тобто здатність виконувати ці функції, характеризується деякими значеннями її параметрів, заданих у нормативно-технічній документації. Якщо величини параметрів апаратури відповідають установленим на них номінальним значенням (допускам), то апаратура вважається справною, тобто вона буде здатна задовільно виконувати задані функції. Якщо хоча б один із заданих параметрів не буде відповідати допускам, то апаратура буде в непрацездатному стані, тобто вона не зможе забезпечити задовільне виконання всіх заданих функцій.

Таким чином, контроль технічного стану апаратури зводиться до співставлення істинних значень параметрів конкретної апаратури з їх номінальними значеннями з урахуванням допусків. На основі результатів цього зіставлення робиться висновок про технічний стан апаратури.

Заходи з контролю технічного стану апаратури можуть виконуватися на всіх фазах її використання за призначенням, при профілактичному обслуговуванні та ремонті.

Для забезпечення збережуваності апаратури при зберіганні і безвідмовності в роботі проводиться профілактичне обслуговування, що є складовою частиною технічного обслуговування.

Основним змістом технічного обслуговування є профілактичне обслуговування, яке виконується, як правило, у плановому порядку для підтримки апаратури в справному (працездатному) стані, попередження відмов при використанні за призначенням і продовження її ресурсу.

Профілактичне обслуговування представляє собою комплекс заходів, спрямованих на підтримку апаратури в справному стані, попередження відмов під час роботи і продовження ресурсу.

Комплекс профілактичних заходів складається з наступних робіт:

- а) зовнішній огляд і чищення апаратури;
- б) контрольно-регулювальні роботи;
- в) прогнозування відмов та їх попередження;
- г) сезонні, мастильні і кріпильні роботи;
- д) технічні огляди та перевірки.

Зовнішній огляд апаратури виконують для виявлення зовнішніх ознак можливих несправностей, перевірки правильності встановлення органів управління, перевірки стану елементів і монтажу. Чищення апаратури передбачає видалення з неї пилу, вологи, корозії.

Найбільш трудомісткою частиною профілактичного обслуговування є контрольно-регулювальні роботи і тісно пов'язані з ними роботи з прогнозування відмов. Контрольні роботи включають контроль параметрів РЕА щодо встановлених допусків.

Регулювальні роботи проводяться для відновлення втрачених апаратурою властивостей або працездатності. Для побутової РЕА на цьому етапі проводять роботи щодо зниження пожежонебезпеки телевізорів і відновленню

працездатності кінескопів, які втратили емісію катодів після тривалої експлуатації.

Профілактичне обслуговування, на виконання якого встановлені терміни і час проведення, називають регламентними роботами.

Сезонні, мастильні, кріпильні роботи проводяться для підготовки РЕА до експлуатації в певний час року. При сезонних роботах проводяться заходи щодо зменшення проникнення вологи, утепленню (взимку) і охолодженню (влітку) апаратури, використовують спецмасла і т.д. Після проведення сезонних робіт на РЕА здійснюють контрольно-регулювальні роботи. Для систематичного контролю за технічним станом апаратури проводять технічні огляди та технічні огляди апаратури.

Мастильні роботи передбачають або наповнення, або повну заміну масел в рухомих механізмах. Кріпильні роботи включають перевірку кріпильних деталей (болтів, гайок тощо), їх кріплення, постановку і заміну несправних деталей.

Профілактичне обслуговування включає три етапи:

- 1) роботи на знеструмленій апаратурі (зовнішній огляд і чищення апаратури при сезонних, мастильних і кріпильних роботах);
- 2) роботи під струмом (перевірка вузлів, блоків, працездатності апаратури, регулювання і налаштування параметрів);
- 3) контроль функціонування РЕА (перевірка працездатності, налагодження та перевірка основних параметрів апаратури в цілому).

На кожному етапі обслуговування проводяться операції з підтримання апаратури в справному (працездатному) стані. При цьому регламентні роботи відрізняються рівнем обслуговування, а при визначенні обсягу і періодичності проведення регламентних робіт враховують дві суперечливі вимоги:

- 1) профілактичні роботи підвищують надійність;
- 2) профілактичні роботи ведуть до простою апаратури і знижують коефіцієнт готовності і несуть економічні втрати.

Тому при організації профілактичних робіт забезпечують підтримання надійності апаратури на заданому рівні і передбачають мінімальну вартість і час їх виконання, а також планують виконання робіт найбільш простими способами. Обсяг і періодичність профілактичних робіт регламентується спецінструкціями, наприклад, формуляром.

Постачання передбачає отримання матеріалів, обладнання, приладів, інструментів для проведення профілактичного обслуговування. Для забезпечення нормальної експлуатації апаратури повинні бути організовано її правильне забезпечення витратними матеріалами і засобами (електроенергією, горючими та мастильними матеріалами, інструментом тощо), комплектами запасними інструментами, приладдям (ЗІП) і своєчасне їх поповнення. Для забезпечення технічного обслуговування об'єктів систем їх забезпечують комплектами ЗІП і комплектом контрольно-вимірювальної апаратури.

Комплектом ЗІП називають запасні частини, інструменти, приладдя, матеріали та інше майно, необхідне для технічного обслуговування і ремонту об'єктів та скомплектоване залежно від призначення і особливостей використання. Технічно правильне використання апаратури за призначенням, її підтримка у справному стані та постійній готовності до використання за призначенням, продовження її ресурсу істотно залежать від організації експлуатації радіоелектронної апаратури.

Організація експлуатації складається із заходів з підготовки кваліфікованих кадрів, постачання апаратури запасними елементами (ЗІП) та витратними матеріалами, з планування експлуатації апаратури, а також збору та обробки результатів експлуатації.

Якість експлуатації апаратури в значній мірі визначається кваліфікацією обслуговуючого персоналу. Вплив людини можна розглядати як результат діяльності, від якого залежать експлуатаційні властивості апаратури: людина як елемент системи, що забезпечує її функціонування із заданою продуктивністю; людина як джерело передумов до відмов; людина як елемент

системи, що підтримує надійність апаратури на заданому рівні; людина як елемент системи, що забезпечує її відновлення (ремонт).

Для якісної експлуатації радіоелектронної апаратури проводиться планування її роботи, технічного обслуговування , постачання і підготовки кадрів.

Збір та обробка результатів експлуатації проводяться для кількісної оцінки експлуатаційно-технічних показників за певний період експлуатації.

На основі збору та обробки результатів експлуатації апаратури, аналізу статистичних даних намічаються заходи щодо підвищення надійності та вдосконалення експлуатації апаратури. При цьому результати експлуатації та рекомендації щодо підвищення надійності та вдосконалення апаратури повинні бути своєчасно направлені на завод-виробник.

5.3. Визначення періодичності профілактики

Періодичність призначають виходячи з часу роботи апаратури або календарного терміну експлуатації, при цьому враховується спосіб використання апаратури. Для апаратури разової дії характерні:

- зберігання;
- підготовка до використання за призначенням;
- використання за призначенням.

Апаратура безперервної дії використовується за цільовим призначенням протягом доби (частини доби), наприклад, БРЭА. Чергова апаратура використовується нетривалий час, наприклад, РЛС, радіостанція і т.д.

Оскільки при експлуатації РЕА виникають раптові і поступові відмови, то при виборі періоду виконання профілактичних робіт мають на увазі, що його скорочення підвищує надійність, але при цьому збільшується обсяг і час профілактики, що призводить до зменшення коефіцієнта технічного використання

$$K_{TB} = \frac{T_{0\Sigma}}{T_{0\Sigma} + T_{P\Sigma} + T_{T0\Sigma}}$$

$T_{0\Sigma}$ – сумарне напрацювання за календарний час t_k ;

$T_{P\Sigma}$ – сумарний час ремонтів за час t_k ;

$T_{T0\Sigma}$ – сумарний час профілактичних робіт за час t_k .

В якості критерію для вибору оптимального періоду проведення профілактичних робіт приймають коефіцієнт простою

$$K_{\Pi} = \tau_{TO} + T_{TO} - T_{OP}$$

τ_{TO} – час між профілактиками;

T_{OT} – середня тривалість профілактики;

T_{OP} – напрацювання об'єкта між двома профілактиками.

Для прийнятого експоненціального розподілу відмов

$$T_{TO} = \sqrt{2 \cdot T_0 \cdot T_{OP}}$$

Співвідношення між часом включеного і вимкненого стану характеризується коефіцієнтом інтенсивності експлуатації

$$K_H = \sum_{i=1}^{n_B} t_i / t_k ,$$

де t_i – час роботи апаратури при i -му включенні; n_B – число включень за час t_k , t_k – календарний час роботи апаратури.

З формули випливає, що K_H можна визначити як імовірність знаходження апаратури у включеному стані. Тоді нехтуючи відмовами у вимкненому стані, отримуємо

$$\tau_{TO} = \sqrt{2T_{TO}/K_H\lambda_{\Pi}} ,$$

λ_{Π} – інтенсивність відмов при проведенні профілактики.

Для досконалої апаратури та чергової апаратури, яка працює більший час під струмом використовують формулу

$$\tau_{TO} = K_{CT} \sqrt{2T_{TO}/K_H\lambda_{\Pi}} ,$$

де K_{CT} – коефіцієнт, що враховує стабільність параметрів апаратури за результатами експлуатації.

Формулу можна також використовувати для чергової апаратури, що працює невелику частину під струмом.

Для апаратури разової дії

$$\tau_{TO} = \sqrt{2T_{TO}/\lambda_{XP}} ,$$

де λ_{XP} – інтенсивність відмов в режимі зберігання, в якому проводиться профілактика.

Середня тривалість техобслуговування, яка визначається кількістю контрольованих і регульованих параметрів, визначається як

$$T_{TO} = \sum_{i=1}^{m_n} T_{TOi} ,$$

де T_{TOi} – середній час виконання i -ої операції; m_n – число операцій при одній профілактиці.

5.4. Склад і вимоги до документації з технічного обслуговування і ремонту радіоелектронних систем

Документація включає інструкцію з експлуатації і ремонтно-технічну документацію.

Під технічним обслуговуванням розуміється виконання регламентних робіт і усунення несправностей у процесі експлуатації РЕА. Воно проводиться користувачем або фахівцями ремонтного підприємства з використанням вбудованої діагностичної апаратури, переносних стендів, пристосувань і інструменту.

Ремонт здійснюється фахівцями ремонтного підприємства. Основний обсяг ремонту виконується у відповідності з керівництвом по ремонту з використанням діагностичного обладнання, спеціального інструменту, приладдя і КВП. Документація повинна відображати чотирирівневе обслуговування:

- перший рівень здійснюється користувачем і включає діагностику і виправлення несправностей РЕЗ, включаючи складання технічних і гідравлічних вузлів;
- другий рівень проводиться персоналом підтримки ремонтних підприємств і включає тестування виробів, їх налаштування, а також роботи, які вимагають застосування випробувального обладнання, наприклад, для юстирування антен;
- третій рівень проводиться персоналом ремонтного підприємства та стосується областей, в яких потрібна спеціальна промислова кваліфікаційна основа для таких робіт, як ремонт друкованих плат, і робіт із застосуванням випробувальних стендів і тестового обладнання;
- четвертий рівень проводиться на промисловій базі, в тих випадках, коли для виконання особливого виду ремонту потрібна дорога виробнича інфраструктура.

Забезпечення запчастинами здійснюється за рахунок складів, на яких лежить відповідальність за витрачання та поповнення запчастин. На третьому і

четвертому рівнях обслуговування здійснюються заходи з перевірки програмних засобів та впровадження нових версій програмного забезпечення.

Технічні керівництва повинні представляти собою набір документів і бути розраховані на використання кваліфікованим персоналом для діагностики, усунення несправностей і дефектів РЕЗ і перекривати всі види обслуговування від простого пошуку несправностей до проведення планового ремонту.

Технічне керівництво повинне складатися з докладного опису об'єкту з повним розумінням принципів конструкції і роботи. Для тих РЕА, в яких використовуються друковані плати, модулі, описи повинні охоплювати групу друкованих плат, модулів, осередків з детальним їх висвітленням і поданням принципових схем.

Описи повинні розкривати загальну ідеологію конструкції, функціональний опис, схеми проходження сигналів, схеми взаємних з'єднань і розташування елементів, схеми управління і часові діаграми керуючих сигналів, схеми вхідних і вихідних сигналів, схематичні зображення механічних зборок і вузлів, містити допоміжну інформацію для користувачів по періодичному обслуговуванню, а також інформацію щодо програмного забезпечення. Крім того включати в себе процедури калібрування та юстування, інструкції з обслуговування механічних та електромеханічних пристроїв, допустимі межі параметрів і послідовність дій для діагностики та локалізації несправностей.

В інструкції з обслуговування включаються роботи по розбиранню і складанню всіх блоків, методики проведення випробувань, налаштування пристроїв, установки кожного блоку, опису тестового випробувального обладнання.

Зведена специфікація РЕА повинна відображати весь перелік з складових вузлів, запчастин і аксесуарів, випробувальних стендів і допоміжних пристроїв.

Документація по друкованим платам повинна містити:

- принципові схеми;
- схеми розташування елементів;

- схеми проходження сигналів;
- блок-діаграми з приведенням вхідних і вихідних сигналів;
- функціональні схеми проходження і перетворення сигналів;
- часові діаграми, тестові точки і переліки послідовностей операцій

програмування для всіх програмованих компонент.

Керівництво по ремонту друкованих плат повинно містити:

- інструкції щодо проведення ремонту плат, модулів за допомогою автоматичного діагностичного та ремонтного обладнання, спільно з з'єднувачами та перехідниками;
- ідентифікаційний номер програмного забезпечення.

Документація по програмному забезпеченню включає опис, довідник користувача, інструкції з обслуговування, першоджерела програм, тестові процедури, програми і дані тестування.

Опис повинен включати:

- уявлення про розв'язуваної за допомогою програмного забезпечення задачі;
- його структуру;
- опис інтерфейсу з апаратною частиною;
- карти вхідних і вихідних сигналів;
- таблиці прошивки і використання пам'яті;
- опису структури переривань;
- методи передачі даних і виявлення помилок;
- опису електричних і механічних інтерфейсів;
- номер версії.

Довідник користувача повинен містити:

- фізичний опис програмного забезпечення з точки зору того, що повинен бачити оператор (з посиланням на вимикачі, органи управління тощо);
- робочу процедуру;
- процедури діагностики в режимі реального часу і в режимі з поділом часу.

Документація щодо забезпечення запчастинами використовується як користувачем, так і складом зберігання запчастин, і представляє собою перелік замінних компонент, номери деталей і номери версій. Ця документація представляється у формі бази даних на дискеті або у вигляді диска CD-ROM.

Програма випробувань містить параметри тестування і процедури проведення випробувань на ремонтному підприємстві або на промисловій базі і включає комплект схем розводки кабелів, проводів на РЕА, що показують з'єднання як всередині пристроїв, так і між ними, а також взаємні з'єднання між РЕА.

Інструкція з монтажу містить інформацію з монтажу обладнання на об'єкті включає в себе:

- дані з розмірами, джерел живлення, по інтерфейсах;
- вимоги щодо охолодження, вентиляції;
- дані по фундаментам, підстав, перегородками та кріплення;
- вимоги по забарвленню, пожежної безпеки і захисту від впливу електричних полів;
- перелік кабелів, хвилеводних трактів, засобів кріплення та інших монтажних матеріалів;
- перелік спеціальних інструментів;
- спеціальні інструкції.

Комплектність документів по обслуговуванню і ремонту містить:

- технічний опис і відомості, необхідні для правильного використання виробу;
- керівництво з технічного обслуговування і поточного ремонту, в тому числі по обслуговуванню і відновлення програмного забезпечення;
- інструкцію по зберіганню і транспортуванню;
- інструкцію з оцінки технічного стану виробу;
- типовий перелік запчастин.

Комплект документів для ремонту включає:

- ремонтні документи;

- спрощений комплект конструкторської документації;
- експлуатаційні документи.

Ремонтні документи включають:

- керівництво по ремонту, в тому числі з ремонту друкарських плат;
- технічні умови на ремонт;
- інструкції по монтажу (демонтажу) і розбирання (складання) виробу, налагодження, регулювання і випробувань блоків та агрегатів РЕЗ;
- відомість ЗІП на ремонт;
- норми витрати запчастин на ремонт;
- перелік обладнання, приладів, пристосувань та інструментів для ремонту і т.д.;
- відомість документів для ремонту.

Керівництво по ремонту включає:

- методики перевірки виробу і його складових частин;
- опис способів повного виявлення несправних складальних одиниць і вузлів виробу;
- методи відновлення (ремонту) або заміни несправних одиниць і деталей, відновлення ресурсу виробу;
- вимоги до проведення комплексних перевірок;
- вимоги стандартів з безпеки праці, виключення з застосування вибухонебезпечних речовин, токсичних рідин і газів.

5.5. Поняття ремонту. Види та методи ремонту

Однією з фаз експлуатації є ремонт апаратури (об'єкта).

Залежно від ступеня зносу і старіння, характеру поломок, від складності та обсягу робіт, необхідних для приведення радіоелектронної апаратури в справний стан, ремонт поділяють на плановий і позаплановий, поточний, середній, капітальний.

Плановий ремонт – це ремонт, передбачений у нормативній документації і який здійснюється в заплановані терміни.

Неплановий ремонт – описується в нормативній документації, але здійснюється в неплановому порядку по мірі необхідності.

Поточний ремонт – ремонт, який виконується для гарантованого забезпечення працездатності об'єкта і полягає в заміні і відновленні його окремих частин та їх регулюванні. Поточний ремонт, як правило, виконує обслуговуючий персонал відразу ж після виникнення (виявлення) відмови апаратури (при використанні за призначенням або при технічному обслуговуванні).

Капітальний ремонт – ремонт, який здійснюється з метою відновлення справності та повного або близького до повного відновлення ресурсу об'єкта із заміною або відновленням його частин та їх регулюванням. Капітальний ремонт проводиться ремонтними підприємствами або на заводі виробнику.

При ремонті радіоелектронної апаратури розрізняють чотири метода;

- 1) ремонт методом заміни і подальшого відновлення;
- 2) ремонт методом заміни відновлюваного елемента;
- 3) ремонт при наявності резервування;
- 4) заміна поточного ремонту профілактичним обслуговуванням.

При експлуатації радіоелектронної апаратури жоден з методів в чистому вигляді не застосовують. Найчастіше використовують комбінацію з декількох методів.

Ремонт методом заміни і подальшого відновлення агрегату, вузла, блоку, модуля застосовується в цілях підвищення готовності апаратури. Іноді даний метод називають агрегатним. Час непрацездатного стану апаратури при цьому значно скорочується, оскільки пошук несправного блоку набагато простіший, ніж пошук несправного елемента схеми, а час заміни зводиться до часу заміни блоку. Однак доцільність застосування зазначеного методу залежить від співвідношення затрат, одержуваних в результаті підвищення

готовності та на збільшення вартості запасних елементів за рахунок великої кількості дорогих запасних блоків, агрегатів, вузлів.

Ремонт методом заміни відновлюваного елемента. До недавнього часу до невідновлювальних елементів радіоелектронної апаратури були резистори, конденсатори, електровакуумні та напівпровідникові прилади. В даний час це плати з друкованим монтажем, спресовані модулі, вузли, блоки тощо. Застосування зазначених елементів дає ряд переваг: менші витрати часу на відшукування і заміну елемента, що відмовив; можливість використання менш кваліфікованого обслуговуючого персоналу; зменшення поломок під час ремонту; забезпечення доступності без шкоди для щільності компонування. При бажанні використовувати такий метод ремонту і скоротити витрати на його проведення виникає задача визначення оптимального розміру відновлюваного елемента.

Заміна модулів економічно вигідніша їх відновлення і надалі очікується більш значне використання ремонту методом заміни не відновлювальних модулів порівняно з ремонтом методом відновлення. Заміна модулів у поєднанні з вбудованими пристроями індикації несправностей майже виключає необхідність у висококваліфікованому обслуговуючому персоналі.

Ремонт при наявності резервування можна розглядати як різновид ремонту без зняття апаратурою від виконання функцій. Замість зняття несправного елемента і установлення запасного останній встановлюють заздалегідь, а фактичну роботу з усунення несправності відкладають до якогось моменту в майбутньому. Таке забезпечення готовності апаратури і відповідний йому метод ремонту вимагають великих витрат.

Замена поточного ремонту профілактичним обслуговуванням є дуже цікавим методом ремонту. Для оцінки можливостей профілактичного обслуговування доцільно відмови апаратури розділити на два види: що піддаються профілактиці і що не піддаються профілактиці.

До профілактуючих відмов відносяться майже всі поступові і частина раптових відмов, закон розподілу часу безвідмовної роботи яких є функцією напрацювання елемента, тобто наявності післядії.

При здійсненні поточного ремонту апаратури розрізняють чотири етапи

- 1) встановлення наявності несправності;
- 2) встановлення характеру відмови і відшукування несправного елемента;
- 3) усунення несправності;
- 4) перевірка апаратури після ремонту.

Всі зазначені етапи ремонту є загальними для всіх раніше перерахованих методів ремонту незалежно від методу пошуку відмови — автоматичного чи ручного. Можна припустити, що і подальше удосконалення методів ремонту апаратури не призведе до зміни даних етапів.

При зіставленні методів ремонту апаратури розподіл загального часу поточного ремонту можна аналізувати по етапах ремонту. При ручному пошуку елементів і ремонті методом заміни відновлюваного елемента для блочної конструкції апаратури співвідношення часу за етапами ремонту приблизно наступне:

встановлення наявності несправності — 3% загального часу ремонту;
встановлення характеру відмови і відшукування несправного елемента – 61%,
усунення несправності — 15%; перевірка апаратури після ремонту -21%.

Кожен етап ремонту апаратури пов'язаний з певними діями (операціями) людини чи машини.

При проведенні поточного ремонту людина ремонтує апаратуру, здійснює наступні операції:

- а) огляд і спостереження;
- б) консультації з обслуговуючим персоналом;
- в) отримання (зі складу) постановка випробувального обладнання, приладів та інструменту;
- г) читання технічних описів, інструкцій з експлуатації та іншої технічної документації;

- д) під'єднання і від'єднання (комутація) випробувального обладнання і приладів;
- е) випробування та вимірювання;
- ж) складання або розбирання;
- з) забезпечення доступності;
- і) чищення і змащення;
- к) видалення, заміна чи відновлення несправного елемента;
- л) отримання матеріалів і елементів для заміни;
- м) знімання і зворотна установка агрегатів, блоків, модулів;
- н) регулювання;
- о) очікування ремонту, через відсутність необхідних матеріалів, елементів або документів;
- п) запис результатів вимірювань

Час усунення несправності може бути по-різному для одного і того ж ремонту. Причин різних значень часу усунення, абсолютно ідентичних несправностей можна привести досить багато: різна кваліфікація і досвід обслуговуючого персоналу, різні умови усунення несправності (температура, тиск, настрій обслуговуючого персоналу), різні конструкції вузлів (доступність, наявність контрольних гнізд).

У загальному випадку час усунення несправності є випадковою величиною, яка найбільш повно описується законом її розподілу.

Закон розподілу активного часу ремонту в основному визна-виділяється методом відшукування несправностей і конструкцією апаратури. Якщо апаратура модульного типу та ремонт здійснюється заміною модуля, то має місце експонентний закон розподілу, часу ремонту. Цей закон справедливий і для відносно простої апаратури

5.6. Пошук несправних елементів в системі

При пошуку відмов під елементом апаратури умовимося розуміти таку самотійну конструктивну частину, яка в разі наявності в неї несправності повністю замінюється.

Близько 64% активного часу поточного ремонту витрачається на пошук несправного елемента.

Відшукування несправності — це повільний і виснажливий процес навіть для досвідченого обслуговуючого персоналу. Тому розробка заходів щодо спрощення відшукування несправності скорочує не тільки основну частку, часу активного ремонту, але і зменшує фізичну і розумову навантаження обслуговуючого персоналу.

До заходів щодо спрощення відшукування несправностей в першу чергу відноситься автоматизація цього процесу. Однак слід критично підходити до використання автоматичних систем відшукування несправностей і застосовувати їх тоді, коли витрати на створення і експлуатацію складних і дорогих самих по собі систем виправдовуються підвищенням ремонтопридатності апаратури.

Незалежно від застосовуваних засобів процес пошуку відмов елемента має дві стадії:

- 1) вибір послідовності перевірки елементів;
- 2) вибір методики (способу) проведення окремих операцій перевірки.

Вибір тієї чи іншої послідовності перевірки та методики проведення окремих операцій залежить від конструкції апаратури або її частини, в якій з'явилася відмова, і може змінюватися у відповідності з особливостями апаратури і наявною інформацією по надійності і трудомісткості перевірки елементів.

При проведенні перевірки справності елементів незалежно від її послідовності поступово наближаються до несправного елемента. Результат перевірки одного елемента дозволяє виключити з розгляду, принаймні, одну з можливих несправностей. В деяких випадках в результаті однієї перевірки

виключаються $n-1$ з можливих несправностей, відразу ж визначається несправний елемент. Кожна перевірка чергового елемента обмежує область апаратури, що підлягає подальшій перевірці. У цьому сенсі закономірність перевірок елементів ґрунтується на методі послідовного наближення. Всі вміння у пошуку несправностей полягає в меншій витраті часу, який визначається як послідовністю проведення перевірок елементів, так і методикою проведення цих перевірок.

Для визначення оптимальної послідовності перевірки елементів розглянемо наступну математичну модель процесу пошуку відмовив елемента.

Апаратура, в якій з'явилася несправність, складається з n елементів. Відмови елементів незалежні. При відмові будь-якого з елементів відмовляє апаратура. Для контролю справності елемента є можливість подати на його вхід контрольний сигнал і перевірити на виході реакцію на цей сигнал. Відомі інтенсивності відмов елементів і потрібну час на перевірку їх справності. Необхідно визначити послідовність перевірок елементів, що забезпечує найменший час пошуку несправності.

Нехай нумерація елементів виконується в порядку перевірки їх справності, Тоді середній час пошуку несправності в схемі буде,

$$K_{ТВ} = \frac{T_{0\Sigma}}{T_{0\Sigma} + T_{P\Sigma} + T_{T0\Sigma}}$$

де — середній час, витрачений на пошук, при відмові γ -го елемента; — умовна ймовірність відмови γ -го елемента за умови відмови схеми.

В свою чергу

$$K_{ТВ} = \frac{T_{0\Sigma}}{T_{0\Sigma} + T_{P\Sigma} + T_{T0\Sigma}}$$

Таким чином,

$$K_{ТВ} = \frac{T_{0\Sigma}}{T_{0\Sigma} + T_{Р\Sigma} + T_{Т0\Sigma}}$$

Нехай вихідна послідовність перевірок справності елементів буде така, що

$$K_{ТВ} = \frac{T_{0\Sigma}}{T_{0\Sigma} + T_{Р\Sigma} + T_{Т0\Sigma}}$$

Утворимо другу послідовність відмінну від першої тим, що спочатку перевіряється 1-й елемент, а потім n -й. Ця послідовність утворюється з першою заміною дк і тй відповідно на

$$K_{ТВ} = \frac{T_{0\Sigma}}{T_{0\Sigma} + T_{Р\Sigma} + T_{Т0\Sigma}}$$

Визначимо, у якому випадку друга послідовність забезпечує менший час пошуку несправності. Цю умову можна записати у вигляді

$$K_{ТВ} = \frac{T_{0\Sigma}}{T_{0\Sigma} + T_{Р\Sigma} + T_{Т0\Sigma}}$$

Після вирахуванняз та обліку отримаємо

$$K_{ТВ} = \frac{T_{0\Sigma}}{T_{0\Sigma} + T_{Р\Sigma} + T_{Т0\Sigma}}$$

З впливає, що друга послідовність забезпечує менший час пошуку несправності тільки в тому випадку, коли відношення середнього часу контролю справності елемента до його умовної ймовірності відмови менше, ніж зазначене ставлення в першій послідовності.

Таким чином, оптимальна послідовність повинна володіти такими властивостями:

Якщо часи контролю справності всіх елементів рівні, то оптимальна послідовність приймає вигляд

$$K_{ТВ} = \frac{T_{0\Sigma}}{T_{0\Sigma} + T_{P\Sigma} + T_{T0\Sigma}}$$

тобто контроль справності елементів слід проводити в порядку убутання умовної імовірності відмов елементів.

Послідовність можна записати в більш зручному вигляді

$$K_{ТВ} = \frac{T_{0\Sigma}}{T_{0\Sigma} + T_{P\Sigma} + T_{T0\Sigma}}$$

Розглянута модель передбачала, що при перевірці справності елемента на його вхід подається контрольний сигнал. Така організація пошуку несправності не завжди є раціональною, бо вимагає великої різноманітності контрольних сигналів. У реальних радіоелектронних схемах є можливість використовувати один або декілька контрольних сигналів для перевірки справності великої кількості елементів. Це явище найбільш типове для схеми, що складається з послідовно з'єднаних елементів.

Нехай є схема, що складається з n послідовно з'єднаних елементів. На вхід першого елемента надходить контрольний сигнал і відомі реакції цього сигналу на виходах кожного з елементів і інтенсивності відмов елементів. В схемі є один несправний елемент. Потрібно визначити оптимальну процедуру перевірки справності елементів схеми з метою виявлення несправного за умови, що часи перевірок всіх елементів однакові.

У вихідному стані відмова може знаходитися в будь-якому з n елементів. Отже, ентропія (невизначеність) стану схеми складе міру

Оскільки сигнал надходить тільки на вхід всієї схеми, то для пошуку несправності послідовно розв'язується задача, в якій з частин схеми знаходиться несправність. З цією метою вимірюється реакція на контрольний сигнал в одній з точок схеми. Якщо реакція відповідає необхідної, то робиться висновок, що несправність в наступній частині схеми, в іншому випадку навпаки.

Таким чином, при першому вимірі отримуємо наступну кількість інформації де k — номер елемента, за якими проводиться вимірювання реакції на контрольний сигнал.

Для скорочення часу пошуку несправності необхідно зменшити число вимірювань, а це можливо при збільшенні кількості інформації, одержуваної від кожного наміри.

Визначимо умову, при якому виходить найбільша кількість інформації, для чого вирішимо рівняння

Таким чином, встановлено, що для досягнення оптимальної процедури пошуку несправності необхідно кожен раз проводити вимірювання реакції на контрольний сигнал у точці схеми, яка ділить передбачувану несправну схему по ймовірності навпіл.

Алгоритм пошуку несправності в цьому випадку наступний

- 1) досліджувана схема ділиться умовної ймовірності відмови навпіл і в точці поділу проводиться випробування;
- 2) в залежності від результату випробування приймається несправної та чи інша частина схеми;
- 3) для несправної частини схеми ця процедура повторюється;
- 4) повторення проводиться до тих пір поки несправним залишиться тільки один елемент.

Для аналітичного представлення процесу пошуку несправного елементу як правило, застосовують його графічне зображення у вигляді програми пошуку несправностей. Умовимося позначати елемент у вигляді прямокутника, а вимірювання у вигляді кола всередині з номерами елемента, за яким

проводиться вимірювання. Тоді програма пошуку несправності буде представляти, собою клітинні схему, що складається з кружечків з двома виходами, що позначають результат вимірювання (є потрібний сигнал або його немає) і закінчується прямокутниками, що позначають несправний елемент.

При пошуку несправностей крім вибору послідовності перевірки справності елементів необхідно вибрати методику (спосіб) перевірки справності конкретного елемента. Розглянемо основні способи перевірки, які використовують на практиці.

Спосіб зовнішнього огляду дозволяє візуально або органами чуття визначити місцезнаходження дефекту. При візуальному огляді можуть бути виявлені згорілі радіоелементи, зміни їх форми, кольору і розмірів, тріщини і відшарування друкованих провідників, неякісна пайка, пошкодження ізоляції, цілісності з'єднувальних проводів, а також поява диму і іскріння.

Несправності деяких елементів, таких як імпульсні трансформатори, динамічні головки, часто виявляються на слух. Місця надмірного нагрівання тих або інших компонентів можна виявити, торкаючись їх рукою. Метод доцільно використовувати на ранніх етапах пошуку несправностей в апаратурі, а також при аварійному режимі роботи пристрою. Аналіз монтажу може проводитися як при ввімкненому, так і при вимкненому пристрої.

Спосіб проміжних вимірювань полягає в вимірюванні параметрів елементів або схем апаратури. Реальні показники можуть відрізнятися допусками від НТД, тому стверджується справність елемента або всієї схеми.

При проведенні пошуку відмов використовують різні контрольно-вимірювальні прилади. Він є найбільш ефективним у тих випадках, коли вже є попередня інформація про місцезнаходження несправності в блоці або модулі. При цьому проводяться спостереження форми електричних сигналів, вимірювання величин постійних та змінних напруг у характерних контрольних точках схеми пристрою, а також вимірювання часових параметрів сигналів (тривалості імпульсів, затримок, частоти і т.д.). У результаті такого аналізу виявляються протиріччя в роботі вузлів, вихід електричних параметрів за межі

зон допусків, і на основі цього робиться висновок про несправності тих чи інших радіоелементів. При проведенні вимірювань використовують вольтметри постійного і змінного струму, осцилографи, частотоміри та інші прилади.

Спосіб заміни полягає у тому, що окремі елементи (блок, модуль, електровакуумні прилади) замінюються на свідомо справні, і при відновленні ознаки нормальної роботи робиться висновок про несправності заміненого елемента. Цей спосіб досить ефективний, якщо знімними елементами є блоки, модулі. Якщо ж замінюються електровакуумні прилади, що найчастіше і буває, то такий спосіб призводить до великих втрат ламп.

Цей метод досить простий і дозволяє досить швидко визначити місце несправності в апаратурі, але його застосування можливо, якщо є завідомо справний блок або модуль, яким можна замінити сумнівний модуль ремонтної апаратури. Природно, що такий спосіб максимально ефективний у виробках, побудованих за модульно-блочним принципом.

Спосіб порівняння еквівалентів полягає у порівнянні режимів роботи елемента з підозрою на відмову з завідомо справним елементом, блоком, вузлом. Даний метод схожий на попередній і полягає в заміні частини схеми подібним їй вузлом або який-небудь сукупністю радіоелементів, які в результаті мають такий же вплив на іншу частину схеми.

Для встановлення факту відмови елемента можна застосовувати декілька методів. Вибір методу обумовлений конструкцією системи, наявності приладів вимірювання і суб'єктивними особливостями.

Спосіб виключення полягає в тому, щоб вилучити на деякий час зі схеми несправної апаратури окремі радіоелементи або вузли та провести аналіз роботи пристрою в цілому. Даний спосіб передбачає тимчасове від'єднання або перемикання виводів підозрілих радіоелементів, що в деяких випадках дозволяє визначити місцезнаходження несправності або конкретно несправний елемент.

Спосіб електричного впливу дозволяє отримати інформацію про місцезнаходження несправності в результаті аналізу реакції схеми на різні маніпуляції, які проводить фахівець, що ремонтує РЕА. До таких маніпуляцій

відносяться: встановлення перемичок; зміну напруги живлення схеми; зміну положення движків змінних і підстроєчних резисторів; замикання контрольних точок на корпус; підключення працездатного конденсатора паралельно іншому радіоелементу; подання електричних сигналів до різних ділянок схеми і інше.

Спосіб механічного впливу (або метод простукування) дозволяє виявити дефекти монтажу і зазвичай застосовується при переміжних відмовах, то коли несправність носить «мерехтливий», періодично повторюваний характер. Причинами таких несправностей є: наявність «холодної» пайки в платах; замикання близько розташованих радіоелементів між собою; замикання сусідніх доріжок на друкованій платі краплями припою, обрізками виводів радіоелементів; зменшення пружності, забруднення або деформація контактів в з'єднаннях, тримачах запобіжників, змінних резисторах; порушення фізичної структури матеріалу і утворення ненадійного механічного контакту в місцях пайки.

Коли ненадійний контакт проявляє себе короткочасним зникненням, він може бути визначений шляхом акуратних ударів гумовим молоточком по місцям пайки радіоелементів та друкованим провідникам плат. Не слід наносити удари по виступаючим з пайок выводам радіоелементів, оскільки вони можуть зігнутися і замкнути сусідні друковані провідники. У разі, якщо при подібному механічному впливі несправність проявилася, необхідно намагатися виявити точне місце поганого контакту. При цьому можна використовувати лупу, з допомогою якої слід ретельно дослідити якість пайки монтажних елементів, або похитати пінцетом вивода радіоелементів з боку монтажу і спостерігати, чи не рухаються вони в місцях пайки.

Іноді поганий контакт таким способом визначити не вдається, оскільки легке постукування не призводить до його порушення. У цьому випадку можна застосувати тонкі палички, виготовлені з ізоляційного матеріалу, наприклад, олівця без грифеля, рукоятки тонкої викрутки і т. п. Нею необхідно водити по платі поперемінно в різних напрямках, спостерігаючи за реакцією на ці дії. При

пошуку місця ненадійного контакту слід чергувати натиск палички на друковану плату від слабкого до значного.

Пошук несправностей за допомогою методу механічного впливу проводиться при включеному живленні.

Спосіб електропрогону застосовують у тих випадках, коли несправність носить не стійкий характер, а метод механічного впливу не дозволяє її виявити. Електропрогон здійснюють шляхом включення радіоелектронного пристрою на тривалий термін з підвищеною напругою живлення (в межах, що допускаються нормативно-технічною документацією), збільшенням температури (тепловий удар) і т.д. Він повинен проводитися під постійним наглядом фахівця, що здійснює ремонт апаратури. Кінцевою метою електропрогону є перетворення оборотних несправностей у схемі у необоротні. Після досягнення їх стійкого прояву слід оперативно, щоб не порушити тепловий режим, провести вимірювання напруги в характерних контрольних точках схеми або на виводах транзисторів (мікросхем) і визначити дефектний радіoeлемент.

Спосіб послідовного контролю полягає в послідовній перевірці проходження електричного сигналу від блоку до блоку, від каскаду до каскаду до виявлення несправності. Даний спосіб доцільно застосовувати при пошуку несправностей у пристроях з незначною кількістю каскадів, виконаних на транзисторах і мікросхемах. Одночасно з перевіркою проходження електричного сигналу контролюються значення постійних напруг на виводах транзисторів і мікросхем, після чого вони порівнюються із значеннями, наведеними в таблицях технічних описів, інструкцій з експлуатації та іншої документації.

Спосіб послідовного контролю проходження сигналу звичайно застосовують за принципом «від кінця до початку», тобто спочатку контроль наявності сигналу здійснюють у вихідній частини пристрою, а потім поступово переміщаються в бік його входу, поки не буде виявлений нормальний сигнал.

Спосіб половинного ділення схеми зазвичай використовують для контролю проходження сигналу в багатокаскадних радіоелектронних

пристроях, що дозволяє значно скоротити час пошуку місця несправності. Суть полягає в уявному поділі схеми пристрою на дві половини. Далі перевіряється наявність сигналу на виході каскаду, розташованого приблизно в середині тієї частини, де знайдено несправність. Якщо дефект не виявлено, решта схеми знову ділиться навпіл, і так далі, поки не буде виявлено несправний каскад.

5.7. Загальна характеристика методів розрахунку надійності ремонтів систем

Показники надійності ремонтів в процесі застосування систем зазвичай звичайно розраховують з напрацювання відновлюваних систем – завжди в календарному часу.

Показники надійності, як правило, визначаються за умови, що в момент включення всі елементи працездатні. Найбільш часто використовуються два методи розрахунку надійності ремонтів систем, які умовно наопиняються: метод інтегральних рівнянь і метод диференціальних рівнянь. Розвиток методу диференціальних рівнянь привело до формування ряду правил визначення шуканих величин безпосередньо за схемою станів.

Метод інтегральних рівнянь заснований на допущенні, що значення часу (напрацювання) між послідовними відмовами відмовами і часу відновлення є незалежними випадковими величинами. Складають і розв'язують інтегральні або інтегро-диференціальні рівняння, що зв'язують імовірності знаходження в різних станах. При цьому немає принципових обмежень на закони розподілу часу напрацювання між відмовами і часу відновлення елементів. Зазвичай порівняно просто скласти самі рівняння.

Однак рішення цих рівнянь часто зустрічає великі труднощі. Точні кінцеві результати можна отримати лише для деяких законів розподілу для дубльованих систем.

Розв'язують системи диференціальних рівнянь методом перетворення Лапласа або яким-небудь іншим методом.

Коли перерви в роботі системи допустимі, в якості показників надійності зазвичай використовують функцію готовності $K_{\Gamma}(t)$ і функцію простою $K_{\Pi}(t)$ або відповідні показники надійності. При цьому часто розглядають сталий режим експлуатації при $t \rightarrow \infty$. Тоді $P'(t)=0$ і система диференціальних рівнянь переходить в систему алгебраїчних рівнянь.

Коли перерви в роботі системи неприпустимі, в якості показників надійності використовуються умовні імовірності безперервної безвідмовної роботи протягом заданого часу виконання завдання при умові, що в початковий момент часу всі елементи системи працездатні. Безпосередньо за схемою станів можна визначити стаціонарні імовірності P_i знаходження системи в k -му стані. Для цього використовується наступне правило:

необхідно рухатися за напрямком стрілок з кожного крайнього стану в k -ий по найкоротшому шляху і перемножити всі інтенсивності переходів, відповідні стрілкам. Таким чином долаються всі шляхи з усіх крайніх станів в кожен стан системи. При розгалуженій схемі станів деякі ділянки шляху доведеться проходити кілька разів. При цьому інтенсивності переходів цих ділянок потрібно враховувати тільки один раз. Імовірність знаходження системи у k -му стані

$$P_k = \frac{\Delta k}{\sum_{j=0}^m \Delta j}$$

де Δk , Δj - добуток інтенсивностей переходів з крайніх станів відповідно у k та j при рухові найкоротшим шляхом в напрямку стрілок, $m+1$ – число станів системи.

5.8. Обчислення функцій готовності та простою систем

Нерезервована система може перебувати в будь-який момент часу t в одному з двох станів; 0 – система працездатна; 1 – система непрацездатна і

ремонтуються. Позначимо імовірність цих станів через $P_0(t)$ і $P_1(t)$. Очевидно, що $K_{\Gamma}(t) = P_0(t)$, $K_{\Pi}(t) = P_1(t)$.

При тривалій експлуатації можуть бути досягнуті встановлені значення $K_{\Gamma} = P_0(t)$, $K_{\Pi} = P_1(t)$.

Розглянемо спочатку випадок, коли час безвідмовної роботи і час відновлення мають експоненціальний розподіл.

На рис. 5.1 наведена схема станів системи, на якій зображені можливі стани і інтенсивності переходів. У відповідності зі схемою рис. 5-1 складемо систему диференціальних рівнянь.

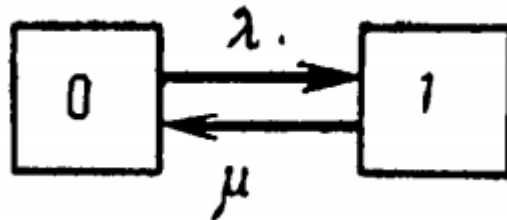


Рис. 5.1. Схема станів простої системи

$$P'_0(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t);$$

$$P'_1(t) = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t).$$

Якщо при $t = 0$ система перебувала в працездатному стані, то початкові умови $P_0(0) = 1$, $P_1(0) = 0$ і в результаті розв'язку системи рівнянь отримаємо:

$$\begin{cases} K_{\Gamma}(t) = P_0(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \exp(-(\mu + \lambda)t); \\ K_{\Pi}(t) = P_1(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} - \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \exp(-(\mu + \lambda)t). \end{cases}$$

Якщо при $t = 0$ система перебувала в ремонті, то початкові умови $P_0(0) = 0$, $P_1(0) = 1$ і в результаті розв'язку системи рівнянь отримаємо:

$$\begin{cases} K_{\Gamma}(t) = P_0(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} - \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \exp(-(\mu + \lambda)t); \\ K_{\Pi}(t) = P_1(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \exp(-(\mu + \lambda)t). \end{cases}$$

При тривалій експлуатації $t \rightarrow \infty$ функції готовності та простою набувають сталого значення та перетворюються у коефіцієнти готовності та простою, які не залежать від початкових умов:

$$\begin{cases} K_{\Gamma} = P_0(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda}; \\ K_{\Pi} = P_1(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda}. \end{cases}$$

Оскільки $\mu = \frac{1}{T_B}$, $\lambda = \frac{1}{T}$ отримаємо відомі вирази для коефіцієнтів готовності та простою:

$$\begin{cases} K_{\Gamma} = \frac{T_B}{T + T_B}; \\ K_{\Pi} = \frac{T}{T + T_B}. \end{cases}$$

Вирази для коефіцієнтів готовності і простою можна записати безпосередньо за схемою станів, використовуючи вищевикладене правило.

При русі у напрямку стрілки зі стану 1 в стан 0 інтенсивність переходу дорівнює μ , а зі стану 0 в стан 1 – λ . Отже,

$$\begin{cases} P_0 = \frac{\mu}{\mu + \lambda}; \\ P_1 = \frac{\lambda}{\mu + \lambda}. \end{cases}$$

5.9. Особливості розрахунку зарезервованих систем

Система, що складається з рівних по надійності одного основного і k резервних елементів, може перебувати в будь-якому з $(k + 2)$ станів:

0 – всі елементи працездатні; 1 – один елемент в непрацездатному стані; j – коли j елементів в непрацездатному стані; $k + 1$, коли $(k + 1)$ елементів в непрацездатному стані.

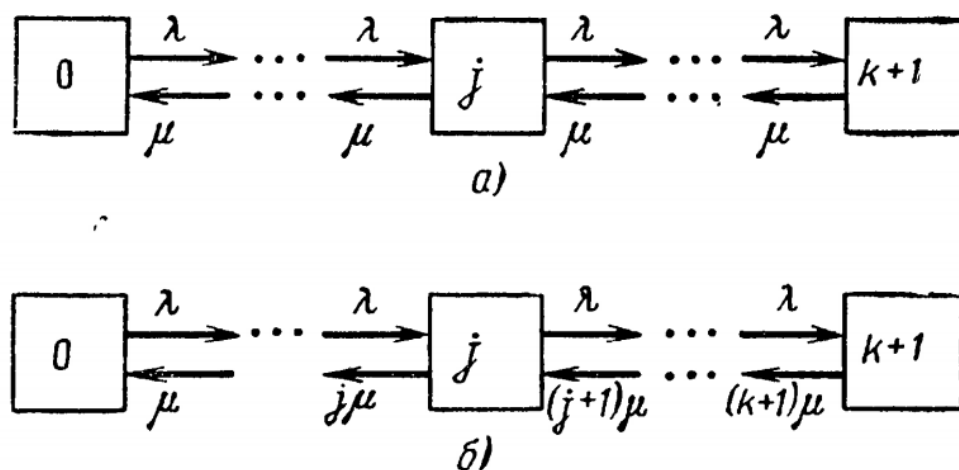


Рис. 5.2. Схема станів системи, що складається з основного і k однакових елементів в ненавантаженому резерві при обмеженому (а) і необмеженому (б) відновленні

Вважаємо, що при заміні працюючого елемента на резервний перерви в роботі системи не відбувається, тому відмова системи настає при одночасній непрацездатності основного і всіх резервних елементів (стан $(k + 1)$).

Розглянемо випадок ненавантаженого резерву з абсолютно надійним перемикачем і однієї ремонтною бригадою, яка обслуговує систему (обмежене відновлення). За припущенням, елементи в ненавантаженому резерві мають інтенсивність відмов $\lambda = 0$. Якщо число непрацездатних елементів більше одного, то існує черга на ремонт. Схема станів системи представлена на рис. 5.2, а.

Система диференціальних рівнянь для нашого прикладу має вигляд:

$$P'_0(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t);$$

.

$$P'_j(t) = \lambda P_{j-1}(t) - (\lambda + \mu)P_j(t) + \mu P_{j+1}(t);$$

.

$$P'_{k+1}(t) = \lambda P_k(t) - \mu P_{k+1}(t).$$

При тривалій експлуатації $t \rightarrow \infty$ система перетворюється у систему алгебраїчних рівнянь:

$$-\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) = 0;$$

.

$$\lambda P_{j-1}(t) - (\lambda + \mu)P_j(t) + \mu P_{j+1}(t) = 0;$$

.

$$\lambda P_k(t) - \mu P_{k+1}(t) = 0.$$

Також систему необхідно додати нормувальною умовою:

$$\sum_{j=0}^{k+1} P_j(t) = 1$$

В результаті розв'язку даної системи отримаємо значення коефіцієнтів простою та готовності.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\Gamma} = P_{k+1} = \frac{1}{\sum_{j=0}^{k+1} (\frac{\mu}{\lambda})^j}; \\ K_{\Pi} = 1 - P_{k+1} = 1 - \frac{1}{\sum_{j=0}^{k+1} (\frac{\mu}{\lambda})^j}. \end{array} \right.$$

Якщо та ж система, що складається з $k + 1$ елементів, обслуговується $(k + 1)$ ремонтними бригадами (необмежене відновлення), то черга на ремонт відсутня. Схема станів для ненавантаженого резерву і не обмеженого відновлення представлена на рис. 5.2, б. В результаті розв'язок системи рівнянь при $P'(t) = 0$ отримаємо:

$$\begin{cases} K_{\Gamma} = P_{k+1} = \frac{1}{\sum_{j=0}^{k+1} \frac{(k+1)!}{j!} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{k+1-j}}; \\ K_{\Pi} = 1 - P_{k+1} = 1 - \frac{1}{\sum_{j=0}^{k+1} \frac{(k+1)!}{j!} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{k+1-j}}. \end{cases}$$

Схеми станів для системи, що складається з одного основного і k елементів, в навантаженому резерві наведені на рис. 5.3, а – для обмеженого відновлення і б – для необмеженого відновлення.

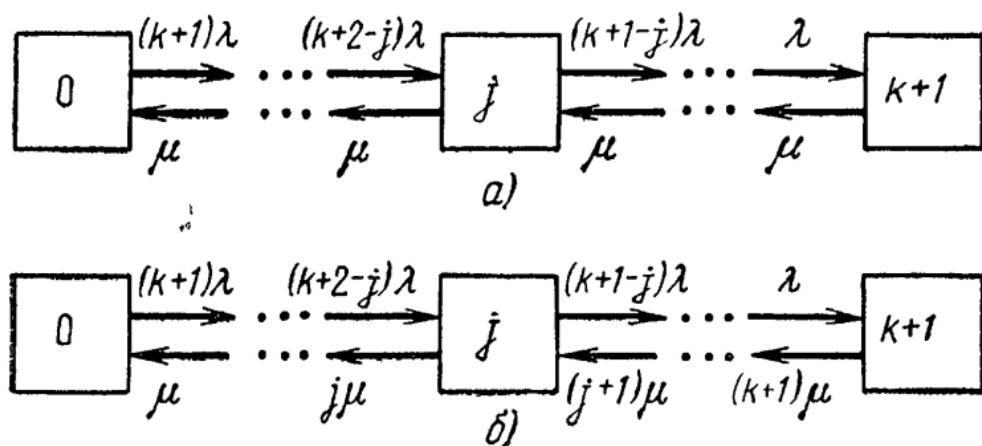


Рис. 5.3. Схема станів системи, що складається з основного і k елементів в навантаженому резерві при обмеженому (а) і необмеженому (б) відновлення

Аналогічними перетвореннями отримаємо:

для обмеженого відновлення:

$$\begin{cases} K_{\Pi} = P_{k+1} = \frac{1}{\sum_{j=0}^{k+1} \frac{1}{j!} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^j}; \\ K_{\Gamma} = 1 - K_{\Pi}. \end{cases}$$

для необмеженого відновлення:

$$\left. \begin{aligned} K_{\Pi} &= \left(\frac{\lambda}{\mu + \lambda}\right)^{k+1}; \\ K_{\Gamma} &= 1 - \left(\frac{\lambda}{\mu + \lambda}\right)^{k+1} = \sum_{j=0}^k C_{k+1}^{k+1-j} \times \\ &\times \left(\frac{\mu}{\mu + \lambda}\right)^{k+1-j} \left(\frac{\lambda}{\mu + \lambda}\right)^j. \end{aligned} \right\}$$

В деяких випадках можливі варіанти, коли після певної кількості відмов і відновлень настає час, коли прилад відновленню не підлягає. Приклад представлення схеми станів такого варіанту наведено на рис. 5.4.

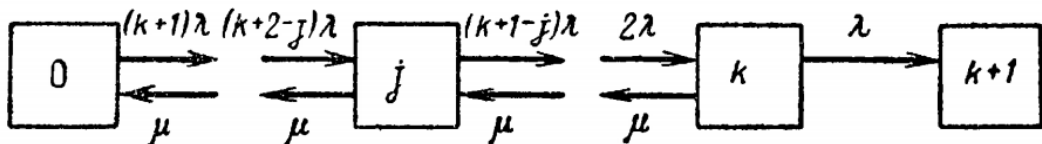


Рис. 5.4. Схема станів системи, що складається з основного і k елементів в навантаженому резерві. Стан $(k + 1)$ є поглинаючим

Методика розрахунку таких систем аналогічна попереднім розглянутим варіантам, в останньому рівнянні буде лише одна складова.

Питання для самоконтролю

Скільки часу займає усунення несправності у приладі при ручному пошуку відмов?

- А) 10%;
- Б) 25%;
- В) 60%;
- Г) 15%;
- Д) 75%.

Як визначається оптимальний період регламентних робіт для чергової апаратури яка в період експлуатації більший час знаходиться в стані очікування експлуатації?

- А) використовують метод розрахунку як і для апаратури неперервної дії;
- Б) використовують метод розрахунку як і для апаратури разової дії;
- В) для такої апаратури не можна розрахувати оптимальний період профілактик;
- Г) період регламентних робіт назначають календарно, що записують в техпаспорті.
- Д) визначається графіком роботи майстра.

Якщо систему обслуговує одна ремонтна бригада і при надходженні більш ніж однієї заявки на ремонт виникає черга, то таке відновлення називають

- А) обмеженим;
- Б) необмеженим;
- В) навантаженим;
- Г) черговим;
- Д) складним.

Скільки часу займає перевірка справності апаратури після ремонту?

- А) 10%;
- Б) 21%;
- В) 60%;
- Г) 15%;
- Д) 75%.

Як визначається оптимальний період регламентних робіт для чергової апаратури яка в період експлуатації більший час працює під струмом?

- А) використовують метод розрахунку як і для апаратури неперервної дії;
- Б) використовують метод розрахунку як і для апаратури разової дії;
- В) для такої апаратури не можна розрахувати оптимальний період профілактик;
- Г) період регламентних робіт назначають календарно, що записують в техпаспорті.
- Д) визначається графіком роботи майстра.

Якщо систему обслуговує не одна ремонтна бригада і при надходженні більш ніж однієї заявки на ремонт черги не виникає, то таке відновлення називають

- А) обмеженим;
- Б) необмеженим;
- В) навантаженим;
- Г) черговим;
- Д) складним.

Список літератури

1. Леонов А.И. Дубровский Н.Ф. Основы технической эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для ВУЗов. –М.: Легпромбытиздат, 1991. -272с.
2. Б.П, Хабаров, Г.В. Куликов, А.А. Парамонов Техническая диагностика и ремонт бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие; Под общей редакцией Г.В.Куликова. – М.: Горячая линия-Телеком. 2004 - 376 с: ил.
3. Сафарбаков А.М., Лукьянов А.В., Пахомов С.В. Основы технической диагностики: учебное пособие. – Иркутск: ИрГУПС, 2006. – 216 с.
4. Бенда Дитмар Поиск неисправностей в электрических схемах; Пер. с нем. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 256 с: ил.
5. Джейкокс Дж. Руководство по поиску неисправностей в электронной аппаратуре: Пер. с англ. М.: Мир, 1989.176 с., ил.
6. Мисюль П. И.Техническое обслуживание и ремонт бытовой радиоаппаратуры: Спецтехнология: Учеб. пособие / П. И. Мисюль. - Мн.: Выш. шк., 2002. - 320 с: ил.
7. П.И. Мисюль РЕМОНТ, НАСТРОЙКА И ПРОВЕРКА БЫТОВОЙ РАДИОАППАРАТУРЫ – Мн.: Высш. шк., 2006. - 271 с: ил.
8. Пис Р.А.Обнаружение неисправностей в аналоговых схемах Москва: Техносфера, 2007. – 192с.
11. Томел Д., Уидмер Н. Поиск неисправностей в электронике / Д. Томел, Н. Уидмер ; пер. с англ, С. О. Махарадзе. – М.: НТ Пресс, 2007. – 416 с.: ил.
12. Дэвидсон Г. Л.Поиск неисправностей и ремонт электронной аппаратуры без схем: Пер.с англ. - М: ДМК Пресс, 2002. - 544 с: ил.
13. Шишонок Н.А., Репкин В.Ф, Барвинский Л.Л. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники.- М.: Сов. радио, 1964.
14. Широков А.М. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры. - В. школа, 1965.

15. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие для студентов вузов/ А.К. Быкадоров, Л.И. Кульбан и др.; Под ред. Лавриненко В.Ю. - М.: В. школа, 1978.
16. ГОСТ 20.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
17. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным.
18. Демьянчук В.С. Надежность обслуживаемых радиоэлектронных систем. - Киев: ВШ, 1976.
19. Базовский И. Надежность. Теория и практика. - М.: Мир, 1965. Павленко К И.

ГЛОСАРІЙ

Автономне резервування standalone redundancy
Безвідмовність reliability
Біноміальний розподіл binomial distribution
Відмова failure
Відновлювані repairable
Вірогідність authenticity
Внутрішньоелементне резервування inside the element redundancy
Гамма-відсотковий ресурс gamma-percentile resource
Гамма-відсотковий термін gamma-percentile
збережуваність storability time
Гамма-відсотковий термін роботи gamma-percentile useful life
Гамма-розподіл gamma-distribution
Геометричний розподіл geometric distribution
Граничний стан limiting state
Довговічність durability
Довірчі межі confiding limits
Дублювання duplication
Експоненціальний розподіл exponential distribution
Загальне резервування whole system redundancy
Змінне резервування variables redundancy
Інтегральна функція integral function
Інтенсивність intensity
Інтенсивність відмов intensity failure
Інтенсивність відновлення intensity restoration
Інтенсивність потоку відмов intensity flow failure
Інформаційне резервування information redundancy
Імовірність безвідмовної роботи probability reliability work
Імовірність відмови probability failure

Імовірність відновлення probability restoration
Ковзне резервування sliding redundancy
Коефіцієнт відновлення coefficient of restitution
Ресурс resource
Коефіцієнтом вимушеного простою coefficient forced down-time
Коефіцієнт готовності coefficient readiness
Коефіцієнтом оперативної готовності coefficient operational readiness
Комплексні показники надійності integrated indicators of dependability
Контрольні випробування control testing
Кратність резервування redundancy ratio
Критерій відмови failure criterion
Навантажений резерв loaded reserve
Надійність dependability
Надійність програмного забезпечення dependability of software
Напрацювання operating time
Напрацювання до відмови operating time to failure
Напрацювання між відмовами operating time between failures
Невідновлювані non-repairable
Ненавантажений резерв unloaded reserve
Нестабільність instability
Нормальний закон розподілу normal law of distributing
Нормування надійності dependability specification
Одиничне резервування single redundancy
Параметр потоку відмов parameter of stream failure
Показник надійності dependability index
Полегшений резерв reduced reserve
Постійне резервування continuous redundancy
Потік відмов stream failure
Працездатність up state
Програмна надійність software dependability

Резервування redundancy
Резервування заміщенням standby redundancy
Резервування з дробовою кратністю redundancy of sampling scheme
Резервування постійне continuous redundancy
Ремонтопридатність maintainability
Ресурс useful life
Рівномірний розподіл uniform distribution
Роздільне резервування segregated redundancy
Розподіл Вейбулла distribution of Veybulla
Розподіл Пуассона Poisson distribution
Розподіл Релея Rayleigh distribution
Середній час відновлення mean time to recovery
Середній ресурс average resource
Середнє напрацювання mean operating time
Середня інтенсивність відмов mean intensity failure
Статистичні оцінки statistical estimations
Структурна надійність structural dependability
Структурне резервування structural redundancy
Стійкість stability
Теорія надійності theory of dependability
Термін експлуатації term operation
Термін збереженості storability time
Термін роботи useful life
Технічний засіб hardware
Тимчасове резервування temporal redundancy
Функція готовності function readiness
Функція розподілу потоку відмов function distribution flow failure
Частота відмов failure rate
Щільність імовірності density probability

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

Б

Безвідмовність, 7, 49

В

Відмова 7, 9, 95

- апаратна, 46
- метрологічна, 8, 41
- основного елемента, 113
- програмна, 46, 49

Вірогідність

- безвідмовної роботи, 41, 42
- відмови, 49
- метрологічної справності, 8
- помилки програми, 51

Випробування

- визначальні, 32
- контрольні, 32
- програм, 46

Г

Гамма-відсотковий

- ресурс, 23
- термін роботи, 22

Гамма-розподіл, 69

Граничний стан, 7

Граф станів, 115, 116, 118

Д

Довговічність, 6, 7, 23, 51

Довірчі межі, 8, 28

- ймовірності відмови, 31

Дублювання, 131

Е

Експоненціальний розподіл, 26, 62

З

Захищеність, 51

Збережуваність, 7

156

І

Інтегральна функція, 8, 30

Інтенсивність

- апаратних відмов, 47

- відмов, 8, 10, 21, 24, 25, 36, 39, 40, 54, 55,

- 58, 59, 63, 67, 69, 70, 75, 85, 90,

- 91, 95, 102, 110, 114, 124, 128,

- 134, 142, 144, 145

- відновлення, 18

- метрологічних відмов, 8

- потоку відмов, 15, 47

Й

Ймовірність

- безвідмовної роботи, 8, 21, 24, 38, 40, 42, 54, 63, 69, 72,

- 83, 105, 108, 113, 132, 133, 135,

- 136, 137, 139, 140, 141, 142, 144,

- 146, 148

- відмови, 8, 10, 35, 38, 72

К

Коефіцієнт

- готовності, 21, 22, 51, 85, 96, 115

- відновлення ресурсу, 19

- оперативної готовності, 21

Комплексні показники надійності, 20

Кратність резервування, 131

Критерій відмови, 7

М

Метрологічна

- відмова, 8

- надійність, 8, 41

- справність, 8

- ймовірність безвідмовної роботи, 42

Н

Надійність, 6

157

- програмна, 45

- програмного забезпечення, 45

- структурна, 23

Напрацювання, 7

- до відмови, 7, 14, 15, 17, 18, 40, 54, 55, 59, 69

- між відмовами, 7

- на метрологічну відмову, 8

- середнє, 14, 30, 37, 39, 54, 63, 85, 103, 134

Нестабільність, 8, 41

Нормування надійності, 6

П

Параметр потоку відмов, 17

План контролю, 33

Показник надійності, 8

- відновлювані, 7

- комплексні, 20

- невідновлювані, 7

Потік відмов, 14

Працездатність, 6

Р

Резерв

- навантажений, 127
- ненавантажений, 128
- полегшений, 128

Резервування

- автономне, 129
- внутрішньоелементне, 130
- з цілою і дробовою кратністю, 24, 137, 140
- загальне, 129, 137
- заміщенням, 24, 130
- змінне, 130
- інформаційне, 126
- ковзне, 144
- мажоритарне, 143
- одиничне, 130
- постійне, 24, 130
- роздільне, 130
- структурне, 126, 127
- тимчасове, 124, 127

Ремонтопридатність, 6, 7, 125

Ресурс, 7, 19, 23, 90, 148

158

Розподіл

- біномінальний, 78
- Вейбулла, 59, 54
- гамма, 69
- експоненціальний, 62, 111

- норм надійності, 83, 93,
- нормальний, 70
- Пуассона, 80
- Релея, 67
- рівномірний, 77

С

Середній час відновлення, 7

Середній ресурс, 23

Середнє напруження, 8, 11, 14, 30, 37, 44, 45, 54, 63, 85,
102, 103, 110, 134, 136, 137, 144

Середня інтенсивність відмов, 10

Статистичні оцінки, 11

Стійкість, 51

Т

Теорія надійності, 6

Термін експлуатації, 7

Термін збереженості, 23

Термін роботи, 22

Ф

Функція готовності, 21

Функція розподілу потоку відмов 15

Ч

Частота відмов, 8, 9, 11, 63, 67, 69, 71, 137

Щ

Щільність імовірності, 9