

А .М. ЗАЛУЖНИЙ

**НАДІЙНІСТЬ
ТА ДІАГНОСТИКА
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

ВСТУП

Теорія надійності – це наука, яка вивчає процеси виникнення відмов в технічних системах (пристроях) з метою визначення причин їх виникнення та вироблення відповідних способів по їх усуненню.

Основною задачею теорії надійності є створення безвідмовних технічних систем, здібних ефективно працювати в різних умовах експлуатації.

Теорія надійності досить молода наука. Її формування почалось в 50-х роках XX століття. Однак це не означає, що надійністю технічних систем, які створювались спеціалістами, ніхто не займався.

Проблемою надійності почали займатися ще з тих пір, як з'явилась техніка. Поки промислові пристрої були досить простими, задачі по забезпеченню надійності вирішувались, як правило, на основі інженерного досвіду. Інформацію про надійність пристроїв, якої не доставало, довгий час одержували в процесі експлуатації пристроїв, яку потім використовували при їх удосконаленні.

В 50-х роках почався стрімкий розвиток електроніки, приладобудування, обчислювальної техніки, автоматизованих систем управління (АСУ), які застосовувались в різних галузях народного господарства. Старі методи забезпечення надійності при створенні складних технічних систем не могли забезпечити вимоги по їх надійності.

Особливо велике значення надійності надавалось військовим системам. Недостатня їх надійність призводила до не виконання такими системами поставлених бойових задач.

Відсутність теоретичних методів забезпечення надійності не дозволяло створювати технічні системи з потрібним рівнем надійності. Все це обумовило необхідність розробки принципово нових методів і способів оцінки надійності технічних систем при їх проектуванні.

Для вирішення указаної задачі вимагався науковий підхід, що стало причиною прискореного розвитку теорії надійності.

Вивчення теорії надійності пов'язано з відмовами, які виникають під час роботи систем. Відмови є випадковими подіями. Їх поява залежить від багатьох та досить часто випадкових причин.

Досвід застосування електронних систем показав, що без проведення спеціальних заходів по забезпеченню надійності такі системи є недостатньо ефективними при експлуатації.

Надійність – один з основних технічних показників якості електронних технічних систем, за допомогою якого оцінюються такі важливі характеристики систем, як безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність.

Проблемі забезпечення надійності створюваних сучасних електронних систем надається першорядне значення. Це зумовлено тим, що створення складних (багатофункціональних) систем різного призначення, складених з великої множини функціонально пов'язаних між собою елементів, призводить до зниження їх експлуатаційної надійності і, як наслідок, погіршення техніко-економічних показників при їх застосуванні.

Особливо великі вимоги по надійності приділяються до технічних систем управління технологічними процесами на хімічних підприємствах, атомних електростанціях, а також до систем управління злетом і посадкою літаків та космічних апаратів, коли недостатня надійність цих систем може призвести до катастрофічних наслідків.

Не дивлячись на постійне поліпшення характеристик надійності комплектуючих виробів, проблема надійності електронних систем залишається однією з головних, оскільки подальший розвиток науки і техніки супроводжується створенням принципово нових систем та пристроїв, які застосовуються не тільки в сферах управління і промислового виробництва, але і в інших областях техніки, в тому числі і в побутовій.

Для оцінки рівня надійності на стадії проектування потрібно проводити складні, а часом трудомісткі випробування на надійність, що не завжди економічно виправдано, а інколи технічно неможливо в зв'язку з відсутністю відповідного випробувального устаткування.

Знання основ теорії надійності, методів аналізу надійності систем дозволяє застосувати альтернативні методи оцінки

надійності з використанням аналітичних методів розрахунку показників надійності при проектуванні систем, що дозволяє виключити не тільки частину дорого витратних випробувань, але і скоротити час на розробку та створення систем з потрібним рівнем надійності.

Теорія надійності знайшла найбільш широке застосування при розробці, проектуванні, виробництві та експлуатації систем різного призначення.

1. ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

1.1. Основні терміни та визначення

В теорії надійності використовуються цілий ряд термінів без яких неможливо аналізувати надійність технічних систем. Згідно діючого **ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення**, наводимо основні терміни та їх визначення:

♦ **об'єкт** – система, підсистема, апаратура, пристрій, елемент чи будь-яка їх частина, що розглядається з погляду надійності як самостійна одиниця;

♦ **елемент** – об'єкт, який являє собою найпростішу частину системи, окремі частини якого не підлягають розгляду як самостійна одиниця;

♦ **обслуговуваний об'єкт** – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування передбачено нормативно-технічною та (чи) конструкторською документацією;

♦ **необслуговуваний об'єкт** – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування не передбачено нормативно-технічною документацією;

♦ **ремонтний об'єкт** – об'єкт, ремонт якого можливий та передбачений нормативною та (чи) конструкторською документацією;

♦ **неремонтний об'єкт** – об'єкт, ремонт якого неможливий чи непередбачений нормативною, ремонтною та (чи) конструкторською (проектною) документацією;

♦ **відновлюваний об'єкт** – ремонтний об'єкт, який після відмови та усунення несправності знову стає здатним виконувати необхідні функції з заданими кількісними показниками надійності;

♦ **невідновлюваний об'єкт** – об'єкт, ремонт якого неможливий чи не дозволяє відновити працездатність із заданими кількісними показниками надійності;

♦ **надійність** – властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції в заданих

режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

Надійність об'єкта – комплексна властивість, яка визначає якість об'єкта, його придатність до використання по призначенню.

Під якістю продукції розуміють сукупність її властивостей, що обумовлюють придатність продукції для задоволення визначених вимог згідно з її призначенням. Одною з властивостей цієї сукупності є надійність.

В залежності від призначення об'єкта та умов його застосування надійність об'єкта оцінюється такими кількісними показниками: безвідмовності, довговічності, ремонтопридатності та збережуваності, або сукупністю цих властивостей.

Безвідмовність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку. Ця властивість особливо важлива для об'єктів, відмови в роботі яких пов'язані з небезпекою для життя людей.

Довговічність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту.

Довговічність характеризується тривалістю роботи об'єкта по сумарному наробітку, яка може перериватись періодами для відновлення його працездатності в планових і непланових ремонтах та при технічному обслуговуванні.

Ремонтотпридатність – властивість об'єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування та ремонту.

Важливість ремонтотпридатності технічних пристроїв визначається витратами на їх ремонт та готовність для виконання своїх функцій.

Збережуваність – властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції під час і після зберігання та транспортування.

Роль цієї властивості дуже значна для об'єктів, які довгий час знаходяться на зберіганні до того часу, коли їх застосують.

Готовність – властивість об'єкта бути здатним виконувати потрібні функції в заданих умовах у будь-який час чи протягом заданого інтервалу часу за умови забезпечення необхідними зовнішніми ресурсами. Ця властивість залежить від поєднання властивостей безвідмовності, ремонтопридатності та забезпечення технічного обслуговування та ремонту.

В залежності від стану, в якому може знаходитись об'єкт, використовують наступні терміни:

- ♦ **справність** – стан об'єкта, за яким він здатний виконувати усі задані функції об'єкта;

- ♦ **несправність** – стан об'єкта за яким він нездатний виконувати хоч би одну із заданих функцій об'єкта.

Несправність часто є наслідком відмови, але може бути й без неї;

- ♦ **працездатний стан** – стан об'єкта, який характеризується його здатністю виконувати усі потрібні функції;

- ♦ **непрацездатний стан** – стан об'єкта, за яким він нездатний виконувати хоч би одну з потрібних функцій;

- ♦ **критичний стан** – стан об'єкта, який може призвести до травмування людей, значних матеріальних збитків чи інших неприйнятних наслідків;

- ♦ **граничний стан** – стан об'єкта, за яким його подальша експлуатація недопустима чи недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне.

Критерієм граничного стану є ознака або сукупність ознак граничного стану об'єкта, встановлених нормативною та конструкторською документацією;

- ♦ **незначна несправність** – несправність, що не порушує жодної з потрібних функцій об'єкта;

- ♦ **значна несправність** – несправність, що порушує хоча б одну з потрібних функцій об'єкта;

- ♦ **часткова несправність** – несправність, що викликає нездатність об'єкта виконувати частину потрібних функцій;

- ♦ **повна несправність** – несправність, що характеризується повною нездатністю об'єкта виконувати потрібні функції;

◆ **конструкційна несправність** – несправність, яка спричинена недосконалістю проекту об'єкта;

◆ **виробнича несправність** – несправність, що спричинена невідповідністю ходу виробництва проекту об'єкта чи встановленим виробничим процесом;

◆ **дефект** – кожна окрема невідповідність об'єкта встановленим вимогам;

◆ **пошкодження** – подія, яка полягає в порушенні справнього стану об'єкта коли зберігається його працездатність;

◆ **відмова** – подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто в порушенні працездатного стану об'єкта;

◆ **збій** – самоусувна відмова або одноразова відмова, яку можна усунути.

Серед термінів, які стосуються тривалості та обсягу роботи, є такі:

◆ **наробіток** – тривалість чи обсяг роботи об'єкта. Наробіток може бути як неперервною величиною (тривалість роботи в годинах, кілометрах пробігу тощо), так і цілочисельною величиною (кількість робочих циклів, запусків тощо);

◆ **наробіток до відмови** – наробіток об'єкта від початку експлуатації до виникнення першої відмови;

◆ **наробіток між відмовами** – наробіток об'єкта від завершення відновлення його працездатного стану до виникнення його наступної відмови;

◆ **ресурс** – сумарний наробіток об'єкта від початку його експлуатації чи поновлення після ремонту до переходу в граничний стан;

◆ **залишковий ресурс** – сумарний наробіток об'єкта від моменту контролю його технічного стану до переходу в граничний стан;

◆ **призначений ресурс** – сумарний наробіток, при досягненні якого експлуатацію об'єкта належить припинити незалежно від його технічного стану;

◆ **термін служби** – календарна тривалість експлуатації об'єкта від початку чи її поновлення після ремонту до переходу в граничний стан;

♦ **призначений термін служби** – тривалість зберігання та транспортування об'єкта, протягом якої значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції, перебувають у заданих межах;

♦ **термін збережуваності** – календарна тривалість зберігання та (чи) транспортування об'єкта, протягом якої значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції, перебувають у заданих межах;

♦ **призначений термін зберігання** – календарна тривалість зберігання, після досягнення якої зберігання об'єкта належить припинити незалежно від його технічного стану.

Після закінчення призначеного ресурсу (терміну служби, терміну зберігання), як правило, об'єкт вилучають з експлуатації та приймають відповідне рішення, передбачене нормативно-технічними документами: відправити об'єкт в ремонт, списати, або перевірити та встановити новий ресурс;

♦ **тривалість відновлення** – інтервал часу, протягом якого об'єкт перебуває в непрацездатному стані через відмову;

♦ **тривалість технічного обслуговування (ремонту)** – інтервал часу, протягом якого виконується вручну чи автоматично операція технічного обслуговування та (чи) ремонту об'єкта, включно з тривалістю затримок через незабезпеченість матеріальними ресурсами;

1.2. Класифікація та фізика відмов

Поняття відмови являється основним при оцінці надійності технічних систем. При цьому під відмовою розуміють подію, яка полягає у порушенні працездатного стану об'єкта. Це означає, що об'єкт втратив можливість виконувати свої функції.

Відмови можна класифікувати по таким основним ознакам (табл 1.1). Розглянемо більш детально характер виникнення відмов.

Відмова елемента – явище випадкове, але причини, що обумовлюють виникнення відмови, пов'язані з певними фізичними та фізико-хімічними процесами, що відбуваються в матеріалах і конструкції на різних етапах життя елемента.

Потік цих процесів залежить як від режиму роботи (внутрішні умови), так і від зовнішніх умов роботи елемента: температури, вологості, тиску, вібрації, ударів, дії радіаційного випромінювання та інше).

Таблиця

Класифікація відмов

Ознака класифікації	Вид відмови
1. Характер зміни основного параметра виробу до моменту виникнення відмови	Раптова Поступова
2. Можливість наступного використання виробу після виникнення відмови	Повна Часткова
3. Стійкість непрацездатності	Стійка Самоусувна
4. Зв'язок між відмовами	Незалежна Залежна
5. Наявність зовнішніх проявів відмови	Явна(очевидна) Неявна(прихована)
6. Причини виникнення відмови: ◆ при конструюванні (помилка конструктора, недосконалість методів конструювання) ◆ при виготовленні (порушення технології, недосконалість технології) ◆ при експлуатації (порушення правил експлуатації, зовнішні дії, невластиві нормальній експлуатації)	Конструкційна Виробнича Експлуатаційна

По характеру зміни параметрів відмови поділяються на раптові та поступові.

Раптові відмови це такі відмови, які неможливо передбачити попередніми дослідженнями чи технічним наглядом. Такі відмови характеризуються різкою, практично миттєвою зміною одного або декількох параметрів виробу. Раптові відмови, як

правило, проявляються у вигляді механічних пошкоджень елементів (полонки, тріщини, обриви, пробою ізоляції та інше).

Причиною виникнення раптових відмов є перевищення діючими навантаженнями межі допустимих значень для даного матеріалу, або елемента.

Раптові відмови, звичайно, є результатом прихованих недоліків технології виробництва та конструктивних дефектів, пов'язаних з неправильним застосуванням елементів у виробі, а також помилки обслуговуючого персоналу при експлуатації виробу.

Поступові (параметричні) відмови це такі відмови, які спричинені поступовими змінами значень одного чи декількох параметрів виробу в залежності від наробітку виробу, або зносу його окремих елементів, що призводить до відмови виробу.

Слід відмітити, що появі раптових відмов звичайно передують приховані від спостереження зміни фізичних властивостей елементів, в результаті чого ці зміни можуть з часом досягти критичних значень, коли настає його відмова. Тому поділ відмов на раптові і поступові носить досить умовний характер.

Повною або стабільною відмовою називають відмову, що призводить до повної неспроможності виробу виконувати жодну з потрібних функцій, поки не буде усунена причина відмови.

Частковою відмовою виробу називають відмову, що призводить до неспроможності виробу, виконувати частину потрібних функцій. Наприклад, зниження коефіцієнта підсилення радіоприймача, що не виключає можливості вести деякий час прийом з меншою ефективністю.

В залежності від зв'язку з іншими відмовами розрізняють незалежні і залежні відмови. Незалежна відмова – це така відмова, яка не спричинена відмовою або несправністю іншого виробу. Залежною відмовою називають відмову, яка спричинена відмовою або несправністю іншого виробу.

По легкості виявлення відмови можуть бути очевидними (явними) або прихованими (неявними). Очевидними відмовами є такі, що виявляються візуально чи штатними методами і

засобами контролю та діагностики під час підготовки виробу до використання чи в процесі його використання за призначенням.

Приховані відмови є такі, що не виявляються візуально чи штатними методами і засобами контролю та діагностики, але виявляються під час проведення технічного обслуговування чи спеціальними методами діагностики.

По причинах відмови прийнято ділити на відмови, які викликані обставинами під час проектування, виробництва чи використання виробу.

1.3. Класифікація об'єктів

В залежності від призначення та конструкції технічних об'єктів (пристроїв, систем) для характеристики їх надійності застосовують різні кількісні показники надійності.

Усі технічні об'єкти, що розглядаються в теорії надійності, поділяються на дві групи, які відрізняються показниками надійності та методами їх оцінки:

- 1) невідновлювані об'єкти;
- 2) відновлювані об'єкти.

Відновлювані об'єкти в свою чергу діляться на:

- ◆ відновлювані поза процесом застосування;
- ◆ відновлювані в процесі застосування, для яких перерви в роботі не допускаються;
- ◆ відновлювані в процесі застосування, для яких перерви в роботі допускаються.

Невідновлювані об'єкти - це об'єкти, працездатність яких у випадку відмови, не підлягає відновленню при застосуванні. Невідновлювані об'єкти можуть бути як ремонтowanими, так і неремонтowanими.

При аналізі надійності, а також при виборі показників надійності слід враховувати рішення, яке може бути прийнятим у випадку відмови об'єкта.

Так, якщо в процесі застосування об'єкта відновлення працездатності даного об'єкта у випадку його відмови по яким-небудь причинам признається недоцільним або нездійсненим (наприклад, із-за неможливості перерву виконуваної функції), то

такий об'єкт в даній ситуації є невідновлюваним. Таким чином, один і той же об'єкт в залежності від умов та етапів експлуатації може вважатись відновлюваним або невідновлюваним.

До невідновлюваних об'єктів відносяться вироби одноразового застосування, які до моменту його застосування по призначенню, як правило, на протязі тривалого часу знаходяться у стані зберігання.

У більшості випадків, проте, мають справу з оперативно невідновлюваними об'єктами. Це означає, що в процесі роботи такі об'єкти не можуть бути відновлені у випадку відмови, але в процесі зберігання, а також при підготовці до застосування такі об'єкти можуть відновлюватись в разі потреби.

У якості прикладу можна навести непілотовані космічні апарати. Так, на етапі зберігання космічні апарати відносяться до відновлюваних об'єктів, а під час польоту в космосі є невідновлюваними.

На практиці найбільш часто мають справу з відновлюваними об'єктами. Відновлювані об'єкти - це ремонтовані об'єкти, працездатність яких у випадку відмови, підлягає відновленню при їх застосуванні. До відновлюваних об'єктів відносяться об'єкти багаторазового використання.

Відновлювані об'єкти в процесі застосування поділяються на об'єкти, для яких недопустимі перерви в роботі (резервовані системи) та відновлювані, для яких допустимі короточасні перерви в роботі.

У випадку відмови відновлюваних об'єктів в процесі їх застосування такі відмови або несправності усуваються шляхом відповідного ремонту. При цьому самі об'єкти складаються, як правило, з неремонтованих виробів (компонентів), які у випадку відмови або несправності підлягають заміні справними.

Для відновлюваних об'єктів перехід з основного (працездатного) стану в граничний стан визначається настанням моменту, коли подальша експлуатація об'єктів технічно неможлива або недоцільна з таких причин:

- 1) стає неможливим подальша підтримка його безпеки, безвідмовності або ефективності на мінімально допустимому рівні при технічному обслуговуванні;

2) в результаті фізичного зносу або морального старіння об'єкта.

2. ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ

2.1. Показники надійності невідновлювальних об'єктів

До невідновлюваних об'єктів відносяться об'єкти, працездатність яких у випадку відмови не відновлюється. Такі об'єкти працюють до першої відмови.

При розгляді кількісних показників надійності невідновлюваних об'єктів, приймаємо, що кожен об'єкт в момент часу $t = 0$ є працездатним. При цьому моментом $t = 0$ вважаємо час початку роботи (експлуатації) об'єкту, а інтервал часу $[0, t]$ – наробіток об'єкту від початку роботи до першої відмови, яка виникає в момент часу t .

Оскільки відмови об'єктів є випадковими подіями, які виникають у будь-який, раніше не відомий момент часу, то для кількісної характеристики надійності невідновлюваних об'єктів використовуються імовірнісні характеристики, за допомогою яких проводиться оцінка випадкової величини T – наробіток об'єкту до першої відмови.

Для кількісної характеристики безвідмовності об'єктів, що не відновлюються, використовуються такі основні показники:

1. Імовірність безвідмовної роботи

Для таких об'єктів основною кількісною характеристикою надійності є імовірність безвідмовної роботи $P(t)$.

$P(t)$ – імовірність того, що в межах заданого наробітку відмова об'єкту не виникне.

Імовірнісне визначення:

$$P(t) = P\{T > t\}. \quad (2.1)$$

де T – випадкова величина, яка означає наробіток об'єкту до першої відмови; t – заданий час.

Математичний зміст виразу (2.1) полягає в тому, що будь-який з екземплярів об'єктів одного типу може відмовити в

будь-який момент часу, але для дуже великої партії об'єктів існує закономірність, при якій з імовірністю $P(t)$ будь-який з екземплярів пропрацює безвідмовно час T більший, ніж заданий час t .

Основні властивості функції $P(t)$:

а) при $t = 0$ $P(0) = 1$.

Це означає, що будь-який об'єкт в початковий момент часу повинен бути працездатним;

б) $P(t)$ – монотонно спадна функція часу t , тобто надійність об'єкту з часом падає;

в) при $t \rightarrow \infty$ $P(\infty) \rightarrow 0$.

Будь-який із об'єктів з часом відмовить.

Статистичне визначення:

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (2.2)$$

де N_0 – кількість об'єктів, які працездатні в момент часу $t = 0$; $n(t)$ – кількість об'єктів, які відмовили за час t ; $N_0 - n(t)$ – кількість об'єктів, які продовжують безвідмовно працювати по закінченню часу t .

2 Імовірність відмови

Крім показника $P(t)$, для кількісної характеристики ненадійності об'єктів використовується показник імовірності відмови $Q(t)$, тобто імовірність явища, протилежного явищу безвідмовної роботи.

$Q(t)$ – імовірність того, що в заданому інтервалі часу $[0, t]$ і визначених умовах експлуатації відбудеться хоч би одна відмова об'єкту.

Імовірнісне визначення:

$$Q(t) = P\{T \leq t\} = F(t), \quad (2.3)$$

де T – випадкова величина, що означає час наробітку об'єкту до відмови; t – заданий час роботи; $F(t)$ – функція розподілу (інтегральний закон розподілу) випадкової величини; T – наробіток до відмови.

Основні властивості функції $Q(t)$:

а) при $t = 0$ $Q(0) = 0$.

Це означає, що в початковий момент часу непрацездатність об'єкту відсутня;

б) $Q(t)$ – монотонно зростаюча функція часу;

в) при $t \rightarrow \infty$ $Q(\infty) \rightarrow 1$.

Імовірність відмови об'єкту з часом неминуча.

Статистичне визначення:

$$Q^*(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (2.4)$$

де $n(t)$ – кількість об'єктів, які відмовили за час t ; N_0 – кількість об'єктів, які працездатні в момент часу $t = 0$.

Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ та імовірність відмови $Q(t)$ пов'язані між собою залежністю:

$$P(t) + Q(t) = 1. \quad (2.5)$$

Вираз (2.5) дуже часто використовують при практичних розрахунках надійності технічних систем.

3. Щільність розподілу імовірностей відмов

Для кількісної характеристики надійності невідновлюваних об'єктів застосовується також щільність розподілу імовірностей (диференціальний закон розподілу імовірностей) відмов чи наробіток до відмови $f(t)$.

Імовірнісне визначення:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d}{dt} [1 - P(t)] = -\frac{dP(t)}{dt}, \quad (2.6)$$

де $Q(t) = 1 - P(t)$.

Фізичний зміст функції $f(t)$ – швидкість зниження надійності об'єкту з часом t .

Статистичне визначення:

$$f^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}, \quad (2.7)$$

де $n(\Delta t)$ – кількість об'єктів, які відмовили в інтервалі часу від $(t - \frac{\Delta t}{2})$ до $(t + \frac{\Delta t}{2})$;

Δt – довжина цього інтервалу; N_0 - кількість об'єктів, які працездатні в момент часу $t = 0$.

Справедливість оцінки $f(t)$ по формулі (2.7) можна показати на наступному прикладі.

Нехай кількість об'єктів, які безвідмовно робили на протязі часу t і $t + \Delta t$, буде:

$$\begin{aligned} N(t) &= N_0 P(t), \\ N(t + \Delta t) &= N_0 P(t + \Delta t), \end{aligned}$$

де $P(t)$ – імовірність безвідмовної роботи.

Кількість об'єктів, які відмовили на протязі часу Δt ,

$$n(\Delta t) = N(t) - N(t + \Delta t) = -N_0 [P(t + \Delta t) - P(t)].$$

Підставляючи значення $n(\Delta t)$ у вираз (2.7), отримаємо:

$$f(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t} = - \frac{N_0 [P(t + \Delta t) - P(t)]}{N_0 \Delta t}.$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ отримаємо:

$$f(t) = - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} = -P'(t) = Q'(t). \quad (2.8)$$

Щільність розподілу відмов $f(t)$ пов'язана з імовірністю відмови $Q(t)$ та імовірністю безвідмовної роботи $P(t)$ такими залежностями:

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt; \quad P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (2.9)$$

На рис. 2.1 зображені криві імовірності безвідмовної роботи **P(t)**, імовірності відмови **Q(t)** та щільності розподілу імовірностей відмови **f(t)**.

Щільність розподілу імовірностей має наступні властивості:

а) $f(t) \geq 0$;

б) $P(t_1 \leq T \leq t_2) = \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt$;

в) $\int_{-\infty}^{\infty} f(t)dt = 1$,

тобто площа, обмежена кривою **f(t)** та віссю абсцис, дорівнює одиниці;

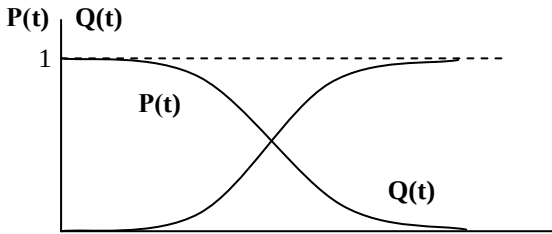


Рис.2.1. Вид розподілу функцій **P(t)** і **Q(t)**

г) якщо в точці **t** функція **f(t)** неперервна, то $F'(t) = f(t)$.

Враховуючи те, що випадкова величина часу безвідмовної роботи знаходиться в межах $0 \leq t \leq \infty$, то

$$\int_0^{\infty} f(t)dt = 1. \quad (2.10)$$

Тоді імовірність безвідмовної роботи **P(t)** може бути представлена таким виразом:

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_0^{\infty} f(t)dt - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt. \quad (2.11)$$

Величина $f(t)dt$ визначає імовірність відмови об'єкту в інтервалі часу $[t, t+\Delta t]$. При цьому не відомо, в якому стані до моменту часу t знаходиться об'єкт: працездатному чи непрацездатному. Можливо, об'єкт відмовив раніше часу t . В цьому недолік даного показника. Тому показник $f(t)$ не знайшов практичного застосування для оцінки надійності невідновлюваних об'єктів.

4. Інтенсивність відмов

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – умовна щільність імовірності виникнення відмови невідновлюваного об'єкту, що визначається для часу t при умові, що до цього часу відмова об'єкту не виникла.

Імовірнісне визначення:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}. \quad (2.12)$$

Статистичне визначення:

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}. \quad (2.13)$$

де $n(\Delta t)$ – кількість об'єктів, які відмовили в інтервалі часу

$$\left[t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right];$$

$N_{\text{сер}} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$ - середня кількість об'єктів, які працездатні в

інтервалі часу Δt .

Справедливість статистичної оцінки інтенсивності відмов $\lambda(t)$ по формулі (2.13) може бути показана аналогічно функції $f(t)$, якщо покласти, що:

$$N_{\text{сер}} = N_0 - n(t).$$

Таким чином, при використанні показника $\lambda(t)$ для характеристики надійності невідновлюваних об'єктів, на відміну від показника $f(t)$, розглядаються тільки ті об'єкти, які були працездатними в момент часу t .

Підставляючи в формулу (2.12) значення $f(t)$ з (2.6), отримуємо:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (2.14)$$

Інтегруючи обидві частини рівняння (2.14) на інтервалі часу від 0 до t при початковій умові $P(0) = 1$, отримуємо:

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\int_0^t \frac{1}{P(t)} dP(t) = -\ln P(t).$$

Звідки отримаємо:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (2.15)$$

Рівняння (2.15) встановлює залежність між імовірністю безвідмовної роботи будь-якого об'єкту за час t та інтенсивністю відмов $\lambda(t)$.

Аналіз даного рівняння показує, що інтенсивність відмов за період роботи об'єкту є змінною величиною, залежною від тривалості роботи об'єкту. Таким чином, при будь-якому характері зміни $\lambda(t)$ величина $P(t)$ буде тим менша, чим більше значення $\lambda(t)$. Це рівняння іноді називають загальним законом надійності, який застосовується для будь-яких потоків відмов невідновлюваних об'єктів. При цьому під потоком слід розуміти відмови, які можуть відбуватися одна за одною у будь-які моменти часу.

У випадку, коли інтенсивність відмов $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$, рівняння (2.13) приймає вигляд:

$$P(t) = e^{-\lambda(t)} \quad (2.1)$$

де λ — середня величина інтенсивності відмов об'єкту; t — час роботи об'єкту, для якого визначається його імовірність безвідмовної роботи.

Рівняння (2.16) отримало назву експоненційного закону надійності. При цьому законі імовірність безвідмовної роботи об'єкту, що має інтенсивність відмов $\lambda(t)$, зменшується з часом по експоненційній кривій.

Дане рівняння використовується при інженерних розрахунках надійності складних пристроїв, використовуючи довідкові дані інтенсивності відмов елементів.

На рис. 2.2 зображена типова крива функції $\lambda(t)$. Дану криву можна розділити на три ділянки.

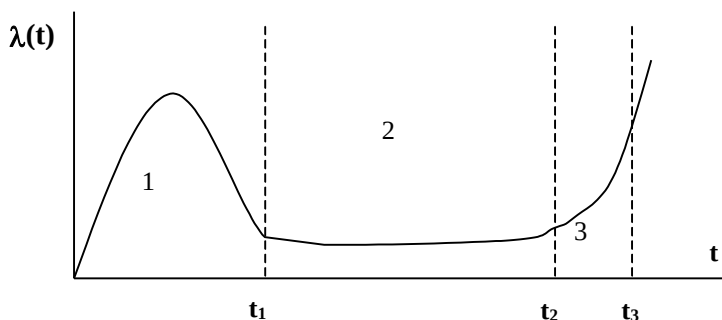


Рис.2.2. Графік зміни інтенсивності відмов $\lambda(t)$

На першій ділянці інтенсивність відмов досить висока, далі до моменту часу t_1 йде на зниження. Цю ділянку називають періодом приробітку виробів. Відмови виробів, які здійснюються у цей період, обумовлені в основному конструктивними дефектами та порушеннями технології виробництва. Тривалість цього періоду може складати від декількох десятків до сотень годин у залежності від типу виробу та виду технологічних тренувань на підприємствах-виробниках.

На другій ділянці інтенсивність відмов досить низька. Ця ділянка кривої називається періодом нормальної експлуатації. Відмови виробів, що відбуваються в цей період, носять раптовий характер і відбуваються з постійною чи близькою до

цього інтенсивністю. В цей період часу експоненціальна залежність безвідмовної роботи від часу роботи виробу підтверджується експериментальними даними відмов виробів. Тривалість цього періоду може складати до десятка тисяч годин в залежності від типу виробу та умов його експлуатації.

На третій ділянці інтенсивність відмов поступово починає зростати. Цю ділянку кривої називають періодом зносу. Відмови, які виникають в цей період, обумовлені старінням елементів. Час t_2 може служити граничним часом, при досягненні якого будь-який об'єкт чи пристрій повинен зніматися з експлуатації.

Таким чином, чотири вищезгаданих показників надійності (P , Q , f , λ) є функціями часу. Кожна із цих функцій повністю характеризує розподіл імовірностей наробітку до відмови. Якщо відома одна із цих функцій, то по ній можна обрахувати і всі інші. Відповідні вирази вказаних функцій наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Функціональний зв'язок між показниками надійності

Відома функція	Формули для визначення інших функцій			
	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	—	$1-P(t)$	$-\frac{dP(t)}{dt}$	$-\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}$
$Q(t)$	$1-Q(t)$	—	$\frac{dQ(t)}{dt}$	$-\frac{1}{1-Q(t)} \frac{dQ(t)}{dt}$
$F(t)$	$\int_0^{\infty} f(x)dx$	$\int_0^t f(x)dx$	—	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(x)dx}$
$\lambda(t)$	$e^{-\int_0^t \lambda(x)dx}$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(x)dx}$	$\lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(x)dx}$	—

5. Середній наробіток до відмови

Найбільш розповсюдженим показником для кількісної характеристики надійності невідновлюваних об'єктів є середній наробіток до відмови T_1 .

Середній наробіток до відмови – це математичне сподівання наробітку об'єкту до першої відмови.

Імовірнісне визначення:

$$T_1 = MT = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t \frac{dF(t)}{dt} dt = - \int_0^{\infty} t \frac{dP(t)}{dt} dt,$$

де MT – математичне сподівання випадкової величини T ;

$F(t)$ – функція розподілу випадкової величини T .

Інтегруючи по частинам та використовуючи співвідношення:

$$\int u dv = uv - \int v du,$$

знайдемо:

$$T_1 = -t P(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt,$$

Так як перший доданок

$$-t P(t) \Big|_0^{\infty} = -t [1 - F(t)] \Big|_0^{\infty} = -\lim_{t \rightarrow \infty} t [1 - F(t)] = 0,$$

то із цього випливає, що

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.17)$$

Таким чином, середній наробіток до відмови T_1 кількісно дорівнює площі під кривою $P(t)$.

Підставивши в формулу (2.17) замість $P(t)$ його вираз по (2.16) для експоненційного закону розподілу часу безвідмовної роботи, отримаємо:

$$T_1 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.18)$$

Статистичне визначення:

$$T_1^* = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i, \quad (2.19)$$

де t_i – час роботи i -го об'єкту до першої відмови;

N_0 – кількість об'єктів, які працездатні в момент часу $t = 0$.

Другою важливою характеристикою випадкової величини є дисперсія, яка служить мірою розсіювання випадкової величини T відносно її математичного сподівання.

Дисперсія визначається за формулою:

$$\begin{aligned} DT &= M(T - MT)^2 = \int_0^{\infty} (t - MT)^2 f(t) dt = \\ &= \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - 2T \int_0^{\infty} t f(t) dt + T^2 \int_0^{\infty} f(t) dt. \end{aligned}$$

Так як

$$\int_0^{\infty} t f(t) dt = T, \quad \int_0^{\infty} f(t) dt = 1,$$

то

$$DT = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - T^2 = 2 \int_0^{\infty} t p(t) dt - T^2.$$

Для експоненційного закону розподілу часу безвідмовної роботи маємо:

$$DT = 2 \int_0^{\infty} t p(t) dt - T^2 = 2 \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{2}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2}.$$

Крім дисперсії, для характеристики випадкової величини T використовується середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma(t) = \sqrt{DT}.$$

Слід відмітити, що для невідновлюваних об'єктів з підвищеною надійністю (наприклад, елементів електронних систем) такий параметр, як середньостатистичний час наробітку до відмови, є чисто теоретичним, так як вони тривало не експлуатуються. Тому отримати значення середнього часу наробітку до відмови на основі реальних статистичних даних практично неможливо, так як технічні пристрої старіють раніш, ніж напроцьовують цей час такі об'єкти.

В таких випадках значення середнього часу наробітку до відмови обчислюють по експериментальним даним про відмови елементів, отриманим в початковий період експлуатації чи випробувань. Таким чином, за величину T_1 приймають середній наробіток до відмови, який міг би мати об'єкт в дійсності, якщо він зберігав би на протязі всього періоду використання ту інтенсивність відмови, яку він мав в початковий період експлуатації або випробувань.

2.2. Показники надійності відновлюваних об'єктів

2.2.1. Показники надійності невідновлюваних об'єктів в процесі застосування

До відновлюваних об'єктів відносяться об'єкти, які після відмови та наступного відновлення (ремонту) можуть знову продовжувати свої функції з заданими показниками надійності.

Всі кількісні характеристики надійності для невідновлюваних об'єктів можуть бути застосовані для характеристики надійності відновлюваних об'єктів. Але так як відновлювані об'єкти після відмови ремонтуються, після чого їх працездатність знову відновлюється, то для повної характеристики надійності таких об'єктів необхідно враховувати процес відновлення (ремонту). Для цього, крім кількісних характеристик показників безвідмовності, використовуються кількісні показники ремонтпридатності та довговічності для характеристики надійності таких об'єктів.

При розгляді показників надійності слід розрізняти відновлювані об'єкти:

- ◆ без відновлення в процесі застосування;

- ◆ з відновленням в процесі застосування;

До невідновлюваних в процесі застосування по призначенню відносяться такі об'єкти, відмова яких призводить до невиконання поставленої задачі; при наявності резерву ремонт (відновлення) ділянки резервованої групи, що відмовила, не здійснюється до закінчення виконання задачі.

Відновлювані в процесі застосування об'єкти можна поділити на дві групи:

- ◆ об'єкти, для яких недопустимі перерви в роботі (резервовані об'єкти);
- ◆ об'єкти, для яких допустимі короткотривалі перерви в роботі.

В залежності від призначення та умов експлуатації об'єктів для кількісної характеристики їх надійності можуть застосовуватись такі показники надійності:

1.Параметр потоку відмов

Для характеристики надійності відновлюваних зовні процесу застосування об'єкту використовують параметр потоку відмов $\omega(t)$ – відношення математичного сподівання кількості відмов відновлюваного об'єкту за досить малий його наробіток до значення цього наробітку.

Імовірнісне визначення:

$$\omega(t) = \lim \frac{p_1(t, t + \Delta t) + p_{>1}(t, t + \Delta t)}{\Delta t},$$

де $p_1(t, t + \Delta t)$ – імовірність появи однієї відмови на інтервалі часу $(t, t + \Delta t)$; $p_{>1}(t, t + \Delta t)$ – імовірність появи двох або більше відмов на інтервалі часу $(t, t + \Delta t)$; Δt – інтервал часу.

Статистичне визначення

$$\omega^*(t) = \frac{n'(t)}{N_0 \Delta t}, \quad (2.20)$$

де $n'(\Delta t) \geq n(\Delta t)$ – кількість відновлюваних об'єктів на інтервалі часу $[t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}]$; N_0 – кількість працездатних об'єктів у момент часу $t = 0$; Δt – інтервал часу.

Потоки відмов у відновлюваних об'єктів створюються за рахунок складення потоків відмов однотипних елементів, що встановлені в об'єкти замість елементів, які відмовили раніше.

Потоки відмов в імовірному розумінні можуть бути різними. Обмежимося розглядом найпростішого (пуассонівського) потоку.

Потік відмов називається найпростішим або пуассонівським, якщо він одночасно володіє трьома властивостями: стаціонарністю, ординарністю та відсутністю післядії.

Потік відмов стаціонарний, якщо імовірність появи n відмов на інтервалі часу $[t_1, t_2]$ не залежить від того, де на вісі часу розташований даний інтервал, а залежить тільки від його довжини.

Потік відмов ординарний, якщо імовірність появи двох або більше відмов за невеликий проміжок часу Δt досить мала в порівнянні з імовірністю появи однієї відмови.

У потоці відмов відсутні післядії, якщо характер появи відмов після моменту часу t не залежить від того, яким чином і коли відбувалися ці відмови до цього моменту часу.

Пуассонівський потік знайшов широке застосування в теорії надійності при оцінці надійності відновлюваних об'єктів. Так, його використовують для характеристики інтенсивності відмов складних технічних пристроїв.

Розглянемо зв'язок між параметром потоку відмов $\omega(t)$ і щільністю розподілу імовірностей наробітку між відмовами $f(t)$.

Якщо випадкові величини наробітку між відмовами розподілені однаково та незалежні, то параметр потоку відмов $\omega(t)$ пов'язаний зі щільністю розподілу наробітку між відмовами $f(t)$ наступним рівнянням:

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t f(t - \tau)\omega(\tau)d\tau. \quad (2.21)$$

Рівняння (2.21) є інтегральним рівнянням Вольтерра другого роду з різноним ядром. Це рівняння розв'язується числовим методом з використанням послідовних наближень. Обчислення здійснюються до тих пір, доки $\omega_{i+1}(t)$ та $\omega_i(t)$ стануть практично співпадати. Якщо потік відмов найпростіший, то існує значення, що встановилося, параметру потоку відмов відновлюваного об'єкту:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \bar{\omega} = \frac{1}{T}, \quad (2.22)$$

де T – середній наробіток до відмови відновлюваного об'єкту.

2. Імовірність безвідмовної роботи

Імовірність безвідмовної роботи $\tilde{P}(t_1, t_2)$ на інтервалі часу $[t_1, t_2]$ так, як і для невідновлюваних об'єктів, є основною кількісною характеристикою надійності відновлюваних об'єктів.

Для ординарних без післядії потоків відмов імовірність безвідмовної роботи об'єкту, який відновлюється зовні процесу застосування об'єкту, на інтервалі часу $[t_1, t_2]$ визначається рівнянням:

$$\tilde{P}(t_1, t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt}. \quad (2.23)$$

Для випадку, коли потік відмов стаціонарний, тобто величина $\omega(t) = \omega = \text{const}$, імовірність безвідмовної роботи відновлюваного об'єкту на інтервалі часу $[t_1, t_2]$ дорівнює:

$$\tilde{P}(t_1, t_2) = e^{-\omega(t_2 - t_1)}. \quad (2.24)$$

де ω – параметр потоку відмов об'єкту.

2.2.2. Показники надійності відновлюваних об'єктів в процесі застосування

1. Середній наробіток до відмови

Середній наробіток до відмови є найбільш кількісним показником, який найчастіше застосовується для оцінки надійності відновлюваних в процесі застосування об'єктів.

Імовірнісне визначення:

$$T_k = MT_k = \int_0^{\infty} t \cdot f_k(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot dQ_k(t) = \int_0^{\infty} P_k(t) dt,$$

де MT_k – математичне сподівання випадкового часу безвідмовної роботи об'єкту до моменту закінчення $(k-1)$ -го відновлення до моменту появи k -ої відмови.

Статистичне визначення:

$$T^* = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_i, \quad (2.25)$$

де r – загальне число відмов об'єктів за період спостереження експлуатації; t_i – час наробітку об'єкту між $(i-1)$ -ю та i -ою відмовами.

Таким чином, середній наробіток до відмови – це відношення сумарного наробітку відновлюваного об'єкту до математичного сподівання числа його відмов на протязі цього наробітку.

2. Імовірність відновлення

Для відновлюваних об'єктів основною кількісною характеристикою ремонтпридатності є імовірність відновлення об'єкту за заданий час $P_b(t)$.

$P_b(t)$ – імовірність того, що час відновлення працездатного стану об'єкту T_b не перевищує заданий час t .

Імовірнісне визначення:

$$P_b(t) = P\{T_b \leq t\} = R(t), \quad (2.26)$$

де T_b – випадкова величина, що означає час, який витратили на відновлення працездатного стану об’єкту після відмови; t – заданий час відновлення; $R(t)$ – функція розподілу часу відновлення.

Основні властивості функції $P_b(t)$:

- а) при $t = 0$ $P_b(0) = 0$;
- б) $P_b(t)$ – монотонно зростаюча функція часу;
- в) при $t \rightarrow \infty$ $P_b(\infty) \rightarrow 1$.

Статистичне визначення:

$$P_b^*(t) = \frac{n_b}{N_{oe}}, \quad (2.27)$$

де $n_b(t)$ – кількість відновлюваних об’єктів, час відновлення яких був менше заданого; N_{oe} – кількість об’єктів, які непрацездатні в момент часу $t=0$.

3. Щільність розподілу часу відновлення

Щільність розподілу часу відновлення $f_b(t)$ визначається аналогічно щільності розподілу відмов $f(t)$ для невідновлюваних об’єктів.

Імовірнісне визначення:

$$f_b(t) = \frac{dP_b(t)}{dt}. \quad (2.28)$$

Статистичне визначення:

$$f_b^*(t) = \frac{n_b(\Delta t)}{N_{ob} \Delta t}, \quad (2.29)$$

де $n_b(\Delta t)$ – кількість відновлюваних об’єктів на інтервалі часу

$[t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}]$; N_{ob} – кількість об’єктів, які непрацездатні в момент часу $t = 0$.

4. Інтенсивність відновлення

Інтенсивність відновлення $\mu(t)$ – це умовна щільність імовірності відновлення працездатності об'єкта, яка визначена для даного моменту часу при умові, що до того моменту відновлення не було завершено.

Імовірнісне визначення:

$$\mu_v(t) = \frac{1}{1 - P_v(t)} \frac{dP_v(t)}{dt}. \quad (2.30)$$

Статистичне визначення:

$$\mu_v^*(t) = \frac{n_v(\Delta t)}{N_{v.c.p.} \Delta t}, \quad (2.31)$$

де $n_v(\Delta t)$ – кількість відновлюваних об'єктів на інтервалі часу $[t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}]$; $N_{v.c.p.}$ – середня кількість об'єктів, які чекають відновлення до початку інтервалу часу Δt .

Інтегруючи рівняння (2.30) в межах $[0, t]$ при початковій умові $P_v(0) = 0$, отримаємо:

$$P_v(t) = 1 - e^{-\int_{t_1}^{t_2} \mu_v(t) dt}. \quad (2.32)$$

Рівняння (2.32) встановлює зв'язок між імовірністю відновлення працездатного стану відновлюваного об'єкту за час t та інтенсивністю відновлення $\mu(t)$.

По рівнянню (2.32) можна визначити імовірність відновлення об'єкту для будь-яких законів розподілу випадкового часу, що витрачається на відновлення (ремонт).

У випадку, коли потік інтенсивності відновлення є найпростішим, тобто $\mu_v(t) = \mu_v = \text{const}$, то рівняння (2.32) має вигляд:

$$P_v(t) = 1 - e^{-\mu_v t}, \quad (2.33)$$

де μ_b – середня інтенсивність відновлення; t – заданий час, для якого визначається імовірність відновлення.

5. Середній час відновлення

Середній час відновлення T_b – це математичне сподівання часу відновлення працездатного стану об'єкту після відмови.

Імовірнісне визначення:

$$T_b = MT_b = \int_0^{\infty} t \cdot f_b(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - P_b(t)] dt, \quad (2.34)$$

де MT_b – математичне сподівання випадкової величини виконання операцій по відновленню об'єкта.

Для випадку, коли процес по відновленню розглядається як найпростіший ($\mu_b(t) = \text{const}$), то має місце рівність:

$$T_b = \frac{1}{\mu_b}. \quad (2.35)$$

Статистичне визначення:

$$T_b^* = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} t_{bi}, \quad (2.36)$$

де t_{bi} – час, що витрачається на відновлення i -го об'єкту; n_b – кількість відновлюваних об'єктів

6. Нестационарний коефіцієнт готовності

Для характеристики надійності відновлюваних об'єктів використовуються комплексні показники. До них відносяться функція готовності або нестационарний коефіцієнт готовності $K_r(t)$.

$K_r(t)$ – імовірність того, що об'єкт буде працездатним в заданий момент часу, що відраховується від початку роботи (чи іншого певно визначеного моменту часу).

Імовірнісне визначення:

$$K_r(t) = \sum_{i=1}^{\infty} P\left\{ \sum_{k=0}^i (T_k + T_b) < t < \sum_{k=0}^i (T_k + T_b) + T_{i+1} \right\},$$

де T_k , T_b – випадкові величини, що характеризують середній наробіток до відмови і середній час відновлення об'єкту.

Статистичне визначення:

$$K_r^*(t) = \frac{N(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad (2.37)$$

де $N(t)$ – кількість працездатних об'єктів в момент часу t ; $n(t)$ – кількість непрацездатних об'єктів в момент часу t ; N_0 – загальна кількість об'єктів в момент часу $t = 0$.

7. Нестационарний коефіцієнт простою

Разом з функцією $K_r(t)$ для характеристики відновлюваних об'єктів використовують функцію простою або нестационарний коефіцієнт простою.

$K_n(t)$ – імовірність того, що в заданий момент часу t об'єкт знаходиться у стані відмови (відновлення).

Імовірнісне визначення:

$$K_n(t) = \sum_{i=0}^{\infty} P\left\{ \sum_{k=0}^i (T_k + T_b) + T_{i+1} < t < \sum_{k=0}^{i+1} (T_k + T_{bk}) \right\}.$$

Функції $K_r(t)$ та $K_n(t)$ пов'язані між собою наступним співвідношенням:

$$K_r(t) + K_n(t) = 1 \quad (2.38)$$

8. Коефіцієнт готовності

Для оцінки експлуатаційної готовності відновлюваних об'єктів найбільш часто застосовують стаціонарний коефіцієнт готовності об'єкту K_r .

K_r – це імовірність того, що об'єкт буде в працездатному стані в будь-який момент часу, крім запланованих періодів, на

протязі яких застосування об'єкту за призначенням не передбачається.

Імовірнісне визначення:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^n t_{vi}}, \quad (2.40)$$

де t_{pi} – i -й інтервал часу працездатної роботи об'єкту; t_{vi} – i -й інтервал часу відновлення об'єкту; n – число відмов об'єкту.

9. Коефіцієнт простою

Коефіцієнт простою K_{Π} – імовірність того, що об'єкт буде в непрацездатному стані в будь-який момент часу, крім запланованих періодів, на протязі яких застосування об'єкту по призначенню не передбачається.

Імовірнісне визначення:

$$K_{\Pi} = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{\Pi}(t) = \frac{T_v}{T_o + T_v}. \quad (2.41)$$

Статистичне визначення:

$$K_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{vi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^n t_{vi}}. \quad (2.42)$$

Коефіцієнт готовності K_r і простою K_{Π} зв'язані між собою наступним співвідношенням:

$$K_r + K_{\Pi} = 1. \quad (2.43)$$

10. Коефіцієнт оперативної готовності

В якості комплексного показника надійності відновлюваних об'єктів часто застосовують коефіцієнт оперативної готовності $K_{or}(\tau)$.

$K_{or}(\tau)$ – імовірність того, що об’єкт буде в працездатному стані у будь-який момент часу, крім періодів, на протязі яких застосування об’єкту по призначенню не передбачається, і, починаючи з цього моменту, буде виконувати необхідну функцію на протязі заданого інтервалу часу.

Імовірнісне визначення:

$$K_{or}(\tau) = K_r P(\tau) \quad (2.44)$$

де $K_r = \frac{T_o}{T_o + T_b}$ – стаціонарне значення коефіцієнту готовності відновлюваного об’єкту; $P(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи об’єкту на протязі заданого часу τ .

Статистичне визначення:

$$K_{or}(\tau) = \frac{N(t, t + \tau)}{N_0}, \quad (2.45)$$

де $N(t, t + \tau)$ кількість об’єктів, які працездатні у будь-який момент часу t і потім безвідмовно працювали на протязі заданого часу τ ; N_0 – загальна кількість об’єктів в момент часу $t = 0$.

11. Нестационарний коефіцієнт оперативної готовності

Нестационарний коефіцієнт оперативності $K_{or}(t, t + t_0)$ – імовірність того, що об’єкт буде працездатним в заданий момент часу t , і, починаючи з цього моменту часу, буде виконувати необхідну функцію на протязі заданого інтервалу часу $[t + t_0]$.

Математичне визначення:

$$K_{or}(t, t + t_0) = K_r(t) * P(t_0), \quad (2.46)$$

де $K_r(t)$ – нестационарний коефіцієнт готовності;

$P(t_0)$ – імовірність безвідмовної роботи відновлюваного об’єкту на протязі заданого часу t_0 .

Статистичне визначення:

$$K_{ог}^*(t, t + \tau) = \frac{N(t, t + t_0)}{N_0}, \quad (2.47)$$

де $N(t, t+t_0)$ – кількість працездатних об'єктів в момент часу t , які безвідмовно працювали на інтервалі часу $[t, t+\tau]$; N_0 – загальна кількість об'єктів в момент часу $t = 0$.

12. Коефіцієнт технічного використання

Коефіцієнт технічного використання $K_{тв}$ – це відношення математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкту у працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування об'єкту у працездатному стані і в простоях, що обумовлені технічним обслуговуванням та ремонтом за цей же період.

Статистичне визначення:

$$K_{тв}^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^n (t_{vi} + t_{mi})}, \quad (2.48)$$

де t_{mi} – час простою (технічного обслуговування) після i -ї відмови об'єкту.

Розглянуті вище показники надійності для відновлюваних об'єктів служать для практичної оцінки надійності об'єктів і задаються в технічному завданні замовником при проектуванні об'єкту. При цьому список показників надійності, які застосовуються, повинен відповідати об'єктивній характеристиці необхідних властивостей об'єкту.

В залежності від призначення об'єкту та умов його застосування показники надійності можуть бути різними.

Так, для першої групи об'єктів, які по умовам застосування не можуть відновлюватися під час роботи, основним показником надійності є безвідмовна робота на протязі заданого часу:

$$P_1(t) = P(t). \quad (2.49)$$

Для другої групи об'єктів, які по умовам застосування повинні в будь-який момент часу бути готовими до роботи і не мати відмов (несправностей) в процесі роботи, але допускається відновлення ділянки резервованої групи під час роботи. Характеристикою надійності є імовірність успішного використання об'єкта, тобто коефіцієнт оперативної готовності:

$$P_n(t, \tau) = K_{or}(\tau) = K_r p(\tau) \quad (2.50)$$

де $P_n(t, \tau)$ – імовірність того, що система у будь-який момент часу t буде у працездатному стані і безвідмовно пропрацює на протязі заданого часу τ ; K_r – коефіцієнт готовності (імовірність того, що об'єкт в будь-який момент часу знаходиться в працездатному стані); $p(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи об'єкту на протязі заданого часу τ .

Об'єкти цієї групи взагалі використовуються короткочасно. Основний час вони знаходяться в стані готовності.

Для третьої групи об'єктів, які по умовам застосування допускають короточасні перерви в роботі, характеристикою надійності є коефіцієнт готовності:

$$P_{III}(t) = K_r. \quad (2.51)$$

Коефіцієнти готовності залежать від часу відновлення. Чим менший час відновлення, тим вище коефіцієнт готовності об'єкту, тим ефективніше використовується об'єкт при експлуатації.

Дана характеристика використовується для оцінки надійності об'єктів багаторазового використання. Такі об'єкти повинні мати високу ремонтпридатність.

2.3. Показники довговічності та збережуваності

Для невідновлювальних об'єктів довговічність кількісно оцінюється двома показниками: ресурсом та терміном служби.

Ресурс – сумарний наробіток об'єкта до відмови або стану, який визначений в технічній документації. Оскільки ресурс може бути випадковою величиною, то в якості показника

довговічності застосовують середній ресурс T_p (математичне сподівання ресурсу).

Найбільш часто для оцінки довговічності застосовують гамма-відсотковий ресурс та позначений ресурс. Гамма-відсотковий ресурс $T_{p\gamma}$ – сумарний наробіток, протягом якого об’єкт не досягне граничного стану з імовірністю γ , вираженою у відсотках.

Призначений ресурс $T_{p.n.}$ – сумарний наробіток, при досягненні якого експлуатацію об’єкту належить припинити незалежно від його технічного стану.

Термін служби – календарна тривалість експлуатації об’єкта від початку до переходу в граничний стан, який задається в технічній документації.

Термін служби – випадкова величина, а тому в якості показника терміну служби застосовують середній термін служби T_{cl} (математичне сподівання терміну служби).

На практиці найбільш часто в якості показників довговічності застосовують гамма-відсотковий термін служби або призначений термін служби. Гамма-відсотковий термін служби $T_{cl\gamma}$ – календарна тривалість експлуатації об’єкта, протягом якої об’єкт не досягне граничного стану з імовірністю γ , вираженою у відсотках.

Призначений термін служби $T_{cl.n.}$ – календарна тривалість експлуатації, при досягненні якої експлуатацію об’єкта належить припинити незалежно від його технічного стану.

Для невідновлюваних об’єктів одноразового застосування, для яких основним періодом експлуатації являється період зберігання, надійність об’єктів кількісно оцінюється показниками збережуваності.

В якості показників збережуваності застосовуються:

1. Імовірність безвідмовної збережуваності

Імовірність безвідмовної збережуваності $P_{36}(t)$ – імовірність того, що в заданому інтервалі часу t_{36} при даних умовах зберігання або транспортування не відбудеться ні одна відмова.

Імовірнісне визначення:

$$P_{36}(t) = P\{T_{36} > t_{36}\} = \int_{t_{36}}^{\infty} f_{36}(t) dt, \quad (2.52)$$

де T_{36} – середній термін збережуваності, $f_{36}(t)$ – щільність розподілу випадкового терміну збережуваності T_{36} .

На практиці найбільш часто для характеристики збережуваності застосовують: середній термін збережуваності, гамма-відсотковий термін збережуваності.

2. Середній термін збережуваності

Середній термін збережуваності T_{36} – це математичне сподівання терміну збережуваності.

Імовірнісне визначення:

$$T_{36} = MT_{36} = \int_0^{\infty} t f_{36}(t) dt = \int_0^{\infty} P_{36}(t) dt. \quad (2.53)$$

У випадку, коли об'єкт зберігається без профілактичного обслуговування на протязі часу t_{36} . (перевірка працездатності здійснюється тільки після терміну зберігання), статистичне значення T_{36}^* визначається за формулою:

$$T_{36}^* = \frac{n_0 t_{36}}{r}, \quad (2.54)$$

де t_{36} – час зберігання об'єкта; r – кількість екземплярів об'єктів, які відмовили за час t_{36} ; n_0 – кількість екземплярів об'єктів, поставлених на зберігання.

У випадку зберігання об'єктів з технічним обслуговуванням (під час зберігання об'єкти періодично перевіряються на працездатність) статистичне значення T_{36}^* визначається за формулою:

$$T_{36}^* = \frac{n_0 \sum_{i=1}^m t_{36i}}{r_i}, \quad (2.55)$$

де r_i - кількість екземплярів об'єктів із числа n_0 , що відмовили за час зберігання t_{36i} , тобто за час між $(i-1)$ -ю та i -ю перевітками об'єктів; m – кількість циклів зберігання, по завершенні яких проводиться перевірка працездатності всіх екземплярів об'єктів; n_0 – загальна кількість екземплярів об'єктів, що підлягають зберігання та перевірці при зберіганні.

Отже, довговічність невідновлюваних виробів, для яких зберігання та транспортування являються невід'ємною частиною експлуатації, необхідно ототожнювати не тільки з безвідмовністю, а також із збережуваністю.

Для відновлюваних об'єктів довговічність являє собою властивість зберігати працездатність до граничного стану з необхідними перервами для технічного обслуговування, ремонтів тощо. В якості показників довговічності відновлюваних об'єктів застосовують ресурс і термін служби, але ці показники можуть мати інші визначення ніж для невідновлюваних об'єктів.

В даному випадку ресурс являє собою сумарний наробіток об'єкта від початку його експлуатації чи поновлення після ремонту до переходу в граничний стан. При цьому для характеристики довговічності застосовують такі показники: середній ресурс, гамма-відсотковий ресурс та призначений ресурс.

1. Середній ресурс

Середній ресурс T_p – математичне сподівання ресурсу. Середній ресурс визначається виразом:

$$T_p = MT_p = \int_0^{\infty} t f_p(t) dt, \quad (2.56)$$

де $f_p(t)$ – щільність розподілу ресурсу.

2. Гамма-відсотковий ресурс

Гамма-відсотковий ресурс T_{γ} – сумарне напрацювання, протягом якого об’єкт не досягне граничного стану з імовірністю γ , вираженою у відсотках

$$T_{\gamma} = \int_{T_{\gamma}}^{\infty} t f_p(t) dt = \frac{\gamma}{100}. \quad (2.57)$$

Гамма-відсотковий ресурс - це ресурс, який має переважна більшість (як правило, не менше 90%) об’єктів, що експлуатуються.

3. Призначений ресурс

Призначений ресурс $T_{\text{пн}}$ – це сумарний наробіток, при досягненні якого експлуатацію об’єкта припиняють незалежно від його технічного стану.

Термін служби відновлюваних об’єктів визначається календарною тривалістю експлуатації об’єкту від початку або її поновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

В якості показників терміну служби застосовують: середній термін служби $T_{\text{сл}}$, гамма-відсотковий термін служби $T_{\text{сл}\gamma}$, призначений термін служби $T_{\text{сл.п.}}$.

1. Середній термін служби

Середній термін служби $T_{\text{сл}}$ – це математичне сподівання терміну служби

$$T_{\text{сл}} = \int_0^{\infty} t f_{\text{сл}}(t) dt.$$

2. Гамма-відсотковий термін служби

$$T_{\text{сл}\gamma} = \int_{T_{\text{сл}\gamma}}^{\infty} t f_{\text{сл}}(t) dt = \frac{\gamma}{100},$$

де $f_{\text{сл}}(t)$ – щільність розподілу терміну служби.

Термін збережуваності відновлюваних об’єктів визначається календарною тривалістю зберігання та транспортування

об'єктів, протягом якої значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції, перебувають у заданих межах.

Показники довговічності для відновлюваних виробів чисельно, як правило, значно перевищують показники довговічності невідновлюваних виробів. Слід відмітити, що показники довговічності, як правило, не розраховуються, а призначуються з врахуванням досвіду експлуатації аналогічних типів виробів та економічних факторів. В деяких випадках такі показники, як гамма-відсотковий ресурс, середній термін служби можуть бути визначені в результаті випробовувань виробів.

Слід, однак, відмітити, що довговічність для відновлюваних виробів має деяку відмінність від надійності. Справа в тому, що виріб може бути довговічним, але не надійним, і навпаки.

Таким чином, надійність і довговічність для відновлюваних виробів поняття далеко не ідентичні, оскільки вони відображають різні властивості якості виробу.

Забезпечення надійності та довговічності виробів являється комплексною задачею, яка вирішується на всіх стадіях їх створення та існування при допомозі системи управління надійністю і якістю виробів.

3. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН

3.1. Основні поняття теорії імовірностей

При експлуатації технічних систем відбуваються відмови в роботі, що мають різний характер. Ці відмови можуть бути раптовими та поступовими.

При аналізі відмов встановлено, що причиною цих відмов, як правило, є вихід із ладу комплектуючих виробів.

Раптові відмови відносяться до категорії випадкових подій. Випадковість їх виникнення пов'язана з тим, що вони відбуваються зненацька і нерегулярно. Раптові відмови звичайно є наслідком прихованих порушень технології виробництва або прихованих змін параметрів комплектуючих виробів (елементів) в процесі експлуатації пристроїв, при порушенні робочих режимів, при різкій зміні зовнішніх умов і т.п.

Тому для вивчення процесів виникнення відмов технічних систем доцільно використовувати теорію імовірностей і математичної статистики.

Теорія імовірностей вивчає:

- ◆ випадкові події;
- ◆ випадкові величини;
- ◆ випадкові процеси (випадкові функції).

Події в навколишньому просторі розділяють на достовірні, неможливі та випадкові. Якщо перші події при визначенні умов можуть відбуватися завжди, другі - ніколи, то треті можуть як відбуватися, так і не відбуватися.

Подія, яка при кожному окремому випадку (випробуванні) завбачити неможливо, називається випадковою.

Випадковою називається величина, що приймає свої значення з певною імовірністю.

Випадковим процесом або випадковою функцією називається сукупність випадкових величин, що відповідають різним значенням деякого не випадкового параметра.

Незважаючи на те, що завчасно передбачити випадкові події або випадкові величини та процеси не можливо, їх можна характеризувати за допомогою математичних методів, якщо розглядати не кожен окремо випадкову подію, величину, а всю їхню сукупність.

Розглянемо деякі основні поняття теорії імовірностей.

Якщо при n випробуваннях (явищах, подіях) деяка подія A (наприклад, відмова) з'явилася k раз, то відношення $\frac{k}{n}$ називається частотою випадкової події A .

При подальшому збільшенні числа n (випробувань) поява події A буде наближатися до деякого позитивного числа p , тобто

$$\left(\frac{k}{n} \right)_{n \rightarrow \infty} \rightarrow p.$$

Таким чином, для будь-якої випадкової події A завжди можна вказати таке число p , для якого при достатньо великому числі подій (явищ, випробувань), що відбуваються при однакових умовах, частота подій приблизно буде рівна p .

Із сказаного випливає, що подія A

- ♦ відбувається приблизно np раз;
- ♦ не відбувається - $(n-k)$ раз.

Очевидно, що значення p може знаходитися в межах:

$$0 < p < 1.$$

Випадкові величини бувають дискретні та неперервні. Вони характеризуються функціями розподілу імовірностей. Так, якщо ξ - випадкова величина, то імовірність того, що вона прийме значення, менше деякого числа x

$$P(\xi < x) = F(x) \tag{3.1}$$

називається інтегральною функцією розподілу імовірностей або законом розподілу імовірностей випадкових величин.

Для дискретних випадкових величин $F(x)$ є східча функція, що не спадає, яка задається у виді таблиці, у якої проти кожного з можливих значень x_i указується відповідна імовірність p_i , або у вигляді графіка.

Значення

$$F(x_i) = \sum_{i=1}^n p_i. \quad (3.2)$$

Для неперервних випадкових величин $F(x)$ неперервна для всіх значень x . Похідна, якщо вона існує, від функції $F'(x) = f(x)$ називається щільністю розподілу імовірностей випадкової величини x .

Таким чином, для неперервних випадкових величин

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx. \quad (3.3)$$

Основна властивість щільності розподілу імовірностей полягає в тому, що вона є невід'ємною функцією від x_i і що площа, обмежена кривою і віссю абсцис, дорівнює одиниці, тобто:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1.$$

Відомо, що повну характеристику випадкової величини дає її функція розподілу. Так, для дискретної випадкової величини досить знати закон її розподілу, а для неперервної – щільність розподілу.

Оскільки для одержання повної характеристики випадкових величин необхідна велика кількість досліджень (випробувань), на практиці при розв'язанні багатьох задач широке застосування одержали так звані числові характеристики розподілу, які відображають найважливіші властивості випадкової величини. Основними з них є математичне сподівання та дисперсія.

Математичним сподіванням MX випадкової дискретної величини X називається сума добутку усіх можливих значень випадкової величини на імовірності цих значень:

$$MX = \sum_{n=1}^{\infty} x_n p_n, \quad (3.4)$$

якщо цей ряд абсолютно сходиться, тобто $\sum_{n=1}^{\infty} p_n = 1$.

Математичне сподівання випадкової величини зв'язано з її середнім значенням. При необмеженому збільшенні кількості дослідів середнє арифметичне значення величини $\bar{x}$ завжди прямує до її математичного сподівання і називається оцінкою середнього значення:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.5)$$

де n - загальне число дослідів; x_i - поточне значення випадкової величини.

Таким чином, математичне сподівання - це середнє значення випадкової величини, центр її розподілу.

Не дивлячись на те, що математичне сподівання дає про випадкову величину значно менше відомостей, чим закон її розподілу, про те знання математичного сподівання буває досить для розв'язку багатьох задач в теорії імовірностей.

Математичне сподівання MX неперервної випадкової величини, розподіленої зі щільністю $f(x)$, визначається за формулою:

$$MX = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx. \quad (3.6)$$

Іншою важливою характеристикою будь-якої (дискретної, неперервної) випадкової величини є її дисперсія.

Дисперсія DX служить мірою розсіювання даної випадкової величини стосовно її математичного сподівання.

Для дискретної випадкової величини дисперсія є математичне сподівання квадрата відхилення даної випадкової величини від її математичного сподівання, тобто

$$DX = M(x - MX)^2. \quad (3.7)$$

Для неперервної випадкової величини, що розподілена зі щільністю $f(x)$, визначається за формулою:

$$DX = M(x - MX)^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - MX)^2 f(x) dx. \quad (3.8)$$

Крім математичного сподівання та дисперсії, важливими числовими характеристиками випадкових величин є:

середнє квадратичне відхилення випадкової величини

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)}; \quad (3.9)$$

коефіцієнт мінливості (варіації)

$$v(x) = \frac{\sigma(x)}{MX}; \quad (3.10)$$

мода випадкової величини M_0X . Вона характеризує те її значення, при якому щільність імовірності максимальна, тобто мода - це значення признаку випадкової величини, яке найчастіше спостерігається в ряді розподілу.

Для дискретних випадкових величин мода визначається як значення ознаки з найбільшою частотою.

У випадку неперервних випадкових величин мода може бути визначена як значення ознаки, якій відповідає найбільша щільність розподілу частоти;

медіана випадкової величини M_0X характеризує значення ознаки, відносно якої статистична сукупність ділиться на дві рівні по об'єму частини, тобто площа під графіком функції щільності розподілу ділиться медіаною наполовину.

Крім указаних вище числових характеристик, для оцінки тих або інших випадкових величин застосовуються і інші числові характеристики.

3.2. Основні закони розподілу відмов

3.2.1. Біноміальний закон розподілу

Відмови в роботі технічних пристроїв, як випадкові події, можуть мати різні закони розподілу.

У теорії надійності для дослідження надійності технічних пристроїв найбільше поширення одержали такі закони розподілу:

- ♦ для дискретних випадкових величин - біноміальний закон та закон Пуассона;

- ♦ для неперервних випадкових величин - експоненційний закон, нормальний закон, закон Релея, гамма-розподіл, закон Вейбулла та інші.

Біноміальний розподіл є найбільш важливим розподілом для дискретних випадкових величин. Він представляє собою двухпараметричний розподіл з параметрами n та p . Розподіл знайшов практичне застосування при статистичному контролі якості виробів, тобто при визначенні наявності придатних чи непридатних (бракованих) зразків в партії виробів.

Якщо імовірність появи подій m в одному досліді дорівнює p , а імовірність його не появи дорівнює q , то імовірність появи подій m у серії n дослідів визначається за формулою:

$$P_n^m = C_n^m p^m (1 - p)^{n-m}, \quad (3.11)$$

де $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$ – кількість сполучень n по m ; $q = 1 - p$.

Цей вираз являє собою загальний член розкладу бінома

$$(q + p)^n, \quad (3.12)$$

відкіля і його назва - біноміальний закон розподілу.

Загальна властивість закону полягає в тому, що

$$(q + p) = 1 \quad (3.13)$$

Основні характеристики біноміального закону:

- ♦ область значень - ціле позитивне число від 0 до n ;

- ♦ при $p = 1/2$ закон розподілу симетричний;
- ♦ математичне сподівання $M[m] = np$;
- ♦ дисперсія $D[m] = npq$.

Біноміальний закон застосовується при статистичному контролі якості виробів, тобто при визначенні наявності придатних і непридатних (бракованих) зразків у партії виробів.

3.2.2. Закон розподілу Пуассона

Закон розподілу Пуассона грає важливу роль в теорії надійності. Він описує закономірність виникнення випадкових відмов в технічних системах. Розподіл знайшов широке застосування при визначенні імовірності окремих подій, ізольованих в часі та просторі. При цьому імовірність таких подій дуже мала, наприклад: визначення кількості телефонних викликів за заданий проміжок часу, кількості випромінювань атомних частинок, кількості атмосферних перешкод при радіопередачах та інші величини.

Випадкова величина X розподілена по закону Пуассона, якщо імовірність цієї величини визначається рівністю:

$$P(m) = \frac{a^m}{m!} e^{-a}. \quad (3.14)$$

Розподіл Пуассона є однопараметричним розподілом з параметром a .

Якщо покласти $a = \lambda t$, то

$$P(m) = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t},$$

де λ – інтенсивність випадкових подій або параметр розподілу Пуассона; $m = 0, 1, 2, \dots$

Основні характеристики розподілу Пуассона:

- ♦ розподіл несиметричний; несиметричність особливо виражена при малих значеннях a ;
- ♦ математичне сподівання $M[m] = \lambda$;
- ♦ дисперсія $D[m] = \lambda$.

Оскільки для розподілу Пуассона дисперсія випадкової величини дорівнює її математичному сподіванню (λt), то цю властивість застосовують на практиці при вирішенні питання: чи є потік відмов (відновлень), який отримали при випробуваннях електронної апаратури, пуассонівським. З цією метою визначають статистичне значення λ^*t та дисперсію D^* . Якщо значення λ^*t близьке до значення D , то можна припустити, що досліджуваний потік подій (відмов, відновлень) близький до пуассонівського.

Окремим випадком закону Пуассона є експоненційний закон ($m = 1$).

3.2.3 Експоненційний закон розподілу

У випадку, коли потік відмов елементів технічних пристроїв задовольняє властивостям найпростішого (пуассонівського), для експоненційного розподілу мають місце такі залежності:

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\lambda t}; \\ Q(t) &= 1 - e^{-\lambda t}; \\ f(t) &= \lambda \cdot e^{-\lambda t}, \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

де λ - параметр (інтенсивність відмов) розподілу.

Експоненційний розподіл є однопараметричним розподілом.

Основні характеристики закону:

♦ математичне сподівання (середній наробіток до відмови)

$$MT = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{1}{\lambda};$$

♦ дисперсія часу наробітку до відмови

$$DT = \int_0^{\infty} (t - MT)^2 f(t) dt = \frac{1}{\lambda^2}.$$

При $\lambda t \ll 1$ $P(t) \approx 1 - \lambda t$ і $Q(t) \approx \lambda t$.

Важливою властивістю експоненційного розподілу є те, що імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ за час t не залежить від попереднього періоду роботи, а залежить тільки від тривалості часу t . Таку властивість мають технічні системи, для яких процес старіння і постійної втрати якості не грає істотної ролі.

На рис. 3.1 подані кількісні характеристики надійності й інших величин для експоненційного закону розподілу.

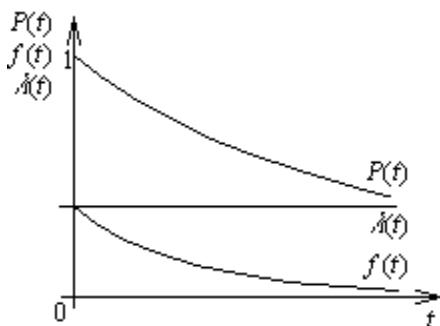


Рис.3.1. Експоненційний закон розподілу

Експоненційний закон широко використовується при розрахунках імовірності безвідмовної роботи технічних пристроїв за час t та їхніх елементів за допомогою довідкових даних по інтенсивностях відмов комплектуючих елементів.

Як показує досвід експлуатації багатьох технічних систем, експоненційний закон застосовується для оцінки надійності тих пристроїв, які пройшли технологічне тренування протягом 50-150 годин, коли $\lambda(t) = \text{const}$. Даний закон порушується лише в період масового старіння та зношування елементів пристроїв.

Практичне застосування експоненційного закону при оцінках надійності технічних пристроїв можна пояснити такими факторами:

1) експоненційний розподіл наробітку до відмови типовий для складних систем, які складаються з множини елементів, що мають різний розподіл наробітку до відмови. Крім того, під-

вищена інтенсивність відмов, що спостерігається в початковий період експлуатації, легко усувається шляхом технологічних тренувань на підприємствах-виготовлювачах;

2) при $\lambda = \text{const}$ розрахункові формули мають прості аналітичні залежності і дуже зручні при їхньому практичному застосуванні для визначення показників надійності;

3) при обмежених експериментальних даних відхилення значення інтенсивності відмов від гіпотези $\lambda = \text{const}$ незначні, навіть якщо і спостерігається деяка нестаціонарність потоку, тобто $\lambda(t)$.

Якщо експериментальних даних недостатньо, щоб виявити нестаціонарність потоку, то приймають в якості першого наближення $\lambda = \text{const}$.

3.2.4. Нормальний закон розподілу

Випадкова величина X розподілена по нормальному закону, якщо щільність розподілу імовірностей змінюється за законом

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.16)$$

де x - незалежна випадкова величина; a - середнє значення випадкової величини x ; σ - середнє квадратичне відхилення випадкової величини.

На рис.3.2 зображена крива нормального розподілу випадкової величини, що має симетричну форму. Ця крива відома в опублікованій літературі під різними назвами: крива Гаусса або крива Лапласа.

Дана крива математично описується залежністю (3.16). Такий розподіл випадкової величини є в тому випадку, коли на досліджувану випадкову величину впливають ряд випадкових факторів, кожний із яких не має домінуючого впливу на сумарне значення відхилення величини від її середнього значення.

У теорії надійності ця крива виражає собою щільність розподілу в часі відмов деяких технічних пристроїв.

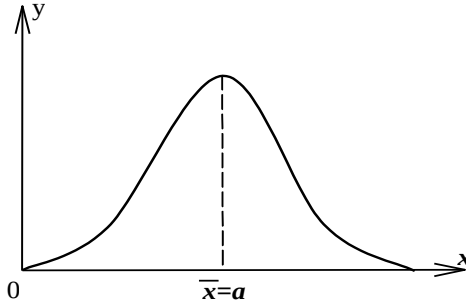


Рис.3.2. Крива нормального розподілу

Для нормального закону мають місце такі залежності:

$$F(t) = Q(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma_t^2}} dt; \quad (3.17)$$

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= 1 - Q(t) = 0,5 - \Phi(u); \\ f(t) &= \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma_t^2}}; \\ \lambda(t) &= \frac{f(t)}{P(t)}, \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

де a - середнє значення наробітку T ; $\sigma(t)$ - середнє квадратичне відхилення випадкової величини T ;

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \text{нормована функція Лапласа};$$

$$u = \frac{t - a}{\sigma_t}.$$

Основні характеристики нормального закону:

- ♦ область значень величини T - від 0 до $+\infty$, розподіл симетричний;
- ♦ математичне сподівання $MT = a$;
- ♦ дисперсія $DT = a^2$.

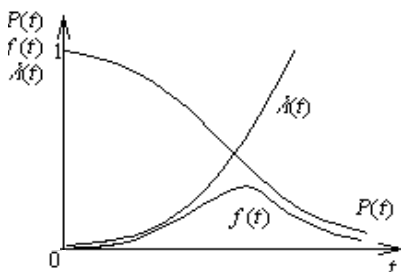


Рис. 3.3. Нормальний закон розподілу

На рис. 3.3 зображені кількісні характеристики надійності для нормального закону. З рис.3.3 видно, що величина $\lambda(t)$ зростає з часом t .

Нормальний розподіл застосовується для оцінки надійності технічних пристроїв в процесі зносу та старіння. Він також застосовується для характеристики результатів незалежних вимірів фізичних величин.

Нормальний розподіл є основним законом у математичній статистиці. Його застосування обумовлено центральною граничною теоремою, відповідно до якої розподіл середнього з n спостережень при досить загальних умовах прямує в результаті до нормального розподілу незалежно від виду вихідного розподілу.

3.2.5. Закон розподілу Релея

Розподіл Релея зустрічається при оцінці надійності складних технічних пристроїв. При зміні з часом відмов пристроїв відповідно до розподілу Релея їхня щільність визначається таким співвідношенням:

$$f(t) = \frac{t}{\sigma_1^2} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma_1^2}}, \quad (3.19)$$

де σ_1 - параметр розподілу Релея. Параметр σ_1 є модою цього розподілу.

Для закону Релея мають місце такі залежності:

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\frac{t^2}{2\sigma_1^2}}; \\ Q(t) &= 1 - e^{-\frac{t^2}{2\sigma_1^2}}; \\ \lambda(t) &= \frac{t}{\sigma_1^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Основні характеристики закону Релея:

- ◆ математичне сподівання $MT = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_1 \cong 1,253 \sigma_1$;
- ◆ дисперсія $DT = (2 - \frac{\pi}{2}) \sigma_1^2 = 0,429 \sigma_1^2$.

На рис.3.4 зображені кількісні характеристики надійності та інших величин для закону розподілу Релея. Як видно з рисунка, інтенсивність відмов розподілу з часом лінійно зростає. Це означає, що з часом відбувається інтенсивне старіння або знос технічного пристрою і відмови його не задовольняють умовам сталого випадкового процесу.

При цьому імовірність безвідмовної роботи пристрою $P(t)$ для великих проміжків часу t зменшується значно швидше, чим при експоненційному розподілі. Проте в початковий період роботи пристрою (при маленьких значеннях t), коли інтенсивність відмов незначна, імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ зменшується з часом t повільніше, ніж при експоненційному розподілі.

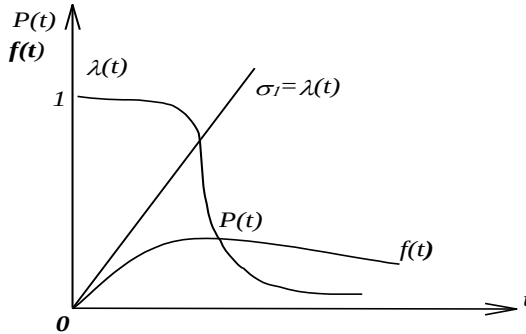


Рис.3.4. Закон розподілу Релея

Така зміна надійності може спостерігатися, наприклад, в пристроях короткочасної дії з резервуванням, у яких зміна відмов у часі окремих елементів пристрою підпорядковується (приблизно) розподілу Релея.

3.2.6. Гамма-розподіл

Гамма – розподіл представляє собою двухпараметричний розподіл випадкових величин. Він займає важливе місце в теорії надійності. Гамма-розподіл широко застосовують при опису виникнення відмов елементів пристроїв, часу відновлення, а також наробітку на відмову резервованих систем.

Щільність розподілу імовірностей випадкової величини x визначається такою залежністю:

$$f(t) \frac{1}{\Gamma(k)} \lambda^k t^{k-1} e^{-\lambda t} = \frac{\lambda^k}{(k-1)!} t^{k-1} e^{-\lambda t} \quad \text{при } t \geq 0, \quad (3.21)$$

де $\Gamma(k) = \int_0^{\infty} u^{k-1} e^{-u} du$ – гамма-функція.

Функція розподілу (інтегральний закон розподілу)

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^j}{j!}. \quad (3.22)$$

В теорії надійності γ -розподіл, звичайно, використовується при цілому k .

При $k = 1$ одержуємо експоненційний розподіл.

При $k > 1$ γ -розподіл є розподілом суми k випадкових величин, кожна з яких має експоненційний розподіл із параметром $\lambda_0 = \frac{1}{T}$.

Гамма - розподіл при цілому k іноді називають розподілом Ерланга. Для такого розподілу кількісні характеристики мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\lambda_0 t} \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!}; \\ f(t) &= \lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda_0 t}; \\ \lambda(t) &= \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)! \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

де k - параметр розподілу, що характеризує асиметрію і вихід величин за межі γ -розподілу. У залежності від його значення істотно змінюється вид основних характеристик надійності.

На рис.3.5 зображені кількісні характеристики надійності гамма-розподілу.

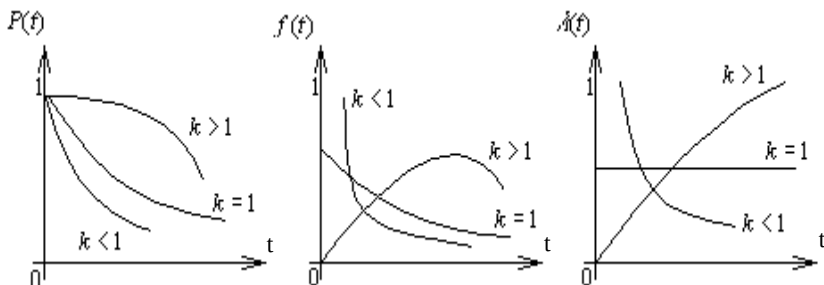


Рис.3.5. Гамма-розподіл

Основні характеристики γ -розподілу:

♦ математичне сподівання (середній наробіток до відмови)

$$MT = \frac{k}{\lambda_0};$$

♦ дисперсія

$$DT = \frac{k}{\lambda_0^2}.$$

3.2.7. Закон розподілу Вейбулла

Закон розподілу Вейбулла є двухпараметричний розподіл. Він застосовується для оцінки наробітку до відмови елементів електронних систем. Його також застосовують для оцінки електромеханічних вузлів апаратури та вузлів і деталей автомобілів.

При цьому законі щільність розподілу імовірностей відмови $f(t)$ визначається таким рівнянням:

$$f(t) = \lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}, \quad (3.24)$$

де λ_0 - параметр, що визначає масштаб; при його зміні крива розподілу стискується або розтягується; k - параметр асиметрії розподілу.

Для розподілу Вейбулла функція надійності $P(t)$ та інтенсивність відмов $\lambda(t)$ визначаються за такими формулами:

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\lambda_0 t^k}; \\ \lambda(t) &= \lambda_0 \cdot k \cdot t^{k-1}. \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Основні характеристики закону Вейбулла:

♦ математичне сподівання (середній наробіток до відмови)

$$MT = \frac{\Gamma(\frac{1}{k} + 1)}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}},$$

де $\Gamma(\frac{1}{k} + 1) = \int_0^{\infty} u^{\frac{1}{k}} e^{-u} du$ – гамма-функція;

♦ дисперсія $DT = \lambda_0 \left[\Gamma(\frac{2}{k} + 1) - \Gamma^2(\frac{1}{k} + 1) \right]$.

На рис.3.6 зображені кількісні характеристики надійності для закону Вейбулла.

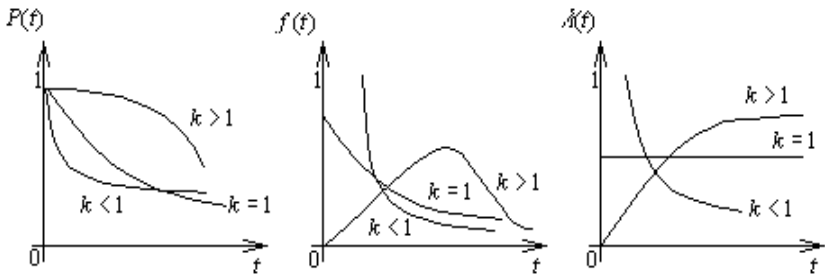


Рис.3.6. Закон розподілу Вейбулла

При $k = 1$ розподіл Вейбулла перетворюється в експоненційний розподіл; при $k > 1$ інтенсивність відмов починається з нуля і збільшується з часом; при $k = 2$ розподіл переходить в

розподіл Релея; при $k < 1$ інтенсивність відмов починається від $+\infty$ і з часом зменшується до нуля.

Про більш детальні відомості про теоретичні закони розподілу слід звертатись до відповідних курсів теорії імовірності.

3.2.8. Сума розподілів

У ряді випадків при аналізі надійності технічних систем, що складаються з елементів із різними розподілами наробітку до відмови, розподіли подають у вигляді суми двох або більше розподілів:

$$f(t) = c_1 f_1(t) + c_2 f_2(t),$$

де $f_1(t)$ і $f_2(t)$ – теоретичні розподіли визначеного виду; c_1 і c_2 – вагові коефіцієнти, що враховують вплив різних додатків. При цьому $c_1 + c_2 = 1$.

Як приклад розглянемо суму двох експоненційних розподілів, що найбільш часто зустрічаються на практиці:

$$f(t) = c_1 \cdot \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 t} + c_2 \cdot \lambda_2 \cdot e^{-\lambda_2 t}.$$

Для цього випадку маємо:

$$P(t) = c_1 \cdot e^{-\lambda_1 t} + c_2 \cdot e^{-\lambda_2 t};$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{c_1 \cdot \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 t} + c_2 \cdot \lambda_2 \cdot e^{-\lambda_2 t}}{c_1 \cdot e^{-\lambda_1 t} + c_2 \cdot e^{-\lambda_2 t}}.$$

Середній наробіток до відмови

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2}.$$

4. ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ

4.1. Основні етапи оцінки надійності

Оцінку надійності технічних пристроїв (систем) проводять на різних стадіях їх створення та експлуатації. При проектуванні пристрою проводять проектну оцінку його надійності, а при дослідних випробуваннях та промисловій експлуатації - експериментальну оцінку надійності пристрою.

Задачею оцінки надійності будь-яких технічних пристроїв є визначення кількісних показників надійності, які характеризують безвідмовність, ремонтопридатність, довговічність та збережуваність технічних пристроїв.

Рівень надійності будь-якого пристрою задається на етапі проектування, оскільки на цьому етапі визначається його структура. Обрана структура пристрою безпосередньо впливає на рівень його надійності та визначає ті матеріальні витрати, які необхідні будуть для забезпечення цього рівня в процесі проектування, виготовлення та експлуатації.

Це підтверджує досвід промислової експлуатації різноманітних технічних систем. Так, із множини факторів, що впливають на безвідмовність, найбільший вплив мають конструктивні фактори.

Таким чином, проектування є важливим етапом в забезпеченні необхідного рівня надійності пристроїв. Тому попередній аналіз і оцінку надійності пристроїв варто робити ще на етапі проектування, коли вплив тих або інших схемних та конструктивних змін не потребують великих матеріальних витрат.

4.2. Основні математичні моделі надійності

4.2.1. Логічні моделі

Надійність пристроїв на етапі проектування визначається за допомогою відповідних математичних моделей надійності, які являють собою модель функціонування пристроїв.

Математична модель встановлює аналітичну залежність показника, який характеризує надійність пристрою, від кількісних показників надійності елементів пристрою. Вигляд математичної моделі визначає імовірність застосування тих або інших розрахункових формул для визначення надійності пристрою.

Розрізняють такі математичні моделі [3]:

1) двопозиційні моделі, що описують пристрої, які знаходяться в одному із двох можливих станів: 1 (працездатний) або 0 (непрацездатний), при цьому елементи пристрою також знаходяться в одному із двох станів: 1 або 0 (наприклад, модель функціонування пристрою, що враховує тільки раптові відмови);

2) двопозиційні моделі, що описують пристрої, які знаходяться в стані 1 або 0, а елементи пристрою в цей час знаходяться в одному із проміжних станів від 1 до 0 (наприклад, модель функціонування пристрою, що враховує тільки параметричні відмови);

3) багатопозиційні моделі, що описують пристрої, які знаходяться в неперервній або дискретній множині станів від 1 до 0, а елементи пристрою в цей час знаходяться тільки в одному із двох можливих станів 1 або 0 (наприклад, модель функціонування складного пристрою в нормальних умовах до настання зношуваних відмов);

4) багатопозиційні моделі, що описують пристрої, які знаходяться так само, як і їхні елементи, у неперервній або дискретній множині станів від 1 до 0 (наприклад, модель функціонування складного пристрою в умовах впливу проникаючої радіації тощо).

В якості математичних моделей при визначенні надійності пристрою найбільш часто застосовують логічні моделі (схеми) надійності і метод графів (схеми станів).

Логічна модель надійності являє собою графічне зображення складових частин (елементів) виробу, у якому функціональні зв'язки між елементами замінюються логічними. При її побудові передбачається, що відмови елементів незалежні, а елементи і виріб можуть знаходитися в одному із двох можливих станів: працездатному або непрацездатному. Така модель дозволяє враховувати можливі стани виробу по стану його елементів.

Таким чином, логічна модель надійності характеризує безвідмовну роботу виробу в залежності від справності або несправності елементів виробу. Крім того, дана модель встановлює математичну залежність надійності будь-якої технічної системи від кількісних показників надійності елементів, що входять до її складу.

У випадку визначення надійності багатфункціональних систем, логічні моделі складають по кожній функції.

Найбільш простими логічними моделями надійності є послідовні та паралельні моделі, що складаються з незалежних елементів. Ці моделі найбільше часто використовують при попередніх визначеннях надійності простих пристроїв (систем).

Послідовна модель надійності являє собою логічну схему, у якій елементи між собою з'єднані послідовно. Таке з'єднання, з погляду надійності, називають послідовним (основним).

На рис.4.1 зображена структурна схема системи з послідовним з'єднанням елементів. Для такої моделі умовою роботи без

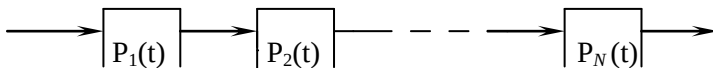


Рис.4.1. Послідовна модель надійності

відмов є безвідмовна робота всіх елементів даного з'єднання. Таким чином, при послідовному з'єднанні елементів система

зберігає свою працездатність при зберіганні працездатності всіма елементам послідовного з'єднання, а відмова одного з елементів веде до відмови всієї системи.

Якщо всі елементи системи працездатні та незалежні, то імовірність безвідмовної роботи такої системи за час t визначається за такою формулою:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (4.1)$$

де $P_i(t)$ - імовірність безвідмовної роботи i -го елемента за час t ; N -кількість елементів системи.

Імовірність відмови системи за час t визначається за формулою:

$$Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (4.2)$$

Надійність системи з послідовним з'єднанням елементів залежить як від кількості елементів, так і від їхніх показників надійності. Очевидно, що зі збільшенням кількості елементів, імовірність безвідмовної роботи системи зменшується.

Послідовні моделі надійності використовуються для оцінки надійності нерезервованих систем.

Паралельна модель надійності являє собою логічну схему, у якій елементи між собою з'єднані паралельно.

На рис.4.2 зображена структурна схема системи з паралельним з'єднанням елементів.

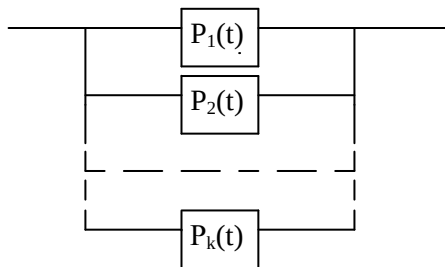


Рис. 4.2. Паралельна модель надійності

Таке з'єднання елементів, з погляду надійності, називають паралельним(структурним резервуванням) і розглядають його як спосіб підвищення надійності.

Для такої моделі умовою безвідмовної роботи є безвідмовна робота хоча б одного елемента паралельного з'єднання, а відмова системи настає при відмові всіх елементів даного з'єднання.

Надійність системи при паралельно з'єднаних елементах на логічній схемі визначається за формулами, що відповідають визначеному виду резервування.

Імовірність безвідмовної роботи системи, зображеної на рис.4.2, за час t визначається за формулою:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^k [1 - P_j(t)], \quad (4.3)$$

де $P_j(t)$ - імовірність безвідмовної роботи за час t j -го елемента системи; k -кількість паралельно з'єднаних елементів системи.

Імовірність відмови системи за час t визначається за формулою:

$$Q_c(t) = \prod_{j=1}^k [1 - P_j(t)]. \quad (4.4)$$

Паралельні моделі надійності використовуються для визначення надійності резервованих систем. Таким чином, використовуючи математичні моделі, можна знайти значення показників надійності пристрою (системи) за даними про надійність елементів.

Незважаючи на простоту та наближеність розглянутих моделей вони достатньо широко застосовуються при попередніх визначеннях надійності при проектуванні пристроїв.

Очевидно, що достовірність результатів надійності пристроїв багато в чому залежить від повноти математичної моделі та повноти урахування всіх факторів, що впливають на надійність.

Головна складність при визначенні надійності - це складення логічної моделі та вибір відповідних формул розрахунку, за допомогою яких потім визначають кількісні значення показників надійності. Справа в тому, що логічна модель (схема) не завжди співпадає з функціональною (електричною) схемою пристрою. В цьому випадку віднесення з'єднання елементів до послідовного або паралельного з'єднання елементів на логічній моделі трохи ускладнене і звичайно залежить від виконуваної функції даним з'єднанням, а також виду відмов.

Як приклад побудови логічної моделі для визначення надійності розглянемо пристрій, електрична схема якого зображена на рис.4.3

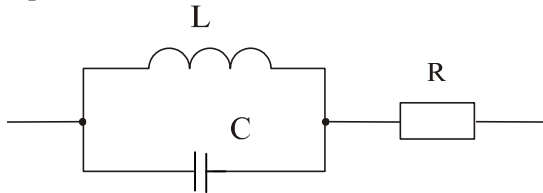


Рис.4.3. Електрична схема коливального контуру

Коливний контур буде нормально функціонувати, якщо всі елементи контуру будуть справні, тобто працездатні, а вихід із строю будь-якого з них призводить до порушення функціонування даної схеми, тобто відмови.

Таким чином, незважаючи на наявність у схемі паралельно-послідовного з'єднання елементів, визначення надійності даної схеми повинно проводитися по послідовній моделі, у якій елементи з'єднані між собою послідовно, оскільки саме ця логічна модель характеризує безвідмовну роботу даної схеми.

Приклад логічної моделі для оцінки надійності схеми наведено на рис.4.4.

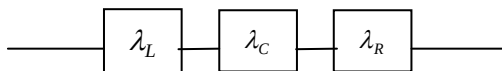


Рис.4.4. Логічна модель розрахунку надійності коливного контуру

Задаючись значеннями інтенсивності відмов λ_L , λ_C і λ_R , визначають імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ за час t .

4.2.2. Метод графів

Метод графів (станів) використовується при визначенні надійності складних пристроїв, функціонування яких описується двопозиційними моделями без урахування післядії відмов. Метод заснований на припущенні, що час наробітку до відмови і час відновлення розподілені по експоненційному закону. Даний метод придатний для оцінки надійності як невідновлюваних, так і відновлювальних пристроїв (систем).

Для визначення кількісних показників надійності будують математичну (логічну) модель надійності пристрою у вигляді графа (схеми) станів, на якому у вигляді кружків зображують можливі стани пристрою, в яких він може знаходитися при відмовах або відновленнях елементів, і відповідними стрілками можливі напрямки переходів з одного стану в інший. Біля стрілок вказують відповідні інтенсивності переходів (λ або μ). У випадку невідновлюваного пристрою між станами є лише по одній стрілці.

Як приклад використання даного методу для оцінки надійності, розглянемо відновлювальний пристрій що складається з n послідовно з'єднаних на логічній схемі нерезервованих елементів. Надійність елементів характеризується інтенсивностями відмов λ_j і відновленнями μ_j .

Схема графа станів для пристрою з відновленням наведена на рис.4.5.

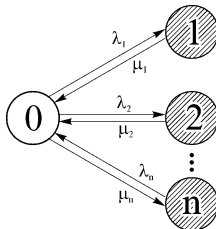


Рис. 4.5. Граф станів нерезервованого пристрою з відновленням

0 - стан, коли пристрій працездатний; 1, 2, ..., **n** – стан, коли пристрій непрацездатний і проводиться відновлення відповідного елемента.

[illegible]

Система диференціальних рівнянь доповнюється нормувальною умовою

$$\sum_{j=0}^n P_j(t) = 1, \quad (4.6)$$

69

Таким чином, уся множина можливих станів пристрою може бути подана у вигляді двох множин: множина станів $\mathbf{n}_1$, у яких пристрій працездатний, та множина станів $\mathbf{n}_2$, у яких пристрій непрацездатний.

Функція готовності пристрою визначається за формулою:

$$K_{\Gamma}(t) = \sum_{j=0}^{n_1} P_j(t), \quad (4.7)$$

де $P_j(t)$ - імовірність перебування пристрою в j -му працездатному стані.

Імовірність станів $P_j(t)$ пристрою, у випадку відмов його елементів, визначається шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь. При розв'язанні, як правило, використовують перетворення Лапласа (додаток Д1, табл. Д1-1).

Функція простою визначається з рівняння:

$$K_{\Pi}(t) = 1 - K_{\Gamma}(t) = 1 - \sum_{j=0}^{n_1} P_j(t). \quad (4.8)$$

Якщо необхідно визначити коефіцієнт готовності K_{Γ} пристрою, то в цьому випадку розв'язують систему диференціальних рівнянь при сталому режимі експлуатації, тобто при $t \rightarrow \infty$.

У цьому випадку усі похідні $P'_j(t) = 0$ і система диференціальних рівнянь перетвориться в систему алгебраїчних рівнянь, розв'язуючи яку, з урахуванням нормувальної умови, отримують:

$$K_{\Gamma} = P_0 = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\mu_j} + 1}. \quad (4.9)$$

Середній наробіток пристрою до відмови визначається хом підсумовування середніх часів перебування пристрою в працездатних станах за формулою

$$T = \sum_{j=0}^{n_1} T_j, \quad (4.10)$$

де T_j - середній час перебування пристрою в j -му стані.

Слід зазначити, що застосування логічних схем і відповідних їм формул розрахунку надійності резервованих виробів (систем) дозволяє визначити кількісні показники надійності (безвідмовності) значно швидше, ніж застосування методу графів станів із наступним розв'язанням системи диференціальних рівнянь.

4.3. Перехід від логічної моделі до графа станів при оцінці надійності

У ряді випадків при оцінці надійності пристроїв (систем), що відновлюються, із використанням методу графа станів побудова графа стану пристрою може бути значно полегшена, якщо попередньо скласти логічну схему (модель) для розрахунку надійності пристрою, вважаючи його умовно невідновлюваним.

У табл.4.1 приведені типові з'єднання елементів для невідновлюваних систем. Для переходу до графів станів відповідних систем необхідно в графах станів (табл.4.1) вказати стрілки з інтенсивностями відновлень.

Як видно з табл.4.1, послідовному з'єднанню на логічній схемі надійності відповідає простий граф станів, що розгалужується, а паралельному (навантаженому) з'єднанню - складний граф трикутної структури.

На схемах графів (при елементах різної надійності) номери станів позначені двійковим кодом, у якому кількість знаків дорівнює кількості елементів. Місце знака відповідає номеру елемента, а символ "1" і "0" означають працездатний та непрацездатний стани відповідно.

У випадку елементів однакової надійності графи станів спрощуються.

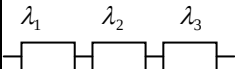
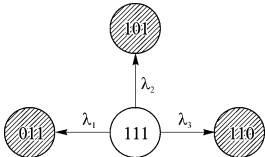
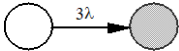
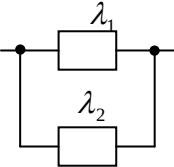
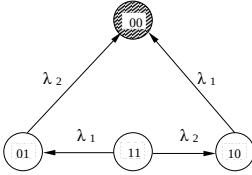
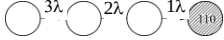
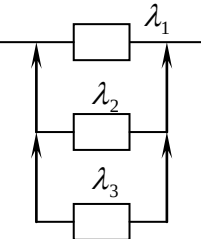
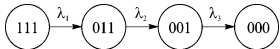
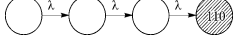
У випадку триразового резервування (резерв навантажений) стани, що відповідають непрацездатності будь-

якого з елементів з'єднання розміщуються послідовно зі станами, що відповідають непрацездатності елементів.

З урахуванням цих особливостей структури графа станів перехід від логічної схеми для розрахунку надійності до графа станів варто виконувати в такій послідовності:

1) в логічній схемі для розрахунку надійності виділяють послідовно-паралельні і паралельно-послідовні з'єднання елементів, які потім об'єднують;

Таблиця 4.1

Тип з'єднання елементів на логічній схемі	Графи станів	
	при елементах різної надійності	при елементах однакової надійності
		
		
		

◆ однакові стани елементів з'єднуються;

3) за даними правилами будують графі станів окремо для працюючих (навантажених) підсистем і підсистем, що знаходяться в ненавантаженому резерві;

4) кінцеві стани графа станів працюючої (навантаженої) підсистеми є початковими вершинами графа станів для підсистеми, що знаходиться в ненавантаженому резерві. До кожної з цих вершин необхідно приєднати граф станів підсистеми ненавантаженого резерву.

Розглянемо особливості побудови графа при елементах різної надійності. Припустимо, що потік відмов елементів найпростіший, тобто без післядії. В цьому випадку при відмові будь-якого з елементів система з справного стану переходить до інших станів, кожний з яких відповідає непрацездатності лише одного з елементів, що входять в послідовне або паралельне з'єднання на логічній схемі. При цьому інші елементи системи у цих станах залишаються працездатними.

Так, у випадку дубльованої системи (резерв навантажений) при відмові обох елементів з'єднання, шляхи графа сходяться до одного стану, у якому система непрацездатна.

На рис.4.6 приведено приклад логічної схеми для розрахунку надійності відповідного їй графа станів.

4.4. Метод розрахунку надійності із застосуванням формули повної імовірності

Метод заснований на використанні формули повної імовірності:

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(B_j) \cdot P\left(\frac{A}{B_j}\right),$$

де $P(A)$ - імовірність події A , що може наступити лише за умови появи одної з несумісних подій $B_1, B_2, \dots, B_n$, що утворюють повну групу; $P\left(\frac{A}{B_j}\right)$ - умовна імовірність події A .

При використанні формули повної імовірності для розрахунку надійності розглядаються гіпотези $H_1, H_2, \dots, H_n$ появи несумісних подій, що утворюють повну групу. Разом з однією із цих подій може відбутися подія X - безвідмовна робота системи на протязі часу t .

В цьому випадку формула повної імовірності має вигляд:

$$P(X) = \sum_{j=1}^n P(H_j) \cdot P\left(\frac{X}{H_j}\right). \quad (4.11)$$

Таким чином, імовірність появи події X (безвідмовна робота системи) дорівнює сумі добутків імовірності кожної гіпотези $P(H_j)$ на умовну імовірність $P\left(\frac{X}{H_j}\right)$ події при цій гіпотезі.

При використанні формули (4.11) для розрахунку надійності на логічній схемі надійності системи вибирається визначена група елементів і розглядаються всі можливі гіпотези, що стосуються зміни станів цих елементів на протязі наробітку $(0, t)$. При цьому в кожній з гіпотез враховується, що будь-який елемент групи може знаходитися в одному із двох можливих станів: працездатному або непрацездатному.

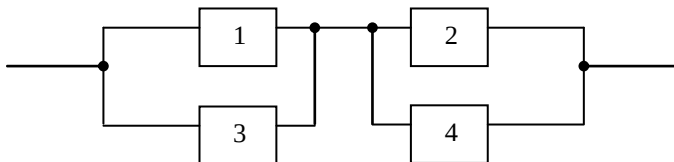


Рис.4.7. Логічна схема розрахунку надійності

Як приклад застосування формули повної імовірності для розрахунку надійності, розглянемо систему, логічна схема якої наведена на рис.(4.7).

Система являє собою паралельно - послідовне з'єднання елементів. Розглянемо групу, що складається з 1 і 2 елементів

при таких гіпотезах, що стосуються можливих станів цих елементів:

H₁ - обидва елементи працездатні;

H₂ - перший елемент відмовив, другий елемент залишився працездатним;

H₃ - другий елемент відмовив, перший елемент залишився працездатним;

H₄ - обидва елементи відмовили.

Гіпотези і відповідні їм імовірності наведені в табл.5.2. В таблиці застосовані наступні умовні позначення: символ “1” означає працездатний стан елемента, а символ “0” - непрацездатний.

Таблиця 5.2

Гіпотеза	Стан елемента		Імовірність гіпотези $P(H_j)$	Умовна імовірність безвідмовної роботи системи при гіпотезі $P\left(\frac{X}{H_j}\right)$
	1	2		
H₁	1	1	$p_1 p_2$	1
H₂	0	1	$q_1 p_2$	p_3
H₃	1	0	$p_1 q_2$	p_4
H₄	0	0	$q_1 q_2$	$p_3 p_4$

Підставляючи вираз для $P(H_j)$ та $P\left(\frac{X}{H_j}\right)$ в (4.11),

одержимо вираз для імовірності безвідмовної роботи системи за заданий час (0, t):

$$P_c(t) = p_1 p_2 + q_1 p_2 p_3 + p_1 q_2 p_4 + q_1 q_2 p_3 p_4$$

Так як $q_i = 1 - p_i$, то вираз для $P(t)$ буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} P_c(t) &= p_1 p_2 + (1 - p_1) p_2 p_3 + p_1 (1 - p_2) p_4 + (1 - p_1)(1 - p_2) p_3 p_4 = \\ &= p_1 p_2 + p_2 p_3 + p_1 p_4 + p_3 \cdot p_4 - (p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_4 + p_1 p_3 \cdot p_4 + \\ &+ p_2 p_3 p_4) + p_1 p_2 p_3 p_4. \end{aligned}$$

Застосування даного методу при розрахунку надійності дозволяє скоротити обсяг математичних перетворень і обчислень.

5. НАДІЙНІСТЬ НЕРЕЗЕРВОВАНИХ СИСТЕМ

5.1. Надійність невідновлюваних систем

5.1.1. Розрахунок надійності при раптових відмовах

Оцінка надійності будь-якого технічного об'єкту (системи) заключається у визначенні кількісних показників надійності об'єкту при заданій його структурі і відомих характеристиках надійності вхідних елементів (вузлів, блоків тощо).

В залежності від виду з'єднання елементів в логічній моделі (схемі) надійності розрізняють дві групи методів, які використовуються для оцінки надійності: аналітичні та експериментальні.

Аналітичні методи оцінки ґрунтуються на теорії імовірностей, теорії масового обслуговування, теорії графів та інших математичних методах.

Експериментальні методи оцінки ґрунтуються на досліді моделей об'єктів: математичних і фізичних.

Вибір конкретного методу оцінки надійності залежить від виду математичної (логічної) моделі надійності виробу, виду закону розподілу наробітку до відмови і стадії проектування об'єкта.

При оцінці надійності невідновлюваних систем елементи системи розглядаються як невідновлювані. В цьому випадку показники безвідмовності виробу визначаються по показниках безвідмовності елементів λ_i , T_i і $P_i(t)$.

Розглянемо метод розрахунку надійності для випадку, коли елементи пристрою (системи) на логічній моделі надійності мають послідовне з'єднання.

Метод заснований на наступних припущеннях:

- ♦ відмови елементів являють собою найпростіший потік відмов. Це означає, що відмови елементів пристрою являються подіями випадковими, незалежними та без після дії.

- ♦ відмова будь-якого елемента спричиняє до відмови пристрою в цілому;

♦ інтенсивність відмов елементів має постійне значення, тобто не залежить від часу. Отже, у цьому випадку справедливий експоненційний закон розподілу наробітку до відмови.

Показники надійності (безвідмовності) пристрою в цьому випадку визначаються по показниках безвідмовності елементів із використанням формул для послідовного з'єднання (рис.4.1).

Імовірність безвідмовної роботи нерезервованого пристрою за заданий час t визначається за формулою:

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (5.1)$$

де $P_i(t)$ - імовірність безвідмовної роботи i -го елемента пристрою за час t ; N - кількість елементів пристрою.

У випадку експоненційного закону розподілу часу наробітку до відмови елементів, коли

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t},$$

то імовірність безвідмовної роботи пристрою за заданий час t визначається за формулою:

$$P(t) = e^{-t \sum_{i=1}^N \lambda_i} = e^{-\lambda t}, \quad (5.2)$$

де $\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$ - інтенсивність відмов пристрою (системи);

λ_i - інтенсивність відмов i -го елемента пристрою (системи).

Це означає, що загальна інтенсивність відмов пристрою при визначенні надійності визначається шляхом підсумовування інтенсивності відмов усіх елементів пристрою.

При інтенсивності відмов, що задовольняє умові $\lambda t \leq 0.1$, для визначення імовірності безвідмовної роботи користуються іноді наближеною формулою, отриманою шляхом розкладання експоненціальної функції в степеневий ряд:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \dots$$

Якщо відкинути члени ряду другого та більш високих порядків внаслідок їхньої малості, отримаємо:

$$P(t) \approx 1 - \lambda t = 1 - t \sum_{i=1}^N \lambda_i .$$

Величина помилки в оцінках $P(t)$ в цьому випадку не перевищує $(0,5 - 1,0)\%$.

Середній час безвідмовної роботи пристрою (системи) визначається за формулою:

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} . \quad (5.3)$$

Таким чином, для визначення кількісних показників безвідмовності пристрою, в якого елементи в логічній моделі надійності мають послідовне з'єднання, достатньо знати кількість елементів, що входять до складу пристрою, та значення інтенсивностей їхніх відмов.

Даний метод оцінки показників безвідмовності пристроїв (систем) одержав назву метод “ λ - характеристик”. Він широко застосовується при визначенні імовірності безвідмовної роботи за заданий час t технічних пристроїв та їхніх складових частин (елементів), з використанням довідкових даних по інтенсивності відмов елементів (див. додаток Д2 даного посібника).

Для зменшення кількості раптових відмов проводять попередні технологічні тренування пристроїв під навантаженням з метою виявлення прихованих виробничих дефектів, а також вводять захист від механічних та кліматичних впливів.

Проте слід відзначити, що метод оцінки надійності за допомогою “ λ - характеристик” має ряд недоліків:

1) точність та достовірність результатів розрахунку надійності залежить від точності вихідних даних (λ - характеристик) елементів. Крім того, для одержання достовірних λ - характеристик елементів потрібні тривалі

випробування. При цьому необхідно випробувати великі партії елементів, що пов'язано з великими виробничими витратами;

2) метод не враховує поступових (параметричних) відмов та збоїв, що найбільш часто зустрічаються при експлуатації електронно-обчислювальних машин.

5.1.2. Розрахунок надійності при параметричних відмовах

У багатьох випадках порушення працездатності технічних пристроїв відбувається не тільки з вини виникнення раптових відмов, але й в наслідок виникнення параметричних відмов.

Параметричні відмови викликані зміною вихідного (визначального) параметра під впливом дії фізичних процесів і в наслідок старіння та зносу.

Так, основною причиною відмов запам'ятовуючих пристроїв (ЗП) в електронно-обчислювальних машинах є саме усунні відмови, поява яких пов'язана з дрейфом робочих параметрів ЗП під дією внутрішніх та зовнішніх факторів [26].

Відмови, які характеризуються повільною зміною значень одного або декількох параметрів пристрою в залежності від тривалості наробітку його, називають поступовими або параметричними.

Принципової різниці між раптовими відмовами та поступовими (параметричними) немає. Раптові відмови в більшості випадків є наслідком поступової зміни робочих параметрів (характеристик) елементів в пристроях, електричні режими роботи яких не відповідають вимогам технічних вимог на дані елементи.

Поступові відмови наступають тоді, коли відхилення значень основних параметрів пристрою (системи) виходить за допустимі границі, при яких пристрій вважається непрацездатним.

Як показує досвід експлуатації різних технічних пристроїв (систем) більшість відмов, що відбуваються в початковий період експлуатації, є поступовими, тобто параметричними.

Значна частина цих відмов обумовлена помилками, допущеними при проектуванні технічних пристроїв, наприклад:

◆ критичність пристроїв до зміни робочих параметрів елементів (резисторів, конденсаторів, транзисторів і т.д.), що з часом є причиною параметричної відмови;

◆ застосування елементів в робочих режимах, які перевищують допустимі норми для цих елементів. Таке явище можливе, якщо при проектуванні пристроїв відсутній контроль за правильністю застосування елементів в технічних пристроях та системах.

Очевидно, що поступова зміна параметрів елементів призводить з часом до раптових відмов. Необхідність обліку параметричних відмов підтверджується даними, які поступають з місць експлуатації виробів різного призначення, з яких слідує, що більше 50% відмов елементів – поступові.

Тому оцінка впливу параметричних відмов на надійність складних систем та вибір методів боротьби з такими відмовами є однією з найважливіших задач теорії надійності.

Оскільки виникнення раптових та поступових відмов є випадковими подіями, то для оцінки параметричної надійності користуються методами теорії імовірностей та математичної статистики.

Для оцінки параметричної надійності використовують:

- ◆ аналітичний метод;
- ◆ імовірнісне модулювання на цифрових електронно-обчислювальних машинах;
- ◆ метод граничних або матричних випробувань.

Аналітичний метод розрахунку застосовується в тому випадку, коли відомі схема системи, параметри елементів та допуски на відхилення визначального параметра системи. При цьому під визначальним параметром розуміють параметр пристрою (системи), по якому оцінюється якість його функціонування.

Визначальний параметр в процесі наробітку пристрою може досягати критичного значення, після якого стан пристрою вважається незадовільним (непрацездатним).

Критичне (граничне) значення визначального параметра називають границею робочої області.

Вид залежності визначального параметра $y(t)$ від параметрів елементів може бути представлений рівнянням:

$$y(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)].$$

Аналітичний метод розрахунку надійності технічних пристроїв базується на виділенні елементів пристрою, які схильні до раптових та поступових відмов, та наступному визначенні імовірності безвідмовної роботи для кожної групи однотипних елементів схеми окремо та загальну імовірність безвідмовної роботи пристрою як добуток двох імовірностей:

$$P_c(t) = P_p(t)P_n(t), \quad (5.4)$$

де $P_p(t)$ - імовірність безвідмовної роботи схеми по раптовим відмовам; $P_n(t)$ - імовірність безвідмовної роботи по поступовим відмовам.

Такий підхід цілком можливий при наступних припущеннях: події, які пов'язані з виходом із строю елементів по причині раптових та поступових відмов, є сумісні та незалежні.

Сумісність виходу із ладу елементів через старіння та поломки не викликає сумніву, оскільки можливі випадки, коли елемент буває близьким до виходу із ладу внаслідок старіння і в цей момент елемент може випадково вийти із ладу в результаті поломки.

З іншого боку, вихід із ладу елементів в результаті поломок показує, що аварійні відмови або поломки головним чином визначаються діями зовнішніх умов (факторів) на пристрої при їх експлуатації.

На основі даного припущення логічну схему для розрахунку надійності можна представити у вигляді послідовно з'єднаних елементів (блоків).

Розглянемо визначення імовірності справної роботи елемента (схеми, системи), який піддається поступовим (параметричним) відмовам.

Задача оцінки параметричної надійності виконується в два етапи:

♦ на першому етапі визначаються допустимі значення відхилення тих або інших параметрів елементів схеми;

♦ на другому етапі по визначеним допустимим значенням оцінюють показники надійності схеми та пристрою в цілому.

Розрахункові формули для оцінки показників надійності при появі поступових відмов різні в залежності від того, який пристрій (система) при цьому оцінюється: не відновлювальний або відновлювальний.

Для елементів та пристроїв з неперервною характеристикою:

$$U_{\text{вих}}(t) = f[U_{\text{вих}}(t)]$$

відхилення значення вихідної величини y при постійному значенні вхідної величини ($x = \text{const}$) як правило підкоряється нормальному закону. Так, імовірність безвідмовної роботи одного елемента визначається за формулою:

$$P(t) = [0, -\Phi(u)].$$

Якщо працездатність схеми залежить від декількох параметрів, то, при умові незалежності цих параметрів, імовірність безвідмовної роботи схеми по поступовим відмовам визначається за наступним виразом:

$$P_{\text{нс}}(t) = \prod_{i=1}^k [0, 5 - \Phi(u)],$$

$$\text{де } \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{x^2}{2}} dx; \quad u = \frac{t - T_i}{\sigma_i};$$

T_i - середнє значення часу відхилення i -го параметра вище критичного значення; σ_i - середнє квадратичне відхилення i -го параметра; k - кількість параметрів, які визначають працездатність схеми.

Імовірність безвідмовної роботи схеми пристрою при появі поступових відмов визначається за наступним виразом:

$$P_{nc}(t) = \prod_{i=1}^l P_{nc}(t), \quad (5.5)$$

де l - кількість схем, які утворюють систему.

Для відновлювальних пристроїв (систем) при оцінці показників надійності слід враховувати те, що потік відмов для окремої схеми є стаціонарним з обмеженою післядією, а потік відмов для всієї системи – є найпростішим. Тому для оцінки імовірності безвідмовної роботи схеми пристрою по поступовим відмовам з достатньо прийнятним наближенням можна використати експоненційний закон, тобто поступові відмови, як і раптові, підкоряються експоненційному закону розподілу. Тоді

$$P_{nc}(t) = e^{-\lambda_n t}, \quad (5.6)$$

де λ_n - інтенсивність виходу за допустиму межу деякого визначального параметра.

Слід відмітити, що при застосуванні аналітичного методу виникають певні труднощі при оцінці поступових відмов для напівпровідникових інтегральних схем із-за відсутності аналітичних залежностей, які визначають інтенсивність поступових відмов в залежності від числа компонентів на кристалі, типу схеми та метода з'єднання. В цьому випадку можна визначати тільки інтенсивність поступових відмов по відношенню до характеристик раптових відмов.

Експериментальні дані показують, що поступові відмови інтегральних схем складають приблизно 15% загальної кількості відмов. Тому можна прийняти, що інтенсивність поступових відмов λ_{nc} для інтегральних схем складає $0,15\lambda_p$ раптових відмов [6].

Для оцінки надійності складних технічних систем з урахуванням можливих параметричних відмов часто використовують імовірнісне моделювання. Імовірнісне моделювання передбачає складення математичних моделей процесів розвитку параметричних відмов. В таких моделях досліджують дію різних фізичних навантажень на зміну параметрів (характеристик) технічної системи.

Ціль таких досліджень – визначення області безвідмовної роботи системи шляхом оптимального вибору параметрів комплектуючих елементів (компонентів), які забезпечують найбільшу стабільність роботи системи в заданих умовах експлуатації.

По результатам досліджень будується область безвідмовної роботи (ОБР) або робоча область параметрів (РОП).

На рис. 5.1 зображено графік залежності визначального параметра системи y від параметра елемента x .

Відхилення визначального параметра y від номінального значення $y_{\text{ном}}$ за допустимі границі y_1 і y_2 та вихід параметра

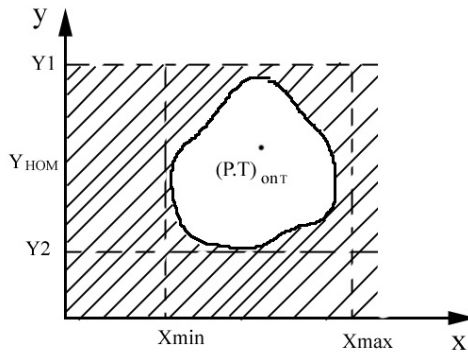


Рис. 5.1. Побудова робочої області безвідмовної роботи (ОБР)

x за границі x_{min} та x_{max} служить критерієм параметричної відмови системи.

Область параметричних відмов на рис.5.1 заштрихована. Оптимальна робоча точка $(P.T.)_{\text{опт}}$ як правило знаходиться у центрі робочої області. Отже, визначивши робочу область, ми в систему як би вводимо запас по критичному параметру - параметричну надмірність.

Перевага даного методу полягає в тому, що він дозволяє визначити область стійкої роботи схеми і вибрати номінальні значення елементів так, щоб номінальне значення параметра схеми знаходилось в середині цієї області.

Однак, побудова області безвідмовної роботи можлива тільки при невеликій кількості параметрів. Для багатопараметричних виробів (систем) ця побудова та вибір оптимальної робочої точки проводиться експериментально методом граничних та матричних випробувань.

Матричні (граничні) випробування проводяться на стадії проектування вузлів системи для аналітичного або експериментального дослідження правильності підбору параметрів елементів у вузлах системи.

Матричні (граничні) випробування можна провести для нескладних схем вузлів при відомих залежностях вихідних параметрів від вхідних та встановлених значеннях $Y_{i \min}$, $Y_{i \max}$.

Для електронних вузлів (схем), для яких залежності $y_i = f_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)$ складні, застосовується експериментальний метод знаходження границь області безвідмовної роботи. Цей метод часто називають граничними випробуваннями.

Оскільки кількість вхідних параметрів x_j як правило велике, то область безвідмовної роботи одержують у виді дискретних розрізів її площинами, паралельними координатним площинам. З цією метою як правило збирають макет вузла (схеми), в якому можна змінювати величини параметрів x_j (наприклад, опір, ємність і т.п. або зовнішні умови).

Якщо змінювати значення одного з параметрів (наприклад, x_R і при цьому визначають відповідні значення другого параметра (наприклад, x_C), при яких вихідні параметри виходять за встановлені для них границі. Як правило, матричні випробування можливо провести при декількох дискретних значеннях вхідних параметрів.

По результатам матричних випробувань можна змінити вибрані до цього номінальні значення та допуски вхідних параметрів для того, щоб забезпечити найбільшу безвідмовність вузла по його поступовим відмовам елементів з урахуванням умов експлуатації (теплових, ударно-вібраційних та інших навантажень).

Особливо великий ефект матричні випробування дають у випадку, коли відомі залежності зміни параметрів елементів від

температури, вологості та наробітку, а також інших факторів і ці залежності покладені в основу моделювання параметрів елементів.

Досвід експлуатації електронних систем різного застосування показує, що неувага до матричних (граничних) випробувань при розробці окремих вузлів та блоків радіоелектронних систем веде до створення систем, які можуть бути недостатньо стійкими до дій експлуатаційних факторів, в наслідок чого такі системи мають низьку експлуатаційну надійність.

5.2. Розрахунок надійності системи автоматичного управління

Розглянемо систему, структурна схема якої зображена на рис. 5.2. В систему входять: порівнювальний пристрій (ПП), вимірювальний пристрій (ВП), підсилювач (П), зі схемою зворотного зв'язку (ЗЗ), виконавчий пристрій (ВП) та об'єкт управління (ОУ).

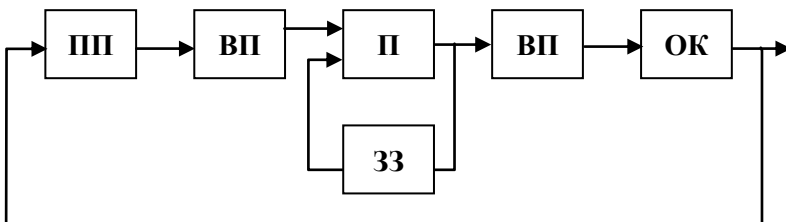


Рис. 5.2. Структурна схема САУ зі зворотнім зв'язком

Вказані основні елементи (пристрої) на структурній схемі системи слід розглядати як елементи для розрахунку надійності системи.

В свою чергу кожний із цих елементів складається із первинних елементів (компонентів), що входять до його складу. Так, підсилювальний пристрій може включати до свого складу такі компоненти: резистори, конденсатори, транзистори та інші деталі.

Для первинних елементів характеристики надійності приводяться в нормативно-технічних документах (НТД) та довідковій літературі.

Для розрахунку надійності системи формують критерії відмови як для системи, так і для її основних елементів. Спочатку критерії відмови формують для раптових відмов, а потім – для поступових відмов. Наприклад, для конденсаторів раптові відмови можуть відбуватися за рахунок обривів та коротких замикань, для резисторів недротяжних – за рахунок обривів. Для транзисторів раптові відмови відбуваються за рахунок пробою переходів.

Після формулювання критерію для раптових відмов формують критерії для поступових (параметричних) відмов, які можуть виникати в системі. Як відомо, в процесі експлуатації будь-якого виробу параметри первинних елементів змінюються на протязі часу (опір в резисторах, ємність в конденсаторів, коефіцієнт підсилення у транзисторів і т. п.).

При розрахунку режимів роботи основних елементів системи визначають допустимі значення параметрів елементів, при досягненні яких система відмовляє (втрачає свою працездатність).

Для первинних елементів критерій відмови визначається, виходячи із зміни основного (визначального) параметра, що характеризує працездатність даного основного елемента.

Так, для підсилювачів визначальним параметром є коефіцієнт підсилення. Відмова первинних елементів як правило призводить до зміни цього коефіцієнта. Виходячи з вимог, які пред'являються до режиму регулювання, для коефіцієнта підсилення встановлюється визначений діапазон зміни значення цього параметру. Тому для схеми підсилювача задають граничні значення $K_{\max}$ та $K_{\min}$, при досягненні яких появляється відмова.

Аналогічно може бути визначений критерій відмови і для інших типів основних елементів пристроїв.

Для системи в цілому критеріями відмови слід рахувати: втрату стійкості або перевищення статичної похибки визначального параметру до значення, яке допустиме для системи, або погіршення відповідних динамічних характеристик

системи. Дані відмови з'являються через відмову елементів, що створюють вказану систему.

Для розрахунку надійності системи складають відповідну логічну схему надійності. На основі аналізу функціонування даної системи видно, що система буде працездатна в тому випадку, коли буде зберігатись працездатність всіх її елементів, а відмова будь-якого з них призведе до відмови системи.

Отже логічна схема (модель) надійності системи може бути представлена у вигляді послідовного з'єднання елементів (рис. 5.3).

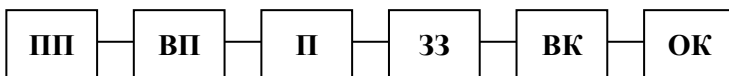


Рис. 5.3. Логічна схема надійності системи

Слід відмітити, що логічна схема надійності має свої відмінності від структурної (електричної) схеми.

Для систем автоматичного регулювання (управління), які мають внутрішній зворотній зв'язок (ЗЗ), застосування такого зв'язку, наприклад, в підсилювачі, забезпечує його правильне функціонування.

У випадку відмови схеми ЗЗ відбувається відмова підсилювача, і як наслідок, відмова системи в цілому. Тому логічна схема для розрахунку має бути послідовним з'єднанням елементів.

Визначення надійності системи здійснюється шляхом визначення показників безвідмовності елементів, що входять в послідовне з'єднання на логічній схемі. Розрахунок показників безвідмовності проводиться окремо для відновлюваних та невідновлюваних елементів по методиці, яка буде розглянута нижче.

Показники безвідмовності визначаються також окремо для раптових та поступових відмов. Після визначення показників безвідмовності основних елементів системи визначають надійність системи в цілому.

5.3. Надійність відновлюваних систем

До відновлюваних систем відносяться системи, які після відмови та усунення несправності знову спроможні виконувати необхідні функції з заданими кількісними показниками надійності.

Процес відновлення працездатного стану системи (пристрою) після відмови складається з пошуку несправного елемента (вузла, блока і т.д.), її відновлення (ремонт) або заміни на справну.

Скорочення часу, що витрачається на відновлення працездатного стану системи, призводить до підвищення готовності системи при експлуатації.

На рис.5.3. подано діаграму функціонування відновлювальної системи.

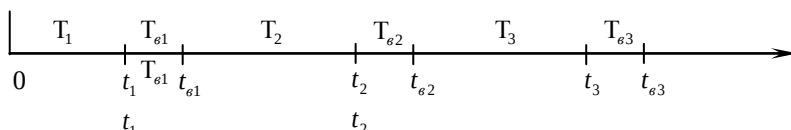


Рис. 5.4. Діаграма функціонування системи

У випадковий момент часу t_1 система відмовляє, потім система протягом часу $T_{в1}$ ремонтується і після відновлення в момент часу включається в роботу і продовжує працювати до моменту часу t_2 , після чого відбувається її чергова відмова, і процес поновлення її працездатності повторюється.

При оцінці надійності нерезервованих і резервованих систем (пристроїв) з відновленням, для яких допустимі перерви в роботі, у якості характеристики надійності використовують комплексні показники: функція готовності $K_r(t)$ і простою

$K_n(t)$ або відповідні їхні коефіцієнти готовності K_r і простою K_n .

Якщо припустити, що потоки відмов та відновлень є найпростішими і час безвідмовної роботи та відновлення розподілений по експоненційному закону, то процес роботи та відновлення нерезервованого пристрою можна розглядати як

випадковий процес з неперервним часом та кінцевою множиною станів:

0 – пристрій працездатний;

1 – пристрій непрацездатний і знаходиться в ремонті.

В цьому випадку для оцінки надійності відновлюваного пристрою можна використовувати метод графів (станів) з наступним складенням та розв'язком системи диференціальних рівнянь першого порядку [...].

Як приклад визначення кількісних показників надійності відновлюваного пристрою розглянемо нерезервований виріб, граф станів якого наведено на рис. 5.4.

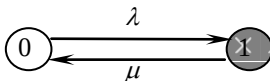


Рис. 5.5. Граф станів відновлюваного виробу.

Інтенсивності відмов і відновлень виробу дорівнюють λ і μ відповідно.

Припустимо, що потік відмов виробу є найпростішим, тобто без післядії. У цьому випадку для характеристики надійності виробу застосуємо експоненційний закон.

Для складання системи диференціальних рівнянь попередньо розглянемо можливі стани, у яких може знаходитися виріб в довільний момент часу. Для цього розглянемо такі припущення можливих несумісних станів.

Відновлюваний виріб може в довільний момент часу t знаходитись в одному з двох можливих станів:

0 - стан, коли виріб працездатний;

1 - стан, коли виріб непрацездатний.

Імовірності перебування виробу в зазначених станах позначимо відповідно $P_0(t)$ і $P_1(t)$.

Складемо диференціальні рівняння, що характеризують стан виробу. Для цього розглянемо імовірності появи таких подій. Припустимо, що:

♦ в момент часу t виріб знаходиться в справному стані і буде безвідмовно працювати протягом часу $t + \Delta t$. Імовірність цієї події дорівнює:

$$P_0(t)e^{-\lambda \Delta t} P_0(t)(1 - \lambda \Delta t);$$

♦ в момент часу t виріб несправний (непрацездатний), але за час $t + \Delta t$ буде відновлений. Імовірність цієї події дорівнює:

$$P_1(t)(1 - e^{-\mu \Delta t}) P_1(t) \mu \Delta t.$$

Відповідно до формули повної імовірності імовірність безвідмовної роботи виробу на інтервалі часу $t + \Delta t$ буде:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)(1 - \lambda \Delta t) + P_1(t) \mu \Delta t.$$

Після відповідного перетворення виразу отримаємо:

$$\frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t).$$

При $\Delta t = 0$ отримаємо:

$$P_0'(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t). \quad (5.7)$$

Аналогічно знаходяться рівняння для P_1' , що має вигляд:

$$P_1'(t) = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t).$$

Таким чином, система диференціальних рівнянь, що характеризують імовірність перебування виробу в різних станах у момент часу t , має вигляд:

$$\begin{aligned} P_0'(t) &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ P_1'(t) &= \lambda P_0(t) - \mu P_1(t) \end{aligned} \quad (5.8)$$

із нормованою умовою:

$$P_0(t) + P_1(t) = 1.$$

Для рішення диференціальних рівнянь визначимо початкові умови. Для цього розглянемо такі припущення:

1) якщо в момент часу $t = 0$ виріб знаходився в справному стані, то початкові умови будуть такими:

$$P_0(0) = 1, P_1(0) = 0.$$

У цьому випадку, розв'язуючи систему рівнянь (5.8), отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} K_r(t) = P_0(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \\ K_n(t) = P_1(t) &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \end{aligned} \right\}. \quad (5.9)$$

2) якщо в момент часу $t = 0$ виріб знаходився в несправному (непрацездатному) стані, то початкові умови будуть такими:

$$P_0(0) = 0, P_1(0) = 1.$$

У цьому випадку, розв'язуючи систему рівнянь (5.9), отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} K_r(t) = P_0(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \\ K_n(t) = P_1(t) &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \end{aligned} \right\}. \quad (5.10)$$

При $t \rightarrow \infty$ функції $K_r(t)$ і $K_n(t)$ прямують до своїх стаціонарних значень:

$$\left. \begin{aligned} K_r &= \lim_t K_r(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \\ K_n &= \lim_t K_n(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \end{aligned} \right\}, \quad (5.11)$$

де K_r і K_n - постійні значення коефіцієнтів готовності і простою в сталому режимі експлуатації виробу.

Зважаючи на те, що

$$\lambda = \frac{1}{T_0}, \mu = \frac{1}{T_b},$$

формули (5.11) можна записати в такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} K_r &= \frac{T_0}{T_0 + T_b}; \\ K_n &= \frac{T_b}{T_0 + T_b}. \end{aligned} \right\} \quad (5.12)$$

З формул (5.12) випливає, що коефіцієнт готовності характеризує частку часу, на протязі якого виріб справний, а коефіцієнт простою - частку часу, на протязі якого виріб несправний, тобто знаходиться в ремонті.

Коефіцієнти готовності та простою можна визначити по системі диференціальних рівнянь, якщо рівняння $P'_0(t)$ і $P'_1(t)$ прирівняти до нуля і потім розв'язати систему алгебраїчних рівнянь щодо працездатних станів виробу (визначається K_r) або непрацездатних станів (визначається K_n).

Для системи (5.8) алгебраїчні рівняння для визначення коефіцієнтів мають вигляд:

$$\lambda P_0 + \mu P_1 = 0;$$

$$\lambda P_0 - \mu P_1 = 0.$$

Розв'язуючи алгебраїчні рівняння з урахуванням нормувальної умови:

$$P_0 + P_1 = 1,$$

отримаємо:

$$K_r = P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu};$$

$$K_n = P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}.$$

Формули для K_r і K_n мають практичне застосування для характеристики надійності (ненадійності) відновлюваних об'єктів (систем).

Якщо використовувати формулу (5.9) для K_r , то вираз для функції $K_r(t)$ можна представити у вигляді:

$$K_r(t) = K_r + (1 - K_r)e^{-\frac{t}{K_r T_b}}. \quad (5.13)$$

Досліджуємо вираз для функцій $K_r(t)$ і $P(t)$ при малих значеннях t . Для цього в формулах для $K_r(t)$ і $P(t)$ розкладемо експоненти в ряди з залишенням в них лінійних доданків.

Звідки отримаємо:

$$K_r(t) = K_r + (1 - K_r) \left(1 - \frac{t}{K_r T_b} \right) \approx P(t). \quad (5.14)$$

З цього випливає, що при малих значеннях t значення функції готовності $K_r(t)$ збігається зі значенням імовірності безвідмовної роботи $P(t)$.

Ця властивість використовується при обчисленні значень $K_r(t)$ в нестационарний період часу.

Визначимо відносну похибку, допустиму при таких обчисленнях.

Якщо вважати, що до моменту τ значення функції $K_r(t)$ збігалось з функцією $P(t)$, а при $t > \tau$ функція $K_r(t) = K_r$, то максимальна похибка можлива лише в момент часу τ . У цьому випадку має місце рівність:

$$e^{-\frac{\tau}{T}} = \frac{T_0}{T_0 + T_b},$$

звідки

$$\tau = T_0 \ln K_r .$$

Якщо підставити значення τ в (5.14) замість t , отримаємо:

$$K_r(t) = K_r + (1 - K_r) e^{\frac{T_0 \ln K_r}{K_r T_0}} = K_r + (1 - K_r) K_r^{\frac{1}{1 - K_r}} .$$

Відносна похибка обчислень визначається за формулою:

$$\Delta = \frac{K_r(\tau) K_r}{K_r(\tau)} 100\% = \frac{(1 - K_r) K_r^{\frac{1}{1 - K_r}}}{K_r + (1 - K_r) K_r^{\frac{1}{1 - K_r}}} 100\% .$$

При значенні $K_r = 0,9$ відносна похибка при визначенні $K_r(t)$ буде складати менше 4% і зменшується з ростом K_r .

Для нерезервованих відновлювальних об'єктів (систем), для яких перерви в роботі неприпустимі, замість показників готовності і простою визначають умовну імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ на протязі часу t , за умови, що об'єкт в початковий момент часу $t = 0$ був працездатний.

У цьому випадку при складанні системи диференціальних рівнянь члени, що містять інтенсивності переходів із непрацездатного стану, повинні бути виключені з системи рівнянь.

Для цього на схемі графа станів об'єкта між можливими його станами вказують лише по одній стрілці.

Система диференціальних рівнянь розв'язується при початкових умовах:

$$P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = \dots = P_n(0) = 0 .$$

При цих умовах імовірність роботи об'єкта на протязі часу t визначається за формулою:

$$P(t) = \sum_{j=0}^{n_1} P_j(t) , \quad (5.15)$$

де $P_j(t)$ - імовірність перебування об'єкта в j -му стані в момент часу t ; n_1 - число працездатних станів об'єкта.

У випадку розв'язання повної системи диференціальних рівнянь використовують перетворення Лапласа:

$$f(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt.$$

Якщо покласти $f(t) = P(t)$, то будемо мати:

$$P(s) = \int_0^{\infty} P(t) \cdot e^{-st} dt.$$

Середній час безвідмовної роботи і середній час відновлення для відновлювальних систем знаходяться за формулами:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt; \quad T_B = \int_0^{\infty} P_B(t) dt.$$

Для розрахунку надійності нерезервованих систем метод диференціальних рівнянь на практиці застосовується найбільш часто.

6. НАДІЙНІСТЬ РЕЗЕРВОВАНИХ СИСТЕМ

6.1. Види резервування

При проектуванні технічних систем різного призначення забезпечення надійності вирішується шляхом застосування комплектуючих елементів з високою надійністю. Однак, як свідчить досвід, створення складних електронних систем з використанням великої кількості елементів знижує рівень надійності таких систем.

Одним з найбільш ефективних методів підвищення надійності систем (пристроїв) на етапі проектування є резервування.

Резервування – це спосіб забезпечення надійності системи (об’єкта) за рахунок використання додаткових засобів та можливостей, надлишкових по відношенню до мінімально необхідних.

Розрізняють наступні види резервування: режимне, параметричне, функціональне, інформаційне, почасове та структурне.

Режимне резервування – це один із способів підвищення безвідмовності системи шляхом використання елементів в полегшеному режимі роботи (з коефіцієнтом навантаження K_n не більше 0,5–0,8 від номінального), що призводить до значного зменшення інтенсивності відмов елементів, в середньому в 2 – 5 раз.

Різновидом режимного резервування є по часове резервування, коли складові частини (блоки) системи під час її застосування працюють неодноразово, тобто циклами.

Інтенсивність відмов системи, що складається з блоків, які працюють неодноразово, визначається за формулою:

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{1}{t} * \sum_{i=1}^n \lambda_i * (t_i^k - t_i^n) = \frac{1}{t} * \sum_{i=1}^n \lambda_i * \Delta t_i \quad (6.1)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента (блока) на інтервалі часу Δt_i ;

$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ - проміжок часу на протязі якого працює пристрій,

що розглядають; n – кількість інтервалів t_i .

Параметричне резервування – спосіб підвищення безвідмовності роботи пристрою шляхом вибору оптимального режиму роботи його елементів. При цьому оптимальним режимом слід вважати таку комбінацію параметрів елементів, яка б забезпечувала стабільність роботи системи при імовірних впливах на неї різноманітних зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів. Для цього будують залежність визначального параметра Y пристрою від параметрів елементів X_i ($x_{i \min} \leq x_{i \text{ ном}} \leq x_{i \max}$) і визначають робочу область визначального параметра (область безвідмовної роботи системи).

Таким чином, відхилення визначального параметра Y за допустимі границі $y_{\min}$ та $y_{\max}$ при зміні параметрів X_i за границі $x_{i \min}$ та $x_{i \max}$ є критерієм параметричної відмови системи. Отже, обравши оптимальну робочу точку, в пристрій вводять параметричну надмірність – параметричне резервування.

Функціональне резервування – це резервування з застосуванням схем, малокритичних до порушення працездатності окремих елементів системи. Підвищення надійності при даному способі резервування досягається шляхом заміни елементів, що відмовили, більш інтенсивною роботою інших елементів, тобто за рахунок збільшення навантаження на елементи, що залишились працездатними.

Функціональне резервування найбільш часто використовують в пристроях, які використовують, так званий, зворотній зв'язок. Прикладом пристроїв з функціональним резервуванням є автоматичний регулятор підсилення (АРП). Завдяки схемі АРП вихід з ладу окремих елементів не призводить до порушення працездатності приймаючого пристрою, оскільки зміни режиму роботи окремих елементів внаслідок виходу з ладу одного елемента, будуть скомпенсовані схемою АРП.

Інформаційне резервування базується на використанні надмірної інформації, яка дозволяє підвищити достовірність

інформації, що передається по каналах зв'язку, тим самим підвищуючи надійність пристрою. Прикладом цього може бути багаторазова передача по каналу зв'язку одного і того ж інформаційного повідомлення. В цьому випадку, введення інформаційної надмірності шляхом багаторазового повторення повідомлення знижує швидкість передачі, але суттєво підвищує достовірність його при прийомі.

Інформаційне резервування застосовується не лише в апаратурі передачі даних але й в інших технічних системах. Так, в обчислювальних пристроях широко застосовують самокорегуюче кодування для визначення імовірних помилок, що викликані збоями окремих систем. Інформаційне резервування можливе лише за умови введення структурної надмірності.

По часове резервування – резервування з використанням резервів часу. Такий вид резервування може бути реалізований шляхом планування часу, заздалегідь більшого за мінімально необхідний для виконання поставлених задач. В цьому випадку, при відмові або виході з ладу пристрою в процесі роботи, у нього буде резерв часу на пошук і усунення несправності та завершення роботи, що була перервана виходом з ладу пристрою. Відмови та несправності, які виникають при цьому на протязі резервного часу, при розрахунках надійності не враховують.

Структурне резервування – це резервування із застосуванням резервних елементів структури об'єкта. Його застосовують у випадках, коли неможливо звичайними методами забезпечити необхідну надійність.

Структурне резервування застосовують на стадії проектування або в процесі експлуатації об'єкта шляхом установа двох або більше однотипних об'єктів. Таке резервування характеризується паралельним з'єднанням елементів (блоків, пристроїв) на логічній схемі, в якому лише відмова усіх паралельно з'єднаних елементів призводить до виходу всього з'єднання в цілому.

В залежності від реакції резервованої системи на виникнення відмови розрізняють активне та пасивне резервування.

Активним називають резервування, при якому основний (робочий) елемент замінюється резервним, тобто відбувається перебудова структури системи.

При активному резервуванні розрізняють наступні основні способи структурного резервування (рис. 6.1):

- ♦ **загальне** резервування, при якому резервується об'єкт в цілому (рис. 6.2,а);

- ♦ **роздільне** резервування, при якому резервуються окремі елементи об'єкта або їх групи (рис. 6.2,б);

- ♦ **змішане** резервування, коли в одному і тому ж об'єкті застосовують декілька способів резервування (рис. 6.3,б);

- ♦ **ковзке** резервування, при якому група основних елементів об'єкта резервується одним або кількома елементами, кожен з яких може замінити будь-який основний елемент, що вийшов з ладу (рис. 6.3,в);

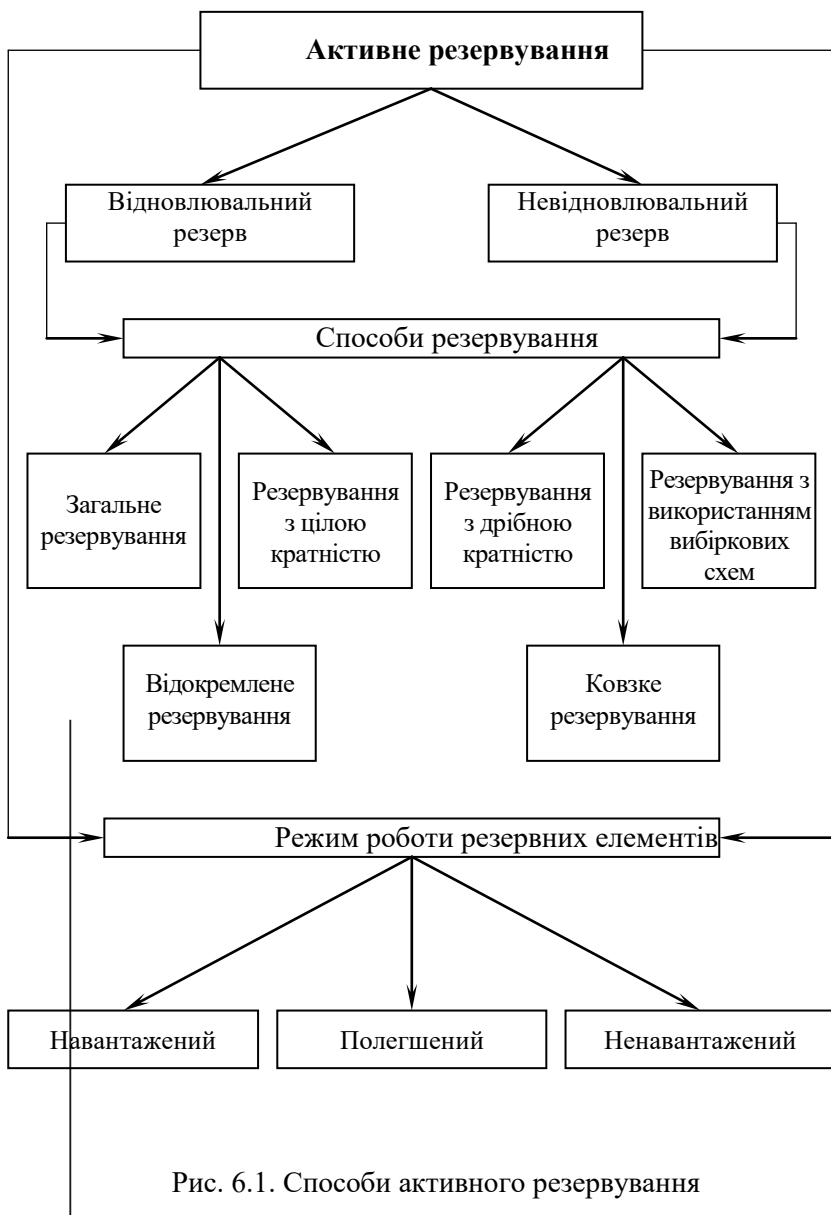
- ♦ резервування з використанням **вибіркових схем** (**мажоритарне** резервування), при якому забезпечується стійкість об'єктів до випадкових збоїв або відмов, які самоусуваються (рис. 6.3,д).

За схемою вмикання резервних елементів розрізняють: постійне резервування, резервування заміщенням, динамічне резервування та ковзке резервування.

Постійне резервування –це паралельне резервування, в якому використовують навантажений резерв. При відмові будь-якого елемента в резервній групі, виконання об'єктом потрібних функцій забезпечується резервними елементами, що залишились працездатними, без їх перемикань(мал. 6.2,а).

Основною перевагою такого способу резервування є його простота та економічність, оскільки, у випадку виходу з ладу робочого (основного) елемента, відпадає необхідність у спеціальних пристроях для ввімкнення резервного елемента.

Недоліком такого резервування є зміна режиму роботи інших працездатних елементів паралельного з'єднання, у випадку відмови одного з них.



Резервування **заміщенням** – це резервування, в якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного (рис. 6.2,в).

Основним недоліком такого способу резервування є те, що у випадку відмови основного елемента необхідно мати контролюючий та автоматичний пристрій, який би забезпечував виявлення елемента, що відмовив, та підключення резервного.

Динамічне резервування базується на перебудові структури об'єкта у випадку відмови основних елементів. На рис. 6.3,г основний канал передачі даних позначено суцільною лінією, а можливі резервні тракти – штрих-пунктирною лінією.

Ковзке резервування – це резервування заміщенням (рис.6.3,в).

Для практичної реалізації ковзного резервування необхідно мати спеціальний пристрій, що забезпечує виявлення елемента, що відмовив, та автоматичне підключення замість нього резервного елемента.

В залежності від стану, в якому знаходиться резервний елементи до виникнення відмови, тобто до моменту підключення їх в роботу, розрізняють:

- ♦ **навантажений** резерв, коли один або декілька резервних елементів знаходяться в режимі основного елемента.

Недоліком такого резервування є те, що ресурс резерву використовується одночасно з ресурсом основного елемента.

- ♦ **полегшений** резерв, коли один або декілька резервних основний елемент. При такому способі резервування ресурс резервного елемента використовується частково.

- ♦ **ненавантажений** резерв, коли один або декілька резервних елементів знаходяться в ненавантаженому режимі до початку виконання функцій основного елемента.

Недоліком такого способу резервування є те, що для його реалізації на практиці необхідно мати спеціальний автоматичний пристрій, який впливає на конструкцію об'єкта.

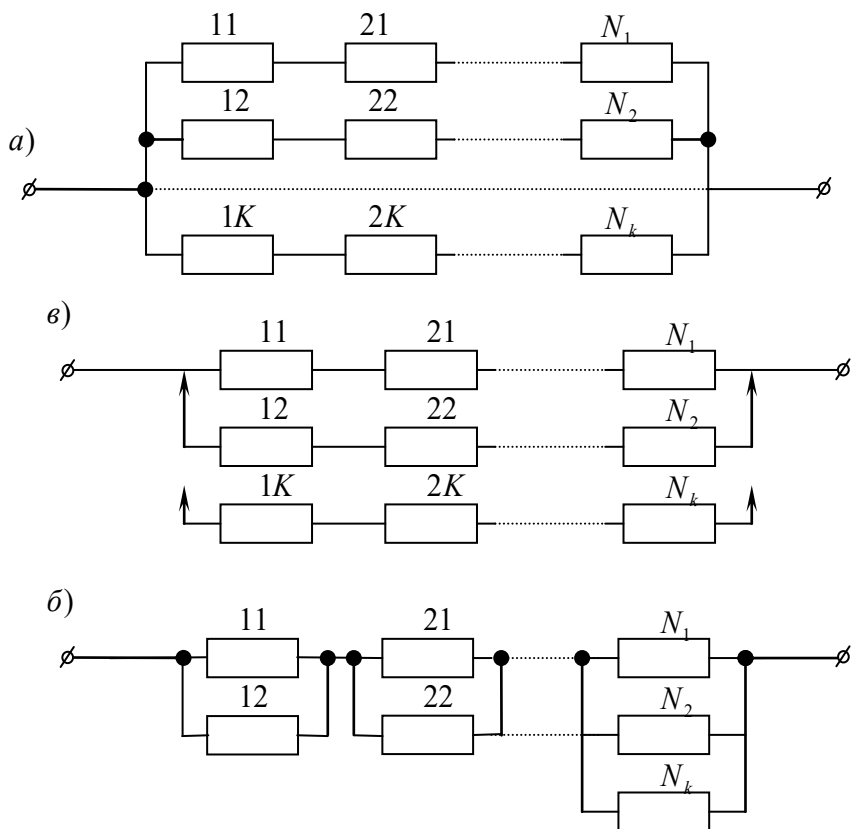


Рис.6.2.Логічні схеми надійності при різних способах структурного резервування:

а-загальне резервування з постійним включенням резерва;
б-поелементне резервування з постійним включенням резерва;
в-загальне резервування з включенням резерва заміщенням.

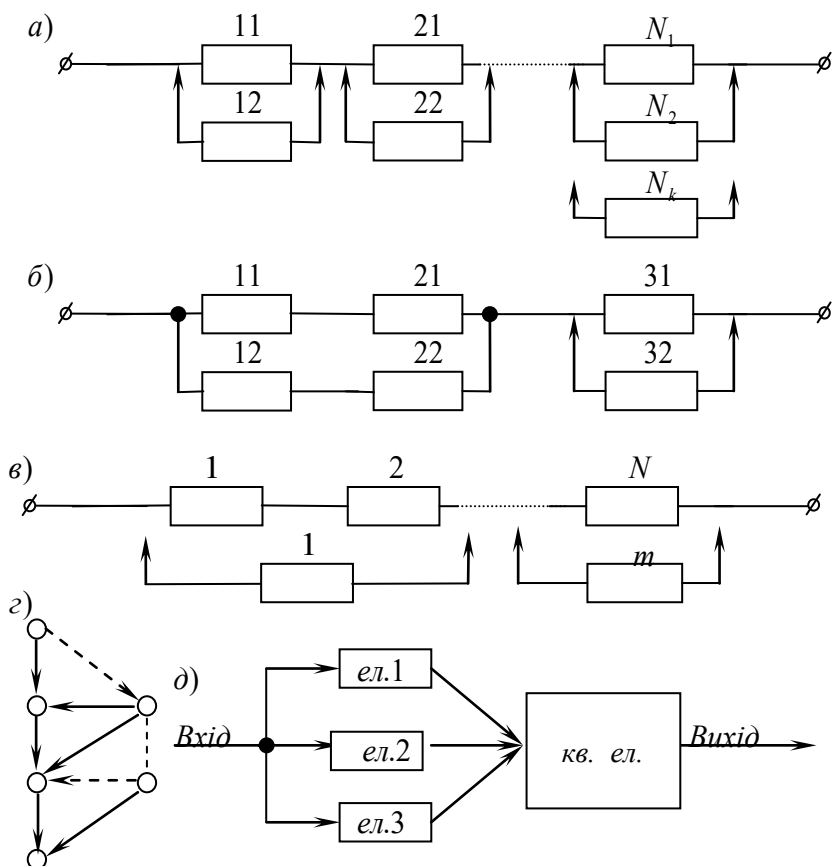


Рис.6.3.Логічні схеми надійності при різних способах резервування:

а-поелементне резервування з включенням резерва заміщення;

б-змішане резервування;

в-ковзке резервування з дрібною кратністю;

г-схема вибіркового резервування ;

д-схема динамічного резервування.

Пасивним резервуванням називають резервування, при якому відмова одного або декількох елементів пристрою не впливає на його працездатність.

Такий спосіб резервування характеризується тим, що елементи резервованого з'єднання мають постійне паралельне з'єднання. У випадку відмови одного з елементів перебудова схеми не відбувається, на відміну від активного з'єднання.

При пасивному з'єднанні розрізняють:

- ♦ резервування з **незмінним навантаженням**, при якому відмова одного або декількох елементів системи не викликає зміни навантаження на решту елементів;

- ♦ резервування з **перерозподілом навантаження**, при якому відмова одного або декількох елементів системи призводить до того, що навантаження на решту елементів відповідно збільшується.

В залежності від кратності резервування може бути резервування з цілим або дрібним коефіцієнтом кратності. При цьому під кратністю резервування **h** мають на увазі відношення кількості резервних елементів до кількості основних.

Резервування з дрібною кратністю може мати місце, коли два або більше однотипних елемента резервуються одним або більше резервними елементами.

Частіше застосовують варіант з дрібним резервуванням, коли кількість основних елементів більша ніж кількість резервних. Наприклад, у випадку ковзного резервування (рис. 6.3,в), кратність резервування **h=0,5**.

Резервування, кратність якого дорівнює одиниці, називають дублюванням.

У зв'язку з тим, що структурне резервування пов'язане з додатковими витратами при проектуванні об'єкта (системи), то ці витрати повинні бути виправдані за рахунок підвищення надійності пристрою та зменшення витрат на ремонтні (відновлю-вальні) роботи в процесі його експлуатації. Для визначення ефективності резервування використовують наступні якісні показники:

$$B_T = \frac{T_p}{T}; \quad B_p = \frac{P_p(t)}{P(t)}; \quad B_Q = \frac{Q(t)}{Q_p(t)},$$

де B_T – виграш за рахунок підвищення напрацювання на відмову резервованої системи T_p по відношенню до напрацювання на відмову нерезервованої системи T ; B_p та B_Q – аналогічні показники при підвищенні імовірності безвідмовної роботи $P_p(t)$ та зменшення імовірності відмови $Q_p(t)$ резервованої системи.

Резервування вважають ефективним, коли показники B_T , B_p , B_Q більші одиниці.

Надійність систем може бути значно підвищена, якщо в них застосовувати резервування з відновленням, тобто у випадку відмови системи в процесі експлуатації працездатність основної та резервної системи піддається відновленню.

Слід зазначити, що надійність резервованих систем, а також резервованих з відновленням, залежить від надійності вбудованої системи контролю (ВСК), що застосовується для виявлення появи відмови основного елемента та підключення резервного.

При розрахунках надійності резервованих систем надійність ВСК може бути включена в логічну схему послідовно з резервованим з'єднанням елементів.

Застосування того чи іншого способу резервування визначається технічною можливістю реалізації, а точніше вимогами до конструкції та умовами експлуатації.

Як було відзначено раніше, надійність електронних систем значною мірою визначається тим, чи застосовано резервування з відновленням в процесі експлуатації систем, чи без нього. В зв'язку з цим розрізняють:

- ◆ резервування з відновленням, при якому працездатність будь-якого основного і резервного елементів системи у випадку виникнення їх відмов підлягає відновленню;

- ◆ резервування без відновлення, при якому працездатність будь-якого основного і резервного елементів системи у випадку виникнення їх відмов відновленню не підлягає.

Для оцінки надійності резервованих систем існують різні способи та методи розрахунків.

В якості моделей при розрахунках надійності резервованих систем найчастіше використовують логічні схеми надійності та граф станів, за допомогою яких складаються диференціальні рівняння імовірностей станів системи (об'єкта).

Логічною моделлю резервованої системи часто використовують логічну (структурну) схему, на якій елементи мають паралельно-послідовне з'єднання.

У з'єднанні, що складається з послідовно з'єднаних елементів, вихід з ладу одного з них призводить до виходу з ладу всього з'єднання. При з'єднанні елементів паралельно, вихід з ладу одного або декількох елементів не призводить до порушення працездатності з'єднання в цілому. Відмова з'єднання настає лише у випадку виходу з ладу всіх елементів в цьому з'єднанні.

Розглянемо методи розрахунку надійності невідновлюваних в процесі використання об'єктів при різних способах резервування.

6.2. Структурне резервування без відновлення

6.2.1. Загальне резервування

♦ Резерв навантажений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічна схема надійності такої системи зображена на рис. 6.2,а. Кожна підсистема містить N послідовно з'єднаних елементів.

Імовірність відмови $Q_c(t)$ системи визначається за формулою:

$$Q_c(t) = \prod_{j=1}^{k+1} Q_j(t), \quad (6.2)$$

де $Q_j(t)$ – імовірність відмови на протязі часу t j -ї підсистеми (основної або резервної); $k+1$ – кількість паралельно з'єднаних на логічній схемі підсистем.

Імовірність безвідмовної роботи системи з загальним резервуванням $P_c(t)$ визначається за формулою:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^{k+1} Q_j(t) = 1 - \prod_{j=1}^{k+1} [1 - \prod_{i=1}^N P_i(t)]. \quad (6.3)$$

Якщо всі $k+1$ підсистем в паралельному з'єднанні мають однакову надійність, то формула (6.3) матиме наступний вигляд:

$$P_c(t) = 1 - [1 - \prod_{i=1}^N P_i(t)]^{k+1}. \quad (6.4)$$

Отримана формула застосовується для визначення надійності технічних систем з загальним резервуванням (резерв навантажених), логічна модель яких відповідає логічній моделі, зображеній на рис. 6.2,а.

Середній наробіток на відмову резервованої системи визначається за формулою:

$$T_{\text{рез}} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt. \quad (6.5)$$

Розглянемо випадок, коли потік відмов елементів в основній та резервній підсистемах являється найпростішим. В цьому випадку середній наробіток на відмову елементів системи відповідає експоненційному розподілу і імовірність безвідмовної роботи елементів може бути визначена за формулою:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (6.6)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента основної або резервної підсистеми.

Підставляючи вираз (6.6) в формулу (6.5), отримуємо:

$$P_c(t) = 1 - [1 - e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i t}]^{k+1}. \quad (6.7)$$

Позначивши $\sum_{i=1}^N \lambda_i = \lambda_0$ та підставивши отриманий вираз в (6.7), отримаємо:

$$T_{\text{рез}} = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-t \sum_{i=1}^N \lambda_i})] dt. \quad (6.8)$$

Якщо ввести підстановку $[1 - e^{-t \sum_{i=1}^N \lambda_i}] = y$, то вираз (6.8) приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} T_{\text{рез}} &= \frac{1}{\lambda_0} \int_0^{\infty} \frac{1 - y^{k+1}}{1 - y} dy = \frac{1}{\lambda_0} \int_0^{\infty} (1 + y + y^2 + \dots + y^k) dt = \\ &= \frac{1}{\lambda_0} \sum_{j=0}^k \frac{1}{1 + j} y^{j+1} \Big|_0^1 = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{j=0}^k \frac{1}{1 + j} = T_0 \sum_{j=0}^k \frac{1}{1 + j}, \end{aligned} \quad (6.9)$$

де T_0 – середнє значення наробітку на відмову основної або резервної системи.

З формули (6.10) випливає, що збільшення кратності резервування призводить до зменшення приросту середнього наробітку на відмову. Це пояснюється тим, що при застосуванні навантаженого резерву підсистема постійно витрачає свій технічний ресурс разом з ресурсом основної системи.

Таким чином, чим більша кратність резервування, тим пізніше до роботи підключається резервна підсистема і тим більшу частину ресурсу вона відпрацьовує, коли знаходиться в холостому режимі. В цьому полягає основний недолік навантаженого резерву.

♦ Резерв ненавантажений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічна схема надійності такої схеми зображена на рис. 6.2,в.

При ненавантаженому резерві імовірність безвідмовної роботи системи, яка має одну основну та k резервних підсистем, визначається за рекурсивною формулою:

$$P_c(t) = P_k(t) + \int_0^t P_{k+1}(t-\tau) f_k(\tau) d\tau, \quad (6.10)$$

де $P_k(t)$ – імовірність безвідмовної роботи системи, що має одну основну та $k+1$ резервних підсистем, на протязі часу t ; $P_{k+1}(t-\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи $(k+1)$ -ої резервної підсистеми на протязі часу $(t-\tau)$ при умові, що до моменту часу τ резервна підсистема була працездатна; $f_k(\tau)$ – щільність розподілу наробітку на відмову системи, що має одну основну та $k+1$ резервних підсистем.

У випадку експоненційного розподілу наробітку на відмову елементів системи та резервних підсистем імовірність безвідмовної роботи системи з загальним ненавантаженим резервом визначається за формулою:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!}, \quad (6.11)$$

де $\lambda = \sum_{j=1}^N \lambda_0$ – інтенсивність відмов однієї з $k+1$ паралельно з'єднаних на логічній схемі підсистем;

Формула (6.12) являє собою гамма-розподіл.

Наробіток на відмову системи з ненавантаженим резервом визначається шляхом інтегрування виразу (6.11) в межах $(0, \infty)$:

$$T_{\text{рез}} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_0 t} \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!} dt = \frac{k+1}{\lambda_0} = T_0(k+1). \quad (6.12)$$

На основі формули (6.12) можна зробити висновок, що наробіток на відмову системи з ненавантаженим резервом завжди більший ніж при навантаженому.

Однак, слід зазначити, що на практиці реалізувати ненавантажений резерв в електронній апаратурі не завжди є можливим, оскільки значна її частина використовується в різних об'єктах (автомобільний та залізничний транспорт, кораблі, літаки і інші), де на неї діють різні механічні та кліматичні фактори. Ці дії, навіть при відсутності електричного навантаження в резерві, призводять до швидкого вичерпання технічного ресурсу внаслідок старіння елементів.

Крім того, для окремих видів систем при експлуатації перерви в роботі неприпустимі, тому в таких системах застосовують полегшений резерв.

♦ Резерв полегшений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічна схема надійності такої системи зображена на рис. 6.2,в.

При полегшеному резерві імовірність безвідмовної роботи системи, що має одну основну та k резервних підсистем, визначають за формулою:

$$P_c(t) = P_k(t) + \int_0^t P_{k+1}(\tau) P_{k+1}(t-\tau) f_k(\tau) d\tau, \quad (6.13)$$

де $P_k(t)$ – імовірність безвідмовної роботи k -ї системи, що має одну основну та $k-1$ резервних підсистем, на протязі часу t ; $P_{k+1}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи $(k+1)$ -ї резервної підсистеми до моменту часу τ ввімкнення її до роботи; $P_{k+1}(t-\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи $(k+1)$ -ї резервної підсистеми на протязі часу $(t-\tau)$ від моменту τ , коли її було включено в роботу, до моменту часу t ; $f_k(t)$ – щільність розподілу напрацювання на відмову системи, що має одну основну та $(k-1)$ резервних підсистем.

У випадку основної та резервної підсистем, які мають рівну надійність, та експоненційний розподіл наробітку на відмову елементів, імовірність безвідмовної роботи системи з загальним полегшеним резервом визначається за формулою:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[1 + \sum_{j=1}^k \frac{a_j}{j!} (1 - e^{-\lambda_1 t}) \right], \quad (6.14)$$

де λ та λ_0 – інтенсивності відмов основної та резервної підсистем в робочому та полегшеному станах відповідно;

$$a_j = \prod_{j=0}^{k-1} \left(j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right). \quad (6.15)$$

Середній наробіток на відмову системи з полегшеним резервуванням визначається за формулою:

$$T_{\text{рез}} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = T_0 \sum_{j=0}^k \frac{1}{1 + jK_p}, \quad (6.16)$$

де $K_p = \lambda_1/\lambda_0$ – коефіцієнт використання ресурсу.

6.2.2. Роздільне резервування

♦ Резерв навантажений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічна схема надійності системи з роздільним резервуванням зображена на рис. 6.2,б.

При роздільному резервуванні імовірність безвідмовної роботи системи з навантаженим резервуванням на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N \{ 1 - [1 - P_i(t)]^{k_i+1} \}, \quad (6.18)$$

де $P_i(t)$ – імовірність безвідмовної роботи i -го елемента (ділянки резервування); k_i+1 – кількість з'єднаних паралельно на логічній схемі елементів на i -й ділянці резервування.

У випадку, коли елементи (основний та резервні) мають однакову надійність та експоненційний розподіл наробітку на відмову, імовірність безвідмовної роботи системи з роздільним резервуванням визначається за формулою:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N [1 - (1 - e^{-\lambda t})^{k_i+1}], \quad (6.18)$$

Середній наробіток на відмову системи з роздільним резервуванням:

$$T_{\text{рез}} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \frac{(N-1)!}{\lambda(k+1)} \sum_{\eta=0}^k \frac{1}{\frac{\eta+1}{k+1} \left(\frac{\eta+1}{k+1} + 1 \right) \dots \left(\frac{\eta+1}{k+1} + N-1 \right)},$$

де $\lambda = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{N}$ – середнє значення інтенсивності відмов елементів.

♦ Резерв ненавантажений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічна схема надійності такої системи зображена на рис. 6.3,а.

Імовірність безвідмовної роботи системи з роздільним резервуванням на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[\sum_{j=1}^k \frac{(\lambda_0 t)^j}{j!} \right]^N, \quad (6.19)$$

де λ_0 – інтенсивність відмов основного елемента;

$\lambda = \sum_{i=0}^N \frac{\lambda_i}{N}$ – середнє значення інтенсивності відмов елементів.

Середній наробіток на відмову резервованої системи:

$$T_{\text{рез}} = \int_0^{\infty} P_{\text{розд}}(t) dt = T_0 \sum_{i=0}^N C_N^i \frac{i!}{N^i}, \quad (6.20)$$

де $C_N^i = \frac{N!}{(N-i)!i!}$ – кількість сполучень з N по i .

6.2.3. Активне резервування з урахуванням надійності перемикачів

Логічну схему такої системи зображено на рис. 6.4.

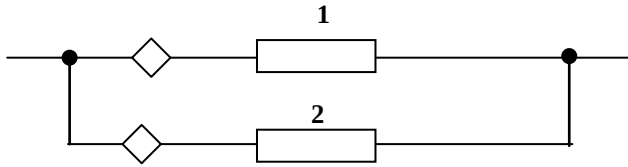


Рис.6.4.Схема резервування з перемикачами Π

При загальному резервуванні (резерв навантажений) імовірність безвідмовної роботи системи на протязі t часу визначають за формулою:

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^{k+1} [1 - P_{\Pi_j}(t)P_j(t)], \quad (6.21)$$

де $P_j(t)$ – імовірність безвідмовної роботи основного або резервних елементів на протязі часу t ; $P_{\Pi_j}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи перемикача на протязі часу t .

При роздільному резервуванні (резерв навантажений) імовірність безвідмовної роботи системи визначається за формулою:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N \{1 - \prod_{j=1}^{k+1} [1 - P_{\Pi_{ji}}(t)P_{ji}(t)]\}, \quad (6.22)$$

6.2.4. Ковзке резервування

♦ Резерв навантажений

Основний та резервні елементи системи мають однакову надійність, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Логічну схему надійності для такої системи зображено на рис. 6.3,в.

Система складається з N основних та k резервних елементів. Будь-який з резервних елементів може замінити будь-який основний елемент, що відмовив. Відмова системи в цілому відбувається лише за умови, що кількість основних елементів, що вийшли з ладу, перевищує кількість резервних елементів.

Оскільки кількість основних елементів, звичайно, більша ніж резервних, то такий вид резервування називають ковзним з дрібною кратністю. Як приклад такого резервування можна навести один резервний комплект апаратури передачі даних на чотири основних.

Вважатимемо, що потоки відмов основних та резервних елементів, найпростіші.

В такому випадку імовірність безвідмовної роботи системи на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = \sum_{i=N}^{N+k} C_{N+k}^i e^{-i\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{N+k-1}, \quad (6.23)$$

де λ – інтенсивність відмов основних та резервних елементів.

Середній наробіток на відмову системи

$$T_{\text{рез}} = \sum_{i=N}^{N+k} \frac{1}{i\lambda}. \quad (6.24)$$

♦ Резерв ненавантажений

Основний та резервні елементи системи однакової надійності.

Як приклад такої системи розглянемо систему, що складається з N основних та одного резервного елементів. Така система буде безвідмовно працювати на протязі часу t за наступних несумісних подій.

♦ усі елементи основної системи працюють безвідмовно на протязі часу t ;

♦ відмовив один основний елемент з кількості $N+1$ основних та резервних елементів в момент часу $\tau < t$,

♦працездатний резервний елемент ввімкнувся в роботу і безвідмовно працював решту часу на інтервалі $(t-\tau)$.

Складаючи імовірності цих подій, отримаємо вираз для обчислення імовірності безвідмовної роботи системи з ковзким резервом:

$$P_c(t) = P^{N-1}(t)[P(t) + N \int_0^t P_n(\tau)P(t-\tau)f(\tau)d\tau] \quad (6.25)$$

де $P(t)$ – імовірність безвідмовної роботи одного елемента основної системи на протязі часу t ; $P_n(t)$ – імовірність безвідмовної роботи перемикачів до моменту τ ввімкнення резервного елемента; $P(t-\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи резервного елемента з моменту τ ввімкнення його в роботу до моменту t ; $f(\tau)$ – щільність розподілу наробітку на відмову одного робочого елемента основної системи.

У випадку експоненціального розподілу наробітку на відмову основних та резервного елементів та перемикача (потоків відмов найпростіші) імовірність безвідмовної роботи системи на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = e^{-N\lambda t} [1 + N \frac{\lambda}{\lambda_n} (1 - e^{-\lambda_n t})], \quad (6.26)$$

де λ та λ_n інтенсивність відмов основного, що працює, елемента та перемикачів відповідно.

У випадку, коли N основних та k резервних елементів мають однакову надійність та абсолютно надійного перемикача, імовірність безвідмовної роботи резервованої системи на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = e^{-N\lambda t} \sum_{j=0}^k \frac{(N\lambda t)^j}{j!}. \quad (6.27)$$

Середній наробіток на відмову резервованої системи визначається за формулою:

$$T_{\text{рез}} = \frac{K+1}{N\lambda}. \quad (6.28)$$

♦ Резерв полегшений

Основний та резервні елементи системи однакової надійності, перемикачі відсутні або абсолютно надійні.

Розглянемо випадок, коли система складається з N основних та k резервних елементів. Потоки відмов основних та резервних елементів є найпростіші.

Для даного випадку імовірність безвідмовної роботи системи на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_c(t) = \frac{\prod_{j=0}^k (N+j \frac{\lambda_1}{\lambda_0})}{(\frac{\lambda_1}{\lambda_0})^k k!} - \sum_{j=0}^k \frac{(-1)^j C_k^j}{N+j \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} e^{-(N+j \frac{\lambda_1}{\lambda_0})\lambda t}, \quad (6.29)$$

де λ_0 та λ_1 – інтенсивність відмов елементів в робочому (основному) та полегшеному режимах відповідно.

Середній наробіток на відмову резервованої системи

$$T_{\text{рез}} = T_0 \sum_{j=0}^k \frac{1}{N+j \frac{\lambda_1}{\lambda_0}}. \quad (6.30)$$

6.2.5. Резервування з використанням вибірових схем

Основними недоліками структурного резервування заміщення є його технічна складність реалізації та недостатня надійність перемикачів.

Стосовно застосування постійного (навантаженого) резервування, то воно також має ряд недоліків. Наприклад, у випадку резервування на рівні елементів, необхідно мати елементи з підвищеною навантажувальною здатністю, оскільки у випадку відмови робочого елемента значно змінюється режим роботи решти елементів, що залишились працездатними, а відповідно і

їх надійність. Резервування з використанням вибірових схем, які працюють за принципом голосування за більшістю, є одним з різновидів структурного резервування. Такий вид резервування застосовується в інформаційних системах з навантаженим резервом.

Способи такого резервування наведено на рис. 6.5.

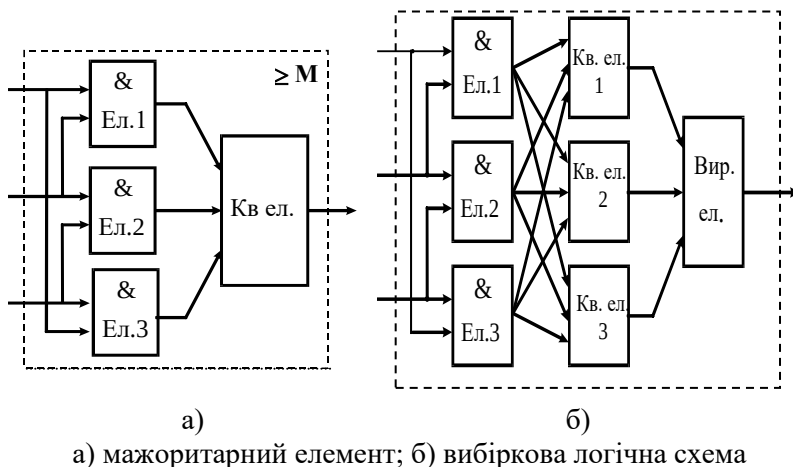


Рис. 6.5. Структурна схема резервування з використанням вибірових логічних схем

При резервуванні з використанням вибірових схем вхідний сигнал в двійковому коді ("0" або "1") подається на вхід непарної кількості ідентичних елементів, які підключені паралельно. З виходів цих елементів сигнали поступають на кворум-елемент (вирішальний елемент), де вони порівнюються.

Кворум-елемент формує на своєму виході сигнал ("0" або "1") в тому випадку, коли на його входи поступають аналогічні сигнали від більшості ідентичних елементів. Тому такий спосіб резервування іноді називають мажоритарним, а вирішальний елемент, що реалізує мажоритарний закон (голосування за більшістю), мажоритарним.

Найбільш широке застосування використання в інформаційних системах знайшли мажоритарні елементи на

логічних елементах “І” та “АБО”, що реалізують операцію “2 з 3”.

Структурну схему найпростішого мажоритарного елемента зображено на рис. 6.5,а.

Імовірність безвідмовної роботи на протязі часу t схеми (мажоритарного елемента) визначається наступним чином.

Для цього введемо наступні позначення: $P_1(t)$, ..., $P_3(t)$ та $P_v(t)$ – імовірність безвідмовної роботи схеми на протязі часу t ідентичних та вирішального елементів.

Розглянемо всі можливі стани системи, в яких вона може знаходитись у випадку виходу з ладу елементів. Позначимо працездатні та непрацездатні стани елементів символами “1” та “0” відповідно.

Дані можливих станів системи наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

$p_1(t)$	$p_2(t)$	$p_3(t)$	$p_v(t)$	$p_1(t)$	$p_2(t)$	$p_3(t)$	$p_v(t)$
1	1	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	0	1	0	0
1	0	1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0	0	1

Припустимо, що вирішальний елемент абсолютно надійний, тобто $p_v(t)=1$. Тоді у відповідності з даними станів (див. табл. 6.1), в яких схема зберігає свою працездатність, імовірність безвідмовної роботи мажоритарного елемента $P_m(t)$ на протязі часу t визначається за формулою:

$$P_m(t) = p_1(t)p_2(t)p_3(t) + q_1(t)p_2(t)p_3(t) + p_1(t)q_2(t)p_3(t) + p_1(t)p_2(t)q_3(t), \quad (6.31)$$

де $q_1(t)$, ..., $q_3(t)$ – імовірність відмов ідентичних елементів на протязі часу t .

Якщо припустити, що $P_1(t)=P_2(t)=P_3(t)=P(t)$ в силу їх ідентичності, то вираз (6.31) приймає наступний вигляд:

$$P_m(t) = p^2(t)[3 - p(t)]. \quad (6.32)$$

У випадку, коли вирішальний елемент не є абсолютно надійним, тобто $p_v(t) \neq 1$, то вираз (6.32) буде мати вигляд:

$$P_m(t) = p_v(t)p^2(t)[3 - 2p(t)]. \quad (6.33)$$

Слід пам'ятати, що головною умовою використання мажоритарного резервування повинна бути ідентичність логічних елементів. Якщо логічні елементи не ідентичні, то мажоритарний закон застосовувати неможливо.

6.3. Визначення надійності резервованих систем при двох видах відмов

Однією з причин, що призводить до відмови технічних систем в процесі експлуатації, є вихід з ладу елементів систем. Аналіз елементів, що вийшли з ладу показує, що в більшості випадків порушення працездатності цих елементів трапляється внаслідок короткого замикання чи обриву елементів.

Іноді відмови технічних пристроїв викликаються відхиленням параметрів елементів за допустимі границі. В якості прикладу можна навести випадок, коли зміна номіналу ємності височастотних конденсаторів за границі допуску викликає розлад вибіркокових схем фільтрів. Їх називають параметричними відмовами.

Зовнішній прояв відмов елементів типу обрив і коротке замикання можемо спостерігати в напівпровідникових діодах, конденсаторах, ІМС, релейно-контактних елементах та елементах інших типів.

На рис. 6.6 зображена логічна схема надійності елемента з урахуванням можливого обриву та короткого замикання.

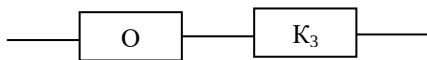


Рис.6.6. Логічна схема надійності елемента

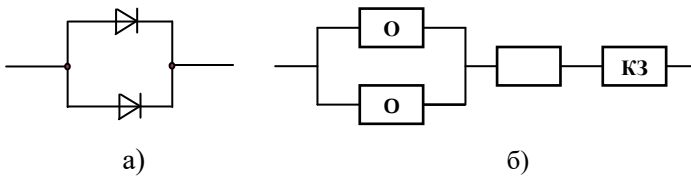
Введемо наступні позначення. Нехай ймовірність безвідмовної роботи елемента відносно обриву $P_0(t)$, а ймовірність безвідмовної роботи елемента відносно короткого замикання $P_3(t)$. Тоді ймовірність будь-якого елемента за заданий час визначається добутком:

$$P(t) = P_0(t)P_3(t). \quad (6.35)$$

У випадку резервованих елементів ймовірність безвідмовної роботи таких елементів потрібно розглядати з урахуванням ймовірностей безвідмовної роботи при цих двох видах відмов.

Очевидно, що співвідношення цих ймовірностей залежить від типу елементів.

Розглянемо визначення надійності резервованих систем при двох видах відмов. Для цього в якості прикладу розглянемо систему, яка складається з двох паралельно з'єднаних діодів (рис.6.7,а).



а) схема електрична паралельного з'єднання діодів;
б) логічна схема надійності діодів

Рис. 6.7

Якщо можливі відмови у вигляді обриву і короткого замикання, то надійність резервованої системи може бути визначена наступним чином.

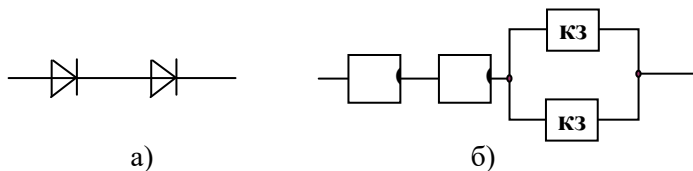
Розглянемо можливі наслідки, які можуть відбуватися в дубльованій системі у випадку виникнення того чи іншого виду відмов. Так, коротке замикання будь-якого з діодів призводить

до відмови даної системи в цілому, а обрив будь-якого з діодів - до відмови лише цього елемента. В цьому випадку логічна схема надійності дубльованої системи має вигляд, зображений на рис. 6.7,б.

Імовірність безвідмовної роботи дубльованої системи (6.7,а) з урахуванням логічної схеми надійності (рис.6.7,б) визначається виразом:

$$P(t) = \{1 - [1 - P_0(t)]^2\} P_3^2(t). \quad (6.35)$$

Якщо діоди з'єднані послідовно (рис. 6.8,а), то логічна схема надійності в цьому випадку має вигляд, зображений на рис 6.8,б.



- а) схема електрична послідовного з'єднання діодів;
б) логічна схема надійності

Рис.6.8.

Імовірність безвідмовної роботи системи (рис.6.8,а) з урахуванням логічної схеми надійності (рис.6.8,б) визначається виразом:

$$P(t) = P_0^2(t) \{1 - [1 - P_3(t)]^2\}. \quad (6.36)$$

При паралельному з'єднанні m елементів коротке замикання будь-якого з елементів призводить до відмови всієї системи, а при обриві - система зберігає свою працездатність.

У цьому випадку імовірність безвідмовної роботи резервованих систем з однаковою надійністю елементів з урахуванням двох видів відмов визначається за формулою:

$$P(t) = \{1 - [1 - P_0(t)]^m\} P_3^m(t). \quad (6.37)$$

Якщо при резервуванні використовується послідовне з'єднання m елементів, то обрив будь-якого з елементів призводить до відмови всього з'єднання, а при короткому замиканні - з'єднання зберігає свою працездатність.

В цьому випадку надійність резервованої системи з послідовним з'єднанням елементів з однаковою надійністю визначається за формулою:

$$P(t) = P_0^m(t) \{1 - [1 - P_3(t)]^m\}. \quad (6.38)$$

У загальному випадку, коли значення імовірності $P_0(t)$ і $P_3(t)$ для окремих елементів різні, то надійність системи з m послідовно з'єднаних елементів визначається за формулою:

$$P(t) = \prod_{i=1}^m P_0(t) \{1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_3(t)]\}. \quad (6.39)$$

6.4. Матричний метод розрахунку надійності

Під час роботи технічних пристроїв мають місце випадки, коли відмова елементів пристрою призводить до зміни режиму роботи решти зв'язаних з ним елементів, і, як наслідок, викликає зміну характеристик надійності цих елементів. Так, електричний пробій транзистора в схемі підсилювача викликає зміну струму в колі схеми, в наслідок чого змінюються коефіцієнти електричного навантаження окремих елементів підсилювача, тим самим знижується їх надійність. В таких випадках при визначенні надійності пристроїв необхідно враховувати можливі наслідки відмов, тобто вплив відмов на інтенсивність відмов інших елементів, що залишаються працездатними після появи відмови. Для розв'язку даної задачі використовують матричний метод [24].

Сутність методу полягає в тому, що для визначення імовірності безвідмовної роботи пристрою (системи) з урахуванням наслідків від раптових відмов складається матриця всіх можливих несумісних подій $x_1, x_2, \dots, x_N$, після чого підраховують імовірності всіх цих подій $P(H_j)$.

Складаючи імовірності сприятливих (система працездатна) подій, визначають імовірність безвідмовної роботи системи на протязі часу t .

Як приклад розрахунку надійності системи матричним методом розглянемо пристрій, що складається з N елементів. Для цього випадку імовірність виникнення усіх можливих несумісних подій (безвідмовна робота або відмова одного або декількох елементів) для пристрою може бути представлена у вигляді матриці:

H_0	x_1	x_2	$\dots$	x_α	$\dots$	x_β	$\dots$	x_N
H_1	x_1	x_2	$\dots$	x_α	$\dots$	x_β	$\dots$	x_N
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
H_N	x_1	x_2	$\dots$	x_α	$\dots$	x_β	$\dots$	x_N
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$H_{\alpha,\beta}$	x_1	x_2	$\dots$	x_α	$\dots$	x_β	$\dots$	x_N
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$H_{1,2,\dots,N}$	x_1	x_2	$\dots$	x_α	$\dots$	x_β	$\dots$	x_N

В даній матриці було використано наступні позначення: x_i – стан i -го елемента; $\overline{x_i}$ – стан, коли i -й елемент відмовив; H_0 – гіпотеза, заключається в тому, що усі елементи справні; H_1 – гіпотеза, що 1-й елемент відмовив; $H_{\alpha,\beta}$ – гіпотеза, що відмовили елементи α та β , причому спочатку відмовив елемент α , а потім – β .

Оскільки матриця утворює повну групу несумісних подій, то дані події можна розглядати як гіпотези. Серед гіпотез матриці можуть бути сприятливі, коли пристрій працездатний, незважаючи на відмову елементів, та несприятливі, коли пристрій непрацездатний.

Сума імовірностей всіх гіпотез:

$$\sum_{j=0}^N P(H_j) = 1. \quad (6.40)$$

Сума імовірностей сприятливих гіпотез визначає імовірність безвідмовної роботи на протязі часу :

$$P(t) = \sum_{j=0}^{N_1} P(H_j), \quad (6.41)$$

де N_1 – кількість сприятливих гіпотез.

Імовірність гіпотези, коли пристрій знаходиться в працездатному стані (відмови елементів відсутні) визначається добутком імовірностей безвідмовної роботи всіх елементів пристрою:

$$P(H_0) = \prod_{j=1}^N P_j(t). \quad (6.42)$$

Імовірність решти гіпотез визначається за формулою повної імовірності, тобто через умовні імовірності часткових подій:

$$P(X) = \sum_{j=1}^N P(H_j)P(X/H_j), \quad (6.43)$$

де $P(X)$ – імовірність виникнення події X (безвідмовна робота або відмова одного чи декількох елементів); $P(X/H_i)$ – умовна імовірність події X при гіпотезі H_j .

Нижче наведено без виведення формулу для розрахунку надійності елемента $\overline{x_2}$:

$$P(H_2) = \frac{\lambda_2 (e^{-t \sum_{v=1}^N \lambda_v^{(a)}} - e^{-t \sum_{i=1}^N \lambda_i})}{\sum_{i=1}^N \lambda_i - \sum_{v=1}^N \lambda_v^{(a)}}, \quad (6.44)$$

де $v \neq \alpha$, $\lambda_v^{(a)}$ – зміна інтенсивності.

Отже, для того, щоб виконати розрахунок надійності за допомогою матричного методу, необхідно знати інтенсивності відмов елементів λ_i при нормальних режимах роботи пристрою та їх зміни, які викликаються зміною режимів за рахунок відмов різних елементів..

Цінність матричного методу розрахунку надійності полягає в тому, що цей метод не вносить ніяких обмежень на структуру пристрою та способи з'єднання елементів.

6.5. Оптимальне резервування

Для забезпечення потрібного рівня надійності при проектуванні технічних пристроїв використовують різні методи резервування. Проте використовуючи резервування, ставиться задача не тільки забезпечити потрібний рівень надійності пристрою, але й вирішити цю задачу з найменшими витратами на резервні елементи і для пристроїв в цілому.

На практиці часто трапляються випадки, коли потрібно забезпечити заданий рівень надійності пристрою при наявності певних конструктивних та інших обмежень. Наприклад, за зовнішніми габаритами, масою, споживчою потужністю, вартістю тощо.

При наявності одного обмежувального фактора розрізняють два види задач оптимального резервування, які формуються наступним чином [11].

Задача першого виду:

♦ визначення при роздільному резервуванні технічної системи, що складається з n частин, необхідну кількість резервних елементів, що забезпечують задане значення показника надійності системи при мінімальній вартості резерву в цілому.

Задача другого виду:

♦ визначення при окремому резервуванні системи, що складається з n частин, необхідну кількість резервних елементів, що забезпечують максимально можливе значення показника надійності системи, щоб вартість всього резерву не перевищувала заданого значення.

Розв'язок подібного типу задач базується на методах оптимізації [11]. Зрозуміло, що матеріальні затрати на резервування, перш за все визначаються кількістю резервних елементів.

В сучасних електронних системах при активному резервуванні використовують автоматичні перемикачі, які дозволяють значно зменшити час вмикання резервних елементів.

Відомо, що при збільшенні числа частин резервування при роздільному способі резервування ймовірність відмови системи зменшується. Але при великій кількості частин резервування відмови системи починають зростати з причини відмов перемикальних пристроїв. Це пов'язане з тим, що контрольно-вимірювальні пристрої, які працюють з сумісно резервною системою як єдине ціле, також технічно складні, як і сама система, працездатність якої вони контролюють. Тому відмови системи можуть відбуватися з вини перемикальних пристроїв.

Розглянемо наступну задачу.

Маємо технічну систему, в якій повинно бути застосоване активне резервування. Необхідно визначити оптимальну кількість частин резервування, на яке повинна бути розділена основна (нерезервована) система, що має ймовірність відмови $Q_n(t)$, щоб отримати більш надійну систему, якщо надійність перемикачів $q_n(t)$ і число резервних елементів в кожній частині k .

На рис.6.9 зображена логічна схема системи з активним резервуванням. Для визначення оптимальної кількості частин резервування вважаємо, що система може бути розділена на n ділянок з однаковою надійністю. При цьому основні та резервні елементи будуть знаходитись в однакових робочих умовах.

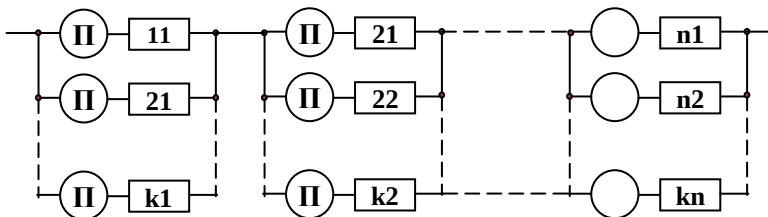


Рис.6.9. Логічна схема системи з активним резервуванням:
 $1, 2, \dots, n$ - основні та резервні елементи; П - перемикачі, n - кількість ділянок резервування; k - кількість резервних елементів.

В цьому випадку імовірність відмови частини системи з урахуванням ненадійності перемикачів визначається з виразу:

$$1 - Q_n(t) = \prod_{i=1}^n [1 - q_{ni}(t)] [1 - q_{di}(t)],$$

звідки

$$q_d(t) = 1 - [1 - q_n(t)] [1 - Q_n(t)]^{1/n}.$$

Імовірність відмови резервованого вузла сумісно з резервними елементами визначається наступним виразом:

$$q_{\text{вуз}}(t) = [1 - (1 - q_n(t))(1 - Q_n(t))^{1/n}]^{k+1}.$$

Імовірність відмови резервованої системи в цілому:

$$Q_{cp}(t) = \{1 - [1 - (1 - q_n(t))(1 - Q_n(t))^{1/n}]^{k+1}\}^n. \quad (6.45)$$

Подальші дослідження проведемо для технічних систем, у яких імовірність відмови $Q_n(t) < 1$ та $q_n(t) < 1$, тобто систем короточасної дії.

Розклавши праву частину рівняння (6.45) по $\frac{1}{n}$ та n , потім перемноживши вирази в круглих дужках та відкинувши члени вищих порядків малості, отримаємо наближено:

$$Q_{cp}(t) \approx n(q_n(t) + \frac{Q_n(t)}{n})^{k+1}.$$

Дослідимо функцію $Q_{cp}(t)$ на максимум та мінімум відносно величини n , вважаючи, що n - величина неперервна.

Розв'язуючи рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{cp}(t)}{dn} &= \frac{d}{dn} [n(q_n(t) + \frac{Q_n(t)}{n})]^{k+1} = (q_n(t) + \frac{Q_n(t)}{n}) - \\ &(k+1) \frac{Q_n(t)}{n^2} (q_n(t) + \frac{Q_n(t)}{n})^k = 0, \end{aligned}$$

знаходимо значення $n_{\text{опт}}$, при якому імовірність відмови резервованої системи є мінімальною:

$$n_{\text{опт}} = \frac{kQ_n(t)}{q_n(t)}. \quad (6.46)$$

6.6. Структурне резервування з відновленням

6.6.1. Резерв навантажений

У випадку резервованих систем з відновленням елементів, які відмовили, надійність систем може бути істотно підвищена в порівнянні з надійністю резервованих систем без відновлення таких елементів.

Надійність резервованих систем з відновленням розглянемо на прикладі аналізу функціонування дубльованої системи (рис.6.10,а). Передбачається, що елемент, який відмовив, може відновлятися.

У залежності від призначення системи, що резервується, можуть пред'являтися різні вимоги, наприклад:

1) система повинна безвідмовно працювати протягом заданого часу (перерви в роботі недопустимі). В цьому випадку для характеристики надійності системи використовують імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ протягом заданого часу $(0, t)$;

2) система повинна бути працездатною в заданий момент часу t (перерви в роботі допустимі). В цьому випадку для характеристики надійності системи використовують функцію готовності $K_r(t)$.

Визначимо показники надійності дубльованої системи з відновленням, з урахуванням зазначених вимог.

Для визначення показників надійності розглянемо резервовану систему (рис.6.10,а), в якій обидва елементи однакової надійності, інтенсивності відмов та відновлень однакові відповідно дорівнюють λ та μ , і перемикач абсолютно надійний.

Спочатку розглянемо систему, в якій відмови недопустимі (відновлення обмежене).

Нехай час роботи і відновлень елементів дубльованої системи розподілено по експоненційному закону. У цьому випадку процес роботи і відновлення системи можна вважати без наслідку і для характеристики надійності системи можна використовувати метод графів (станів).

Розглянемо усі можливі стани, в яких може знаходитися дубльована система в довільний момент часу. Система в будь-який момент часу може знаходитися в одному з таких можливих станів:

0 - обидва елементи справні;

1 - один елемент відмовив і відновляється, інший елемент справний;

2 - обидва елементи відмовили і система стала непрацездатною. Стан **2** є поглинаючим (система в ньому непрацездатна).

Імовірність зазначених станів дубльованої системи в момент часу t позначимо $P_0(t)$, $P_1(t)$ і $P_2(t)$. Ці імовірності пов'язані між собою таким співвідношенням:

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1. \quad (6.47)$$

Оскільки в стані **2** система непрацездатна, то імовірність безвідмовної роботи і імовірність відмови системи визначаються через відповідні імовірності.

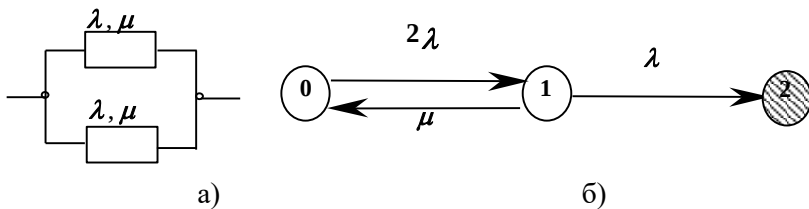
Так, імовірність безвідмовної роботи резервованої системи протягом часу t визначається таким співвідношенням:

$$P_d(t) = P_0(t) + P_1(t).$$

Імовірність відмови системи протягом часу t :

$$Q_d(t) = P_2(t).$$

На рис. 6.10,б зображено граф станів дубльованої системи з відновленням (резерв навантажений).



а) логічна схема надійності системи ;б) граф станів системи

Рис. 6.10. Дубльована система з відновленням
(резерв навантажених)

Поводження дубльованої системи описується системою лінійних диференціальних рівнянь. Система диференціальних рівнянь, складена за схемою графа (рис.6.10,б), має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} P_0'(t) &= -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P_1'(t) &= 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t); \\ P_2'(t) &= \lambda P_1(t). \end{aligned} \right\} \quad (6.48)$$

Початкові умови:

$$P_0(0) = 1; P_1(0) = P_2(0) = 0. \quad (6.49)$$

Рівняння доповнюються нормувальною умовою:

$$\sum_{j=0}^n P_j(0) = 1. \quad (6.50)$$

Розв'язок системи диференціальних рівнянь (6.48) здійснюється за допомогою перетворень Лапласа з урахуванням початкових умов (6.49). В результаті перетворень одержимо систему алгебраїчних рівнянь, яка має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} (s + 2\lambda)P_0(s) - \mu P_1(s) &= 1; \\ -2\lambda P_0(s) + (s + \lambda + \mu)P_1(s) &= 0; \\ -\lambda P_1(s) + sP_2(s) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6.51)$$

де $P_j(s)$ - перетворення по Лапласу функції $P_j(t)$; s - оператор перетворення.

Для визначення $P_j(s)$ розв'язуємо систему алгебраїчних рівнянь за правилом Крамера:

$$P_j(s) = \frac{D_j(s)}{D(s)}, \quad (6.52)$$

де $D(s)$ - визначник, елементами якого є коефіцієнти при $P_0(s)$, $P_1(s)$ і $P_2(s)$; $D_i(s)$ - визначник, утворений з визначника $D(s)$ шляхом заміни i -го стовпчика коефіцієнтами правої частини алгебраїчних рівнянь.

Розв'язок системи (6.51) відносно функції $P_2(s)$ дає:

$$P_2(s) = \frac{2\lambda^2}{s(s-s_1)(s-s_2)}. \quad (6.53)$$

Для знаходження оригіналу функції $P_2(t)$ по її зображенню $P_2(s)$ скористаємося методом розкладення функції $P_2(s)$ на елементарні дроби. Після розкладення функції та виконання оберненого перетворення Лапласа, визначаємо імовірність попадання системи в поглинаючий (непрацездатний стан) за час $(0, t)$:

$$P_2(t) = Q_d(t) = 1 - \frac{s_1 e^{s_2 t} - s_2 e^{s_1 t}}{s_1 - s_2}, \quad (6.54)$$

де

$$s_{1,2} = -\frac{\mu + 3\lambda}{2} \pm \frac{\sqrt{\mu^2 + 6\lambda\mu + \lambda^2}}{2}. \quad (6.54)$$

Імовірність безвідмовної роботи дубльованої системи протягом часу t визначається виразом:

$$P_d(t) = 1 - Q_d(t) = -\frac{s_1 e^{s_2 t} - s_2 e^{s_1 t}}{s_1 - s_2}. \quad (6.55)$$

Знаючи імовірність безвідмовної роботи дубльованої системи, можна визначити всі інші показники надійності за формулами, наведеними в розд. 2.

Для визначення середнього наробітку до відмови дубльованої системи необхідно в формулі для імовірності $P_2(s)$:

$$P_2(s) = \int_0^\infty P_d(t) e^{-st} dt \quad (6.56)$$

замість оператора s підставити значення $s = 0$: $\boxed{\lambda}$

$$T_d = P_2(0) = \int_0^\infty P_d(t) dt.$$

Звідки

$$T_d = \frac{\mu + 3\lambda}{2\lambda^2}. \quad (6.57)$$

Розглянемо дубльовану систему, в якій відновлення необмежене.

У такої системи не повинно бути поглинаючого стану. Це означає, що система після повної відмови і закінчення відновлення повинна знову включитись в роботу.

На рис. 6.11 зображено граф станів дубльованої системи з відновленням при навантаженому резерві.

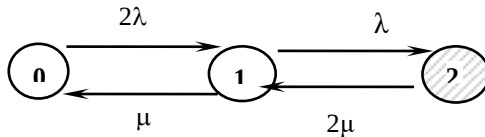


Рис. 6.11. Граф станів дубльованої системи з відновленням (резерв навантажений)

Система диференціальних рівнянь, що описує випадковий процес функціонування такої системи і яка зв'язує імовірність $P_j(t)$ знаходження системи в j -ому стані ($j = 0, 1, 2$) в момент часу t та їх похідні, складається аналогічно системі (6.48).

Система диференціальних рівнянь, яка складена відповідно до графа (рис.6.11), має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} P_0'(t) &= -2\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P_1'(t) &= 2\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu) P_1(t) + 2\mu P_2(t); \\ P_2'(t) &= \lambda P_1(t) - 2\mu P_2(t). \end{aligned} \right\} \quad (6.58)$$

Початкові умови:

$$P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = 0. \quad (6.59)$$

Дані рівняння доповнюються нормувальною умовою:

$$\sum_{j=0}^n P_j(0) = 1. \quad (6.60)$$

Для визначення функції готовності $K_\Gamma(t)$ і коефіцієнта готовності K_Γ дублюючої системи з відновленням розв'язують систему диференціальних рівнянь (6.58) за допомогою перетворень Лапласа і з урахуванням початкових умов (6.59).

В результаті перетворень Лапласа одержують систему алгебраїчних рівнянь, що має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} (s + 2\lambda)P_0(s) - \mu P_1(s) &= 1; \\ -2\lambda P_0(s) + (s + \lambda + \mu)P_1(s) - 2\mu P_2(s) &= 0; \\ -\lambda P_1(s) + (s + 2\mu)P_2(s) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.61)$$

Оскільки справному стану дубльованої системи відповідають стани 0 і 1, то відповідно до теореми додавання імовірностей для несумісних подій, функція готовності

$$K_{\Gamma}(t) = P_d(t) = P_0(t) + P_1(t) = 1 - P_2(t). \quad (6.62)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (6.61) відносно функції $P_2(s)$, отримаємо:

$$P_2(s) = \frac{2\lambda^2}{s[s^2 + 3(\lambda + \mu)s + 2(\lambda + \mu)^2]}.$$

Переходячи від зображення функції до оригіналу, отримаємо:

$$K_{\Pi}(t) = P_2(t) = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2} [1 - 2e^{-(\lambda + \mu)t} + e^{-2(\lambda + \mu)t}]. \quad (6.63)$$

Використовуючи вираз (6.62), визначаємо функцію $K_{\Gamma}(t)$ для дублюючої системи з відновленням:

$$K_{\Gamma}(t) = 1 - K_{\Pi}(t) = 1 - \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2} [1 - 2e^{-(\lambda + \mu)t} + e^{-2(\lambda + \mu)t}]. \quad (6.64)$$

Для визначення коефіцієнта готовності K_{Γ} дубльованої системи поступаємо таким чином. Оскільки досліджується робота системи при $t \rightarrow \infty$, то в цьому випадку коефіцієнт готовності може бути визначений шляхом розв'язку системи диференціальних рівнянь (6.58) при $P_i'(t) = 0$. У цьому випадку система рівнянь перетвориться в систему алгебраїчних рівнянь у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} -2\lambda P_0 + \mu P_1 &= 0; \\ 2\lambda P_0 - (\lambda + \mu)P_1 + 2\mu P_2 &= 0; \\ \lambda P_1 - 2\mu P_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.65)$$

Оскільки система рівнянь (6.65) має нескінченну кількість розв'язків, то замінімо одне з рівнянь системи нормувальною умовою:

$$\left. \begin{aligned} -2\lambda P_0 + \mu P_1 &= 0; \\ \lambda P_1 - 2\mu P_2 &= 0; \\ P_0 + P_1 + P_2 &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (6.66)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (6.66), визначаємо значення P_0, P_1 і P_2 :

$$P_0 = \frac{\mu^2}{(\lambda + \mu)^2}; P_1 = \frac{2\lambda\mu}{(\lambda + \mu)^2}; P_2 = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2}.$$

Для дубльованої системи з відновленням коефіцієнт готовності визначається за таким виразом:

$$K_{Г.д} = P_0 + P_1 = 1 - P_2. \quad (6.67)$$

Підставляючи в (6.67) значення P_2 , отримаємо:

$$K_{Г.д} = \frac{\mu(2\lambda + \mu)}{(\lambda + \mu)^2}. \quad (6.68)$$

6.6.2. Резерв ненавантажений

Для визначення показників надійності дубльованої системи з відновленням розглянемо систему, в якій обидва елементи однакової надійності, що мають інтенсивність відмов λ і відновлень μ , і абсолютно надійний пристрій, але при ненавантаженому резерві.

Розглянемо систему з обмеженим відновленням. На рис. 6.12 наведено граф станів дубльованої системи з відновленням (резерв ненавантажений).

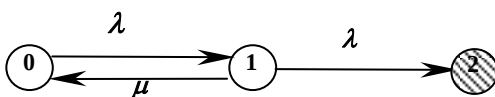


Рис. 6.12. Граф станів дубльованої системи з відновленням (резерв ненавантажений)

Система диференціальних рівнянь, яка описує поведінку дубльованої системи при ненавантаженому резерві, складається аналогічно попереднім системам, але з урахуванням схеми графа на рис. 6.12.

Для даного випадку, система диференціальних рівнянь має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} P_0'(t) &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P_1'(t) &= P_0(t) - (\lambda + \mu) P_1(t); \\ P_2'(t) &= \lambda P_1(t). \end{aligned} \right\} \quad (6.69)$$

Початкові умови:

$$P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = 0. \quad (6.70)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (6.69) з урахуванням початкових умов (6.70) за допомогою перетворень Лапласа, визначаємо імовірність відмови дубльованої системи $Q_d(t)$ протягом часу t , тобто імовірність попадання системи в стан $P_2(t)$:

$$Q_d(t) = P_2(t) = 1 - \frac{s_1 e^{s_2 t} - s_2 e^{s_1 t}}{s_1 - s_2}. \quad (6.71)$$

Імовірність безвідмовної роботи дубльованої системи при ненавантаженому резерві протягом часу t визначається виразом:

$$P_d(t) = 1 - Q_d(t). \quad (6.72)$$

Звідки маємо:

$$P_d(t) = \frac{s_1 e^{s_2 t} - s_2 e^{s_1 t}}{s_1 - s_2}. \quad (6.73)$$

де

$$s_{1,2} = -\frac{\mu + 2\lambda}{2} \pm \frac{\sqrt{(\mu + \lambda)^2 - 4\lambda^2}}{2}.$$

Середній наробіток до відмови дубльованої системи при ненавантаженому резерві визначається виразом:

$$T_d = P_2(s)|_{s=0} = \frac{\mu + 2\lambda}{\lambda^2}. \quad (6.74)$$

Розглянемо дубльовану систему з необмеженим відновленням.

Якщо обидва елементи системи цілком ідентичні (мають однакові інтенсивності відмов і відновлень), то в цьому випадку варто розглядати такі стани дубльованої системи, в яких вона може знаходитись протягом часу t :

0 - обидва елементи справні;

1 - один елемент відмовив і відновляється, інший елемент справний;

2 - обидва елементи відмовили.

Граф станів системи, коли резервний елемент знаходиться в ненавантаженому резерві, показано на рис. 6.13.

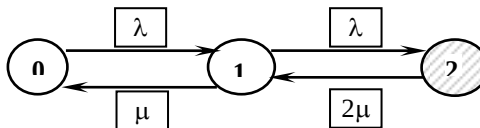


Рис. 6.13. Граф станів резервованої системи з відновленням (резерв ненавантажений)

Відмінність цього графа від графа на рис. 6.11 у відсутності стана, що поглинає. Поводження системи з ненавантаженим резервом описується такою системою диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} P_0'(t) &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P_1'(t) &= \lambda P_0(t) - (\lambda + \mu) P_1(t) + 2\mu P_2(t); \\ P_2'(t) &= \lambda P_1(t) - 2\mu P_2(t). \end{aligned} \right\} \quad (6.75)$$

Початкові умови:

$$P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = 0. \quad (6.76)$$

Дані рівняння доповнюються нормувальною умовою:

$$\sum_{j=0}^n P_j(0) = 1. \quad (6.77)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (6.75) з урахуванням початкових умов, визначаємо залежності $P_j(0)$ для $j = 0, 1, 2$.

Функція готовності дубльованої системи (резерв ненавантажений) для заданого часу t визначається таким виразом:

$$K_{\Gamma}(t) = P_0(t) + P_1(t) = 1 - P_2(t). \quad (6.78)$$

Для нашого випадку маємо:

$$K_{\Gamma}(t) = 1 - \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2 + \mu^2} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{\mu^2 + 4\lambda\mu}} (s_2 e^{s_1 t} - s_1 e^{s_2 t}) \right], \quad (6.79)$$

де

$$s_{1,2} = -\frac{3\mu + 2\lambda}{2} \pm \frac{\sqrt{\mu^2 - 4\lambda\mu}}{2}.$$

Визначення стаціонарного коефіцієнта готовності K_{Γ} для дубльованої системи при ненавантаженому резерві проводиться

шляхом розв'язку системи диференціальних рівнянь (6.75) при $t \rightarrow \infty$, тобто $P_i'(t) = 0$. При цьому замість одного з отриманих алгебраїчних рівнянь використовують нормувальну умову:

$$P_0 + P_1 + P_2 = 1. \quad (6.80)$$

Розв'язуючи отриману систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} -2\lambda P_0 + \mu P_1 &= 0; \\ \lambda P_1 - 2\mu P_2 &= 0; \\ P_0 + P_1 + P_2 &= 1, \end{aligned} \right\} \quad (6.81)$$

одержують такі значення P_i :

$$P_0 = \frac{\mu^2}{(\lambda + \mu)^2}; P_1 = \frac{2\lambda\mu}{(\lambda + \mu)^2}; P_2 = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2}.$$

Оскільки $K_\Gamma = P_0 + P_1$, то, підставляючи отримані значення для P_0 і P_1 , отримаємо:

$$K_\Gamma = \frac{2\mu(\lambda + \mu)}{(\lambda + \mu)^2 + \mu^2}. \quad (6.82)$$

6.7. Вплив системи контролю на надійність резервованих систем з відновленням

При аналізі надійності резервованих пристроїв з відновленням встановлено, що найбільшу ефективність від застосування резервування можна отримати при ідеальній системі контролю стану системи, тобто такій системі, яка здатна практично миттєво виявляти елемент, що відмовив і вмикати в роботу резервний.

В реальних умовах все відбувається трохи інакше. Так, наприклад:

♦ пристрої, в яких системою контролю охоплено лише частину функціональних елементів, явно знижує оцінку стану пристроїв;

- ◆ наявність недостовірної інформації (хибних сигналів) про працездатний чи непрацездатний стан пристрою в наслідок ненадійності системи контролю чи її недосконалості;

- ◆ застосування періодичного контролю замість постійного при експлуатації пристрою;

- ◆ вплив системи технічного обслуговування на відновлення елементів пристрою,

Усе це знижує ефективність застосування резервування як засобу підвищення надійності технічних пристроїв та систем при експлуатації.

Якщо для нерезервованих систем (пристроїв) з відновлюванням система контролю працездатності системи впливає в основному на коефіцієнт готовності, то для резервованих пристроїв з відновлюванням система контролю впливає на всі показники надійності, в тому числі на коефіцієнт готовності, імовірність безвідмовної роботи за заданий час та ін. Про це конкретно викладено в [11].

7. НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ ЗІ СКЛАДНОЮ СТРУКТУРОЮ

7.1 Основні поняття

Існує ряд систем, що складаються з множини елементів, для яких відмова системи залежить не тільки від кількості елементів, але і від місця розташування цих елементів в структурній (логічній) схемі.

Як приклад таких систем можна навести схему на рис. 7.1.

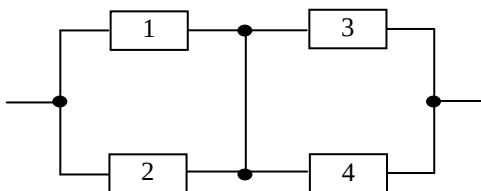


Рис 7.1. Паралельно-послідовне з'єднання елементів

Система відмовляє, якщо відмовлять елементи 1 і 2. Якщо відмовлять елементи 1 і 3 або 2 і 4, то система залишиться працездатною.

Критерієм оцінки складності систем є рівність:

$$\begin{aligned} K_{\max} + 1 &= K_{\min} - \text{для простих систем;} \\ K_{\max} + 1 &\neq K_{\min} - \text{для складаних систем,} \end{aligned} \quad (7.1)$$

де $K_{\max}$ - максимальна кількість елементів, при відмові яких система залишається працездатною; $K_{\min}$ - мінімальна кількість елементів, при відмові яких система стає непрацездатною.

Для системи з послідовним з'єднанням елементів, коли відмова будь-якого елемента призводить до відмови системи, значення коефіцієнтів $K_{\max} = 0$ і $K_{\min} = 1$. Таким чином, критерій (7.1) дотримується. Отже, така система є простою.

Для системи (рис. 7.1) значення коефіцієнтів $K_{\max} = 2$ і $K_{\min} = 2$. Як бачимо, критерій (7.1) не дотримується. З цього випливає, що система є складною.

Складні системи бувають із послідовно-паралельним з'єднанням елементів, з'єднанням типу трикутник і зірка та перехресним з'єднанням.

Існує багато різних методів оцінки надійності складних систем. У загальному випадку порядок оцінки надійності такий.

Якщо система складається з n елементів, то кількість станів системи визначається кількістю станів її елементів. Оскільки елементи системи можуть знаходитися в одному з двох можливих станів (працездатному або непрацездатному), то кількість можливих станів, в яких вона може знаходитися, дорівнює 2^n .

Таким чином, вся множина станів системи розподіляється на дві множини: працездатну та непрацездатну. Визначаючи імовірності перебування системи в працездатному стані та сумуючи їх, визначають імовірність безвідмовної роботи складної системи.

Проте такий метод оцінки має свої труднощі, які пов'язані з визначенням працездатного і непрацездатного станів елементів складної системи.

У зв'язку з цим використовують метод перетворення системи зі складною структурою в більш прості, для яких відомі аналітичні вирази для розрахунку надійності.

Розглянемо методи розрахунку надійності системи зі складною структурою без відновлення.

7.2. Метод згортки

Даний метод заснований на послідовному перетворенні складної структури системи в просту, тобто до послідовного з'єднання елементів.

Як приклад застосування цього методу розглянемо систему (рис 7.2). Нехай імовірність безвідмовної роботи

елементів P_i . Необхідно визначити імовірність безвідмовної роботи P_c системи.

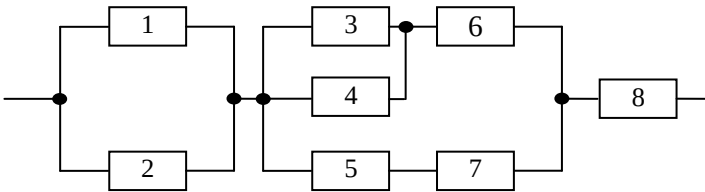


Рис. 7.2. Паралельно-послідовне з'єднання елементів

Розрахунок надійності проводимо поетапно:

1) заміняємо всі паралельні з'єднання елементів системи еквівалентними елементами. Такими паралельними з'єднаннями в схемі (рис. 7.2) є елементи 1 і 2, 3 і 4.

Після перетворення схема прийме вигляд, зображений на рис. 7.3.

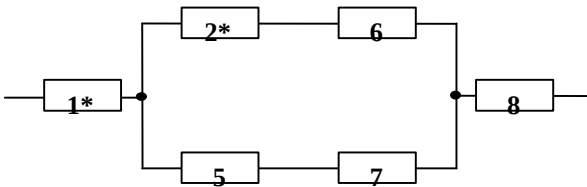


Рис. 7.3. Вигляд схеми після першого перетворення

Імовірність безвідмовної роботи кожної групи елементів визначається за формулами:

$$P_{1-2} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) = P_{1*};$$

$$P_{3-4} = 1 - (1 - P_3)(1 - P_4) = P_{2*};$$

2) заміняємо всі послідовні з'єднання елементів еквівалентними з'єднаннями. В схемі (рис 7.3) такими послідовними

з'єднаннями є елементи 2^* і 6 , 5 і 7 . Після перетворення схема прийме вигляд, зображений на рис 7.4.

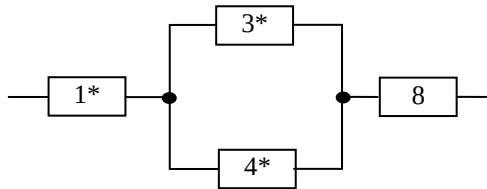


Рис. 7.4. Вигляд схеми після другого перетворення

Імовірність безвідмовної роботи групи з послідовним з'єднанням елементів визначається за формулами:

$$P_{3^*} = P_2 \cdot P_5 = [1 - (1 - P_3)(1 - P_4)]P_5;$$

$$P_{4^*} = P_5 P_7;$$

3) заміняємо паралельне з'єднання елементів еквівалентними елементами. В схемі (рис 7.4) таким з'єднанням є елементи 3^* і 4^* . Після перетворення схема має вигляд, зображений на рис. 7.5

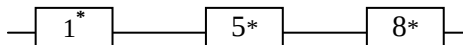


Рис. 7.5. Вид схеми після третього перетворення

Імовірність безвідмовної роботи групи з паралельним з'єднанням елементів визначається за формулою:

$$\begin{aligned} P_{3^*-4^*} &= 1 - (1 - P_{3^*})(1 - P_{4^*}) = \\ &= \{1 - \{1 - [1 - (1 - P_1)(1 - P_2)]P_6\}\}(1 - P_5 P_7) = P_{5^*}. \end{aligned}$$

Таким чином, в результаті перетворень схеми (рис. 7.2), отримана схема з послідовним з'єднанням елементів;

4) імовірність безвідмовної роботи системи з послідовним з'єднанням елементів визначаємо за формулою:

$$P_c = P_1 \cdot P_5 \cdot P_8 = [1 - (1 - P_1)(1 - P_2)] \times \\ \times \{1 - \{1 - [1 - (1 - P_1)(1 - P_2)]P_6\}(1 - P_5P_7)P_8\}.$$

7.3. Метод прямого перебору станів

Багато систем, що складаються з множини функціональних елементів, мають таке структурне з'єднання елементів, яке, у випадку оцінки надійності, не може бути зведено ні до паралельно-послідовної, ні до послідовно-паралельної схеми. На практиці подібні системи є в системах зв'язку, інформаційних системах, системах живлення літаків тощо.

У якості прикладу таких систем можна віднести мостову схему, зображену на рис. 7.6.

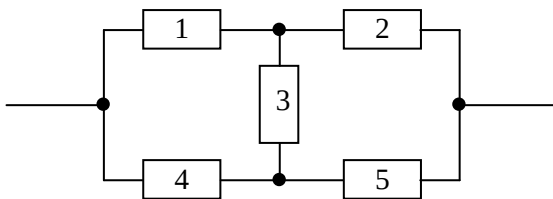


Рис. 7.6. Мостова схема

Методи оцінки показників надійності складаних систем дуже специфічні. Як приклад оцінки надійності подібних систем розглянемо розрахунок надійності схеми (рис. 7.6) за методом прямого перебору станів.

Нехай схема складається з ідентичних елементів, кожний з яких характеризується імовірністю безвідмовної роботи P_i .

Розглянемо усі можливі стани схеми, в яких вона може знаходитися у будь-який момент часу:

H_0 - усі елементи працездатні;

H_i - відмовив i -й елемент, інші елементи працездатні;

$H_{i,j}$ - відмовили i -й і j -й елементи, інші елементи працездатні;

$H_{1,2,\dots,n}$ - відмовили всі елементи схеми.

Вся множина можливих станів може бути подана двома множинами станів елементів, що не перетинаються, які відповідають працездатному або непрацездатному станам.

Визначимо множину можливих станів елементів схеми, при яких мостова схема зберігає працездатність. Для цього складемо таблицю можливих станів елементів за рис. 7.6.

Вважаємо, що відмови елементів є подіями незалежними і без наслідку.

У табл. 7.1 застосовані такі позначення: $x_i = 1$ означає, що i -й елемент працездатний, а $x_i = 0$ - що він непрацездатний.

При незалежних відмовах імовірність кожного стану визначається добутком імовірностей перебування елементів у відповідних станах.

Імовірність працездатного стану мостової схеми визначається виразом:

$$P = \sum_{j=1}^m \prod_{l_j} P_{l_j} \cdot \prod_{k_j} q_{k_j}, \quad (7.2)$$

де m - загальна кількість працездатних станів.

l_j - кількість справних елементів в j -му стані схеми; k_j - кількість елементів, що відмовили, в j -му стані схеми.

Для схеми (рис 7.6) імовірність безвідмовної роботи за заданий час t визначається виразом:

$$P(t) = \sum_{j=1}^{16} \prod_{l_j} p_{l_j}(t) \cdot \prod_{k_j} q_{k_j}(t) = p^5(t) + 5 \cdot q(t) \cdot p^4(t) + \\ + 8 \cdot q^2(t) \cdot p_3(t) + 2 \cdot q^3(t) \cdot p^2(t).$$

Таблиця 7.1

Індекс Стану	Стан елементів					Імовірність стану
J	1	2	3	4	5	p_i
0	1	1	1	1	1	p^5
1	0	1	1	1	1	qr^4
2	1	0	1	1	1	qr^4
3	1	1	0	1	1	qr^4
4	1	1	1	0	1	qr^4
5	1	1	1	1	0	qr^4
6	0	1	0	1	1	q^2p^3
7	0	1	1	0	1	q^2p^3
8	0	1	1	1	0	q^2p^3
9	1	0	0	1	1	q^2p^3
10	1	0	1	0	1	q^2p^3
11	1	0	1	1	0	q^2p^3
12	1	1	0	1	0	q^2p^3
13	1	1	1	0	0	q^2p^3
14	0	1	0	0	1	q^2p^3
15	1	0	0	1	0	q^2p^3

Вважаючи, що всі елементи однакової надійності з $P(t)=0,9$, то при $t=10$ годинам імовірність безвідмовної роботи схеми буде складати:

$$P(t) = 0,978.$$

Слід зазначити, що застосування методу перебору станів при оцінці надійності систем зі складною структурою являє собою трудомісткий процес.

7.4. Метод мінімальних шляхів і перетинів

При оцінці надійності систем зі складною структурою використовується метод мінімальних шляхів і перетинів. Цей метод оцінки є наближеним.

Наведемо пояснення деяких понять, які використовуються в даному методі:

♦ **мінімальним шляхом** у складній структурі називається мінімальний набір працездатних елементів, виключання будь-якого з яких (тобто відмова) переводить систему з працездатного стану в непрацездатний;

♦ **мінімальним перетином** у складній структурі називається мінімальний набір непрацездатних елементів, відновлення будь-якого з яких переводить систему з непрацездатного стану в працездатний.

У системи зі складною структурою може бути декілька мінімальних шляхів і перетинів. Паралельне з'єднання з n елементів має n мінімальних шляхів, що проходять через кожний елемент, і всього один мінімальний перетин. Послідовне з'єднання з n елементів має n мінімальних перетинів, які проходять через кожний елемент, і всього один мінімальний шлях.

Якщо в системі з довільною структурою позначити j -й мінімальний шлях через $\alpha_j (j = \overline{1, n_\alpha})$, а кількість мінімальних перетинів через $\beta_k (k = \overline{1, n_\beta})$, то верхня та нижня оцінки для імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ системи за заданий час t запишуться так [16]:

$$\prod_{k=1}^{n_\beta} \left[1 - \prod_{i \in \beta_k} (1 - P_i(t)) \right] \leq P(t) \leq \prod_{i=1}^{n_\alpha} \left[1 - \prod_{i \in \alpha_k} (1 - P_i(t)) \right] \quad (7.3)$$

Таким чином, при безвідмовній роботі паралельно ввімкнених послідовних ланцюгів, які складаються з елементів шляхів, одержують граничну верхню оцінку для імовірності безвідмовної роботи системи даної структури.

При безвідмовній роботі послідовно ввімкнених паралельних ланцюгів, які складаються з елементів даного перетину, одержують граничну нижню оцінку для імовірності безвідмовної роботи системи даної структури.

Якщо імовірність безвідмовної роботи i -го елемента системи є експоненційною функцією, тобто $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$, то, інтегруючи

праву частину нерівності, можна одержати верхню оцінку для середнього часу наробітку до відмови системи:

$$T \leq \sum_{1 \leq j \leq n_a} T_{a_j} - \sum_{1 \leq j < k \leq n_a} \frac{1}{\Lambda_{a_j} + \Lambda_{a_k}} + \sum_{1 \leq j < k < l \leq n_a} \frac{1}{\Lambda_{a_j} + \Lambda_{a_k} + \Lambda_{a_l}} +$$

$$+ (-1)^{n_a+1} \frac{1}{\sum_{1 \leq j \leq n_a} \Lambda_{a_j}},$$

де $T_{a_j} = \frac{1}{\sum_{j \in a_j} \Lambda_{a_j}}$ - середній час наробітку до відмови j -го шляху;

$$\Lambda_{a_j} = \frac{1}{T_{a_j}}.$$

Як приклад застосування даного методу при оцінці надійності розглянемо схему (рис 7.6).

Для мостової схеми набір мінімальних шляхів зображено на рис. 7.7.

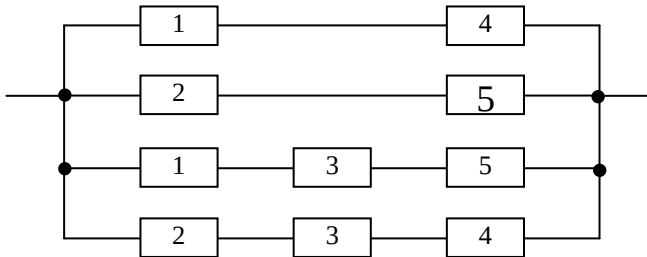


Рис. 7.7. Набір мінімальних шляхів

Оскільки один і той самий елемент включається в два паралельних шляхи, то в результаті розрахунку одержимо верхню оцінку для імовірності безвідмовної роботи за час t :

$$P_a(t) = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)(1 - p_1 p_3 p_5)(1 - p_2 p_3 p_4).$$

Набір мінімальних перетинів для цієї схеми зображено на рис. 7.8.

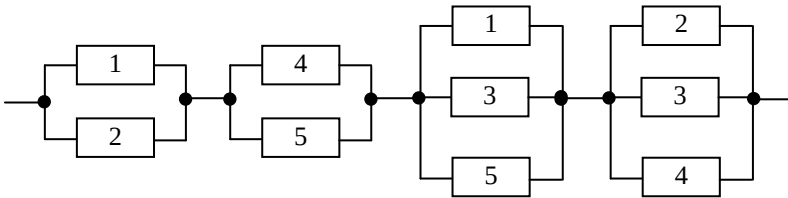


Рис 7.8. Набір мінімальних перетинів

Оскільки той самий елемент включається в два перетини, то одержимо нижню оцінку для імовірності безвідмовної роботи за час t :

$$P_p(t) = (1 - q_1 q_2)(1 - q_5 q_4)(1 - q_1 q_3 q_5)(1 - q_2 q_3 q_4).$$

Якщо прийняти, що $p_1 = p_2 = p_3 = \dots = p_5 = p$ і $q = 1 - p$, то верхня і нижня оцінки запишуться у вигляді:

$$(1 - q^2)^2(1 - q^3)^2 < P < 1 - (1 - p^2)^2(1 - p^3)^2.$$

Визначимо верхню і нижню оцінки для імовірності безвідмовної роботи мостової схеми, коли всі елементи цієї схеми характеризуються імовірністю безвідмовної роботи $P(t) = e^{-\lambda t}$ з параметром $\lambda = 0.01 \frac{1}{\text{год}}$. Оцінку імовірності безвідмовної роботи схеми визначимо для $t = 10$ год.

Підставляючи числові дані в формулу (7.3), отримаємо:

$$0,978 \leq P \leq 0,997$$

Таким чином, застосовуючи метод мінімальних шляхів і перетинів для оцінки надійності системи, можна перетворити будь-яку структуру системи в структуру з послідовно-паралельним з'єднанням або паралельно-послідовним з'єднанням елементів.

7.5. Метод перетворення складної структури щодо особливого елемента

Для оцінки надійності систем із складною структурою використовують метод перетворення структури системи відносно особливого елемента []. Метод заснований на використанні формули повної імовірності. Для цього в структурі системи виділяють особливий елемент, потім розглядають усі можливі його несумісні стани H_j , що утворюють повну групу, тобто:

$$\sum_{j=1}^n P(H_j) = 1. \quad (7.4)$$

Якщо стан системи X , то імовірність його реалізації визначається за формулою:

$$P(X) = \sum_{j=1}^n P(H_j) \cdot P(X/H_j), \quad (7.5)$$

де $P(X/H_j)$ - умовна імовірність стану X за умови, що особливий елемент знаходиться в стані H_j .

Якщо в якості стану особливого елемента розглядати стан, коли він справний або несправний (відмовив), то вираз для визначення імовірності безвідмовної роботи системи за час t при використанні формули повної імовірності (7.5) буде мати вигляд:

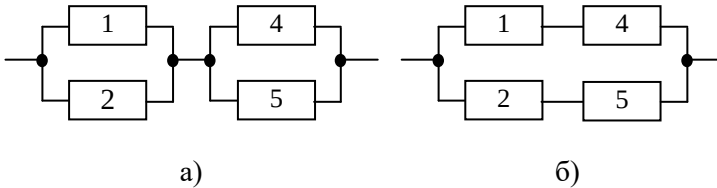
$$P(t) = p_i \cdot P(x_i = 1) + q_i \cdot P(x_i = 0), \quad (7.6)$$

де $P(x_i = 1)$ - імовірність працездатного стану системи за умови, що i -й елемент абсолютно надійний, а $P(x_i = 0)$ - імовірність працездатного стану системи за умови, що i -й елемент відмовив.

Розглянемо приклад застосування даного методу при оцінці надійності мостової схеми (рис 7.6). В якості особливого елемента виділимо елемент 3. Позначимо його через x_3 .

Розглянемо усі можливі стани, в яких він може знаходитися протягом часу t :

H_0 - стан, коли елемент 3 абсолютно надійний, тобто $x_3 = 1$. В цьому випадку мостова схема перетвориться в паралельно-послідовне з'єднання (рис 7.9, а).



а) паралельно-послідовне з'єднання елементів ($x_3 = 1$);

б) послідовно-паралельне з'єднання елементів ($x_3 = 0$)

Рис 7.9. Вид мостової схеми після перетворення

Імовірність безвідмовної роботи системи з таким з'єднанням елементів визначається виразом:

$$P(x_3 = 1) = (1 - q_1 q_2)(1 - q_4 q_5). \quad (7.7)$$

H_1 - стан, коли елемент 3 відмовив, тобто $x_3 = 0$ (обрив ланцюга). Схема (рис 7.6) в цьому випадку перетвориться в паралельно-послідовне з'єднання елементів (рис. 7.9,б).

Імовірність безвідмовної роботи системи з таким з'єднанням елементів визначається виразом:

$$P(x_3 = 0) = (1 - p_1 p_2)(1 - p_4 p_5). \quad (7.8)$$

Остаточно маємо:

$$P(t) = p_3(1 - q_1 q_2)(1 - q_4 q_5) + q_3[1 - (1 - p_1 p_2)(1 - p_4 p_5)].$$

У випадку, якщо елементи схеми ідентичні, то вираз для $P(t)$ має вигляд:

$$P(t) = p(1 - q^2)^2 + q[1 - (1 - p^2)^2]. \quad (7.9)$$

Таким чином, застосування методу розкладання щодо особливого елемента при оцінці надійності систем зі складною структурою дозволяє спростити структурну схему надійності і звести її до паралельно-послідовного з'єднання елементів.

Даний метод розкладання функції $P(X)$ можна використовувати щодо декількох елементів. Так, для випадку розкладання функції по двох елементах маємо:

$$P(t) = p_i p_j P(x_i = 1, x_j = 1) + p_i q_j P(x_i = 1, x_j = 0) + q_i p_j P(x_i = 0, x_j = 1) + q_i q_j P(x_i = 0, x_j = 0). \quad (7.10)$$

7.6. Логіко-імовірнісні методи

Останнім часом широке застосування при аналізі надійності виробів (систем) одержав логіко-імовірнісний метод розрахунку надійності. Теоретичною основою цього методу є математична логіка (булева алгебра).

Відмінність цього методу від класичних методів розрахунку надійності полягає в тому, що математична модель надійності виробу описується за допомогою функцій алгебри логіки, тобто стан (працездатний або непрацездатний) виробу описується за допомогою логічних функцій. В цьому випадку такі функції приймають лише одне з двох можливих значень ($F_{\text{л}} = 1$ або $F_{\text{л}} = 0$). В свою чергу функції $F_{\text{л}}$ визначаються різноманітним набором логічних змінних (аргументів) $x_1, x_2, \dots, x_n$, що аналогічно функціям можуть приймати одне з двох можливих значень: 1 або 0.

З n змінних може бути утворено 2^n логічних функцій.

Логічні змінні $x_1, x_2, \dots, x_n$ характеризують стан елементів системи, при цьому $x_i = 1$ означає працездатний стан елемента, а $x_i = 0$ - непрацездатний. Те ж саме відноситься до логічних функцій, що описують стан виробу.

Логічні функції утворюються за допомогою трьох основних логічних операцій: логічного заперечення $\bar{x}$, додавання (диз'юнкція) **АБО**, що позначається знаком “+” або “ $\vee$ ”, і множення (кон'юнкції) **І**, що позначається знаком “.” або “ $\wedge$ ”.

Логічні функції, що зв'язують стан виробу і стани його елементів, називають логічними функціями працездатності виробу (системи) [10], [32].

Функції працездатності можуть задаватися в словесній формі, таблицями істинності, алгебраїчними виразами або графіками.

Для упорядкування функції працездатності, спочатку аналізують особливості роботи виробу за допомогою логічної схеми надійності.

Після упорядкування функції працездатності переходять до упорядкування рівняння працездатності в алгебраїчній формі. При цьому використовують такі залежності:

$$x_1 \wedge x_2 = x_1 x_2;$$

$$x_1 \vee x_2 = x_1 + x_2 - x_1 x_2;$$

$$\bar{x} = 1 - x.$$

При цьому враховують, що

$$x_1 \cdot x_2 = x_1.$$

В алгебраїчному рівнянні працездатності замість простих подій x_i підставляють імовірності цих подій p_i і потім обчислюють імовірність $P_c(t)$ перебування виробу в працездатному стані протягом заданого інтервалу часу.

Як приклад розглянемо систему, що складається з трьох елементів (рис. 7.10).

Позначимо елементи 1, 2, 3 через x_1 , x_2 , x_3 відповідно.

Функція працездатності буде мати вигляд:

$$F_n = x_1 \vee x_2 \vee x_3. \quad (7.11)$$

Рівняння працездатності в алгебраїчній формі має вигляд:

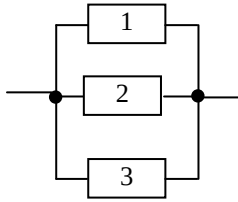


Рис.7.10. Логічна схема розрахунку надійності

$$F_a = x_1 + x_2 + x_3 - (x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3) + x_1 x_2 x_3. (7.12)$$

Вираз для імовірності безвідмовної роботи системи за заданий час $(0, t)$:

$$P_c(t) = p_1 + p_2 + p_3 - (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) + p_1 p_2 p_3.$$

Той самий вираз для $P_c(t)$ можна одержати, якщо використовувати формулу для розрахунку надійності паралельного навантаженого з'єднання:

$$\begin{aligned} P_c(t) &= 1 - \prod_{j=1}^k (1 - p_j) = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3) \\ &= x_1 + x_2 + x_3 - (x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3) + x_1 x_2 x_3. \end{aligned}$$

У випадку розрахунку надійності систем зі складною структурою, при складанні складної логічної функції працездатності системи таку функцію варто перетворити (мінімізувати) так, щоб вона містила мінімальне число членів, які повторюються.

Для мінімізації функцій рекомендуються такі формули математичної логіки:

- 1) $x_1 x_1 = x_1$;
- 2) $x_1 \vee x_1 = x_1$;

- 3) $x_1 \vee x_1 x_2 = x_1$;
- 4) $1 \vee x_1 = 1$;
- 5) $(x_1 \vee \overline{x_1}) = 1$;
- 6) $(x_1 \cdot x_2) \vee (x_1 \cdot \overline{x_2}) = x_1$;
- 7) $x_1 (x_1 \vee x_2) = x_1$;
- 8) $(x_1 \vee x_2) \cdot (x_1 \vee x_3) = x_1 \vee x_2 x_3$;
- 9) $F_{\text{л}}(x_1, x_2, x_3, \dots) =$
 $= x_1 F_{\text{л}}(1, x_2, x_3, \dots) \vee \overline{x_1} F_{\text{л}}(0, x_2, x_3, \dots).$

1) Формула (9) розкладання логічної функції $F_{\text{л}}$ по x_1 на дві складові використовують тоді, коли всі інші формули (1-8) не дозволяють виключити зайві члени.

Таким чином, використання апарата математичної логіки дозволяє формалізувати умови працездатності (надійності) систем зі складною структурою і одержати відповідні формули для розрахунку надійності.

Послідовність розрахунку надійності таких систем така. Для одержання виразу (рівняння) для імовірності працездатного стану складної системи (виробу) необхідно:

1) сформулювати словесно умови працездатності системи;

2) скласти логічну функцію працездатності $F_{\text{л}}$ згідно формулювання про умову працездатності системи;

3) перетворити (в разі необхідності) логічну функцію працездатності, тобто мінімізувати і виключити зайві члени;

4) замінити в логічній функції працездатності логічні операції алгебраїчними, тобто одержати $F_{\text{а}}$;

5) замінити в алгебраїчній функції працездатності прості події їхніми імовірностями;

6) в отриманому виразі, що встановлює зв'язок між імовірністю стану складної системи і імовірностями станів елементів системи, підставити числові значення імовірності станів елементів.

Вирішуючи отримане рівняння, визначають числове значення імовірності працездатного стану складної системи (виробу).

Як приклад розрахунку надійності розглянемо систему (тракт передачі даних), яка зображена на рис. 7.11.

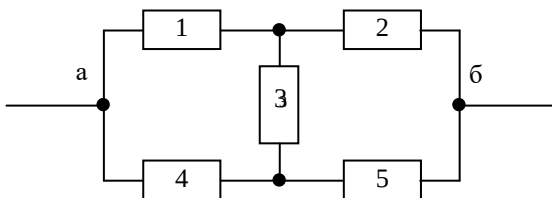


Рис. 7.11. Логічна схема складної системи для розрахунку надійності

Розглянемо умову працездатності системи (тракту):

1) система працездатна, якщо працездатні елементи 1 і 2 або 1, 3 і 5, або 4 і 5, або 4, 3 і 2;

2) запишемо логічну функцію працездатності системи за умовами словесного формулювання працездатності системи, в такий спосіб:

$$F_{\text{н}} = (x_1 \cdot x_2) \vee (x_1 \cdot x_3 \cdot x_5) \vee (x_4 \cdot x_5) \vee (x_4 \cdot x_3 \cdot x_2).$$

3) розкладемо функцію $F_{\text{н}}$ з метою виключення зайвих членів:

$$F_{\text{н}} = x_3 \{ (x_1 \cdot x_2) \vee (x_1 \cdot x_5) \vee (x_4 \cdot x_5) \vee (x_4 \cdot x_2) \} \vee \overline{x_3} \{ x_1 \cdot x_2 \vee x_4 \cdot x_5 \}$$

Спростимо вираз в перших фігурних дужках:

$$\begin{aligned} x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_5 \vee x_4 \cdot x_5 \vee x_4 \cdot x_2 &= x_1 (x_2 \vee x_5) \vee x_4 (x_5 \vee x_2) \\ &= (x_1 \vee x_4) (x_2 \vee x_5). \end{aligned}$$

Підставимо даний вираз в рівняння працездатності і одержимо:

$$F_{\text{л}} = x_3(x_1 \vee x_4)(x_2 \vee x_5) \vee \overline{x_3}(x_1 \cdot x_2 \vee x_4 \cdot x_5).$$

4) замінімо логічні операції алгебраїчними:

$$F_{\text{л}} = x_3\{(x_1 + x_4 - x_1x_4)(x_2 + x_5 - x_2x_5)\} + \\ (1 - x_3)(x_1x_2 + x_4x_5 - x_1x_2x_4x_5)$$

5) замінімо прості події x_1, x_2, x_3 і x_4 їхніми імовірностями і визначимо вираз імовірності працездатного стану мостової схеми:

$$P_c(t) = p_3(p_1 + p_4 - p_1p_4)(p_2 + p_5 - p_2p_5) + \\ + (1 - p_3)(p_1p_2 + p_4p_5 - p_1p_2p_4p_5).$$

6) підставимо конкретні числові значення замість p_1, p_2, p_3 і p_4 та визначимо кількісне значення імовірності працездатного стану $P_c(t)$ системи.

До переваг логіко-імовірнісного методу розрахунку надійності систем варто віднести:

1) можливість застосування методу для оцінки надійності будь-якої системи;

2) можливість застосування методу при будь-яких законах розподілу наробітку до відмови.

До недоліків варто віднести:

1) складність в отриманні логічної функції працездатності системи, яка б точно відповідала аналізованій системі;

2) у випадку отримання складаних функцій працездатності при розрахунку систем із складною структурою перетворення таких функцій стає громіздким.

Проте, метод знаходить широке застосування при оцінці надійності складаних систем.

Застосування методу більш докладно викладене в [10].

7.7. Оцінка ефективності функціонування систем

При оцінці якості складних технічних систем, що мають різні види резервування (структурне, інформаційне тощо), звичайні показники надійності не завжди дозволяють оцінювати якість функціонування систем. Це пов'язано з тим, що наявність у структурі складних систем визначеної функціональної надмірності призводить до того, що виникнення відмов окремих елементів призводить не до повного виходу з ладу системи, а лише до деякого погіршення якості функціонування і зниженню ефективності системи в цілому.

Для оцінки якості функціонування таких систем використовують кількісний показник ефективності функціонування, що враховує вплив часткових відмов на ефективність використання системи. При цьому під ефективністю розуміють деяку кількісну характеристику якості й обсягу роботи, яку виконує система. Наприклад, ефективність функціонування інформаційних систем може характеризуватися обсягом та імовірністю переданої чи прийнятої інформації.

Вибір відповідного показника ефективності функціонування визначається типом системи, її призначенням, видом виконуваної задачі, характером зовнішніх умов та інших факторів.

Для кожного типу системи показник ефективності задається в технічному завданні.

Для систем з кінцевою кількістю станів $E(t)$ визначається як сума значень ефективності для всіх можливих станів, в яких може знаходитися система.

Оцінку ефективності функціонування системи проводять для двох типів []:

- 1) системи **тривалої дії**;
- 2) системи **короткочасної дії**.

Система тривалої дії виконує деяку необхідну роботу на протязі заданого інтервалу часу тривалістю t_0 . Ефективність функціонування системи в цьому випадку залежить від зміни стану системи на протязі цього часу.

Система короткочасної дії виконує деяку задачу, тривалість вирішення якої така, що за цей час зміна стану системи не відбудеться. Таку систему відносять до систем миттєвої дії, тоб-

то вважають, що $t_0 = 0$. Системи короткочасної дії є окремим випадком систем тривалої дії.

Нехай у довільний момент часу кожний з елементів системи знаходиться в одному з двох станів: справному чи несправному. Сукупність станів елементів системи однозначно визначає стан системи в цілому. Отже, кожний стан системи короткочасної дії може характеризуватися цілком визначеним умовним показником функціонування, який кількісно характеризує якість виконання системою своїх заданих функцій за умови, що вона при цьому знаходиться саме в даному стані.

З часом система може змінити свій первісний стан внаслідок зміни станів елементів (відмови елементів тощо). Кожен перехід системи з одного стану в інший можна характеризувати цілком визначеним умовним показником ефективності функціонування, який кількісно характеризує якість виконання системою своїх функцій за умови, що система під час виконання задачі мала даний перехід з одного стану в інший.

7.7.1. Системи короткочасної дії

Ефективність функціонування $E(t)$ системи визначається за формулою:

$$E(t) = \sum_{i=1}^k h_i(t) \Phi_i ; \quad (7.13)$$

де h_i – імовірність того, що система в момент часу t знаходилася в i -ому стані; Φ_i – показник ефективності функціонування системи для i -ого стану; k – кількість станів системи.

Для системи, яка складається з n взаємно незалежних елементів, кожний з яких може знаходитися в одному з двох можливих станів (справному чи несправному), імовірності $h_s(t)$ визначаються через показники надійності елементів системи. Так, імовірність того, що всі елементи працездатні:

$$h_0(t) = \prod_{i=1}^n r_i(t); \quad (7.14)$$

імовірність того, що відмовив i -ий елемент системи:

$$h_i(t) = \frac{q_i(t)}{r_i(t)} \prod_{k=1}^n r_k(t) = \gamma_i(t) h_0(t); \quad (7.15)$$

імовірність того, що відмовили i -ий і j -ий елементи системи:

$$h_{ij}(t) = \frac{q_i(t)}{r_i(t)} \frac{q_j(t)}{r_j(t)} \prod_{k=1}^n r_k(t) = \gamma_i(t) \gamma_j(t) h_0(t); \quad (7.16)$$

У загальному випадку маємо:

$$h_s(t) = \prod_{i \in G_1} r_i(t) \prod_{i \in G_2} q_i(t); \quad (7.17)$$

де G_1 і G_2 – відповідно множини працездатних елементів та елементів, які відмовили, системи у випадку, коли система знаходиться в стані s ; $P_i(s)$ – імовірність працездатного стану i -го елемента системи в момент часу t ;

$$q_i(t) = 1 - P_i(t); \quad \gamma_i(t) = \frac{q_i(t)}{P_i(t)}; \quad (7.18)$$

Для невідновлюваних систем $r_i(t)$ збігається з імовірністю безвідмовної роботи $p_i(t)$ за час t , а для відновлюваних – з нестационарним коефіцієнтом готовності $k_i(t)$ у момент часу t .

У випадку, якщо має місце умова:

$$\max_{1 \leq i \leq n} q_i(t) \ll \frac{1}{n}, \quad (7.19)$$

то ефективність функціонування системи може бути оцінена по наближеній формулі [1]

$$\tilde{E}(t) \approx \Phi_0 \left[1 - \sum_{i=1}^n q_i(t) (1 - \Phi_i^*) \right], \quad (7.20)$$

де $\Phi_i^* = \frac{\Phi_i}{\Phi_0}$; Φ_0 – коефіцієнт ефективності стану системи, коли

всі елементи системи працездатні; Φ_i – коефіцієнт ефективності стану системи, коли відмовив i -ий елемент.

Як приклад розглянемо радіолокаційну систему, призначену для огляду повітряного простору, яка складається з двох радіолокаційних станцій (РЛС), що працюють на різних частотах.

Станція А перекриває простір огляду станцією В в межах визначеного сектора. Відмова будь-якої РЛС погіршує якість і зручність спостереження за повітряною обстановкою, що знижує оперативні можливості радіолокаційної системи в цілому, але при цьому огляд повітряного простору не припиняється, тобто відмовлення системи не настає.

Оскільки в даній системі застосована інформаційна надмірність, то в даному прикладі замість надійності варто розглянути ефективність функціонування системи при виконанні задачі огляду повітряного простору.

Для визначення ефективності системи з урахуванням можливих відмов в її роботі проведемо аналіз можливих станів, в яких вона може знаходитися під час виконання завдання по огляду повітряного простору.

Система за час t може знаходитися в одному з чотирьох станів:

H_0 – стан, коли обидві станції функціонують безвідмовно; імовірність перебування системи в цьому стані $h_0(t)$;

H_1 – стан, коли одна станція відмовила, а друга функціонує безвідмовно; імовірність цього стану $h_1(t)$;

H_2 – стан, коли друга станція відмовила, а перша функціонує безвідмовно; імовірність цього стану $h_2(t)$;

H_3 – стан, коли обидві станції відмовили і система огляду вийшла з ладу цілком; імовірність цього стану $h_3(t)$.

Нехай Φ_0 – показник ефективності системи, що знаходиться в стані H_0 , а $\Phi_1(\Phi_2)$ – показник ефективності системи, що знаходиться в стані $H_1(H_2)$. Показник ефективності системи в стані H_3 , $\Phi_3=0$.

За формулою (7.6) визначаємо ефективність функціонування системи за час t :

$$E(t) = h_0(t)\Phi_0 + h_1(t)\Phi_1 + h_2(t)\Phi_2. \quad (7.21)$$

Підставляючи замість імовірностей $h_0(t)$, $h_1(t)$ та $h_2(t)$ відповідні вирази та гадаючи, що відмови в роботі станції події незалежні, отримуємо:

$$E(t) = P_1(t)P_2(t)\Phi_0 + q_1(t)P_2(t)\Phi_1 + P_1(t)q_2\Phi_2. \quad (7.22)$$

Показники ефективності Φ_i являють собою нормовані коефіцієнти, які показують, яку частину виконуваних задач може виконати технічна система, знаходячись у тому чи іншому технічному стані. Іноді коефіцієнти враховують відносну важливість виконуваних задач системою [25].

7.7.2. Системи тривалої дії

Показник ефективності функціонування системи тривалої дії визначається за формулою:

$$E(t, t + t_0) = \int_{G_\pi} \Phi_\pi d h_\pi(t, t + t_0); \quad (7.23)$$

де $dh_\pi(t, t + t_0)$ - елемент імовірності того, що система тривалої дії мала в інтервалі часу $[t, t + t_0]$ ую реалізацію процесу переходу з одного стану в інший; Φ_π - умовний показник ефективності функціонування системи для цієї реалізації процесу; інтегрування проводиться по простору всіх можливих процесів переходу системи з одного стану в інший в інтервалі часу $[t, t + t_0]$.

Для системи, що складається з n незалежних невідновлюваних елементів, кожний з яких може знаходитись лише в одному з двох можливих станів (працездатному чи непрацездатному), формулу (7.13) можна записати в наступному вигляді:

$$E(t, t + t_0) = \Phi_0 H_0 \left\{ 1 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i} t \int_t^{t+t_0} \Phi_i(x_i) f_i(x_i) dx_i + \right. \\ \left. \sum_{1 \leq i < j \leq h} \frac{1}{r_i r_j} \int_t^{t+t_0} f_i(x_i) dx_i \int_t^{t+t_0} \Phi_{ij}(x_i, x_j) f_j(x_j) dx_j + \dots \right\}; \quad (7.24)$$

де Φ_0 – умовний показник ефективності функціонування системи за умови, що жоден з елементів не відмовив в інтервалі часу $[t, t + t_0]$; $\Phi_i(x_i)$ – умовний показник ефективності функціонування системи за умови, що відмовив тільки i -ий елемент, причому відмова його відбулася в момент часу x_i ($t < x_i < t + t_0$); $\Phi_{ij}(x_i, x_j)$ – умовний показник ефективності функціонування системи за умови, що відмовили тільки i -ий і j -ий елементи, причому відмова їх відбулася в момент часу x_i ($t < x_i < t + t_0$) і x_j ($t < x_j < t + t_0$) і т.д.; H_0 – імовірність того, що жоден з елементів системи не відмовить в інтервалу часу $[t, t + t_0]$:

$$H_0 = \prod_{i=1}^n r_i(t, t + t_0); \quad (7.25)$$

$f_i(x_i)$ – щільність імовірності відмови i -го елемента в момент часу x_i .

Якщо має місце умова:

$$\max_{1 \leq i \leq n} q_i(t, t + t_0) = \max_{1 \leq i \leq n} \int_t^{t+t_0} f_i(x_i) dx_i < \frac{1}{n};$$

то ефективність функціонування системи може бути оцінена за наближеною формулою:

$$\tilde{E}(t, t + t_0) \approx \Phi_0 \left\{ 1 - \sum_{i=1}^n [q_i(t, t + t_0) - \int_t^{t+t_0} \Phi_i^*(x_i) f_i(x_i) dx_i] \right\}, \\ \text{где } \Phi_i^* = \frac{\Phi_i(x_i)}{\Phi_0} \quad (7.26)$$

Похибка оцінки не перевищує величини:

$$\delta = C_n^2 \max_{1 \leq i \leq n} [q_i(t, t + t_0)]^2 \Phi_0$$

8. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ

8.1. Вибір та обґрунтування показників надійності

8.1.1. Вибір та обґрунтування технічного обслуговування

Створення надійних технічних пристроїв починається ще до початку їх проектування. При складанні технічного завдання на розробку та проектування того чи іншого пристрою здійснюється цілий ряд заходів для забезпечення його надійності.

До таких заходів слід віднести:

- 1) вибір та обґрунтування технічного обслуговування;
- 2) вибір основного показника надійності;
- 3) розподіл норм надійності пристрою по елементам (блокам, вузлам);
- 4) складання програми забезпечення надійності.

Зміст цих взаємопов'язаних заходів в більшості випадків залежить від кінцевої мети, яку прагнуть досягти при проектуванні. При цьому необхідно так збалансувати витрати на розробку і проектування пристроїв з витратами на їх експлуатацію, щоб загальна сума витрат не перевищувала задану при забезпеченні найкращих технічних характеристик пристроїв.

Розглянемо зміст перерахованих вище заходів.

Вибір того або іншого виду технічного обслуговування визначає ефективність застосування пристрою та впливає на його конструкцію. Обґрунтування технічних вимог по даному питанню заключається в аналізі технічного обслуговування аналогів з урахуванням позитивного і негативного, що є на відповідний момент.

Розглянемо приклади впливу на конструкцію пристрою при застосуванні різних видів технічного обслуговування.

Існують наступні правила заміни та ремонту окремих блоків (вузлів) технічних пристроїв:

- 1) по календарним термінам незалежно від наробітку виробу;
- 2) по наробітку установлених міжремонтних ресурсів незалежно від календарного терміну;
- 3) по технічному стану.

Заміна по календарним термінам, коли не враховується використання пристрою, призводить до матеріальних витрат, які нічим не можуть бути виправдані. Застосовується такий вид обслуговування, коли відсутній облік наробітку пристрою.

Заміна по виробітку ресурсу можлива лише тоді, коли в конструкції пристрою встановлені рахівники його наробітку.

При заміні по технічному стану періодично контролюють визначальний параметр пристрою, який характеризує його працездатність. При наближенні значення визначального параметру до границі допуску(після чого може настати відмова пристрою) приймається рішення про його заміну або ремонт. В цьому випадку значно скорочуються витрати на технічне обслуговування, скорочуються витрати на вузли та деталі та підвищується надійність пристрою при експлуатації.

8.1.2. Вибір та обґрунтування показників надійності

Однією з найважливіших задач на стадії проектування є правильний вибір номенклатури нормованих показників надійності пристроїв. Необґрунтований вибір показників надійності може призвести до неправильних рішень при проектуванні строю. Тому при виборі показника надійності необхідно враховувати:

- 1) призначення пристрою (системи);
- 2) умови та режими роботи пристрою (системи);
- 3) ремонтпридатність пристрою (системи).

Інформація про призначення пристрою дає можливість визначити область та інтенсивність його застосування по призначенню. Інформацію про умови та режими роботи пристрою використовують для оцінки впливу факторів зовнішнього середовища на працездатність пристрою, який проектується, а

також впливу діючих зовнішніх та внутрішніх навантажень на працездатність елементів пристрою.

Якщо відмова пристрою призводить до невиконання ним важливої задачі або порушує безпеку обслуговуючого персоналу, а також викликає загрозу для здоров'я та життя людей, які знаходяться в зоні дії пристрою, то для таких виробів основним показником надійності є безвідмовність, яка може задаватись у вигляді наробітку до відмови T_1 (на відмову T_0) або імовірності безвідмовної роботи $P(t)$.

У випадку, коли за умовою застосування пристрою передбачається ремонт його в умовах експлуатації, то в якості одного із основних показників надійності слід вибрати коефіцієнт готовності K_r або коефіцієнт технічного використання $K_{тв}$.

Якщо в результаті простою пристрою після його відмови виникають великі матеріальні витрати, то такий пристрій в якості показника надійності повинен мати добру ремонтно-придатність та високі показники безвідмовності.

Якщо пристрій за умовою експлуатації підлягає тривалому зберіганню перед застосуванням або він повинен транспортуватись на спеціальних транспортних засобах, то такий пристрій повинен мати високий показник збережуваності згідно умов зберігання та транспортування.

Всі вище перераховані показники надійності пристрою (системи) повинні забезпечувати нормальне його функціонування протягом заданого терміну експлуатації. Для цього необхідно знайти визначальні параметри пристрою, застосувати відповідні датчики для їх контролю та місця підключення мобільних засобів контролю.

Отже, технічне завдання на пристрій, що проектується, повинно передбачати застосування передової системи технічного обслуговування та ремонту з використанням вбудованих або автономних систем контролю працездатності технічних виробів.

8.2. Класифікація методів розрахунку надійності

Розрахунок надійності проводиться з метою оцінки кількісних показників надійності пристроїв (систем) та їхніх елементів (вузлів, блоків тощо).

Для оцінки надійності проектуємих пристроїв існують різні методи розрахунків, які можна розділити на дві групи: розрахунок надійності пристроїв, що не містять резервних елементів (нерезервовані системи) і пристроїв, що містять резервні елементи (резервовані системи).

В залежності від особливостей структури пристроїв, методи розрахунку надійності можна поділити на три групи стосовно до пристроїв:

1) з простою структурою, що зводиться до послідовно-паралельного з'єднання елементів без урахування їх відновлення. В цьому випадку оцінюється безвідмовність;

2) з складною структурою, елементи якої не відновляються. В цьому випадку оцінюються показники безвідмовності;

3) з різною структурою і елементами, що відновлюються. В цьому випадку оцінюються показники безвідмовності, ремонтпридатності та комплексні показники.

Методи, які використовуються при оцінці надійності перших двох груп, визначають показники безвідмовності при будь-яких законах наробітку елементів до відмови. До таких методів відноситься метод, що базується на теорії імовірності, та логіко-імовірносний.

Вибір методів для оцінки надійності третьої групи визначається видом законів розподілу наробітку до відмови і відновлення, а також складністю структури пристрою.

При оцінці надійності будь-якої із вище зазначених груп пристроїв часто застосовують два види розрахунків: розрахунок норм надійності та розрахунок показників надійності.

У залежності від стадії проектування пристрою та повноти урахування факторів, що впливають на показники надійності, кожний із видів розрахунку поділяється на орієнтовний (наближений) і повний (остаточний) розрахунки.

Орієнтовний розрахунок проводиться на етапі передескізного й ескізного проектування, а повний розрахунок - на етапі технічного проектування.

8.3. Порядок розрахунку

При розрахунку надійності будь-якого пристрою (системи) звичайно потрібно визначити показники безвідмовності виробу. Іноді проводяться розрахунки показників ремонтпридатності, довговічності та збережуваності. Потреба в тому або іншому розрахунку показників надійності визначається призначенням та умовами застосування проектуємого пристрою.

Незалежно від методу розрахунку кількісних показників надійності розрахунок проводиться в такій послідовності (див. рис. 8.1):

1) проведення аналізу умов експлуатації пристрою та визначення кількісних показників його надійності;

2) визначення кола виконуваних функцій (задач), по яких повинна проводитися оцінка якості функціонування пристрою, а також визначення, до якого класу відноситься проектуємий пристрій: однофункціональний або багатфункціональний;

3) визначення критеріїв відмов пристрою в залежності від виконуваних функцій;

4) проводиться аналіз схеми з метою визначення елементів, вихід з ладу яких викликає відмову пристрою, що повинні враховуватися при розрахунку надійності;

5) складання логічної схеми (моделі) розрахунку надійності пристрою Логічну схему надійності пристрою складають таким чином, щоб елементи розрахунку надійності збігалися зі складальними одиницями (блоками) пристрою;

6) вибір методу розрахунку надійності в залежності від виду логічної моделі розрахунку надійності, виду закону розподілу наробітку до відмови та стадії проектування пристрою;

7) розрахунок показників безвідмовності елементів: визначення інтенсивності відмов $\lambda(t)$ та імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ елементів невідновлюваних пристроїв; параметра потоку відмови та імовірності безвідмовної роботи $P(t_1, t_2)$ елементів відновлюваних пристроїв;

8) розрахунок показників надійності проектуємого пристрою. Для цього використовується математична (логічна)

модель надійності пристрою (системи), що встановлює математичну залежність визначеного показника надійності системи від показників надійності елементів, що входять в структуру пристрою.

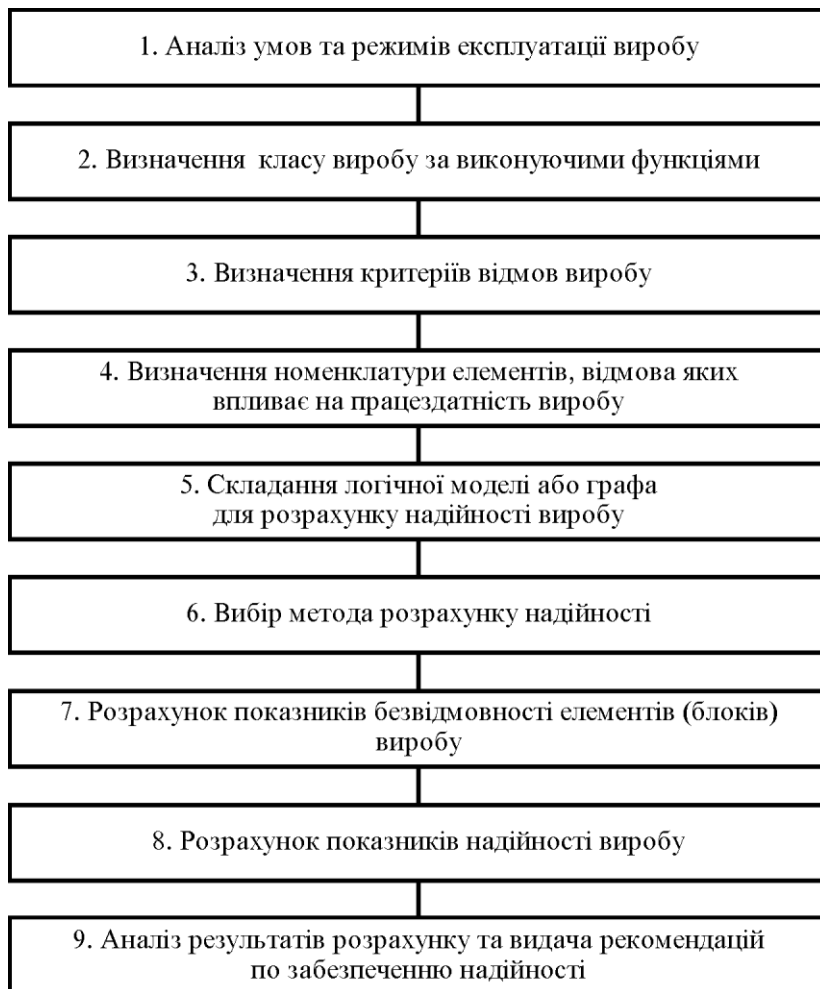


Рис. 8.1. Наближений алгоритм розрахунку надійності при проектування виробу

Слід відзначити деякі відмінності, які існують при визначенні показників надійності пристрою на етапі ескізного проектування та на етапі технічного проектування.

У першому випадку, при визначенні показників надійності, природно, виходять із послідовної моделі надійності пристрою і лише при одержанні незадовільних показників надійності пристрою переходять до більш складних схем, що забезпечують необхідні значення показників надійності пристрою.

У другому випадку, при визначенні показників надійності виробу (системи), спочатку з'ясовують по існуючій технічній документації, до якої із вище вказаних моделей надійності відноситься аналізований пристрій або система і надалі проводять розрахунок показників надійності, виходячи з цієї моделі.

8.4. Розрахунок та розподіл норм надійності

Розрахунок та розподіл норм надійності проводять на етапах ескізного та робочого проектування технічної системи (пристрою).

Під нормою надійності слід розуміти гранично допустиму величину показника надійності пристрою, який необхідно забезпечити при проектуванні. Норма надійності для пристрою та його складових частин (елементів) визначається, виходячи із вимог по надійності, зазначених замовником в технічному завданні.

Норма надійності визначається з урахуванням досягнутого рівня надійності раніше випущених промисловістю виробів, аналогічних по призначенню.

В залежності від призначення та умов експлуатації норма надійності пристрою може бути установлена у вигляді: імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ за заданий час t , середнього наробітку до відмови T_1 (або середнього наробітку на відмову T_0), середнього часу відновлення T_v , коефіцієнта готовності

K_r , середнього ресурсу T_p , середнього терміну служби T_{cl} , середнього терміну збережуваності $T_{зб.}$ та інші.

Визначення норм надійності для пристрою та його складових частин проводиться при таких допущеннях:

- ♦ імовірнісність безвідмовної роботи виробів при поступових і самоусувних відмовах $P_n(t) = 1$ та $P_c(t) = 1$;

- ♦ інтенсивність раптових відмов виробів не залежить від часу;

- ♦ середній час наробітку до відмови складових частин (елементів) виробу розподілений по експоненційному закону;

- ♦ всі елементи системи рівнонадійні.

Вихідними даними при розрахунку норм надійності є:

- ♦ кількість елементів (вузлів, блоків, устроїв), що входять до складу пристрою, N ;

- ♦ необхідний час безвідмовної роботи пристрою (системи) T .

Якщо задана імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ пристрою за заданий час t , то

$$P(t) \leq \prod_{i=1}^N P_i(t) \quad 8.1)$$

де $P_i(t)$ - імовірність безвідмовної роботи i -го елемента (вузла, блока) за заданий час t .

У випадку елементів однакової надійності, маємо:

$$P_i(t) \geq \sqrt[N]{P(t)}.$$

Якщо час наробітку до відмови елементів розподілено по експоненційному закону, то

$$P_i(t) \geq e^{-\frac{\lambda}{N}t} = e^{-\lambda_i t},$$

де λ - допустима інтенсивність відмов для пристрою;

$\lambda_i = \frac{\lambda}{N}$ - максимально допустима інтенсивність відмов i -го елемента пристрою.

8.5. Орієнтовний розрахунок надійності

Орієнтовний розрахунок надійності пристрою проводиться на етапі ескізного проектування, коли немає ще повних даних про режими та умови роботи окремих елементів (вузлів, блоків) пристрою, але вже відома його структура в частині складу елементів і функціональних зв'язків між ними.

Ціль розрахунку:

1) оцінити імовірність практичної реалізації заданих в технічному завданні вимог по надійності пристрою або підготовки даних для їхнього обґрунтування, якщо вони ще не задані;

2) визначити розподіл значень показників надійності по елементах пристрою;

3) провести порівняння окремих варіантів побудови пристрою і вибрати найкращий з них;

4) з'ясувати необхідність введення резервування.

В більшості випадків при орієнтовному розрахунку надійності використовують математичну (логічну) модель надійності, яка представляє собою групу послідовно з'єднаних елементів, що не мають резервних елементів. В цьому випадку відмова будь-якого з елементів викликає відмову пристрою, але при цьому не впливає на надійність інших його елементів.

Розрахунок проводиться при таких припущеннях:

1) відмови елементів є подіями випадковими та незалежними;

2) усі електро-радіовироби (ЕРВ) та інтегральні мікросхеми (ІМС) працюють в номінальному режимі, тобто при коефіцієнті електричного навантаження $k_n = 1$;

3) враховуються при розрахунку тільки ті елементи (вузли, блоки тощо), що входять в логічну модель (схему) розрахунку надійності;

4) час безвідмовної роботи елементів розподілено по експоненційному закону;

5) урахування впливу умов роботи пристрою на його надійність проводиться наближено;

6) параметричні відмови пристрою не враховуються.

Для розрахунку необхідно знати:

1) вид з'єднання елементів (вузлів, блоків та інше) в логічній моделі розрахунку надійності;

2) типи первинних елементів (резисторів, транзисторів, ІМС та інше);

3) середню інтенсивність відмов кожного елемента (компонента).

Порядок проведення розрахунку наведено на рис. 8.1.

Розглянемо розрахунок однофункціонального пристрою з незмінною структурою без відновлення функціональних елементів (елементи між собою з'єднані послідовно).

При послідовному з'єднанні елементів надійність, тобто імовірність безвідмовної роботи пристрою за заданий час визначається по (5.1):

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t)$$

У випадку експоненційного закону розподілу наробітку до відмови $P_i(t)$ елементів імовірність безвідмовної роботи виробу (системи) за час t визначається по (5.2):

$$P(t) = e^{-t \sum_{i=1}^N \lambda_i} = e^{-\lambda t}.$$

Якщо кожний елемент (вузол, блок) має n_i компонентів (резисторів, транзисторів, ІМС тощо), то інтенсивність відмов елементів визначається за формулою:

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^{n_i} \lambda_j, \quad (8.2)$$

де λ_j - інтенсивність відмов j -го компонента i -го елемента пристрою (системи).

З урахуванням (8.2) імовірність безвідмовної роботи пристрою за час t визначається за таким виразом:

$$P(t) = e^{-t \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{n_i} \lambda_j \right)}.$$

Визначення інтенсивності відмов компонентів з урахуванням умов експлуатації пристрою проводиться за формулою:

$$\lambda_j = \lambda_{0j} a_1, \quad (8.3)$$

де λ_{0j} - інтенсивність відмов у номінальному режимі при

$k_n = 1$ і $T_{\text{оточ.с}} = 20^\circ \text{C}$;

a_1 - поправочний коефіцієнт, що враховує умови експлуатації пристрою.

Поправочний коефіцієнт визначається за формулою:

$$a_1 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5,$$

де k_1 і k_2 - поправочні коефіцієнти, що враховують впливи механічних факторів (вібрація, удари); k_3 - поправочний коефіцієнт, що враховує вплив вологості і температури; k_4 - поправочний коефіцієнт, що враховує вплив атмосферного тиску; k_5 - поправочний коефіцієнт, що враховує призначення пристрою та вид технічного обслуговування.

Значення номінальних інтенсивностей відмов деяких елементів дані в додатку Д2 (табл. Д2-3).

Значення поправочних коефіцієнтів $k_1, \dots, k_5$ наведені в додатку Д2 даного посібника.

Для інтенсивності відмов компонентів, що входять в елементи (вузли, блоки тощо), в довідниковій літературі по надійності задають значення $\lambda_{0j\min}$, λ_{0j} і $\lambda_{0j\max}$.

В зв'язку з цим можна визначити значення:

$$P(t)_{\min} = e^{-\lambda_{\min} a_1 t}; P(t) = e^{-\lambda a_1 t}; P(t)_{\max} = e^{-\lambda_{\max} a_1 t},$$

$$\text{де } \lambda_{\min} = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{0j\min} \right); \lambda = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{0j} \right); \lambda_{\max} = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{0j\max} \right).$$

Відповідно час наробітку пристрою до відмови визначається так:

$$T_{\max} = \frac{1}{\lambda_{\min}}; T = \frac{1}{\lambda}; T_{\min} = \frac{1}{\lambda_{\max}}.$$

У випадку оцінки надійності пристрою з урахуванням резервних елементів, то характер формул для визначення кількісних показників надійності (безвідмовності) залежить від виду з'єднання основного і резервних елементів на логічній моделі (схемі) надійності, а також стан, в якому знаходяться резервні елементи до моменту включення їх в роботу замість елемента, що відмовив.

Розрахунок кількісних показників надійності пристрою в цьому випадку можна виконувати двома шляхами:

1) спочатку виключити з розгляду резервні елементи і розрахувати кількісні показники безвідмовності по послідовному з'єднанню елементів (рис.4.1), а після цього визначити підвищення показників безвідмовності з урахуванням застосування резервування ненадійних елементів за допомогою формул, зазначених в розд. 5, які відповідають виду з'єднання елементів і з урахуванням режиму роботи резервних елементів пристроїв;

2) спочатку розрахувати показники безвідмовності елементів пристрою, які мають резервні елементи, а потім провести

розрахунок показників безвідмовності пристрою по логічній моделі для послідовного з'єднання елементів.

Таблиця 8.1

Інтенсивність відмов ЕРЕ проектуемого пристрою

Найменування ЕРЕ	Елемент n_i			
	Кіл., n_j	Інтенсивність відмов, $\lambda_{0j} \cdot 10^6, 1/\Gamma$	Інтенсивність відмов з урахуванням зовнішніх умов, $\lambda_{0j} a_1$	Інтенсивність відмов сумарна, $\lambda_{0j} n_j a_1 \cdot 10^6,$ $1/\Gamma$
Резистори	30	0,008	0,008	0,24
Конденсатори	20	0,01	0,01	0,2
• • •				
Паяні з'єднання	100	0,0001		0,01
	$n_i = \sum n_j$			$\lambda_i = \sum n_j \lambda_{0j} \cdot 10^{-6}$

Дані про номінальну інтенсивність відмов λ_{0j} можуть бути взяті з ТУ на компоненти, літературних джерел по надійності, РТМ відділів надійності підприємств-виготовлювачів ЕРЕ. При їхній відсутності можна користуватися даними, наведеними в додатку Д2 даного посібника.

При виконанні орієнтовного розрахунку надійності для кожного елемента (вузла, блока) пристрою або системи вихідні дані і результати розрахунку варто представити у вигляді таблиці, форма якої наведена в табл. 8.1.

8.6. Повний розрахунок надійності

Повний розрахунок надійності пристрою (системи) проводиться на етапі технічного проектування, коли відомий поелементний склад пристрою, реальні режими роботи елементів та умови роботи пристрою.

Ціль розрахунку:

1) уточнити (при необхідності) варіант побудови схеми пристрою;

2) виявити фактори, що знижують надійність елементів пристрою, та виробити рекомендації по їхньому усуненню;

3) одержати вихідні дані для розрахунку запасних вузлів (елементів) і вирішити питання технічного обслуговування та ремонту пристрою в процесі експлуатації.

Розрахунок проводиться при таких припущеннях:

1) елементи (компоненти) пристрою працюють в режимах, що характеризуються визначеним коефіцієнтом електричного навантаження k_n та температурою оточуючого середовища $T_{оточ\epsilon}$;

2) відмови елементів можуть бути двох типів: раптові (обриви, коротке замикання) та параметричні;

3) режим роботи резервних елементів, якщо такі є, відомий: навантажений, полегшений або ненавантажений.

Для розрахунку надійності необхідно знати: вид з'єднання елементів на логічній моделі (схемі) розрахунку надійності, типи компонентів, застосованих в елементах (вузлах, блоках тощо) пристрою, залежність інтенсивності відмов компонентів від електричного навантаження та умов експлуатації пристрою (системи).

Послідовність проведення розрахунку наведено на рис. 8.1.

Розглянемо розрахунок однофункціонального пристрою (системи) з незмінною структурою без відновлення елементів (послідовне з'єднання елементів).

У випадку основного з'єднання елементів на логічній моделі (схемі) надійності пристрою та експоненційному закону

розподілу наробітку до відмови елементів імовірність безвідмовної роботи пристрою за час t визначається по (5.2):

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

$$\text{де } \lambda = \sum_{i=1}^m N_i \lambda_i,$$

де N_i - кількість однотипних елементів в i -й групі; λ_i - інтенсивність відмов i -го елемента; m - кількість груп однотипних елементів.

Інтенсивність відмов λ_i елементів пристрою (системи) з урахуванням реальних режимів роботи елементів (компонентів) та умов його експлуатації визначається за формулою:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} N_i a_1 a_2,$$

де λ_{0i} - інтенсивність відмов i -го елемента в номінальному режимі; a_1 - поправочний коефіцієнт, що враховує умови експлуатації пристрою;

$a_2 = f(k_{ni}, T_{оточс})$ - поправочний коефіцієнт, що враховує електричне навантаження та температуру оточуючого середовища.

Визначення реальних режимів роботи, тобто коефіцієнта електричного навантаження k_{ni} елементів пристрою, проводиться розрахунковим шляхом за формулами, наведеними в додатку даного посібника або шляхом виміру робочих режимів елементів на дослідному зразку в лабораторних умовах по методикам, наведеним в посібнику по застосуванню електро-радіо виробів (ЕРВ в техніці).

У випадку оцінки надійності пристрою з застосуванням резервних елементів, визначення показників безвідмовності проводиться по паралельно-послідовним логічним моделям надійності та формулам з урахуванням виду резерву, застосованого в пристрої або системі.

Деякі складності виникають при визначенні показників надійності пристрою (системи) зі змінною структурою в процесі

роботи, тобто пристроїв, в яких частина елементів (вузлів, блоків) працюють в різних умовах. Наприклад, окремі вузли (блоки) системи контролю працездатності складних електронних систем, що періодично включаються для проведення контролю, після чого виключаються або переводяться в черговий (полегшений) режим роботи.

В цьому випадку поступають так:

- ♦ проводиться поділ усього циклу роботи системи на такти, що відповідають окремим станам системи;

- ♦ для кожного такту складається функціональна схема, що включає всі елементи (вузли, блоки тощо), які працюють протягом даного такту;

- ♦ визначаються для кожного елемента (вузла, блока тощо) перехідні сталі режими роботи.

Після цього визначають надійність роботи функціональних схем, що відповідають кожному такту. Більш докладно методика розрахунку надійності дана в [16], [29].

При виконанні повного розрахунку надійності для кожного елемента (вузла, блока тощо) пристрою або системи, вихідні дані і результати розрахунку варто представляти у вигляді таблиці, форма якої наведена в табл. 8.2.

Таблиця 8.2

Інтенсивність відмов ЕРЕ пристрою

Порядковий номер	Найменування та тип елемента	Схемне позначення	Інтенсивність відмов $\lambda_{0j} \cdot 10^6, 1/\Gamma$	Поправочні коефіцієнти, що враховують вплив		Сумарна інтенсивність відмов елементів в робочому режимі, $\lambda_{0j} a_1 a_i \cdot 10^6, 1/\Gamma$
				оточуючого середовища, a_1	електричного навантаження та температури $a_i (k_{\Pi i}, T_{окр})$	
1	2	3	4	5	6	7

9. МЕТОДИ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ПО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ ДАНИМ

9.1 Джерела інформації про надійність

Джерелами інформації про надійність пристроїв з урахуванням впливу усіх діючих факторів при роботі пристроїв можуть бути реальна експлуатація, випробування на надійність та моделювання процесу експлуатації. Розглянемо кожне із цих джерел.

Інформація, яка поступає з місць експлуатації, завжди відноситься до морально старіючих пристроїв. Сучасні технічні системи настільки швидко змінюються, що інформація, одержана з місць експлуатації, просто старіє.

Крім того, дані реальної експлуатації, як правило, бувають або не повними, або не завжди об'єктивними в силу різних причин, в тому числі через недостатню кваліфікацію обслуговуючого персоналу. Внаслідок обмеженості об'єму статистичних даних важко одержати достовірну інформацію про реальну надійність пристроїв. Інколи важко здійснювати спостереження за роботою деяких об'єктів в умовах реальної експлуатації (наприклад, космічні об'єкти). Вказані причини обумовлюють необхідність проведення випробувань на надійність та моделювання процесу експлуатації. Проведення випробувань на надійність дозволяє усунути більшість перешкод в одержанні достовірної інформації про надійність пристроїв.

На жаль, випробування на надійність вимагають тривалого та неперервного спостереження за працездатним станом пристроїв в умовах, наближених до реальних умов експлуатації. Проведення таких випробувань вимагають великих витрат. В процесі випробувань витрачається значна частина ресурсу пристрою, внаслідок чого їх неможливо використовувати в подальшій експлуатації.

Крім того, щоб розповсюдити результати випробувань на надійність на наступні випуски пристроїв, необхідна стабільність технології їх виготовлення.

Важливу роль в одержанні інформації про надійність пристроїв має моделювання процесу їх експлуатації. Моделювання дає можливість одержати потрібну інформацію про надійність ще на стадії проектування, задаючи при цьому різні умови експлуатації. Це дозволяє економити матеріальні засоби, оскільки не потрібно витратити на досліди зразків пристроїв.

Моделювання процесу експлуатації включає в себе: моделювання технічного обслуговування, моделювання процесу розвитку відмов та визначення експлуатаційних допусків. Слід відмітити, що застосування моделювання для одержання інформації про надійність пристроїв замість натурних випробувань має свої переваги, оскільки проведення натурних випробувань є процесом трудомістким, тривалим та дорогим. Крім того, для деяких технічних систем проведення натурних випробувань в земних умовах практично неможливе і моделювання є єдиним засобом, що дозволяє одержати необхідну інформацію про надійність таких систем ще на стадії проектування.

Для одержання потрібної інформації про надійність пристроїв використовують різні способи, в тому числі:

- ◆ проведення випробувань з обмеженим об'ємом;
- ◆ проведення прискорених випробувань шляхом використання таких режимів, які прискорюють процес появи відмов;
- ◆ моделювання процесів появи відмов.

9.2 Види випробувань на надійність

В залежності від мети, яка ставиться перед випробуваннями на надійність, вони поділяються на визначальні та контрольні.

Визначальні випробування на надійність проводяться з метою визначення фактичних показників надійності шляхом статистичної оцінки параметрів теоретичного розподілу наробітку до відмови. Об'єктами випробувань є однотипні зразки об'єктів, що не мають конструктивних або інших відмінностей, виготовлених по єдиній технології та випробувані в ідентичних умовах.. В результаті цих випробувань можуть бути одержані точкові або інтервальні оцінки показників надійності.

У випадку незадовільних результатів визначальних випробувань проводиться корегування норм надійності в НТД або доопрацювання дослідних зразків пристроїв з метою забезпечення потрібного рівня надійності.

Контрольні випробування на надійність проводяться з метою перевірки відповідності показників надійності заданим в НТД. При цьому значення показників надійності (параметрів розподілу) не оцінюються, а проводиться перевірка того, що рівень (значення показника) надійності не нижче заданого.

До проведення визначальних та контрольних випробувань проводиться апроксимація експериментальних даних, що є в розробника пристрою, якому-небудь теоретичному розподілу та перевірка статистичних гіпотез про те, що теоретичний розподіл не суперечить експериментальному.

Визначальні або контрольні випробування на надійність проводяться в тих випадках, коли в процесі експериментального дослідження можуть бути забезпечені необхідні об'єм випробувань (спостережень), підтримка і контроль потрібних режимів та умов функціонування пристроїв при випробуванні.

Якщо організувати такі випробування технічно неможливо або економічно недоцільно, дані про надійність пристроїв одержують шляхом експлуатаційних спостережень при **дослідній** та **підконтрольній** експлуатації.

Дослідна та підконтрольна експлуатація пристроїв проводиться з метою перевірки відповідності показників надійності заданим в НТД.

Випробування на надійність проводять по відповідним планам, в яких вказують:

- ◆ кількість об'єктів випробувань (з відновленням працездатного стану об'єкту після відмови або заміною непрацездатного об'єкта, або без відновлення і заміни);

- ◆ критерій припинення випробувань.

Вибір планів випробувань залежить від типу об'єкту випробувань, мети випробувань, оцінюваних показників надійності та інших техніко-економічних факторів.

В результаті випробувань оцінюються показники безвідмовності, довговічності, збережуваності та ремонтпридатності.

Усі види випробувань на надійність, а також оцінка результатів випробувань регламентуються відповідними програмами та методиками випробувань.

9.3 Визначальні випробування

Визначальні випробування проводяться з метою оцінки фактичної надійності пристроїв. При цьому оцінюються кількісні значення показників надійності або параметри експериментальних розподілів випадкових величин, які визначають показники надійності (середній наробіток до відмови, середній наробіток між відмовами, середній час відновлення тощо).

Визначальні випробування проводяться на дослідній партії вперше розроблених або модифікованих пристроїв, виготовлених по єдиній конструкторській документації та технології.

В залежності від способу одержання та виду інформації методи визначальних випробувань поділяються на експериментальні та розрахунково-експериментальні.

Експериментальні методи базуються на використанні статистичних даних, одержаних при випробуванні пристроїв на надійність або даних дослідної та підконтрольної експлуатації.

Визначальні випробування проводяться по планам, приведеним в ГОСТ 27.410–87 [1]. Вихідними даними для планування визначальних випробувань є:

- ♦ об'єм вибірки N ;
- ♦ імовірність γ^* для оцінки відповідного показника надійності;
- ♦ гранична відносна похибка δ оцінки відповідного показника надійності:

$$\delta = \max \left\{ \frac{\Theta^* - \Theta}{\Theta^*} \right\},$$

де Θ^* - статистична оцінка показника надійності Θ ;

◆ коефіцієнт варіювання x розподілу випадкових величин (наробіток, ресурсу, терміну служби, часу відновлення тощо);

◆ вид закону розподілу випадкової величини.

В залежності від плану випробувань об'єм вибірки визначають за відповідними формулами, які наведені в ДСТУ 3004–95 [1].

Наприклад, при плані [NUN] та експоненційному розподілі кількість об'єктів випробувань або кількість відновлень працездатного стану при оцінці середніх показників надійності визначають за формулою:

$$N = \frac{(\delta + 1)}{2} \chi^2_{1-\gamma}(2N),$$

де $\chi^2_{1-\gamma}(2N)$ - квантіль χ^2 - розподілу з $(2N)$ ступенями волі; γ - коефіцієнт довіри (довірча імовірність).

Деякі плани випробувань на надійність наведені в табл. 9.1.

Таблиця 9.1

Термін	Визначення
1. План [NUT]	Одночасно випробовується N об'єктів. Об'єкти, які відмовили, не відновлюються і не замінюються новими, випробування припиняються при закінченні часу випробувань або наробітку T .
2. План [NUr]	Одночасно випробовується N об'єктів. Об'єкти, які відмовили, не відновлюються і не замінюються новими, випробування припиняються, коли кількість об'єктів, які відмовили, досягло r .

Закінчення таблиці 9.1

Термін	Визначення
3. План [NRT]	Одночасно випробовується N об'єктів. Об'єкти, які відмовили, замінюються новими, випробування припиняються по закінченні часу випробувань або наробітку T для кожного із N об'єктів.
4. План [NRr]	Одночасно випробовується N об'єктів. Об'єкти, які відмовили, замінюються новими, випробування припиняються, коли кількість об'єктів, які відмовили, сумарна по всім N досягла r .
5. План [NMT]	Одночасно випробовується N об'єктів. Після кожної відмови об'єкти відновлюються, кожний об'єкт випробовують до закінчення часу випробувань або наробітку T .
6. План [NM r]	Одночасно випробовується N об'єктів. Після кожної відмови об'єкти відновлюються, випробування припиняються, коли сумарна по всім об'єктам кількість відмов досягла r .

У табл. 9.1 використовуються слідуєчі позначення:

U – невідновлюваний і не замінюваний при випробуваннях у випадку відмови;

R – відновлюваний, але замінюваний при випробуваннях об'єкт у випадку відмови;

M – відновлюваний при випробуванні об'єкт у випадку відмови;

N – об'єм вибірки;

T – час випробувань або наробіток;

R – кількість відмов або об'єктів, які відмовили.

9.4 Побудова графіків експериментальних розподілів

На основі статистичних даних про відмови об'єктів, які могли бути одержані як в результаті лабораторних випробувань, так і шляхом спостережень за об'єктами, що знаходяться в реальних умовах експлуатації, будуються графіки інтенсивності відмов $\lambda(t)$ або щільності розподілу наробітку до відмови $f(t)$.

Розглянемо способи одержання та обробки експериментальних даних у цих двох випадках.

При лабораторних випробуваннях, як правило, об'єкти знаходяться в умовах, наближених до умов реальної експлуатації. Розглянемо план випробування на безвідмовність, коли при відмові об'єкта він не замінюється новим.

Обробку статистичних даних за результатами випробувань можна виконувати двома способами:

1) розділимо весь діапазон наробітку об'єктів на окремі інтервали $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ і обчислимо кількість відмов Δr_i об'єктів, що припадають на кожний i -й інтервал. Потім поділимо це число на кількість об'єктів, що залишилися працездатними до початку інтервалу Δt_i , і на довжину цього інтервалу. В результаті одержимо значення статистичної оцінки інтенсивності відмов, що відповідають даному інтервалу Δt_i :

$$\lambda_i^* = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{сер},i} \cdot \Delta t_i}, \quad (9.1)$$

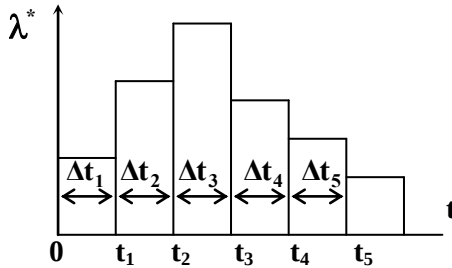
де $N_{\text{сер},i}$ – середня кількість справних виробів, що працюють в проміжках Δt_i ; $n(\Delta t_i)$ – кількість об'єктів, які відмовляли на інтервалі часу Δt_i ; Δt_i - i -й інтервал часу, що розглядається.

Результати обчислень зводяться в табл. 9.2, що має вигляд:

На основі цієї таблиці будується графік $\lambda^*(t)$, зображений на рис. 9.1.

Таблиця 9.2

Δt_1	Δt_2	...	Δt_i	...	Δt_k
λ_1^*	λ_2^*	...	λ_i^*	...	λ_k^*

Рис. 9.1. Графік $\lambda^*(t)$

Для цього по горизонтальній осі послідовно відкладаються інтервали Δt_i і на кожному з них будується прямокутник з висотою λ_i^* . З'єднуючи одержані для кожного інтервалу нароби́тки Δt_i значення λ_i^* плавною кривою і переходячи від статистичних понять до імовірних, одержимо графік інтенсивності відмов $\lambda(t)$.

2) хід обчислень другим способом співпадає з ходом обчислень, що наведений вище, але при цьому способом кількість об'єктів $n(\Delta t_i)$, які відмовили, припадають на інтервал нароби́тку або часу Δt_i , ділиться на кількість об'єктів, які поставлені на випробування:

$$f_i^* = \frac{n(\Delta t_i)}{N_0 \cdot \Delta t_i}. \quad (9.2)$$

Якщо з'єднати одержані для кожного інтервалу нароби́тку Δt_i значення f_i^* плавною кривою і перейти від статис-

тичних понять до імовірнісних, одержимо безумовну щільність розподілу наробітку до відмови $\mathbf{f(t)}$.

Слід відмітити, що між λ_i^* та $\mathbf{f_i^*}$ існує та ж залежність, що й між імовірнісними характеристиками $\lambda(\mathbf{t})$ та $\mathbf{f(t)}$. Це можна показати наступним чином. Для цього, поділивши в формулі (9.1) чисельник і знаменник на N_0 , одержимо:

$$\lambda_i^* = \frac{\frac{n(\Delta t_i)}{N_0 \cdot \Delta t_i}}{1 - \frac{n(t)}{N_0}} = \frac{f_i^*}{1 - Q^*} = \frac{f_i^*}{P_i^*}.$$

Переходячи від статистичних характеристик до неперервних, одержимо формулу (2.12).

При обробці статистичних даних про відмови слід дотримуватись таких правил при поділі діапазону спостережень $[0, t]$ на інтервали. Кількість інтервалів не повинно бути дуже великим, так як при цьому можуть виявитись випадкові коливання значень λ_i^* . Разом з тим кількість інтервалів не повинно бути дуже малим, бо одержимо тоді спотворену криву $\lambda(\mathbf{t})$.

Довжина інтервалу Δt_i залежить від об'єму та однорідності статистичного матеріалу. При збільшенні кількості спостережень можна вибрати короткі інтервали.

Яких-небудь правил відносно поділу часу спостережень на окремі інтервали не існує. Як правило час спостережень ділять на 7-20 інтервалів. При цьому виходять з того, щоб за результатами обробки статистичних даних можна було виявити поведінку кривої $\lambda(\mathbf{t})$ на ділянці від $\mathbf{t=0}$ до $\lambda_{\max}(\mathbf{t})$, який спостерігається в початковий період роботи будь-яких технічних об'єктів.

9.5 Оцінка показників надійності по експериментальним даним

По результатам випробувань одержані експериментальні дані по відмовам пристроїв підлягають статистичній обробці.

Статистична обробка передбачає:

- ◆ визначення функції щільності розподілу відмов або виду функції (інтегральної) розподілу відмов пристроїв;
- ◆ обчислення параметрів одержаного розподілу експериментальним шляхом;
- ◆ встановлення збігу експериментального розподілу, одержаного при випробуваннях, з теоретичним;
- ◆ визначення показників надійності випробуваних пристроїв.

Як правило, в якості типових теоретичних розподілів застосовують експоненційний, нормальний, гамма-розподіл, Релея та Вейбулла.

У більш складних випадках мають справу з композицією двох і більше типових розподілів.

У цьому випадку композицію розподілів представляють у вигляді суми компонентів (типових) розподілів і виконують статистичне дослідження кожного із них окремо.

При експериментальних оцінках надійності незалежно від того, які властивості виробів досліджуються, всі оцінювані показники поділяються на два типи:

- ◆ показники типу наробіток – середній або γ - відсотковий (наробіток до відмови або між відмовами до граничного стану, термін збережуваності, час відновлення та інші).
- ◆ показники типу імовірність (безвідмовної роботи, справного стану в довільний час, відновлення за заданий час тощо).

При визначенні показників надійності типу наробіток в якості величин, за якими безпосередньо ведуть спостереження, є випадкові інтервали наробітку до відмови, між відмовами та інші.

При визначенні показників типу імовірність в якості випадкових величин, за якими безпосередньо ведуть спосте-

реження, є кількість подій у випробуваннях (кількість відмов, відновлень та інші).

По результатам випробувань можуть бути одержані точкові оцінки або знайдені довірчі інтервали, в середині яких з довірчою імовірністю (коефіцієнтом довіри) знаходиться невідомий параметр розподілу наробітку на відмову.

Статистична оцінка параметрів розподілу є випадковою величиною. Критерієм достовірності статистичної оцінки є незсуненість, спроможність та ефективність.

Оцінка θ^* називається **незсуненою** оцінкою невідомого параметра θ , якщо її математичне сподівання дорівнює істинному значенню оцінюваного параметра:

$$M\theta^* = \theta, \quad (9.3)$$

тобто не повинно бути систематичної похибки.

Кількісна міра похибки при заміні θ на θ^* (міра розсіювання θ^* відносно θ) описує $M[\theta^* - \theta]^2$. Цю величину називають середнім квадратом похибки оцінки θ^* .

Із сукупності незсунених оцінок параметра θ слід вибирати такі, які мають мінімально можливу міру розсіювання (дисперсію).

Оцінка θ^* вважається **спроможною**, якщо вона сходиться (по імовірності) до істинного значення оцінюваного параметра θ при збільшенні об'єму вибірки (кількості спостережень):

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\{|\theta^* - \theta| < \varepsilon\} = 1 \quad (9.4)$$

Незсунену оцінку θ^* називають **ефективною**, якщо вона має найменшу можливу дисперсію в порівнянні з іншими незсуненими оцінками параметра θ , тобто $D\theta^*$ повинна бути мінімальною.

По результатам визначальних випробувань одержують точкові або інтервальні оцінки невідомої величини (показника надійності).

9.5.1.Точкові оцінки

Найбільше застосування в інженерній практиці одержали наступні точкові оцінки: відбіркова середня та відбіркова дисперсія.

Для одержання формули, яка зв'язує оцінку середнього наробітку до відмови T_1 з одержаними значеннями випадкової величини $t_1, t_2, \dots, t_N$, використовують слідуєчі методи точкових оцінок:

- ◆ **графічні** методи (з використанням імовірнісних паперу та номограм).

- ◆ **аналітичні** методи (метод максимальної правдоподібності, метод моментів та ін.);

1) графічний метод

Графічний метод широко застосовують в інженерній практиці для визначення закону розподілу випадкової величини по експериментальним даним. Основою методу є застосування координатної сітки (імовірнісного паперу), що має імовірнісну шкалу по осі ординат.

Визначення виду розподілу випадкової величини на базі статистичних даних полягає в тому, що на основі цих даних вибирається приблизно такий теоретичний розподіл цієї величини (наприклад, експоненційний), щоб експериментальний розподіл цієї величини на координатній сітці зображався прямою лінією.

При визначенні характеру розподілу відмов експериментальні дані, одержані при випробуванні виробів, записуються в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Δt_i	$N(\Delta t_i)$	$N(t_i)$	$\frac{n(t_i)}{N_0}$	$1 - \frac{n(t_i)}{N_0}$
1	2	3	4	5

В таблиці позначено:

Δt_i – довжина i -го інтервалу часу; $n(\Delta t_i)$ – кількість відмов за час Δt_i ; $n(t_i)$ – накопичене до цього моменту кількість відмов; N_0 – кількість зразків пристроїв, що були поставлені на випробування; $\frac{n(t_i)}{N_0}$ – імовірність відмови на інтервалі часу $[0, t_i]$.

При перевірці, наприклад, на експоненційний закон використовується папір, по осі абсцис якого нанесена рівномірна шкала для Δt_i , а по осі ординат – логарифмічна шкала.

Перевірка відповідності експериментального розподілу припустимому теоретичному зводиться до перевірки того, чи лягають експериментальні дані на пряму лінію та визначення найбільшого відхилення D по критерію, наприклад, Колмогорова.

При використанні критерію Колмогорова в якості міри розходження експериментального та теоретичного розподілів приймається число D^* , яке вираховується по правилам [25]:

$$D^* = D_{\max} \sqrt{n_i} < 1 \text{ при } n > 100, \quad (9.5)$$

де $D_{\max}$ – максимальне значення різниці статистичної і теоретичної функцій розподілу; n - об'єм вибірки (кількість відмов).

Якщо провести лінію на координатній сітці між точками

$$\frac{n(t_i)}{N_0} \text{ або } \left[1 - \frac{n(t_i)}{N_0}\right] \text{ не вдається або не виконується умова (9.5),}$$

то слід перейти до перевірки на папір з іншою координатною сіткою і т.

Приклад 9.1. При випробуванні на надійність партії однотипних електронних виробів в кількості $N=50$ були одержані наступні дані про відмови виробів, які вказані в таблиці.

Встановити закон розподілу часу безвідмовної роботи виробів шляхом побудови гістограми інтенсивності відмов $\lambda(t)$ та її апроксимації кривою.

Δt_i , год	$n_i(\Delta t_i)$	$N_{\text{сер.}i} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$	$\lambda(t) = \frac{n_i(\Delta t_i)}{N_{\text{сер.}i} \cdot \Delta t_i}$
0-100	2	49	$0,408 \cdot 10^{-3}$
100-200	4	46	$0,869 \cdot 10^{-3}$
200-300	6	41	$1,463 \cdot 10^{-3}$
300-400	4	36	$1,111 \cdot 10^{-3}$
400-500	2	33	$0,606 \cdot 10^{-3}$

$$n_i=18$$

Розв'язання:

1) визначимо середню кількість справно працюючих виробів в інтервалах часу Δt_i за формулою:

$$N_{\text{сер.}1} = \frac{50 + 48}{2} = 49; ; N_{\text{сер.}2} = \frac{48 + 44}{2} = 46 \text{ і т.д.}$$

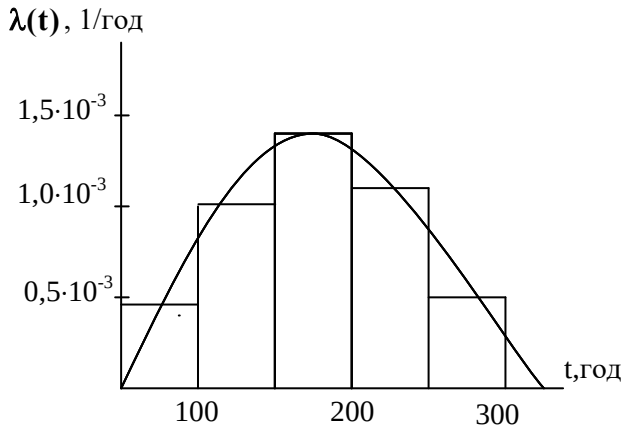


Рис. 9.2

2) визначимо інтенсивність відмов виробів в i -му інтервалі часу за формулою:

$$\lambda^*(t) = \frac{n_i(\Delta t)}{N_{\text{сер.}i} \Delta t_i} = \frac{2}{49 \cdot 100} = 0,408 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$$

3) побудуємо гістограму для інтенсивності відмов та апроксимуємо її кривою (рис. 9.1.1):

4) визначимо середнє значення інтенсивності відмов та найбільше її відхилення D від середнього значення:

$$\lambda_{\text{сер}} = \frac{(0,408 + 0,869 + 1,463 + 1,111 + 0,606)10^{-3}}{5} = 0,89 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}.$$

Звідки:

$$D = 1,463 \cdot 10^{-3} - 0,89 \cdot 10^{-3} = 0,57 \cdot 10^{-3}.$$

5) перевіряєм розподіл відмов, одержаний експериментальним шляхом, на відповідність припустимому експоненційному за критерієм згоди А.Н. Колмогорова:

$$D\sqrt{n_i} = 0,57 \cdot 10^{-3} \sqrt{18} = 2,4 \cdot 10^{-3} < 1.$$

Отже, у відповідності з рівнянням $D\sqrt{n_i} \leq 1$ вважаємо, що вид розподілу часу безвідмовної роботи випробуваних виробів практично експоненційний з середньою інтенсивністю відмов $\lambda_{\text{сер}} \approx 0,89 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$.

Визначимо імовірність безвідмовної роботи виробів за час роботи $t = 500$ год за даними, які наведені в таблиці:

$$P(500) = 1 - \frac{n}{N} = 1 - \frac{18}{50} = 0,64.$$

Визначимо імовірність безвідмовної роботи виробів за формулою експоненційного розподілу:

$$P(500) = e^{-\lambda_{\text{сер}} \cdot t} = e^{-0,89 \cdot 10^{-3} \cdot 500} = 0,64.$$

Як бачимо, розходження обчислення, виконаного за експоненційним розподілом, з експериментальними даними немає.

2) метод максимальної правдоподібності

Для підбору виду теоретичного розподілу, який би достатньо близько підходив до експериментального розподілу, частіше всього застосовують метод максимальної правдоподібності, запропонований Фішером. Цей метод є загальним методом точкових оцінок експериментальних розподілів.

Функцією максимальної правдоподібності називають функцію $L(\theta)$ параметра θ , яка визначається рівністю:

♦ у випадку, коли випадкова величина X дискретна,

$$L(\theta) = P(x_1, \theta) P(x_2, \theta) \dots P(x_N, \theta) = \prod_{i=1}^n P(x_i, \theta); \quad (9.6)$$

♦ у випадку, коли випадкова величина X неперервна зі щільністю розподілу $f(x, \theta)$,

$$L(\theta) = f(x_1, \theta) f(x_2, \theta) \dots f(x_N, \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta). \quad (9.7)$$

Оцінкою максимальної правдоподібності θ^* називається те значення параметра θ , при якому функція правдоподібності досягає найбільшого значення при даних $x_1, x_2, \dots, x_n$, тобто є розв'язком рівняння $L(\theta^*) = \max L(\theta)$.

Отже, метод максимальної правдоподібності полягає в пошуку максимуму функції правдоподібності.

Для зручності обчислення використовують логарифмічну функцію правдоподібності $y = \ln L(\theta)$.

Для знаходження оцінки максимальної правдоподібності розв'язують рівняння:

$$\frac{\partial \ln L(\Theta)}{\partial \Theta} = 0 \quad (9.8)$$

Як приклад застосування методу максимуму правдоподібності знайдемо оцінку параметру λ експоненційного розподілу.

Для експоненційного розподілу випадкової величини при випробуваннях на безвідмовну роботу виробів одержані дані $t_1, t_2, \dots, t_n$ зі щільністю:

$$F(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Необхідно дати статистичну оцінку максимальної правдоподібності для параметру λ .

Оскільки випадкова величина T неперервна, то функція правдоподібності має вигляд:

$$L(\lambda) = f(t_1, \lambda) f(t_2, \lambda) \dots f(t_n, \lambda) = \lambda^n e^{-\lambda \sum_{i=1}^n t_i}$$

$$\ln L(\lambda) = n \ln \lambda - \lambda \sum_{i=1}^n t_i$$

Запишемо рівняння правдоподібності:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} L(\lambda) = \frac{n}{\lambda} - \sum_{i=1}^n t_i = 0.$$

Єдиним розв'язком цього рівняння є

$$\lambda^* = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{1}{T}$$

Отже, $\lambda^* = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \right)^{-1}$ є оцінкою максимальної правдоподібності. Цю оцінку називають вибірковою середньою.

У табл. 9.4 для п'яти планів випробувань на надійність приведені формули для обчислення точкової оцінки параметра λ експоненційного розподілу.

Другою точковою оцінкою є вибіркова дисперсія:

$$DT^* = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - MT^*)^2}{N - 1}. \quad (9.9)$$

Таблиця 9.4

План випробувань	Оцінка параметра λ
[NUN]	$\frac{N}{\sum_{i=1}^N t_i} ; N > 1$
[NUT]	$\frac{d}{\sum_{i=1}^d t_i + (N-d)T} ; d > 0$
[NUr]	$\frac{r-1}{\sum_{i=1}^r t_i + (N-r)t_r} ; r > 1$
[NMT]	$\frac{d}{NT}$
[NM _r]	$\frac{r}{Nt_r}$

В якості прикладу розглянемо випробування на надійність по плану NUN. Однотипні пристрої в кількості N штук при випробуванні працюють в однакових умовах до відмови кожного з них.

Необхідно визначити по результатам випробувань середній час роботи пристрою до відмови відносно статистичного середнього значення.

В якості статистичного середнього значення часу роботи до відмови T_1 використовується середнє арифметичне значення, яке визначається за формулою:

$$T_1^* = \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{N}, \quad (9.10)$$

де t_i – час роботи кожного із зразків пристрою до відмови.

Середньоквадратичне відхилення часу роботи пристрою до відмови відносно середнього значення визначається за формулою:

$$\sigma^*(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - T_1^*)^2}{N - 1}} \quad (9.11)$$

Середньоквадратичне відхилення середнього значення часу роботи до відмови відносно його середнього значення визначається за формулою:

$$\sigma(T_1) = \frac{\sigma(t)}{N}. \quad (9.12)$$

Для визначення довірчого інтервалу необхідно знати закон розподілу досліджуваної випадкової величини.

3) метод моментів

Метод моментів – це загальний метод точкового оцінювання параметрів розподілу, який був запропонований Пірсоном.

Метод моментів при оцінці параметрів статистичного розподілу полягає в прирівнюванні найважливіших значень параметрів статистичного розподілу і відповідних моментів

теоретичного розподілу. Наприклад, якщо теоретичний розподіл залежить від двох параметрів, то ставиться вимога, щоб математичне сподівання MT_i та дисперсія DT_i цього розподілу співпадали з відповідними статистичними характеристиками M^*T та D^*T .

Статистичні моменти наробітку до відмови знаходяться за наступними формулами:

♦ початковий статистичний момент k -го порядку:

$$v_{\eta_k}^* = \frac{\sum_{i=1}^N t_i^k}{N}. \quad (9.13)$$

Очевидно, що статистичним моментом $k = 1$ порядку є $v_1 = MT$ – математичне сподівання.

♦ центральним статистичним моментом k -го порядку:

$$\mu_k^* = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - MT^*)^k}{N}, \quad (9.14)$$

де t_i - наробіток до відмови i -го зразка пристрою із загальної кількості N , що знаходяться на випробуваннях.

Найчастіше на практиці застосовують два моменти:

Статистичне математичне сподівання часу наробітку до першої відмови

$$MT^* = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} \quad (9.15)$$

та статистична дисперсія часу безвідмовної роботи

$$DT^* = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - MT^*)^2}{N - 1} \quad (9.16)$$

Метод моментів в порівнянні з методом максимальної правдоподібності має незначне застосування в зв'язку з тим, що при випробуваннях виробів, як правило, мають справу з неповними вибірками.

9.5.2. Інтервальні оцінки

Розглянуті вище способи точкових оцінок для невідомого параметру (показника надійності) при малих об'ємах вибірки можуть мати істотні похибки, а тому не забезпечують потрібної точності та достовірності оцінювання даних параметрів.

Так, у випадку випробувань високо надійних технічних систем виникають складності точкової оцінки параметрів розподілу в зв'язку з тим, що відмови системи можуть взагалі не відбуватися, а якщо вони і відбуваються, то в невеликій кількості. Тому в теорії надійності оцінюються межі (верхня і нижня) інтервалу, в середині якого з певною імовірністю знаходиться точне значення невідомого показника надійності при даному об'ємі вибірки.

У якості міри достовірності оцінки в математичній статистиці використовується величина γ^* , яка показує, з якою імовірністю можна стверджувати, що знайдений інтервал покриває справжнє значення невідомого параметра θ^* :

$$\gamma^* = P(|\theta^* - \theta| < \delta) = P(\theta^* - \delta < \theta < \theta^* + \delta) = \int_{\theta^* - \delta}^{\theta^* + \delta} f(x) dx \quad (9.17)$$

де γ^* - імовірність; δ - точність оцінки; $\theta^* - \delta$, $\theta^* + \delta$ - нижня та верхня межі надійності.

Величина γ^* задається рядом: 0.8; 0.9; 0.95; 0.99.

Інтервал $(\theta^* - \delta, \theta^* + \delta)$, який покриває параметр θ^* з імовірністю γ^* і точністю δ , називається надійним інтервалом.

У випадку інтервальної оцінки середнього наробітку до відмови маємо:

$$\gamma^* = P (T_n < T_1 < T_n),$$

де: T_n , T_n – нижня та верхня межі інтервалу для оцінки параметра T з імовірністю γ^* .

Таким чином, γ^* інтервал – це випадковий інтервал, що залежить від вибірки (але не від параметра θ).

При оцінці показників надійності за допомогою надійного інтервалу завжди існує ризик зробити похибку, коли справжнє значення невідомого показника буде за межами інтервалу. Це можливо в тому випадку, коли вибраний теоретичний розподіл випадкових величин не співпадає з дослідним розподілом.

Імовірність такої похибки називають рівнем значущості α . Рівень значущості α та імовірність γ^* пов'язані між собою співвідношенням:

$$\alpha = 1 - \gamma^*$$

Таким чином, визначення виду розподілу випадкової величини по статистичним даним полягає в тому, що на основі цих даних вибирається припустимо теоретичний розподіл даної випадкової величини (наприклад, експоненційний) і вираховується імовірність, яка характеризує прийнятність даного припущення.

Якщо ця імовірність перевершує деяку величину рівня α , то вважають, що вибраний теоретичний розподіл не суперечить експериментальним даним.

Для перевірки допустимості припустимого виду розподілу відмов використовують критерій згоди χ^2 (хі-квадрат) або критерій згоди Колмогорова.

χ^2 – розподіл (критерій Пірсона) має багато різних застосувань, в тому числі і при визначенні надійних меж оцінки середнього значення будь-якого параметра надійності при оцінці статистичних даних по результатам випробувань пристроїв на надійність.

Математичний вираз для даного розподілу має вигляд [15]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^v \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^2, \quad (9.18)$$

де x_i – поточне значення випадкової величини; $\bar{x}$ – середнє значення випадкової величини; σ – середнє квадратичне відхилення випадкової величини від її середнього значення; v – кількість ступенів волі (кількість виробів або відмов при випробуванні на надійність).

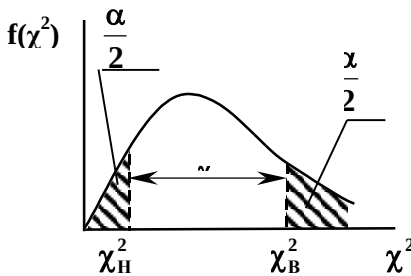


Рис.9.3. Крива щільності χ^2 – розподілу імовірності з нижньою та верхньою межами.

Значення χ^2 є функцією об'єму вибірки виробів N , які підлягають випробуванням.

При кількості ступенів волі $v = N - 1 \geq 30$ крива функції χ^2 наближається до кривої нормального розподілу.

При $v = N - 1 \leq 30$ значення функції χ^2 визначають по таблиці при різних рівнях значущості α або імовірності γ .

На рис. 9.3 зображена крива щільності χ^2 – розподілу імовірності з нижньою χ^2_n та верхньою χ^2_v межами.

Як приклад визначення надійного інтервалу розглянемо такий.

Маємо технічний пристрій, імовірність безвідмовної роботи якого в період нормальної експлуатації визначається виразом:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

де λ - інтенсивність раптових відмов пристрою.

Пристрій пройшов випробування на надійність. Необхідно оцінити по статистичним даним випробувань параметр λ , використовуючи для цього χ^2 розподіл.

В табл. 9.5 наведено приклад запису експериментальних даних, які одержані при випробуванні технічного пристрою по плану [NUN], коли всі N зразків пристрою виходять із ладу за час випробувань, тобто $N = r$.

Таблиця 9.5

Сумарний наробіток, t_{Σ} , год	Оцінка інтенсивності відмов λ , год ⁻¹	Нижня межа допуску λ_n	Верхня Межа допуску λ_v
$\sum_{i=1}^N t_i$	$\frac{N}{t_{\Sigma}}$	$\frac{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2r)}{2t_{\Sigma}}$	$\frac{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2r)}{2t_{\Sigma}}$

Значення квантилів $\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2r)$ і $\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2r)$ визначаються по таблицям χ^2 розподілу з $2r$ ступенями волі (додаток Д1, табл. Д1-3).

Звідки нижня та верхня межі надійного інтервалу для показників безвідмовності пристрою будуть відповідно.

$$P_n(t) = e^{-a_n t} \quad P_v(t) = e^{-\lambda_n t} \quad T_n = \frac{1}{\lambda_v}; \quad T_v = \frac{1}{\lambda_n}$$

Розглянемо визначення інтервальної оцінки для коефіцієнта готовності відновлюваного пристрою.

Особливістю цього визначення є те, що випадкова величина K_r є функцією двох випадкових величин T_0 і T_v :

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_v} = \frac{1}{1 + \frac{T_v}{T_0}} \quad (9.19)$$

Оскільки T_0 і T_b пов'язані з χ^2 розподілом співвідношеннями:

$$\frac{2t_p}{T_0} = \chi^2(T_0); \quad \frac{2t_p}{T_b} = \chi^2(T_b), \quad (9.20)$$

а саме відношення $\chi^2(T_0)$ і $\chi^2(T_b)$ розподілено по закону F – розподілу, тобто:

$$\frac{\chi^2(T_0)}{\chi^2(T_b)} = F, \quad (9.21)$$

то з (9.20) і (9.21) одержимо формули для нижньої та верхньої меж значень K_r :

$$K_{r_n} = \frac{1}{\left(1 + \frac{T_b}{T_0} F_b\right)}; \quad K_{r_b} = \frac{1}{\left(1 + \frac{T_b}{T_n} F_n\right)} \quad (9.22)$$

Числові значення F_n і F_b визначаються з таблиці F – розподілу, вхідними даними для якої є: P_1 (для F_n), P (для F_b) та кількість ступенів волі k . F – розподіл приведено в довідковій літературі.

Як уже відмічалось вище, надійний інтервал – це випадковий інтервал, довжина та положення якого залежать від об'єму вибірки (відмов). У випадку фіксованої точності (величини інтервалу) імовірність збільшується при збільшенні об'єму вибірки.

При фіксованій виборці (відмов) неможливо збільшити імовірність, не зменшуючи при цьому точність, тобто розширюючи надійний інтервал, і, навпаки, неможливо збільшити точність оцінки, не зменшуючи при цьому імовірність.

9.6 Контрольні випробування на надійність

9.6.1. Загальні відомості

Контрольні випробування на надійність проводяться з метою перевірки відповідності фактичного рівня надійності заданим в НТД.

Періодичність проведення контрольних випробувань, як правило, не рідше одного разу в 3 роки.

Контроль показників надійності, які нормуються, включає в себе:

- ♦ одержання та математична обробка вхідних статистичних даних;

- ♦ прийняття рішення про відповідність або невідповідність пристроїв встановленим вимогам по надійності в НТД;

- ♦ аналіз причин та наслідків відмов з метою розробки відповідних мір по підвищенню надійності пристроїв.

При контролю надійності невідновлювальних пристроїв об'єм вибірки (кількість випробуваних зразків пристроїв) дорівнює кількості спостережень. Для відновлюваних пристроїв об'єм вибірки може бути зменшено (до одного зразка).

Для проведення контрольних випробувань із сукупності (партії) однотипних пристроїв проводиться вибірка, яка потім підлягає випробуванню на надійність.

Контрольні випробування проводяться за планами, які приведені в табл. 9.2. [1]. Вибір плану контрольних випробувань визначається:

- ♦ видом показників надійності;
- ♦ складом вихідних даних;
- ♦ прийнятим методом контролю (одноступеневий, послідовний контроль та інші).

По результатах контрольних випробувань роблять висновки про відповідність чи невідповідність показників надійності заданим.

Висновки інколи можуть бути помилковими. При цьому можуть бути помилки першого та другого роду.

Помилка **першого роду** має місце тоді, коли партія виробів, які мають рівень надійності однаковий або вищий

заданого, бракується по результатам випробувань вибірки. Імовірність першого роду називається ризиком постачальника (виробника) і позначається буквою α .

Помилка **другого роду** має місце тоді, коли партія виробів, які мають рівень надійності нижче заданого, приймається по результатам випробувань. Імовірність помилки другого роду називають ризиком замовника (споживача) і позначається буквою β .

У якості прикладу розглянемо контроль середнього напрацювання до відмови.

Вихідні дані:

- ◆ норма показника - T_n ;
- ◆ ризик постачальника - α ;
- ◆ ризик замовника - β ;
- ◆ забраковане значення показника, який підлягає контролю, - T_β ;
- ◆ приймальне значення показника, який підлягає контролю, T_α ;
- ◆ припустимий закон розподілу наробітку до відмови – експоненційний.

9.6.2. Одноступеневий контроль

Параметри плану випробувань визначаються з табл.9.6.

Таблиця 9.6

$\alpha = \beta$						r_{rp}
0.05		0.10		0.20		
$\frac{T_a}{T_\beta}$	$\frac{t_{\max}}{T_a}$	$\frac{T_a}{T_\beta}$	$\frac{t_{\max}}{T_a}$	$\frac{T_a}{T_\beta}$	$\frac{t_{\max}}{T_a}$	
58,820	0,052	21,740	0,105	7,246	0,223	1
13,330	0,356	7,299	0,532	3,636	0,824	2

Випробування припиняються як тільки буде досягнуто одне із значень: $r_{гр}$ або t_{max}/T_α

При випробуваннях без відновлень або без заміни виробів новими об'єм вибірки N повинен бути не менше граничного кількості відмов $r_{гр}$. При випробуванні з відновленням або заміною об'єм вибірки не регламентують.

Якщо тривалість випробувань t_b задана, то всі зразки виробів випробовують одночасно, а відмовлені заміняють або відновлюють, то необхідна кількість зразків виробів [1] визначається за формулою:

$$N = \frac{t_{max}}{t_b} . \quad (9.23)$$

Під час випробувань визначають сумарний наробіток зразків:

♦ при випробуваннях без відновлення або без заміни

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=1}^r t_i + (N - r)t_b ; \quad (9.24)$$

♦ при випробуваннях з відновленням або заміною

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=1}^r t_i . \quad (9.25)$$

Оцінка результатів випробувань проводиться таким чином:

♦ якщо першим досягається кількість відмов $r_{гр}$ при $t_{\Sigma} < t_{max}$, то приймають рішення про невідповідність вимог показника надійності заданим в НТД;

♦ якщо першим досягається умова $t_{\Sigma} = t_{max}$ при $r < r_{гр}$, то приймають рішення про відповідність вимог показника надійності заданим в НТД.

Одноступеневий метод випробувань, при рівних умовах з іншими методами, забезпечує мінімальну календарну тривалість випробувань, а двохступеневий при тих же умовах дозволяє забезпечити мінімум об'єму випробувань.

9.6.3. Послідовний контроль

Параметри плану випробувань визначають по ГОСТ 27.410–84 [1]. По ним в прямокутній системі координат (рис. 9.4) будують похилі лінії:

$$r = \frac{t_{\Sigma}}{T_a} + r_0 - \text{лінія невідповідності}; \quad (9.26)$$

$$r = a\left(\frac{t_{\Sigma}}{T_a} - \frac{t_0}{T_a}\right) - \text{лінія відповідності}. \quad (9.27)$$

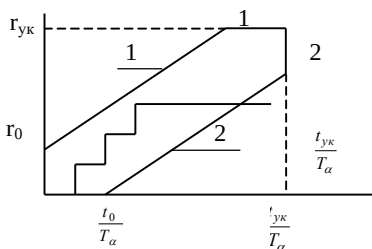


Рис.9.4. Графік послідовних випробувань:
1 – лінія невідповідності; 2 – лінія відповідності.

Укорочення випробувань слід проводити при $r_{ук}$ по сумарному наробітку.

При випробуваннях без відновлення або без заміни мінімальний об'єм вибірки $N = r_{ук}$.

При наявності відмов графіком послідовних випробувань є ступінчата лінія, сума відрізків якої паралельні осі $\frac{t_{\Sigma}}{T_a}$ дорівнює відношенню T_a , а сума відрізків, паралельних осі r , дорівнює числу відмов до моменту t .

При відсутності відмов графіком послідовних випробувань є пряма лінія з початком в точці **O**, яка співпадає з віссю $\frac{t_{\Sigma}}{T_a}$. При цьому $t_{\Sigma} = N \cdot t$.

При випробуваннях з відновленням або заміною сумарний наробіток зразків t_{Σ} в момент t вираховують за формулою:

$$t_{\Sigma} = Nt - \sum_{i=1}^r t_{bi} \quad (9.28)$$

де t_{bi} – тривалість відновлення працездатного стану після i -го із r зразків.

При випробуваннях без відновлення або без заміни сумарний наробіток зразків в момент часу t вираховують за формулою:

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^r t_i - (N-r)t_1, \quad (9.29)$$

де t_i – наробіток до i – ї відмови із r зразків.

Рішення про відповідність вимогам показників надійності приймають при перетині графіком послідовних випробувань одної з ліній відповідності. Рішення про невідповідність вимогам показників надійності – при перетині одної з ліній невідповідності.

При послідовному контролі тривалість випробувань в середньому на 50% менше в порівнянні з одноступеневим методом. Методика послідовних випробувань приведена в [1].

9.7. Оцінка надійності пристроїв по результатах дослідної та підконтрольної експлуатації

9.7.1 Організація збору інформації про надійність

Збір даних про надійність елементів та пристроїв під час експлуатації є дуже важливим моментом для послідувочої достовірної оцінки надійності пристроїв. Він вимагає високої квалі-

фікації обслуговуючого персоналу та безумовного дотримання всіх правил експлуатації, в тому числі термінів профілактичних робіт та ремонтів. Оскільки в реальних умовах це не завжди можливо, то використовують інші форми одержання інформації про надійність пристроїв, зокрема такі, як дослідна та підконтрольна експлуатація.

Дослідна експлуатація – це експлуатація в натуральних умовах спеціально виділених пристроїв, яка проводиться спеціально підготовленим обслуговуючим персоналом, який здійснює старанний контроль технічного стану виробів, що знаходяться на дослідній експлуатації, з урахуванням всіх заходів їх технологічної експлуатації.

Цей вид експлуатації як правило організовують з метою вивчення експлуатаційних показників партії вперше розроблених або удосконалених пристроїв, а також для розробки заходів по поліпшенню їх технічних характеристик.

Відмінність дослідної експлуатації від звичайної полягає в більш інтенсивному використанні дослідної техніки та більш якісним контролем за нею в процесі роботи.

Підконтрольна експлуатація пристроїв, що серійно випускаються, проводиться в реальних умовах спеціально підготовленим персоналом. При цьому здійснюється більш детальний, ніж при дослідній експлуатації, контроль та облік технічного стану пристроїв.

Мета та задачі дослідної та підконтрольної експлуатації одні і ті ж – це визначення відповідності показників надійності заданим в НТД. Для забезпечення потрібних вимог відносно достовірності оцінки показників надійності об'єм вибірки визначається згідно заданим в НТД нормам.

Збір інформації та заповнення первинних документів про надійність пристроїв в звичайних умовах експлуатації проводиться обслуговуючим персоналом у відповідності з існуючою НТД, а при дослідній і підконтрольній експлуатації - черговим персоналом, який займається обслуговуванням техніки, що досліджується, або представником служби надійності, яка організується спеціально для збору інформації про надійність.

Основними видами документації при зборі первинної інформації про відмови виробів є журнали, формуляри та

картки. В журналах фіксується інформація про надійність всіх виробів, що досліджуються. Формуляри ведуться на кожний окремий пристрій. Перевага формулярів над журналом полягає в тому, що вони зберігають всю інформацію про роботу пристрою з початку його роботи у споживача. Картки заповнюються при кожній відмові виробу. Вони являються найбільш оперативною формою інформації, яка може бути використана для автоматичної обробки на обчислювальній машині.

9.7.2 Обробка експериментальних даних

Обробка експериментальних даних про відмови, одержані в результаті спостереження за роботою зразків, виконується методами математичної статистики. Методика, яка при цьому застосовується, однакова як для невідновлювальних, так і для відновлювальних пристроїв.

Вихідними даними, які підлягають обробці, є час наробітку до відмови або на відмову, час, що витрачений на відновлення (ремонт), та число відмов виробів. При наявності вказаного матеріалу його оброблюють і встановлюють закони розподілу показників надійності таких, як імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов та інші.

Знання законів розподілу показників, які оцінюються, дає можливість визначити всі інші кількісні показники надійності. Отже, основною задачею статистичної обробки даних про відмови виробів є визначення одного із законів розподілу випадкових величин, що досліджуються. В ряді випадків вид закону розподілу відомий ще до дослідження. Наприклад, для електронних виробів, які не мають резервних елементів, закон розподілу показників надійності є експоненціальний. Він знаходиться із дослідження експлуатації або випробувань подібних виробів. В цьому випадку дослідним шляхом знаходиться тільки оцінка параметрів цього закону.

При визначенні закону розподілу випадкових величин, одержаних при випробуваннях виробів, доцільно дотримуватись такої послідовності:

- ◆ підготовка експериментальних даних;

- ◆ побудова гістограми кількісного показника надійності виробів, який оцінюється;
- ◆ апроксимація гістограми кривою теоретичного розподілу та визначення його параметрів;
- ◆ перевірка допустимості пропонуємого розподілу на основі використання того або іншого критерію згоди (Колмогорова, Пірсона та ін.).

По результатам отриманих в процесі експлуатації даних складають відповідні таблиці (табл.9.7 та 9.8).

Таблиця 9.7

t_i	n_i	$n_{\Sigma} = \sum_i n_i$	$Q^* = \frac{n_{\Sigma}}{\sum_{k=1}^k n_i}$	$P^*_i = 1 - Q^*_i$
-------	-------	---------------------------	---	---------------------

В таблиці прийняті наступні позначення: Δt_i – довжина i –го інтервалу часу; $n(\Delta t_i)$ – кількість відмов на інтервалі Δt_i ; N_0 – кількість зразків виробу, які були поставлені для спостереження; $N_{\text{сер}}$ – середня кількість справно працюючих зразків в інтервалі Δt_i ; $P^*(t)$, $f^*(t)$, $\lambda^*(t)$ – відповідно статистичні оцінки імовірності безвідмовної роботи, щільності розподілу відмов та інтенсивності відмов .

Дані табл.9.7 використовуються для визначення законів імовірності відмови або імовірності безвідмовної роботи виробів.

Таблиця 9.8

Δt_i	$n(\Delta t_i)$	$P^*(t) = 1 - \frac{n(t_i)}{N_0}$	$f^*(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_0 \Delta t_i}$	$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{сер}} \Delta t_i}$
--------------	-----------------	-----------------------------------	---	--

Дані табл.9 8 використовуються для оцінки розподілу випадкових величин по відповідним гістограмам. По даним таблиці будеться гістограма відповідного показника надійності

$P^*(t)$, $f^*(t)$ або $\lambda^*(t)$. Ця гістограма апроксимується кривою. По виду кривої можна орієнтовно установити закон розподілу відмов.

Перевірка допустимості прийнятого закону розподілу відмов здійснюється по критеріям згоди Колмогорова або Пірсона. Найбільше поширення в практиці обробки статистичних даних одержав критерій Колмогорова.

На основі критерію Колмогорова експериментальний розподіл випадкової величини узгоджують з відповідним теоретичним розподілом, якщо виконується умова:

$$D_{\max} \sqrt{n} \leq 1,$$

в якій $D_{\max}$ визначає найбільше відхилення теоретичної кривої від експериментальної, а n – кількість відмов.

Приклад апроксимації гістограми, отриманої в результаті обробки статистичної кривої, наведено на рис.9.5.

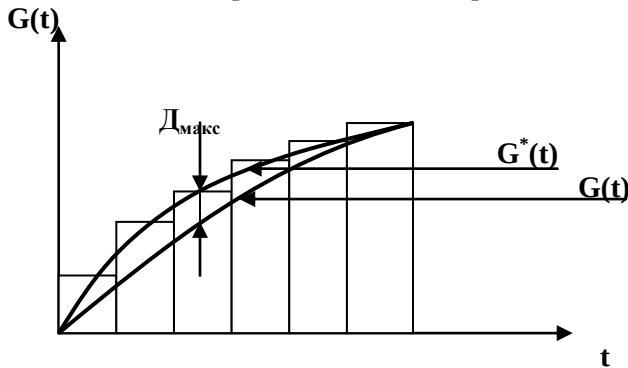


Рис.9.5. Гістограма обробки статистичних даних

Як видно з рисунка, значення $D_{\max}$ визначається безпосередньо по графіку, де гістограма, яка одержана по статистичним даним, представлена кривою $G^*(t)$.

Крива $G(t)$, яка апроксимує її, є теоретичною кривою.

9.7.3 Інтервальна оцінка показників надійності

Кількість статистичних даних про відмови виробів, які одержують в процесі експлуатації, буває дуже обмеженою. В таких випадках точкові оцінки показників надійності можуть бути дуже обмеженими.

Як відомо, відхилення цих оцінок від істинного значення показників надійності є випадковими величинами. Із збільшенням кількості спостережень випадкова величина похибки оцінки показників зменшується.

Розглянемо методику оцінки показників надійності у визначеному інтервалі можливих їх значень. Нехай в результаті спостережень за виробами в процесі експлуатації отримані дані, що характеризують інтервали часу наробітку на відмову t_i ($i = \overline{1, n}$).

Згідно теорії надійності наробіток на відмову та середнє квадратичне відхилення можуть бути знайдені за відповідними формулами. Після встановлення виду закону розподілу визначають точкові оцінки кількісних показників надійності. Так, якщо інтенсивність відмов і інтенсивність відновлення є постійними у часі ($\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ і $\mu(t) = \mu = \text{const}$), то точкові оцінки кількісних показників надійності при експлуатаційному законі розподілу можна одержати з наступних виразів:

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\lambda t}; & T_0 &= 1/\lambda; \\ P_v(t) &= 1 - e^{-\mu t}; & T_v &= 1/\mu; \\ K_r(t) &= K_r + (1 - K_r) e^{-t / K_r T_v}; \\ K_r &= T_0 / (T_0 + T_v). \end{aligned} \right\} \quad (9.30)$$

Якщо в результаті дослідів були одержані дані по часу наробітку на відмову t_i ($i = \overline{1, 2, \dots, n}$), то оцінку середнього часу безвідмовної роботи і середнього квадратичного відхилення знаходимо за формулами математичної статистики:

$$\left. \begin{aligned} T^* &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i ; \\ \sigma^* &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} . \end{aligned} \right\} \quad (9.31)$$

Позначимо істинні значення оцінюваних величин через T_0 і σ . Оскільки об'єм вибірки n обмежений, то неминуче повинні мати місце випадкові похибки:

$$\left. \begin{aligned} \pm \delta &= T^* - T_0 ; \\ \pm \eta &= \sigma^* - \sigma , \end{aligned} \right\} \quad (9.32)$$

розподіл яких повністю визначається законом розподілу вибірки t_i .

Вирази (9.32) можна записати інакше:

$$\left. \begin{aligned} T^* - \delta &\leq T_0 \leq T^* + \delta ; \\ \sigma^* - \eta &\leq \sigma \leq \sigma^* + \eta . \end{aligned} \right\} \quad (9.33)$$

Із (9.33) слідує, що дійсне значення оцінюваної величини лежить в деякому інтервалі. Так, для наробітку на відмову воно знаходиться в інтервалі $T_n = T^* - \delta$ і $T_b = T^* + \delta$, тобто між нижнім та верхнім значеннями наробітку на відмову.

Аналогічно знаходиться інтервал і для оцінки величини σ .

Наведена оцінка випадкових величин є інтервальною оцінкою.

Знайти точні межі інтервалу, в які попадає істинне значення досліджуваної величини, не можливо. Однак можна визначити інтервал її можливих значень з деякою довірчою імовірністю $P_d = \alpha$. При цьому, чим більша довірна імовірність α , тим ширші межі інтервалу, і навпаки.

В загальному випадку ця залежність має вигляд:

$$\alpha = P(Q_n \leq Q \leq Q_v), \quad (9.34)$$

де Q_n і Q_v – нижня та верхня межі параметру Q .

Імовірність того, що значення Q вийде за межі інтервалу (Q_n, Q_v) називається рівнем значущості β :

$$\beta = P(Q_n > Q > Q_v) = 1 - \alpha. \quad (9.35)$$

Значення довірчих імовірностей задаються рядом 0,9; 0,95; 0,99.

Відповідні їм рівні значущості складають 0,1; 0,05; 0,01.

10.3 АБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ

10.1. Організація робіт по забезпеченню надійності

Забезпечення необхідного рівня надійності електронних систем - комплексна проблема. Як показує досвід виготовлення та експлуатація електронних пристроїв різного призначення рішення її в більшості випадків залежить від того, наскільки оперативно і технічно грамотно вирішувались питання забезпечення необхідного рівня надійності на всіх стадіях створення та експлуатації пристроїв.

Щоб технічний пристрій мав високий рівень надійності в роботі, необхідно проведення комплексу засобів на всіх його стадіях: проектування, виготовлення та використання. Для різних видів пристроїв зміст таких засобів та їх послідовність різні в залежності від особливості пристрою, технології його виготовлення та використання.

10.2. Забезпечення надійності на стадії проектування

Згідно з технічним завданням (ТЗ) на розробку будь-якого технічного пристрою (системи) розробляється програма забезпечення надійності (ПЗН), яка визначає впровадження комплекс заходів, спрямованих на забезпечення заданих вимог по надійності на стадії проектування пристрою.

Основні шляхи забезпечення надійності технічних пристроїв (систем) при проектуванні:

- ◆ здійснення раціонального проектування та розрахунково-експериментальних методів оцінки надійності.

- ◆ раціональне проектування базується на професійній освіті інженерів, які виконують науково-дослідні роботи та розробляють програми і методи випробувань, а також на досвіді проектування;

◆ збір та аналіз інформації про надійність вітчизняних та зарубіжних аналогів пристрою (системи), а також про надійність технологічного устаткування. Ця інформація необхідна для виробки вимог по надійності майбутнього пристрою, яка повинна бути забезпечена при його виготовленні. Такі дані можуть приводитись в держстандартах, довідковій літературі та в технічній документації на заводах – виробниках елементів;

◆ удосконалення принципів конструювання вузлів пристроїв (зокрема, застосування схем, малокритичних до зміни параметрів елементів;

◆ встановлення в пристроях елементів і матеріалів з високими показниками надійності;

◆ забезпечення полегшених (в порівнянні з гранично допустимими по ТУ) електричних, теплових, вібраційних та інших режимів роботи елементів в пристроях. При цьому доцільно добиватись, де це можливо, щоб електричне навантаження елементів було не більше 30 –50 % номінального. Це дозволить економити ресурс елементів в процесі роботи пристрою та підвищити їх надійність і довговічність;

◆ застосування граничних та других видів випробувань при створенні нових вузлів апаратури;

◆ застосування гібридних і інтегральних мікросхем;

◆ введення різних видів резервування: структурного, інформаційного, часового та функціонального, що дозволить значно підвищити надійність пристрою;

◆ полегшення температурних режимів вузлів шляхом їх раціонального розміщення (джерела, які інтенсивно виділяють тепло, повинні розташовуватись як можна далі від інших елементів) та створення системи примусової терморегуляції;

◆ поліпшення умов експлуатації пристрою (введення конструкційного захисту від дій зовнішнього середовища);

◆ зменшення дії на елементи електричного навантаження під час перехідних процесів при включенні пристрою, а також при його виключенні;

◆ застосування захисного покриття від дії вологи, що дозволяє підвищити вологостійкість пристрою;

◆ використання передових методів та засобів технічного діагностування для визначення технічного стану та пошуку несправностей. Наприклад, застосування вбудованих або автономних систем (пристроїв) автоматичного контролю працездатності складних систем(комплексів). Діагностика з використанням автоматизованих засобів контролю дозволяє зменшити час технічного обслуговування та пошуку несправностей, зменшити середній час відновлення та підвищити готовність пристроїв.

◆ прогнозування можливих змін параметрів (характеристик) матеріалів та деталей у часі (старіння). Врахування старіння необхідно не тільки для довгочасно працюючих об'єктів, але й для короткочасно працюючих об'єктів, оскільки вони можуть застосовуватися після тривалого зберігання. Тому при розробці принципів електричних схем необхідно підбирати номінальні значення параметрів елементів, щоб забезпечити параметричну надійність пристроїв;

◆ вдосконалювати технічну підготовку обслуговуючого персоналу (операторів), організацію та умови його роботи.

Як відомо, основу надійності майбутніх технічних систем закладає провідний конструктор, який згідно з ТЗ визначає структуру та схемну побудову проектуємої системи, намічає раціональне розміщення вузлів та елементів, що забезпечить мінімальний час на технічне обслуговування та ремонтно – відновлювальні роботи.

В залежності від умов застосування системи провідний конструктор підбирає відповідну конструкцію, а також матеріали та комплектуючі вироби, які будуть використовуватись в даній системі.

Крім конструкторських методів, для забезпечення необхідної працездатності системи широко використовуються аналітичні та імовірнісні методи оцінки надійності проектуємих систем. Для цього на основі функціональної та принципової схем складається структурна (логічна) схема надійності проектуємої системи, за допомогою якої виконується розрахунок проектної надійності системи, використовуючи для цього дані про надійність елементів, вузлів, які застосовані в

системі, взяті із довідкової літератури або на заводах виробниках цих виробів.

На стадії проектування проводиться аналіз та прогнозування поведінки системи при експлуатації. Такий аналіз проводиться з метою виключення можливих випадків прорахунку при схемних побудовах, які можуть виявлятися в процесі експлуатації, та які можуть дорого коштувати для їх усунення.

При виявленні конструкційних недоліків, що понижують рівень надійності системи, проводяться відповідні випробування вузлів та систем в цілому, за допомогою яких проводиться експериментальна оцінка надійності системи.

У випадку виявлення тих або інших недоліків в роботі дослідних зразків проводиться відповідна конструкторська або схемна корекція (доопрацювання) системи, або корекція значень кількісних показників надійності по узгодженню з замовником.

Слід відмітити, що вирішальну роль в забезпеченні надійності проектуємої системи належить конструктору, який, використовуючи свою професійну майстерність та досвід роботи, в змозі розробити технічну систему з високою надійністю, що забезпечить її високу ефективність при експлуатації.

При розробці технічного проекту системи крім серійно випускаємих промисловістю технічних засобів для деяких спеціальних систем розробляються нові засоби, які потім використовуються при виготовленні цих систем.

10.3. Забезпечення надійності на стадії виробництва

На стадії серійного виробництва технічних пристроїв (систем) згідно з вимогами НТД розробляють програму забезпечення надійності. В ній передбачається комплекс організаційно – технічних заходів, які реалізуються при виготовленні системи з метою забезпечення потрібного рівня надійності.

На стадії серійного виробництва виконуються наступні ходи, націлені на забезпечення надійності:

- ◆ контроль за додержанням відповідності виготовлених виробів вимогам конструкторської та технологічної документації;

- ◆ вхідний контроль якості, поступаючих на виробництво комплектуючих виробів від зовнішніх постачальників;

- ◆ збір та аналіз інформації про надійність пристроїв, що знаходяться на місцях експлуатації;

- ◆ аналіз рекламаций та причин відмов;

- ◆ проведення заходів по усуненню можливих відмов з вини порушень технології виготовлення;

- ◆ атестування технологічного устаткування, що застосовуються на робочих місцях складання та регулювання

- ◆ організація та проведення періодичних випробувань та контрольних випробувань на надійність;

- ◆ проведення заходів по результатам періодичних та контрольних випробувань на надійність;

- ◆ проведення авторського контролю за виготовленням деталей та вузлів пристроїв;

- ◆ розробка та реалізація заходів по усуненню недоліків, виявлених при проведенні авторського контролю.

Одним із основних заходів на стадії серійного виробництва, які направлені на забезпечення надійності технічних систем, є стабільність технологічних процесів.

До числа основних конструктивно – технологічних та організаційних заходів, що проводяться на цій стадії для забезпечення надійності, слід віднести такі:

- ◆ використання передових методів організації виробництва;

- ◆ автоматизація та механізація технологічних процесів;

- ◆ впровадження гнучких виробничих систем, робототехнічних комплексів та автоматизованих систем управління;

- ◆ атестування технологічних процесів та робочих місць;

- ◆ контроль якості і надійності комплектуючих і матеріалів;

- ◆ додержування технологічної дисципліни.

Всі ці заходи взаємо пов'язані між собою.

Удосконалення технології виробництва має дуже важливе значення. Без удосконалення технології виробництва неможливо одержати однорідну по якості та надійності продукцію.

Одержання однорідної продукції можливо тоді, коли маємо стабільний технологічний процес на всіх стадіях виробництва, починаючи від одержання матеріалів до складання і регулювання пристрою.

Автоматизація виробничого процесу здатна забезпечити високу ступінь однорідності по якості продукції і відповідно високу надійність та ефективність при застосуванні.

Наприклад, автоматизація виготовлення обмоток трансформаторів забезпечує рівномірний натяг та вкладку проводу при намотці, в результаті чого кількість обривів та замикань різко зменшилось.

Введення технологічних процесів (тренувань) дозволяє виявити приховані відмови напівпровідникових елементів та інтегральних мікросхем. Крім технологічних тренувань в умовах, наближених до експлуатаційних, застосовують прискорені випробування з більш важкими умовами роботи.

Статистичні дані по відмовам елементів систем показують, що в початковий період експлуатації систем спостерігається підвищений ріст відмов, які відбувається по вині виробництва (виробничі дефекти). Ці відмови можна виявити, якщо на підприємстві – виробнику організувати технологічний прогон при вібраційних навантаженнях виробів, які при цьому знаходяться ще й під електричним навантаженням.

Введення тренувальних випробувань в технологічному процесі виробництва скорочує витрати заводу – виробника на гарантійний ремонт. На основі статистичних даних про відмови, що відбуваються в початковий період експлуатації пристроїв, можна встановити оптимальну тривалість проведення технологічних тренувань таким чином, щоб сумарні витрати заводу – виробника на проведення випробувань і на ремонт або заміну пристроїв на протязі гарантійного терміну були мінімальними.

Заходи по забезпеченню відповідного рівня надійності при виробництві пристроїв визначаються станом збору інформації про надійність. Вихідними даними для розрахунку та

удосконалення пристроїв є дані, зібрані в процесі їх випробувань та експлуатації.

Інформація про надійність, яка поступає з місць експлуатації пристроїв, дуже необхідна, оскільки вона дозволяє судити про реальну надійність поставленої замовнику техніки.

Запропонований комплекс заходів на стадії виробництва і прийомо-здаючих випробувань, в тому числі технологічних випробуваннях в нормальних кліматичних умовах та при підвищеній температурі дозволяє виявити практично усі приховані дефекти і поставити споживачу вироби з доброю якістю та надійністю. Тому організація збору та статистичної обробки інформації про надійність має дуже велике значення.

Збір інформації про надійність здійснюється таким чином. На підприємстві при проведенні періодичних або контрольних випробувань на надійність заповнюють картку обліку несправностей на кожний виріб. В картці фіксуються:

- ◆ назва пристрою;
- ◆ наробіток пристрою до відмови;
- ◆ форма прояву несправності (відмови) пристрою;
- ◆ умови роботи пристрою, при яких виникла відмова;
- ◆ місце несправності (відмови);
- ◆ класифікація несправності (відмови);
- ◆ причина несправності (відмови);
- ◆ спосіб та тривалість усунення несправності (відмови);

Картка заповнюється особою, яка відповідальна за проведення випробувань та візується начальником відділу надійності.

По результатам випробувань дані обробляються для визначення наробітку до відмови, середнього часу на відновлення та діючих причин, що викликають порушення працездатності пристрою.

По результатам випробувань складається звіт (акт) про технічний стан та надійність пристрою, в якому вказуються рекомендації по усуненню виявлених недоліків при випробуваннях пристроїв. Звіт є основою для розробки організаційно-технічних заходів по забезпеченню якості та надійності випускаємої продукції.

10.4. Забезпечення надійності на стадії експлуатації

Надійність технічних пристроїв (систем) в умовах експлуатації залежить від цілого ряду факторів:

- ◆ якості поставленої технічної системи;
- ◆ кваліфікації обслуговуючого персоналу;
- ◆ наявності запасних частин;
- ◆ дотримання правил експлуатації, які передбачені інструкцією по експлуатації на дану систему.

В процесі експлуатації мають місце такі види відмов:: раптові та поступові.

Раптові відмови пов'язані з наявністю у пристрої прихованих виробничих дефектів, дефектами конструкційного характеру та порушеннями правил експлуатації (помилки обслуговуючого персоналу).

Поступові відмови обумовлені поступовими змінами параметрів (характеристик) в результаті фізичного старіння (зносу) елементної бази пристрою.

Надійність всього пристрою у випадку незалежності відмов буде визначатись вказаними вище видами відмов.

Для підвищення надійності технічних пристроїв (систем) при експлуатації проводиться наступний ряд заходів:

- ◆ розробка наукових методів експлуатації різних технічних систем та пристроїв;
- ◆ збір статистичних даних про відмови, їх аналіз та видача інформації підприємствам – виробникам і розробникам про експлуатаційну надійність поставлених виробів для прийняття відповідних заходів по усуненню виявлених недоліків та підвищенню їх надійності;
- ◆ підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Наукові методи включають в себе науково–обґрунтовані методи підготовки пристроїв до роботи, своєчасного технічного обслуговування та ремонту їх в процесі експлуатації.

Порядок проведення вказаних заходів вказується в інструкції по експлуатації.

Велике значення при експлуатації пристроїв мають кваліфікація та досвід обслуговуючого персоналу.

Також велике значення для прийняття відповідних заходів по підвищенню експлуатаційної надійності пристроїв має організація збору інформації про відмови, які можуть бути отримані по результатам тривалої експлуатації.

Інформації про відмови, яка отримується в процесі експлуатації пристроїв, оформляється у вигляді карток обліку несправностей або рекламацийних актів.

В картці обліку несправностей або рекламацийному акті записується наступна інформація:

- ◆ номер картки або рекламацийного акта;
- ◆ назва та заводський номер пристрою;
- ◆ наробіток пристрою з початку експлуатації до появи несправності;
- ◆ умови роботи (випробувань), при яких з'явилась несправність пристрою;
- ◆ зовнішня ознака несправності;
- ◆ тип елемента(вузла), що відмовив;
- ◆ імовірність причини появи несправності;
- ◆ способи усунення несправності (заміна, ремонт);
- ◆ час відновлення пристрою;
- ◆ дата та підпис особи, яка заповнила картку або рекламацийний акт.

Картки обліку несправностей як правило застосовують при випробуваннях.

Рекламацийні акти складають для виробів, що знаходяться в експлуатації в період їх гарантійного технічного обслуговування. В цей період виробник несе всю матеріальну відповідальність за появу несправностей поставленого споживачу пристрою, якщо вони відбулися з вини підприємства.

Інформація про надійність пристроїв в процесі експлуатації має велику цінність для розробки заходів по підвищенню надійності в процесі проектування та виробництва. На жаль, дані по експлуатації пристроїв не завжди можуть бути використані при проектуванні нових пристроїв, оскільки в результаті швидкого технічного прогресу ці пристрої морально

застарівають. За цей час можуть змінитись елементна база і самі пристрої.

Проте, вивчення особливостей поведінки пристроїв в умовах експлуатації дає можливість використати накопичені дані для проектування майбутніх пристроїв. Таким чином, збір та узагальнення статистичних даних про відмови пристроїв є важливою задачею, на яку слід звертати увагу споживачу, виробнику та організаціям, що займаються проектуванням.

Ефективність використання технічних пристроїв в процесі експлуатації в більшості залежить від кваліфікації обслуговуючого персоналу. Особливо це проявляється при обслуговуванні складних технічних систем та комплексів, коли кваліфікація персоналу грає важливу роль в прийнятті тих чи інших рішень при оцінці працездатності пристрою.

Технічне обслуговування в залежності від кваліфікації персоналу, який його проводить, може:

- ◆ забезпечити відповідний рівень надійності пристрою;
- ◆ понизити надійність технічного пристрою в результаті порушень правил експлуатації. В цьому випадку технічне обслуговування пристроїв має негативний вплив на характеристики надійності пристрою, і як результат, збільшує матеріальні витрати на його експлуатацію.

В зв'язку з цим при розгляді питання про раціональне технічне обслуговування як правило визначають ряд оптимальних характеристик, таких як періодичність проведення профілактичних робіт, об'єм виконуваних регламентних робіт, кількість спеціалістів та вартість технічного обслуговування з урахуванням появи несправностей пристроїв.

Визначення оптимального технічного обслуговування з урахуванням вище перерахованих факторів можливе лише після детального вивчення всіх факторів та їх можливого впливу на загальну вартість технічного обслуговування пристроїв в умовах експлуатації.

11. НАДІЙНІСТЬ ТА ЕКОНОМІКА

11.1. Оцінка впливу надійності пристроїв на їх економічні показники

Аналіз ефективності при використанні електронних пристроїв та систем показує, що між надійністю та ефективністю існує пряма залежність, яка може бути оцінена за допомогою економічних показників.

Чим вище надійність, тим нижчі витрати на ремонт техніки при її експлуатації і, як наслідок, тим вище ефективність її використання. Відомо, що вартість експлуатації технічних пристроїв в десятки разів вище вартості їх розробки та виготовлення.

Таким чином, надійність будь-яких технічних виробів, в тому числі й електронних, слід розглядати з економічної точки зору, оскільки основним показником в народному господарстві є економія, яку отримують в процесі експлуатації нової техніки.

Крім того, без урахування економічних факторів(витрати, отриманий економічний ефект від впровадження пристроїв) неможливо обґрунтувати заходи по підвищенню надійності виготовлених промисловістю виробів народногосподарського значення.

Як відомо, рівень надійності визначає технічний рівень будь-якої техніки. В свою чергу, технічний рівень визначає економічну ефективність та доцільність її використання по призначенню.

Підвищення надійності виробів збільшує їх довговічність, що рівнозначно збільшенню об'єму виготовлення виробництвом виробів, оскільки в експлуатації в цей час буде знаходитись більше виробів.

Збільшення часу безвідмовної роботи виробів знижує витрати від їх простою та збільшує їх продуктивність. Тому, не дивлячись на те, що для підвищення надійності потрібно збільшувати витрати на проектування та виготовлення, надійний виріб буде істотно дешевший та ефективніший в експлуатації.

Крім того, чим більш відповідальні функції виконує виріб, тим більше значення надається його надійності, оскільки будь-яке порушення його працездатності може призвести до катастрофічних наслідків.

Щоб підвищити економічну ефективність електронних виробів при проектуванні необхідно підвищувати їх надійність. З цього випливає, що оцінка економічної ефективності виробу вимагає проведення економічного аналізу рівня його надійності.

Суть економічного аналізу заключається в оцінці заходів, які необхідні для підвищення надійності, а також у визначенні можливого при цьому економічного ефекту від підвищення надійності виробів. Порівнюючи величину додаткових витрат на підвищення надійності з величиною економічного ефекту, роблять висновок про економічну доцільність проведення вказаних заходів.

Оскільки витрати на підвищення надійності в процесі проектування та виготовлення виробів повинні призводити до зниження експлуатаційних витрат, то в цьому випадку визначають такий оптимальний рівень надійності, при якому загальна вартість проектування, виготовлення та експлуатації буде мінімальна, крім випадків, коли потрібна максимальна надійність для забезпечення потрібної безпеки (наприклад, АСУ космічними об'єктами, АСУ злетом та посадкою літаків, АСУ технологічними процесами на хімічних виробництвах тощо).

Визначення оптимального рівня надійності по критерію вартості зводиться до вирішення двох задач при заданих техніко-економічних вимогах та знаходження оптимального співвідношення між ними.

Задачі формуються таким чином :

- ♦ підвищити надійність до заданого значення при мінімально можливих витратах, тобто мінімізація вартості при обмеженні рівня надійності;

- ♦ одержання максимально можливої надійності при заданих витратах, тобто максимального рівня надійності при обмеженні по вартості [].

Не дивлячись на трудомісткість рішення подібних задач, в даний час розроблено ряд методів оптимального моделювання

надійності по критерію вартості, які дозволяють визначити максимальну або задану надійність при заданих або мінімальній вартості з урахуванням призначення та типу виробів.

11.2. Зв'язок між вартістю та надійністю

Основними кількісними показниками для економічного аналізу надійності є :

- ♦ вартість заходів по підвищенню надійності;
- ♦ економічний ефект від підвищення надійності;
- ♦ термін покриття витрат на заходи по підвищенню надійності;

Розглянемо ці показники стосовно неремонтованих і ремонтованих виробів.

Вартість заходів по підвищенню надійності при проектуванні та виготовленні неремонтованих виробів виражається наступною математичною залежністю [3]:

$$\Delta C_n = \Delta C_0 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_n} \right)^\alpha, \quad (11.1)$$

де ΔC_0 - вартість витрат по забезпеченню надійності виробу з пониженим рівнем надійності (інтенсивність відмов λ_0); ΔC_n - вартість витрати по забезпеченню надійності з підвищеним рівнем надійності (з інтенсивністю відмов $\lambda_n < \lambda_0$); $\alpha = (0,5 - 1,5)$ - коефіцієнт, який залежить від технічного рівня розробки та виробництва.

У випадку експоненційного закону розподілу відмов формула (11.1.) має вигляд:

$$\Delta C_n = \Delta C_0 \left[\frac{\ln P_0(t)}{\ln P_n(t)} \right]^\alpha. \quad (11.2)$$

Розглянуті вище формули (11.1) і (11.2) описують математичну модель вартості надійності, яка базується на підвищенні надійності шляхом зменшення інтенсивності відмов výro-

бу, наприклад: застосування більш надійних елементів замість елементів з низькою надійністю, схемне поліпшення окремих вузлів виробу, застосування полегшених режимів роботи елементів тощо.

Вартість заходів по підвищенню надійності ремонтованих виробів із врахуванням підвищення ремонтпридатності (застосування ЗСК, вільний доступ до елементів, скорочення часу на регулювання та зборку вузлів тощо) оцінюється наступною математичною залежністю [3]:

$$\Delta C_n = \Delta C_0 \left(\frac{K_{no}}{K_{nn}} \right) = \Delta C_0 \left[\frac{T_{vo} (T_{cp.n} + T_{v.n})}{T_{v.n} (T_{cp.o} + T_{vo})} \right]^\alpha, \quad (11.3)$$

де K_{no}, T_{vo}, T_{do} - показники надійності старого варіанта виробу; $K_{nn}, T_{v.n}, T_{cp.n}$ - показники надійності нового виробу з підвищеною надійністю.

Формула (11.3) описує математичну модель, яка враховує зміну вартості ремонтowanego виробу в залежності від зміни його надійності: безвідмовності, готовності (підвищення T_0) та ремонтпридатності (зменшення T_v).

Економічний ефект від підвищення рівня надійності неремонтованих виробів в залежності від зміни його надійності (безвідмовності), коли впровадження заходів не потребує додаткових витрат і собівартість виробу не збільшується, визначається за наступною формулою [3]:

$$\Xi(t) = (e^{-\lambda_0 t} - e^{-\lambda_n t}) \cdot A \cdot Z_0, \quad (11.4)$$

де A - річний випуск продукції (виробів);
 Z_0 - собівартість одного виробу.

Якщо підвищення рівня надійності пов'язано з додатковими витратами та збільшенням собівартості виробу від величини Z_0 до Z_n ($Z_n > Z_0$), то економічний ефект, який

отримують в цьому випадку через t часу (років), визначається за формулою:

$$\Xi(t) = (e^{-\lambda_0 t} - I_z e^{-\lambda_n t}) \cdot A \cdot Z_0, \quad (11.5)$$

де $I_z = \frac{Z_n}{Z_0} > 1$ - індекс собівартості одиниці нового варіанту

виробу в порівнянні зі старим.

Економічний ефект від підвищення надійності ремонтного виробу визначається за формулою [3]:

$$\Xi(t) = Z_n (K_n - K_{nn}) (t - \eta),$$

$$\Xi(t) = Z_n (K_{rn} - K_{ro}) (t - \eta),$$

де η - термін, коли заходи окупаються.

Термін η , коли заходи по підвищенню надійності окупаються, або час, коли виграш від підвищення надійності окупає підвищення собівартості виробу, визначається за формулою [3]:

$$\eta = \frac{\ln I_z}{\lambda_0 - \lambda_n}. \quad (11.6)$$

Термін покриття витрат не повинен бути дуже великим, інакше економічний ефект від підвищення надійності може бути не реалізованим внаслідок настання морального зносу виробу. Тому термін покриття витрат вибирають з умови, що він не повинний перевищувати половину середнього часу безвідмовної роботи старого варіанту виробу, тобто:

$$\eta \leq 0,5 \cdot T_{\text{сеп}} = \frac{1}{2\lambda_0}. \quad (11.7)$$

На основі формул (11.6) і (11.7) можливо вивести умову економічної доцільності проведення робіт по підвищенню рівня надійності неремонтованих виробів:

$$\frac{\lambda_0 - \lambda_n}{2\lambda_0} \geq \ln \frac{C_n}{C_0}.$$

Для ремонттованих виробів термін покриття визначається за формулою:

$$\eta = \frac{\Delta C_n}{C_e}, \quad (11.8)$$

де ΔC_n - вартість додаткових витрат на виготовлення виробу з підвищеним рівнем надійності; ΔC_e - вартість експлуатаційних витрат, які економляться на протязі року від підвищення надійності виробу.

Як відмічалось вище, підвищення надійності неремонтованих і ремонттованих виробів в основному досягається зменшенням інтенсивності відмов, застосуванням різних видів резервування, вибором оптимальних електричних режимів роботи елементів виробів.

Крім того, підвищення надійності ремонттованих виробів може бути забезпечено за рахунок зменшення часу відновлення (застосування вбудованих систем контролю (ВСК) або вбудованих систем технічного діагностування (ВСТД)).

В залежності від етапу впровадження заходів по підвищенню надійності виробів розрізняють конструкторські, виробничі та експлуатаційні заходи.

Усі витрати, які пов'язані з проведенням вказаних заходів, представляються наступним співвідношенням:

$$C = C_n + C_e,$$

де C_n - собівартість виробу (витрати на проектування та виготовлення); C_e - експлуатаційні витрати (витрати на експлуатацію виробу).

Відношення терміну покриття витрат від підвищення надійності до часу експлуатації виробу визначається співвідношенням :

$$\frac{\eta}{t} = \frac{C_n - C_{no}}{C_{eo} - C_e},$$

де C_n і C_{no} - собівартість нового і старого варіантів виробу відповідно ($C_n > C_{no}$); C_e і C_{eo} - експлуатаційні витрати нового і старого варіантів виробу відповідно ($C_e < C_{eo}$).

Собівартість виробу в зв'язку з підвищенням рівня надійності зростає в зв'язку з додатковими витратами по підвищенню надійності при проектуванні та виготовленні визначається за формулою [3]:

$$C_n = \Delta C_n \left[-\frac{N \cdot t \cdot \lambda_{\text{ср}}}{\ln P(t)} \right]^\alpha,$$

де ΔC_n - додаткові витрати на підвищення надійності; N - загальна кількість елементів у виробі; t - час експлуатації виробу; $\lambda_{\text{ср}}$ - середня інтенсивність відмов елементів; $\alpha = (0,5 - 1,5)$ - коефіцієнт, який залежить від рівня розробки та виробництва.

Експлуатаційні витрати в зв'язку з підвищенням надійності зменшуються, оскільки експлуатація та ремонт надійних виробів не потребує зайвих витрат. Ця залежність оцінюється за формулою [3]:

$$C_e = \bar{C}_1 \frac{T_{\text{р.ср}}}{t} [-\ln P(t)], \quad (11.9)$$

де $\bar{C}_1$ - середня вартість однієї відмови приладу; $T_{\text{р.ср}}$ - середній ресурс приладу.

На рис. 11.1 приведена залежність вартості витрат C від імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ виробу (при $\alpha = 1$).

Побудова графіка функції $C = f[P(t)]$ проведена шляхом складення значень функцій $C_n = f_1[P(t)]$ і $C_e = f_2[P(t)]$ по осі ординат.

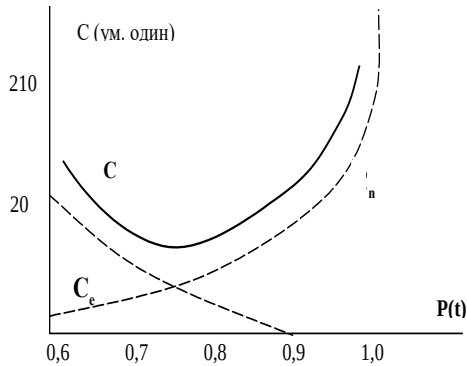


Рис. 11.1. Залежність вартості C від імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ виробу

Як бачимо, функція $C = f[P(t)]$ має яскраво виражений мінімум, який відповідає значенню надійності при оптимальному критерії вартості.

11.3. Техніко-економічні обґрунтування виробів при проектуванні

Техніко-економічні обґрунтування (ТЕО) та розрахунки проводяться розробником на всіх стадіях проектування та впровадження нового виробу.

Основна мета економічного аналізу – виявлення економічної ефективності впровадження спроектованого виробу.

При проектуванні виробів, як правило, вибирають той варіант, який є найбільш ефективним.

Економічний аналіз проводиться за наступним алгоритмом:

- ◆ вивчення питань економічного обґрунтування нової розробки;
- ◆ вибір об'єкту-аналога (прототипу) виробу;
- ◆ якісний аналіз порівнюваних варіантів виробів, тобто оцінка технічного рівня виробів, які проектуються;
- ◆ прогнозування можливого попиту на нові вироби;
- ◆ розрахунок капітальних вкладень та різних експлуатаційних витрат на вироби;
- ◆ розрахунок показників економічної ефективності впровадження виробу.

Як вже відмічалось в п. 11.1 показники надійності та довговічності є основними показниками, за допомогою яких оцінюють технічний рівень виробу, по якому потім прогнозують технічний рівень вітчизняних виробів відносно зарубіжних аналогів. Крім того, показники надійності визначають попит виробу в умовах ринкової економіки.

11.4. Розрахунок капітальних вкладень

При виборі прийнятного варіанта при проектуванні виробу, проводять розрахунок економічної ефективності нового виробу, який включає в себе розрахунок капітальних витрат у виробництві K_v та у сфері використання K , собівартість його виготовлення C_v та витрати в процесі експлуатації [28].

Питомі (на один виріб) капітальні витрати у виробництві визначаються співвідношенням:

$$K_v = K_{nv} + K_{of} + K_{oz}, \quad (11.10)$$

де K_{nv} - витрати на науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи (НУ та ДК) та підготовку виробництва; K_{of} - капіталовкладення в основні виробничі фонди заводу-виробника виробів; K_{oz} - капіталовкладення в обортові засоби заводу-виробника.

Наближено величина K_v може бути визначена співвідношенням :

$$K_v = 1,2 \cdot C_v, \quad (11.11)$$

де C_v - собівартість виготовлення виробу.

Сукупні капітальні витрати в сфері використання нового виробу визначаються за виразом :

$$K = K_{tr} + K_{мнр} + K_{пл}, \quad (11.12)$$

де K_{tr} - витрати на транспортування (доставка виробу на місце експлуатації); $K_{мнр}$ - витрати на монтаж-налагоджувальні роботи виробу перед початком його експлуатації; $K_{пл}$ - вартість виробничої площі, необхідної для установки виробу.

Наближено величина K може бути визначена за виразом:

$$K = (0,1 \div 1,15) \cdot Ц + K_{пл}, \quad (11.13)$$

де $Ц$ - оптова ціна виробу, яка визначається за формулою:

$$Ц = C_n \left(1 + \frac{P_v}{100} \right), \quad (11.14)$$

де P_v - відсоток планового прибутку виробника.

Для розрахунку величин K_v і K необхідно визначити собівартість виготовлення нового виробу по таким статтям витрат:

- ♦ вартість основних матеріалів C_m ;
- ♦ вартість куплених комплектуючих виробів $C_{кв}$ по даним схеми та конструкції виробу;
- ♦ основна заробітна плата, що витрачається на виготовлення виробу, яка визначається за формулою:

$$Z_o = (C_m + C_{кв}) \cdot \frac{Y_{30}}{Y_{\Sigma}}, \quad (11.15)$$

де Y_{zo} - питома вага основної заробітної плати в собівартості аналогічних виробів; Y_{Σ} - питома вага витрат на основні та куплені матеріали;

♦ додаткова заробітна плата, яка включає в себе оплату відпусток, можливого скорочення робочого дня та інші витрати, і яка визначається за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = Z_o \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100},$$

де $Z_{\text{дод}}$ складає 20% від Z_o ;

♦ відрахування в органи соціального страхування:

$$O_c = (Z_o + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_c}{100}, \quad (11.17)$$

де $H_c = 8 \%$

♦ цехові непрямі витрати:

$$P_{\text{ц}} = Z_o \cdot H_{\text{ц}} / 100\%, \quad (11.18)$$

де $H_{\text{ц}} = 120\%$;

♦ загальнозаводські непрямі витрати:

$$HP_z = Z_o \cdot \frac{H_z}{100}, \quad (11.19)$$

де $H_z \leq 70\%$;

♦ виробнича собівартість виробу:

$$C_v = C_m + C_{\text{кв}} + Z_o + Z_{\text{дод}} + O_c + HP_{\text{ц}} + HP_z; \quad (11.20)$$

♦ зовнішні виробничі витрати :

$$HP_{\text{зовн}} = C_z \cdot \frac{H_{\text{зовн}}}{100}, \quad (11.21)$$

де $H_{\text{зовн}} = (3 \div 5)\%$;

♦ повна собівартість виготовлення нового виробу визначається за формулою:

$$C_H = C_3 + HP_{\text{зовн}}. \quad (11.22)$$

11.5. Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Найбільш сильно величина показників надійності та довговічності впливає на витрати по експлуатації виробів.

Експлуатаційні витрати включають в себе:

- ♦ заробітну плату персоналу, який обслуговує виріб;
- ♦ відсоткове нарахування на заробітну плату для виплат на соціальне страхування;
- ♦ амортизаційні витрати;
- ♦ витрати на поточний ремонт;
- ♦ шкоду від простою виробу при його відмові та інші витрати.

Заробітна плата персоналу, який обслуговує виріб, визначається за формулою:

$$Z_n = 1,18 \sum_{i=1}^m t_{\text{зари}} \cdot \bar{Z}_{\text{чи}}, \quad (11.23)$$

де **1,18** – коефіцієнт, що враховує доплату (оплати відпусток, премії) та відрахування від заробітної плати персоналу на соціальне страхування; $t_{\text{зари}}$ - загальний час зайнятості персоналу i -ї категорії (інженер, слюсар, електромонтажник і т.п.) по обслуговуванню виробу на протязі року грн/рік; $\bar{Z}_{\text{чи}}$ - середньочасова заробітна плата персоналу i -ї категорії; m кількість різних по рівню оплати категорії працівників, які обслуговують виріб.

Амортизаційні відрахування включають в себе:

- ♦ витрати на капітальний ремонт виробу (грн/рік):

$$A = \Pi_6 \cdot \frac{H_{акр}}{100}, \quad (11.24)$$

де Π_6 - балансова вартість виробу, яка визначається:

$$\Pi_6 = \Pi + K_{гр} + K_{мир};$$

$H_{акр}$ - річна норма амортизаційних витрат на капітальний ремонт виробу. Орієнтовно приймають $H_{акр} = (8 \div 10)\%$;

♦ витрати по супутнім капіталовкладенням (крім витрат на транспортування, монтаж, наладку та регулювання):

$$A_k = K_{пл} \cdot \frac{H_{ак}}{100},$$

де $H_{ак}$ - загальна річна норма (планова) амортизаційних відрахувань. Орієнтовно $H_{ак} = (15 \div 25)\%$.

Витрати на поточний (позаплановий) ремонт (грн/рік):

$$P_{ин} = K_{ин} (C_m + C_{кв}), \quad (11.26)$$

де $K_{ин}$ - коефіцієнт, значення якого залежить від часу роботи пристрою на протязі року (год/рік). Так, якщо $t = 2000$ год, то $K_{ин} = 2\%$.

Таким чином, річні експлуатаційні витрати по новому виробу складають (грн/рік):

$$U_2 = A_y + A_k + Z_n + P_{ин}. \quad (11.27)$$

У випадку, коли дані про річні витрати виробу-аналога відсутні, розрахунок річних експлуатаційних витрат проводиться тільки для виробу, який проектується.

Слід відмітити, що економічне обґрунтування та розрахунки необхідні на всіх стадіях розробки та запуску у виробництво будь-яких виробів. Це необхідно для того, щоб

виявити економічну ефективність та доцільність запуску в серійне виробництво виробу.

11.6. Гарантійні зобов'язання

Гарантійні зобов'язання - зобов'язання виробника (постачальника) перед споживачем (замовником) гарантувати на протязі встановленого терміну та наробітку відповідність якості поставленої продукції технічним умовам (ТУ), НТД, зразкам і умовам договору та безкоштовно усувати будь-які дефекти або замінювати дефектну продукцію при умові дотримання споживачем правил експлуатації.

Гарантії постачальника закінчуються тоді, коли наробіток виробу досягає гарантійного наробітку або минув гарантійний термін експлуатації виробу.

Початок гарантійного терміну як правило вказується в НТД на поставлений виріб.

Безкоштовно усуваються можливі дефекти виробу, які виявлені в процесі експлуатації або заміну його, включаючи в себе всі витрати по гарантійному обслуговуванню:

- ◆ основна та додаткова зарплата з врахуванням відрахувань на соціальне страхування працівників підприємства, які зайняті гарантійним обслуговуванням та ремонтом;

- ◆ вартість комплектуючих виробів, напівфабрикатів, запасних частин, інструментів, матеріалів та інших матеріальних цінностей, що використовуються при проведенні гарантійного обслуговування;

- ◆ вартість витрат на відрахування при гарантійному обслуговуванні (ремонті) безпосередньо на місцях експлуатації виробу.

- ◆ вартість витрат на оплату приміщення, що орендується для гарантійного ремонту.

Якщо кількість відмов виробу (ремонтований виріб) в процесі експлуатації відповідає нормі, яка вказана в ТУ (розд. "Вимоги надійності"), то постачальник безкоштовно відновлює несправний виріб, або: платить штраф по реклаमाції.

Рекламація оформляється у вигляді рекламацийного акту, в якому вказується причина невідповідності якості (відмова, несправність або некомплектність виробу), яка виявлена в період гарантійного обслуговування, встановленим вимогам.

Ступінь відповідальності виробника за виготовлену продукцію визначається характером виявлених дефектів, тобто невідповідністю виробів встановленим в НТД вимогам.

Розрізняють такі дефекти:

Виробничий – невідповідність виробу встановленим вимогам, що виникли з вини виробництва (порушення технології виготовлення виробу – неякісна пайка тощо);

Конструктивний – дефект, який виник з вини конструктивного недоробку виробу (критичність параметрів тощо).

При наявності конструктивного дефекту складається акт рекламації без пред'явлення штрафних санкцій. Дефект усувається силами та засобами постачальника (виробника).

Гарантійне обслуговування та рекламація мають велике значення для забезпечення необхідної надійності виробів, які постачаються споживачу. Вони встановлюють відповідальність виробників за кількісні показники надійності виробів, які вказані в ТУ (НТД).

Слід відмітити, що гарантійний наробіток і гарантійний термін експлуатації не є показником надійності. Це показники, на протязі яких виробник бере на себе відповідні юридичні зобов'язання по збереженню технічних характеристик своїх виробів, в тому числі і показників надійності.

12. ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ

12.1. Задачі технічної діагностики

В останні десятиріччя XX-го століття спостерігався постійне зростання складності створюваних технічних систем, в тому числі і електронних, при одночасному підвищенні вимог до ефективного їх функціонування.

Створення багатофункціональних систем потребує ускладнення схемних побудов указаних систем, що неминуче призводить до зниження рівня їх надійності, оскільки при цьому різко збільшується кількість застосованих в системах елементів. При цьому зниження рівня надійності не може бути компенсовано застосуванням елементів з високою надійністю.

Таким чином, виникає проблема забезпечення систем з такою високою експлуатаційною надійністю, щоб вони могли ефективно функціонувати при застосуванні.

Для рішення вказаної проблеми необхідна розробка нових методів і засобів контролю працездатності та пошуку несправностей (відмов), тобто необхідно вдосконалювати організацію технічного обслуговування. Саме сучасне технічне обслуговування спроможне розв'язати вказані протиріччя при створенні складних технічних систем.

Розглянемо, що таке технічна діагностика та її основні задачі, які вона вирішує при технічному обслуговуванні технічних пристроїв.

Технічна діагностика – це наука, яка включає в себе теорію і методи визначення технічного стану об'єктів при виготовленні та експлуатації, а також основні принципи побудови технічних засобів, які забезпечують технічне діагностування. Технічну діагностику слід розглядати як розділ загальної теорії надійності електронних систем.

Основною задачею технічної діагностики є розпізнавання технічного стану будь-якого пристрою в умовах обмеженої інформації про його реальний стан.

Під технічним станом слід розуміти сукупність технічних параметрів (характеристик) пристрою, які визначають здатність його виконувати відповідні функції та які можуть зазнавати різних зовнішніх дій в процесі транспортування та експлуатації.

Розрізняють декілька видів технічних станів:

- ◆ справний – це технічний стан пристрою, при якому він відповідає усім технічним вимогам НТД, інакше він несправний;

- ◆ працездатний – це технічний стан пристрою, при якому він відповідає основним технічним вимогам, які визначають можливість застосування його за призначенням. Фізичні процеси, що відбуваються в елементах в процесі експлуатації об'єкта, можуть викликати ту або іншу несправність. Різним несправностям пристрою відповідають різні технічні стани.

Очевидно, що при проведенні аналізу стану пристрою в умовах експлуатації завжди існує певний ризик допустити помилку при визначенні реального стану пристрою, що є особливо неприпустимим для деяких об'єктів, експлуатація яких в несправному стані може мати катастрофічні наслідки.

Слід відмітити, що контроль працездатності пристрою дає однозначну відповідь тільки на питання, чи знаходиться пристрій у справному (працездатному) чи непрацездатному стані. Така інформація цілком достатня при контролі невідновлюваних систем, коли технічне обслуговування зводиться до заміни системи в цілому, якщо вона непрацездатна.

У випадку відновлюваних при експлуатації пристроїв, коли технічне обслуговування передбачає відновлення (ремонт) його шляхом заміни окремих елементів, крім встановлення самого факту відмови пристрою, необхідно ще визначити місце її появи, а при необхідності і причину її появи. В даному випадку нова задача має істотну відмінність від задачі контролю працездатності.

Особливістю нової задачі є те, що множина непрацездатних станів тепер розбивається на ряд підмножин, які підлягають розрізненню. Таким чином, вище розглянута задача (пристрій або працездатний, або непрацездатний)

перетворюється в багатоальтернативну, рішення якої зводиться до віднесення пристрою до однієї з заданих підмножин простору непрацездатних станів.

Отже, рішення діагностичної задачі (віднесення пристрою до справного або несправного) зводиться до забезпечення потрібної достовірності у визначенні реального стану пристрою.

Технічна діагностика базується на двох взаємопов'язаних напрямках: теорії розпізнавання та теорії контролепридатності

Теорія розпізнавання включає в себе наступні розділи: алгоритми розпізнавання, правила прийняття рішень та діагностичні (математичні) моделі.

Розпізнавання стану пристрою означає віднесення його стану до одного з можливих класів (діагнозів). Кількість таких класів (діагнозів) визначається конкретною задачею, яка ставиться перед засобами технічної діагностики при дослідженні стану того чи іншого пристрою. Для розпізнавання станів пристроїв використовують відповідні алгоритми розпізнавання.

Алгоритми розпізнавання базуються на відповідних діагностичних моделях, які встановлюють зв'язок між можливими станами пристрою та набором їх діагностичних параметрів (сигналів).

Істотною частиною процесу розпізнавання є вибір параметрів пристрою, які характеризують його стан. Параметри повинні бути достатньо інформативні, щоб при вибраній кількості діагнозів процес розпізнавання міг бути здійсненим.

Теорія контролепридатності включає в себе наступні розділи: діагностичну інформацію, контроль стану та пошук несправностей (відмов).

Контролепридатністю називається властивість пристрою забезпечувати достовірну оцінку його технічного стану та можливість раннього виявлення несправностей та відмов (прогнозування можливих відмов). Контролепридатність створюється конструкцією пристрою та прийнятою системою технічної діагностики.

В якості системи пошуку несправностей (відмов) часто використовують вбудовані системи контролю (ВСК), які дозволяють визначити працездатність пристрою.

В складних технічних системах використовують автоматизовані вбудовані системи тестового діагностування (ВСТД), які дозволяють автоматизувати процес контролю працездатності та пошуку несправностей пристроїв при експлуатації.

ВСТД мають високу швидкодію та необхідну точність вимірювань і значно підвищують рівень достовірності контролю працездатності пристрою. Так, найбільш досконалі системи контролю можуть видавати рекомендації про характер управляючих дій, які необхідно застосувати до об'єкта контролю, щоб постійно утримувати його вихідні параметри (характеристики) в допустимих межах під час його роботи.

На рис. 12.1 показана загальна схема системи контролю при технічному обслуговуванні об'єктів. Модель об'єкта представляє собою генератор випадкового процесу $\mathbf{X}(t)$, який описує зміну стану об'єкта в часі під впливом зовнішніх та внутрішніх $\xi(t)$ діючих факторів. Обслуговування при цьому зводиться до такого управління процесом $\mathbf{X}(t)$, щоб об'єкт постійно знаходився в області дозволених станів $S_{\theta}^{(n)}$.

Вимірювальний елемент, який оцінює значення регульованої величини $\mathbf{X}^*(t)$, видає інформацію у вирішальний пристрій, де приймається рішення про необхідність та характер управляючих дій на об'єкт контролю. Сукупність вимірювального та вирішального пристроїв представляє собою блок контролю.

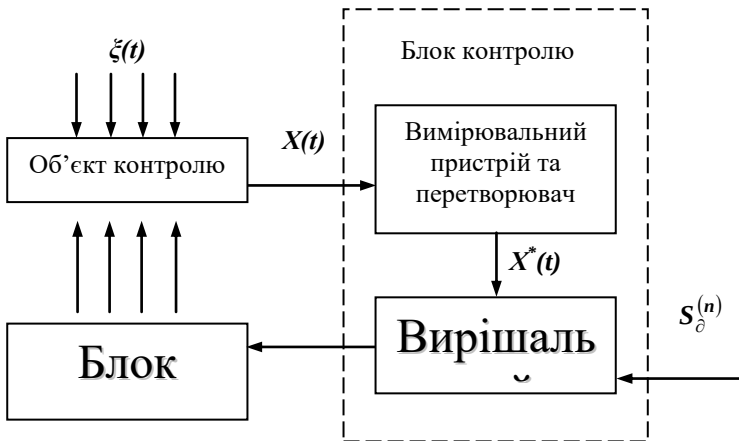


Рис. 12.1. Структурна схема системи контролю об'єкта

Якщо встановлено, що об'єкт контролю непрацездатний, то в цьому випадку здійснюється пошук несправності, тобто технічне діагностування з метою визначення місця несправності (блока, вузла, елемента).

Глибина пошуку являє собою кількісну характеристику, яка показує, яка частина пристрою охоплена системою контролю. Вона задається у вигляді вказівки складової частини пристрою (блока, вузла, елемента), з точністю до якої визначається місце несправності.

Глибина пошуку визначається відношенням:

$$\Pi_1 = \frac{N_k}{N}, \quad (12.1)$$

де N_k – кількість контрольованих елементів; N – загальна кількість елементів пристрою.

Істотною частиною процесу розпізнавання є вибір параметрів пристрою, які характеризують його стан. Параметри повинні бути інформативні, тобто вміщувати досить інформації, щоб по них можливо було визначити стан пристрою.

В цьому випадку глибина пошуку (контролю) може бути

представлена у вигляді відношення:

$$\Pi_2 = \frac{I_k}{I_{k0}}, \quad (12.2)$$

де I_k - кількість інформації про стан об'єкта контролю, що знаходиться в параметрах, які контролюються; I_{k0} - загальна кількість інформації про стан об'єкта контролю, яка знаходиться у всіх параметрах об'єкта контролю.

Розглянуті критерії повноти контролю зручні в тих випадках, коли всі елементи в об'єкті контролю мають однакову надійність. Оскільки указані умови на практиці не завжди виконуються, то використовують інший критерій оцінки стану об'єкта контролю, який визначається відношенням:

$$\Pi = \frac{Q_k(t)}{Q_0(t)} = \frac{1 - P_k(t)}{1 - P_0(t)}, \quad (12.3)$$

де $Q_0(t)$, $Q_k(t)$ - імовірність відмови об'єкта контролю в цілому та його контрольованої частини за час між черговими перевірками, тобто протягом часу t ; $P_0(t)$, $P_k(t)$ - імовірність безвідмовної роботи об'єкта контролю та його контрольованої частини за той же самий період.

Якщо припустити, що надійність об'єкта контролю та його складових частин змінюється по експоненціальному закону, то можна записати наступні відношення:

$$: P_0(t) = e^{-\Lambda_0 t}; P_k(t) = e^{-\Lambda_k t}, \quad (12.4)$$

де Λ_0 , Λ_k - параметр потоку відмов об'єкта контролю та його частини, яка контролюється.

При $\Lambda_0 t \leq 0,1$ та $\Lambda_k t \leq 0,1$ маємо:

$$\Pi = \frac{1 - P_k(t)}{1 - P_0(t)} \approx \frac{\Lambda_k}{\Lambda_0}.$$

Отже, критерієм повноти (глибини) пошуку (контролю) діагностованого пристрою є відношення імовірності пошкодже-

ння частини пристрою, яка контролюється, до імовірності пошкодження пристрою в цілому протягом деякого проміжку часу t .

Другою важливою кількісною характеристикою є достовірність результатів технічного діагностування. Діагностування – це імовірність того, що дійсний технічний стан пристрою збігається з технічним станом, який визначений в результаті технічного діагностування. На практиці часто вимоги до достовірності результатів перевірки (контролю) справності задають вказівкою кратності несправностей, що підлягають виявленню в процесі перевірки пристрою.

Кратність несправності – це кількість елементів діагностуемого пристрою, які одночасно можуть бути несправними.

Сукупність засобів діагностування та методів його проведення, які встановлені відповідними нормативними технічними документами, утворюють систему технічного діагностування (СТД).

Вимоги, які пред'являються до системи діагностування, залежать від стадії їх використання (проектування, експлуатація, технічне обслуговування або ремонт).

На етапі проектування задачею діагностування об'єктів є визначення відповідності функціонування об'єкту, заданому технічним завданням (ТЗ). Особливістю рішення цієї задачі є те, що помилки, які допущені при проектуванні, неможливо передбачити, а вартість витрат на їх усунення при виробництві та експлуатації пристроїв може бути дуже великою.

На етапі проектування використовують математичні моделі майбутнього пристрою, за допомогою яких вирішують задачу визначення правильності функціонування пристрою, що створюється.

Для діагностування використовують ЕОМ, за допомогою яких прискорюють процес пошуку дефектів в майбутній конструкції пристрою.

На етапі виробництва діагностування є складовою части-

ною загального технологічного процесу виготовлення пристрою та його складових частин. На цьому етапі діагностування проводиться з метою виявлення всіх видів дефектів, які можуть бути у пристрої, в тому числі і конструктивні. Необхідна глибина пошуку дефекту в цьому випадку – до елемента пристрою.

На етапі експлуатації пристроїв задачею діагностування є перевірка його готовності до чергового сеансу роботи, виявлення дефектів, що викликають його несправність, а також прогнозування параметричних відмов пристрою при експлуатації.

Вимоги до достовірності результатів діагностування, тривалості та періодичності його в цей період можуть бути різними в залежності від призначення пристрою та умов його експлуатації.

Розглянемо вимоги, які пред'являються до СТД. При проектуванні СТД необхідно, щоб:

- 1) технічне діагностування забезпечувало потрібну достовірність результатів визначення технічного стану об'єкта контролю;
- 2) проектування СТД (автономних або вбудованих) здійснювалось одночасно з проектуванням об'єкта контролю;
- 3) при проектуванні об'єкта контролю забезпечувалось його максимальна діагностованість.

12.2. Математичні моделі об'єктів контролю

Розглянемо способи побудови математичних моделей об'єктів контролю та способи їх контролю. Як відомо, розробка методик контролю правильності функціонування технічних об'єктів, виявлення та пошук відмов є основною задачею технічної діагностики.

Розробка методів та технічних засобів діагностування залежить від алгоритмів функціонування технічних пристроїв (систем). Велика різноманітність принципів функціонування технічних пристроїв зумовлює необхідність використання мате-

матичних методів та способів для практичної реалізації технічного діагностування.

Розв'язок задач технічного діагностування зводиться до пошуку методів оптимізації процесів виявлення та пошуку відмов (несправностей). Розв'язок подібних задач починається з побудови математичної моделі майбутнього об'єкта контролю. Таким чином, заміна реального технічного об'єкта його моделлю є необхідним етапом при розв'язку будь-якої практичної задачі технічної діагностики.

В якості моделі об'єкта контролю найчастіше використовують функціональні або функціонально-логічні моделі, які представляють собою деяку сукупність складових частин (блоків, елементів), і які з'єднані між собою функціональними зв'язками [].

Функціональна модель об'єкта контролю відрізняється від звичайної структурної схеми вибором первинних функціональних елементів. Наприклад, при побудові структурної схеми пристрою виходять із алгоритму його роботи.

При побудові функціональної моделі, яка призначена для пошуку несправностей, первинні функціональні елементи визначаються згідно НТД на об'єкт.

Побудова функціональної моделі залежить від способу відновлення об'єкта контролю, його конструктивного виконання та економічної доцільності.

При побудові функціонально-логічної моделі об'єкта контролю виходять із наступних припущень:

1) кожен елемент (блок) моделі може знаходитись в одному із двох можливих етапів: працездатному або непрацездатному. При цьому в стані працездатності елемент відповідає відповідною реакцією на допустиму сукупність дій, в склад яких можуть входити і реакції інших елементів.

В стані непрацездатності реакція елемента виходить за межі допустимої;

2) відмови елементів є подіями незалежними.

Припускається, що функціональна модель має наступні

властивості:

1) кожен елемент (блок) моделі може мати тільки один вихід, який може бути з'єднаний з будь-якою кількістю входів інших елементів. Кількість входів елементів необмежена.

Якщо є блоки, в яких більше одного виходу, то вони підлягають розбивці на декілька елементів по кількості виходів, що контролюються. При цьому в кожному з блоків (елементів) залишають тільки ті входи, які формують даний вихід;

2) для кожного функціонального елемента відомі допустимі значення вхідних та вихідних сигналів, їх функціональна залежність, а також способи їх контролю;

3) вихід за межі допустимих значень хоч одного з вхідних сигналів, призводить до відхилення значення вихідного сигналу за допустимі межі;

4) зовнішні вхідні сигнали завжди приймають тільки номінальні значення;

5) якщо вихідний сигнал i -го функціонального елемента є вхідним для j -го функціонального елемента, то номінальні значення цих сигналів збігаються;

6) лінії зв'язку між функціональними елементами моделі відповідають лініям зв'язку структурної або принципової електричної схеми об'єкту контролю;

7) лінії зв'язку між функціональними елементами моделі є абсолютно надійні.

Функціонально-логічна модель будується, як правило, безпосередньо по структурній або принциповій електричній схемі об'єкту з урахуванням вищенаведених умов.

Проста функціонально-логічна модель об'єкту контролю наведена на рис. 12.2. На схемі позначені: 1, 2, ..., 5 – функціональні елементи з відповідними зв'язками; x_1 і x_2 – зовнішні входи; z_1 , ..., z_4 – виходи функціональних елементів; z_5 – зовнішній вихід об'єкту діагностики.

Якщо сигнал з виходу функціонального елемента використовується як вхідний для іншого, то такий вихід називають зв'язаним або проміжним.

Функціонально-логічна модель є найбільш зручною формою представлення будь-якого технічного об'єкту, який відноситься до неперервних технічних пристроїв (радіотехнічні та електронні схеми), а також для ряду дискретних систем. Проте з її допомогою не завжди вдається провести аналіз деяких дискретних та резервованих систем. Для таких систем використовуються так звані логічні моделі об'єктів контролю [].

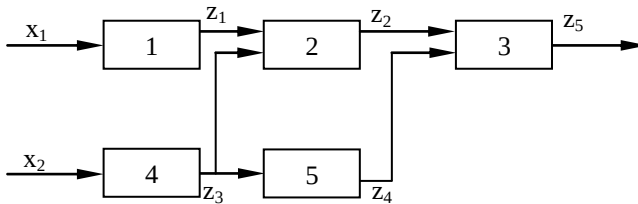


Рис. 12.2. Функціонально-логічна модель ОД

Логічна модель, як і функціональна, будується на основі структурної схеми об'єкта. У випадку нерезервованих систем логічна модель об'єкта контролю збігається з його функціональною моделлю. Різниця лише в тому, що тут вхідні та вихідні сигнали розглядаються як логічні сигнали, що можуть приймати два можливих значення: “1” – якщо значення контрольованого параметру елемента об'єкта контролю знаходиться в допуску і “0” – якщо не в допуску.

Розпізнавання станів об'єкту контролю визначається шляхом формального застосування алгебри логіки.

Розглянемо схему об'єкта діагностування, представлену на рис. 12.2. Таблиця несправностей такої схеми може бути представлена у вигляді табл. 12.1.

У таблиці 12.1 в першій графі позначені множина можливих перевірок елементів, а в решті граф – множина можливих станів елементів.

З таблиці 12.1 випливає, що шість можливих станів об'єкту діагностування, в залежності від можливого стану його елементів, можуть бути визначені за допомогою п'яти перевірок.

Таблиця 12.1

Вид перевірки і i-го елемента	Стан об'єкту					
	11111	01111	10111	11011	11101	11110
1	1	0	1	1	1	1
2	1	0	0	1	0	1
3	1	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	0	1
5	1	1	1	1	0	0

Несправні елементи в цьому випадку визначаються наступними кодовими комбінаціями: 00011, 10011, 11011, 10000 і 11010.

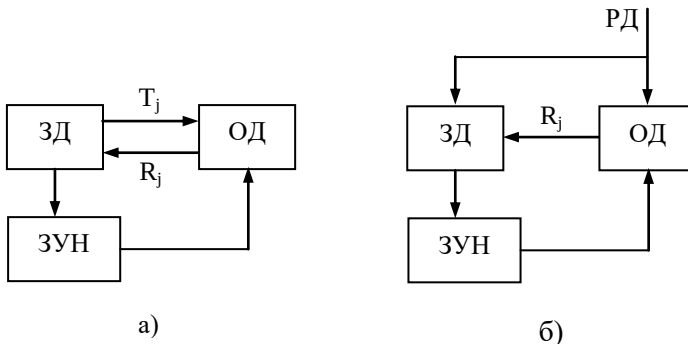
При збільшенні кількості елементів об'єкту збільшується кількість можливих його станів. Це ускладнює отримання оптимальної програми пошуку несправностей.

Розглянутий спосіб побудови та оптимізації програм пошуку несправностей особливо ефективний при діагностуванні об'єктів дискретних систем.

12.3. Основні схеми систем діагностування

Організацію систем діагностування, як правило, розглядають у двох аспектах: відносно сфери виробництва та сфери експлуатації. При цьому засоби діагностичного забезпечення необхідно розглядати спільно з засобами експлуатаційного забезпечення. Це дає змогу обґрунтувати технічні вимоги до самих засобів діагностування.

Існують наступні схеми організації систем діагностування []: тестове та функціональне діагностування технічних об'єктів, які наведені на рис. 12.3.



а) схема тестового діагностування;
 б) схема функціонального діагностування

Рис. 12.3

Узагальнені схеми таких систем діагностування складаються з об'єкта діагностування (ОД), засобів діагностування (ЗД) та засобів усунення несправностей (ЗУН). Схема організації тестового діагностування (рис. 12.3, а) відрізняється від схеми організації функціонального діагностування (рис. 12.3, б) тим, що є можливість подавати на об'єкт діагностування спеціально організовані тестові дії, в той час, коли в процесі функціонального діагностування використовуються тільки робочі дії.

Процес діагностування представляє собою подачу на об'єкт діагностування послідовності входних перевірочних тестових сигналів та отримання відповідних вихідних сигналів (реакцій) з наступним аналізом вихідних сигналів (реакцій) на тестові сигнали.

Замість перевірочних тестів можуть бути використані робочі входні дії, або послідовність спеціально генерованих тестових дій. В першому випадку має місце функціональне, а в іншому – тестове діагностування.

Функціональна схема організації тестового діагностування наведена на рис. 12.4. Схема складається з формувача тестових наборів та еталонних реакцій (ФТР), пристрою спряження (ПС), вимірювального пристрою (ВП), блоку прийняття рішення (БПР), пристрою управління (ПУ), об'єкта діагностування (ОД), дисплея (Д) та бібліотеки тестових програм (БТП).

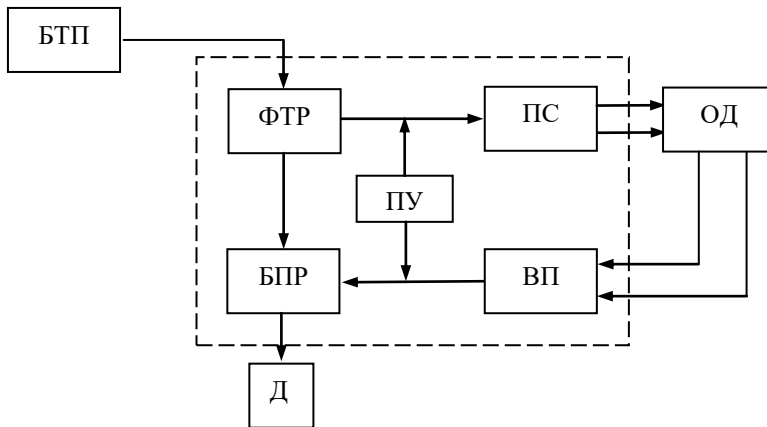


Рис. 12.4. Функціональна схема організації тестового контролю

Схеми діагностування можуть бути як вбудовані, так і зовнішні(автономні).

Системи функціонального діагностування дозволяють контролювати об'єкти в процесі виконання ними робочих функцій і спостерігати за відмовою в момент його появи. При такій організації системи діагностування сукупність і послідовність вхідних дій задається робочим алгоритмом об'єкта діагностування і не може вибиратись самостійно.

Системи функціонального діагностування, як правило, застосовують в процесі виробництва та експлуатації об'єктів, що дозволяє приймати міри у випадку виявлення порушення

працездатності виробу шляхом застосування резервних блоків замість несправних або перейти на інші режими роботи, для яких несправність, що виникла, не впливає на виконання задачі.

В якості недоліків таких систем діагностування виступає обмеженість набору робочий дій, що не завжди дозволяє оптимально розв'язувати задачі діагностування.

В системах тестового діагностування перевірна дія, яка подається на об'єкт діагностування, виробляється діагностуючим пристроєм. При тестовому діагностуванні склад та послідовність дій можна задавати, виходячи з умов ефективності організованого процесу діагностування.

Крім того, при тестовому діагностуванні для подавання перевірочних дій та отримання відповідних реакцій можна використовувати не тільки вхідні та вихідні сигнали (параметри) об'єкту, але й допоміжні контрольні точки, вибирати ту чи іншу дію в залежності від результатів попередніх перевірок.

На рис. 12.5 показана схема алгоритмів діагностування.

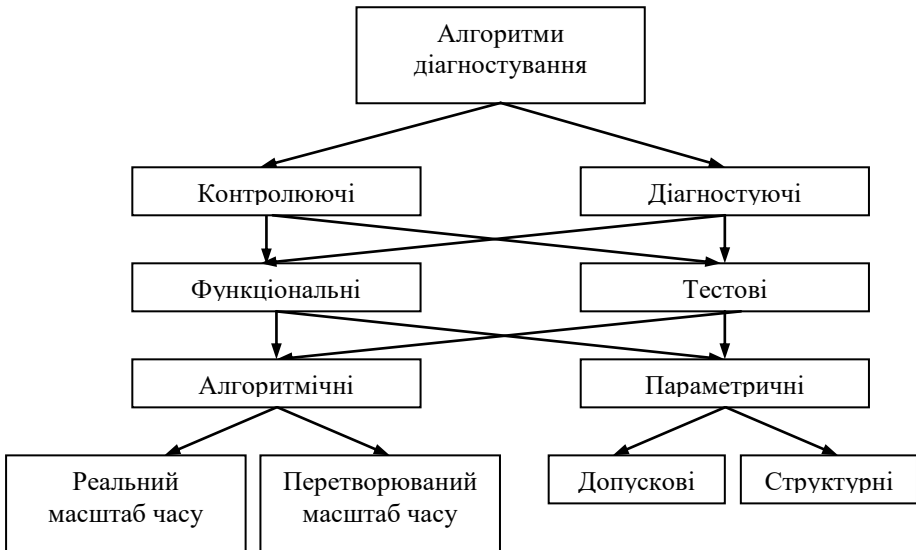


Рис.12.5 .Класифікація алгоритмів діагностування

Всі алгоритми діагностування можна поділити на дві основні групи: контролюючі та діагностуючі, які відрізняються одна від другої глибиною пошуку несправності. В свою чергу контролюючі та діагностуючі алгоритми поділяються на функціональні та тестові.

Основне призначення функціонального діагностування – перевірка справності об’єкта контролю, коли необхідна мінімальна глибина пошуку несправності.

Основне призначення тестових алгоритмів – локалізація місця виникнення несправності, її вид та причина.

Тестові та функціональні алгоритми поділяються на дві групи: алгоритмічні та параметричні.

Алгоритмічні тести використовуються для перевірки правильності функціонування об’єкта. Застосовується цей вид перевірки у цифрових та аналогових пристроях. Перевірка правильності виконання такої програми може здійснюватись як в реальному, так і в перетворюваному масштабі часу.

Параметричне діагностування виконується для:

- ♦ визначення відповідності вихідних електричних параметрів окремих ланцюгів розрахованим або заданим значенням, наприклад, перевірка амплітудних значень сигналів, коефіцієнтів передачі, різні часові відношення (затримки тощо);

Параметричне діагностування застосовується не тільки для аналогових технічних пристроїв та ланцюгів, але і для цифрових та логічних пристроїв, в яких контролюються електричні параметри логічних сигналів (рівні, тривалості фронтів та спадів тощо).

Застосування цього виду діагностики дозволяє виявити появу параметричних відмов (допускові перевірки), а також раптових відмов, які можуть відбуватися при експлуатації пристроїв.

Таким чином, проведення технічного діагностування для визначення технічного стану може бути досягнуто різними спо-

собами.

12.4. Методи оптимального виявлення та пошуку відмов в пристроях

При розробці програм пошуку несправностей в технічних пристроях розрізняють два основних методи: послідовний та комбінаційний. Інколи застосовують різні їх сполучення, зокрема комбінаційно-послідовні.

Послідовний метод – це такий метод побудови алгоритму пошуку несправностей, при якому інформація про технічний стан окремих функціональних елементів об'єкта контролю вводиться в автоматизовану систему контролю (АСК) і логічно обробляється послідовно. Суть побудови програми пошуку несправностей при послідовному методі полягає в визначенні по черговості контролю вихідних параметрів різних функціональних елементів.

При послідовному методі пошуку програма може бути жорсткою або гнучкою [17]. Жорсткою програмою називають таку програму, при виконанні якої параметри функціональних елементів (блоків) контролюються в певній, заздалегідь визначеній послідовності, незалежно від результатів їх контролю. В цьому випадку забезпечується найбільш проста логічна обробка результатів контролю. Така програма найбільш часто застосовується у вбудованих АСК.

Гнучкою називають таку програму, при виконанні якої порядок наступних перевірок залежить від результатів попередніх. Така програма вимагає складної логічної обробки результатів контролю і тому застосовується переважно в універсальних АСК, в яких застосовуються електронно-обчислювальні машини.

Вибір того чи іншого методу побудови програми пошуку несправностей залежить від структури об'єкта контролю та необхідної глибини пошуку.

Слід відзначити, що якість програми пошуку несправ-

ностей істотно впливає на ефективність застосування АСК у системі обслуговування технічних об'єктів. Ефективність пошуку несправностей характеризуються різними можливими витратами: часовими, матеріальними, енергетичними тощо.

Основною задачею раціональної організації пошуку несправностей є скорочення часу та засобів, які витрачаються на пошук. Це можливо при таких програмах, які дозволяють автоматизувати процес пошуку несправностей і тим самим значно зменшити витрати.

При побудові програми пошуку, як правило, потрібно розв'язати дві задачі:

- 1) вибрати найкращий набір контрольованих параметрів об'єкту так, щоб забезпечувався екстремум цільової функції;
- 2) вказати найкращу послідовність контролю вибраних параметрів, щоб процес пошуку був оптимальним.

Найчастіше цільовою функцією оптимізації при розробці програм використовують кількість перевірок в програмі пошуку та середні витрати на визначення одного визначального вихідного параметру (стану) об'єкта контролю.

Перша з них застосовується в випадках, коли витрати на контроль вихідних параметрів функціональних елементів та імовірність різних станів об'єкта контролю однакові, а інша – в тих випадках, коли витрати на контроль різних параметрів та імовірність станів об'єкта контролю не однакові.

На основі цих цільових функцій розроблені оптимальні алгоритми пошуку несправностей та отримані точні рішення та докази оптимальності шляхом застосування математичних методів [17].

Приведемо наступні способи побудови програми, які застосовуються для контролю працездатності та пошуку несправностей технічного пристрою:

- ◆ спосіб послідовного функціонального аналізу;
- ◆ половинної розбивки;
- ◆ побудова програми пошуку по способу час – імовірність;

- ◆ спосіб з використанням інформаційного критерію;
- ◆ метод гілок і меж;
- ◆ побудова програм пошуку по ієрархічному принципу та інші.

Розглянемо деякі з них, що застосовуються при побудові оптимальної програми пошуку несправностей при діагностуванні об'єктів.

12.5. Спосіб послідовного функціонального аналізу

Суть цього методу полягає в наступному. Є технічна система, яка складається з N послідовно з'єднаних функціональних елементів. Для цієї системи визначаються основні функції Φ_i , справність яких дозволить вважати, що контрольована система знаходиться в справному стані та здібна виконувати задані функції.

В якості таких функцій в системі виділяють:

- ◆ функцію випромінювання ВЧ енергії;
- ◆ функцію прийому та перетворення ВЧ сигналів;
- ◆ функцію управління;
- ◆ функцію індикації;
- ◆ функцію електроживлення тощо.

Так, наприклад, якщо в якості об'єкту розглядати радіостанцію, то в якості функцій, що характеризують працездатність станції, будуть функції електроживлення, управління, випромінювання ВЧ енергії, прийому, перетворення та індикації.

Таким чином, контроль працездатності станції буде полягати в контролі виконання вище перерахованих функцій.

Значення основних функцій в будь-який момент часу залежить від значень відповідних аргументів, які характеризують фізичні параметри станції. Так, аргументами функції випромінювання ВЧ енергії $\Phi_{\text{вип}}$ будуть: потужність випромінювання P , несуча частота f_n , тривалість імпульсу t_i , частота слідування

імпульсів F . Отже, $\Phi_{\text{вип}} = f(P, f_{\text{н}}, t_i, F)$. Інші основні функції станції будуть залежати від інших фізичних параметрів.

Для кожного об'єкту, як правило, задані допустимі межі зміни фізичних параметрів, при яких об'єкт працездатний. Таким чином, контроль працездатності такого об'єкту полягає в контролі визначених параметрів від яких залежать основні функції.

У випадку, якщо одна з основних функцій не виконується по одному з своїх аргументів (параметрів), то вважається, що об'єкт несправний і необхідно шукати несправність.

У якості прикладу розглянемо структурну схему простого прийомного пристрою, яка наведена на рис. 12.6.

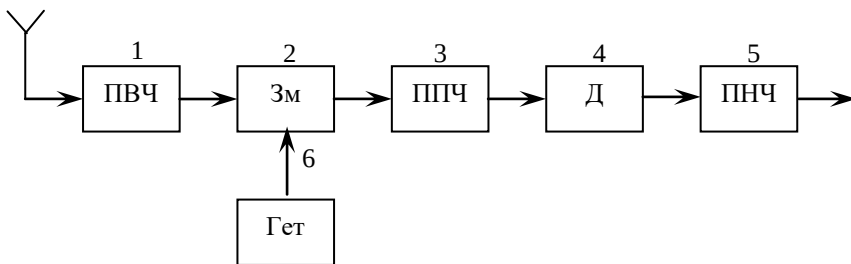


Рис. 12.6. Структурна схема прийомного пристрою

На рис 12.7. приведена схема алгоритму контролю працездатності та пошуку несправності прийомного пристрою із глибиною пошуку до окремого блоку.

Основною функцією прийомного пристрою є функція прийому та перетворення ВЧ сигналу. Ця функція буде виконуватися, якщо при прийомі вхідного сигналу з заданими параметрами на вході прийомного пристрою буде спостерігатись визначений сигнал з заданими параметрами.

Таким чином, контролюючи вихідний сигнал можна приймати рішення про справність або несправність прийомного

пристрою. У випадку несправності прийомного пристрою, контролюючи сигнали на виході кожного функціонального блоку, можна визначити несправний блок.

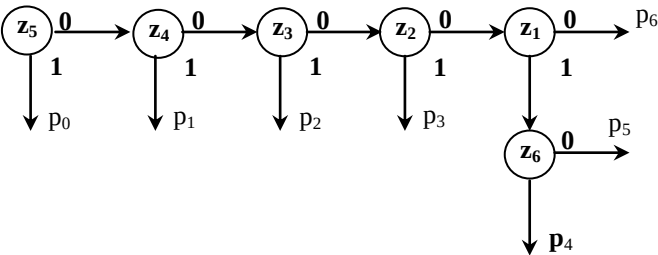


Рис. 12.7. Схема алгоритму контролю працездатності прийомного пристрою

Схему пошуку несправностей, яка представлена на рис. 12.7, називають деревом функцій, а рішення про стан блоків та прийомного пристрою – матрицею рішень (табл. 12.2).

Основною перевагою розглянутого способу побудови програми контролю працездатності та пошуку несправностей є простота логічного аналізу об’єкта контролю, наочність отриманих результатів.

Однак даний метод має недоліки. До них слід віднести те, що одержаний алгоритм пошуку несправностей не є оптимальним ні по часу ні по середнім витратам.

Таблиця 12.2

Позначення по схемі	Рішення
P₀	Приймач справний
P₁	Несправний ПНЧ
P₂	Несправний Д

P_3	Несправний Зм
Закінчення табл. 12.2	
Позначення по схемі	Рішення
P_4	Несправний Гет.
P_5	Несправний ПВЧ

12.6. Метод половинної розбивки

При розробці програми пошуку несправностей радіоелектронних пристроїв та систем, які мають послідовне з'єднання функціональних елементів, дуже часто використовують метод половинної розбивки. Для побудови програми пошуку використовується інформація, яка міститься у функціональній моделі об'єкта контролю.

Розглянемо особливості цього методу. Нехай є система із N послідовно з'єднаних функціональних елементів. Для такої системи вихід із ладу будь-якого i -го елемента ($i = \overline{1, N}$) приведе до непрацездатності системи в цілому.

Для такої системи введемо такі параметри оцінки програми пошуку несправностей: τ_i – середній час перевірки i -го елемента; q_i – імовірність відмови системи через відмову i -го елемента.

Величина q_i визначається із співвідношення

$$q_i = \frac{1 - P_i(t)}{1 - P_c(t)} \quad (12.5)$$

де $P_i(t)$ – імовірність безвідмовної роботи i -го елемента; $P_c(t)$ – імовірність безвідмовної роботи системи.

Розв'язок задачі по пошуку несправного елемента зводи-

ться до знаходження такої послідовності перевірок, при якій для пошуку несправності витрачувалось би мінімум часу.

Розглянемо методику побудови програми пошуку несправності об'єкта контролю. В якості прикладу розглянемо схему пошуку несправностей для об'єкту контролю, зображеного на рис. 12.6. Розділимо об'єкт умовно на дві частини, які містять m і $N-m$ елементів. Очевидно, що несправний елемент з імо-

вірністю $P_1 = \frac{m}{N}$ може знаходитись серед m елементів

з'єднання та з імовірністю $P_2 = \frac{m}{N}$ серед $N-m$ елементів з'єднання.

Математичне сподівання кількості несправних елементів зліва та справа точки поділу визначається наступним виразом:

$$M(m) = mp_1 + (N - m)p_2 = \frac{m^2 + (N - m)^2}{N}. \quad (12.6)$$

Для визначення числа m , при якому дана функція має мінімум, тобто мінімальну кількість несправних елементів зліва і справа від точки поділу, застосуємо вираз:

$$\frac{dM(m)}{dm} = \frac{d}{dm} \left[\frac{m^2 + (N - m)^2}{N} \right]. \quad (12.7)$$

З виразу

$$\frac{1}{N} [2m - 2(N - m)] = 0$$

отримаємо:

$$m = \frac{N}{2}$$

З цього випливає, що при $P_1=P_2=0.5$ несправний елемент з однаковою імовірністю може знаходитись як в лівій частині

з'єднання, так і в правій.

Стосовно схеми рис. 12.6 першим слід контролювати параметр z_3 , так як він ділить об'єкт контролю на дві рівні частини.

При позитивному результаті, коли значення параметра z_3 знаходиться в допустимих межах, вважаємо, що елементи 1-3 і 6 справні, а відмова відбулася в елементах 4,5. Другим буде контролюватись параметр z_5 та ін.

При від'ємному результаті контролю параметра z_3 вважаємо, що елементи 4, 5 справні, а відмова відбулася в елементах 1-3 або 6. В цьому випадку другим контролюється параметр z_1 та ін.

На рис. 12.8. приведена схема пошуку несправностей, яка побудована по методу половинної розбивки.

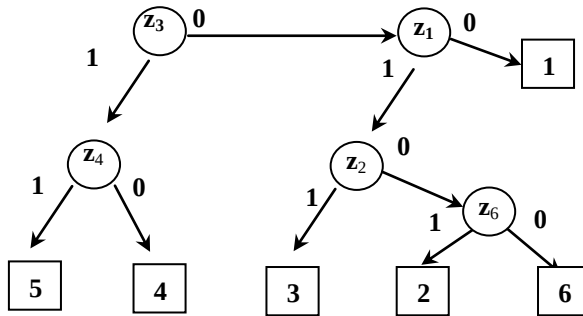


Рис. 12.8. Схема пошуку несправностей

У випадку, коли q_i та t_i мають різні значення, першим необхідно контролювати такий параметр z_i , який ділить об'єкт контролю на частини, імовірність станів яких близька до $1/2$.

При різних q_i і t_i імовірність несправності при перевірці визначається співвідношенням:

$$U_i = \frac{\frac{q_i}{t_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{q_i}{t_i}} \quad (12.8)$$

Для знаходження оптимальної програми несправності поступаємо наступним чином. Визначаємо спочатку математичне сподівання кількості несправних елементів зліва і справа деякої точки поділу множини елементів на дві частини $k = m$.

Математичне сподівання в даному випадку буде визначатись виразом:

$$MX = m \sum_{i=1}^m U_i = (N - m) \sum_{i=m+1}^N U_i = mP_m + (N - m)P_{N-m}$$

де $P_m = \sum_{i=1}^m U_i$ - імовірність знаходження елементів ліворуч точки m ;

$P_{N-m} = \sum_{i=m+1}^N U_i$ - імовірність знаходження елементів праворуч точки m .

Вказані імовірності несумісних подій пов'язані між собою наступним співвідношенням:

$$P_m - P_{N-m} = 1 \quad (12.9)$$

Число m , при якому досягається мінімум перевірок об'єкта контролю, знаходимо із виразу:

$$\frac{dM}{dm} = \frac{d}{dm} [mP_m + (N - m)P_{N-m}].$$

В результаті одержимо, що

$$P_m - P_{N-m} = 0 \quad (12.10)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (12.9) і (12.10), знаходимо:

$$P_m = P_{N-m} = \frac{1}{2}$$

З цього слідує, що побудова оптимальної програми пошуку несправності зводиться до того, що в деякій точці **m** об'єкт контролю ділиться на дві частини так, щоб з імовірністю 0,5 несправний елемент знаходився ліворуч або праворуч цієї точки. В цій точці проводиться контроль стану лівої і правої частин елементів.

По результатам контролю визначається напрямок наступного поділу на відрізок лівої або правої половини множини елементів з рівними значеннями імовірностей вказаних відрізків ланцюга елементів. Такий поділ проводиться доти, поки не буде визначено стан об'єкта із заданим ступенем глибини пошуку несправності.

Метод половинної розбивки застосовується також в тих випадках, коли в об'єкті контролю несправні декілька елементів, пошук яких здійснюється також послідовно, після усунення вже знайдених несправностей.

12.7. Пошук несправностей по методу “час – імовірність”

Для об'єктів контролю, в яких функціональні елементи з'єднані між собою довільно і мають різні імовірності станів, а також різні вартості контролю параметрів, при побудові програми пошуку несправностей успішно застосовується метод “час – імовірність”.

В цьому випадку припускається, що процес пошуку несправностей оцінюється середнім часом пошуку несправного елемента і часом контролю одного параметра.

Вихідною інформацією для побудови оптимальної програми пошуку несправностей є:

- ◆ функціональна модель об'єкта контролю;
- ◆ таблиця несправностей;
- ◆ імовірності $P(s_i)$ різних станів об'єкта контролю;
- ◆ час контролю t_i параметрів z_i функціональних елементів.

Після контролю працездатності об'єкта контролю та прийняття рішення про його несправність пошук несправних елементів проводиться шляхом послідовної їх перевірки.

Побудова оптимальної програми пошуку несправностей проводиться наступним чином. По таблиці несправностей підбирають набір параметрів z до заданої глибини пошуку, а послідовність контролю вихідних параметрів функціональних елементів встановлюється в порядку зменшення величини відношень

$$\frac{P(s_1)}{t_1} > \frac{P(s_2)}{t_1} > \dots > \frac{P(s_N)}{t_N},$$

де $P(s_1), P(s_2), \dots, P(s_N)$ – імовірність станів елементів об'єкта контролю; $t_1, t_2, \dots, t_N$, - час контролю параметрів z_i функціональних елементів.

Побудована по такому методу програма має мінімальний середній час пошуку будь-якого несправного елемента для даної функціональної моделі об'єкта контролю.

12.8. Побудова програми пошуку з використанням інформаційного критерію

Спосіб побудови програми пошуку несправностей з використанням інформаційного критерію вперше був запропонований І.М.Сіндєєвим [].

Даний спосіб полягає у виборі мінімальної кількості параметрів, які підлягають контролю в об'єкті контролю, та визначення послідовності їх контролю.

В якості вихідних даних для побудови програми пошуку несправностей використовується функціональна модель (схема) об'єкта контролю і таблиця несправностей. Таблиця несправностей подається у вигляді транспонованої матриці станів, де стовпці відповідають всім можливим станам об'єкта контролю, а рядки- вихідним параметрам функціональних елементів. При цьому будь який контрольований параметр може мати лише два виходи: "1"- параметр у допуску і "0"- не в допуску.

Розглянемо хід побудови програми пошуку несправностей об'єкта контролю, який складається із N функціональних елементів. Імовірності станів об'єкта контролю рівні

$$P(s_1) = P(s_2) = \dots = P(s_N) = \frac{1}{N}.$$

Невизначеність стану об'єкта контролю до контролю його параметрів в даному випадку характеризується ентропією

$$H_0 = -\sum_{i=1}^N P(s_i) \log_2 P(s_i) = \log_2 N$$

Відомо, що контроль кожного параметра об'єкта контролю несе деяку кількість інформації відносно його стану

$$I_k = H_0 - H_k \quad (12.11)$$

де H_k – середня умовна ентропія об'єкта контролю при умові контролю k - го параметра.

Оскільки в результаті контролю k -го параметра може бути прийнято лише два рішення: імовірність $P_k(z_k)$ – параметр в допуску та імовірність $P_k(\bar{z}_k)$ – параметр не в допуску, то середня умовна ентропія об'єкта контролю буде дорівнювати:

$$H_k = P_k(z_k)H_{z_k} + P_k(\bar{z}_k)H_{\bar{z}_k} \quad (12.12)$$

де H_{z_k} і $H_{\bar{z}_k}$ - ентропія стану об'єкта контролю після виконання контролю параметра z_k .

Імовірності $P_k(z_k)$ і $P_k(\bar{z}_k)$ знаходять по матриці станів об'єкта контролю як відношення кількості одиниць і нулів до загальн кількості станів в k -ому рядку, а саме:

$$P_k(z_k) = \frac{m}{n}; \quad P_k(\bar{z}_k) = \frac{N-m}{N} \quad (12.13)$$

Підставивши значення (12.13) в (12.12), отримаємо вираз для середньої умовної ентропії об'єкта контролю:

$$H_k = \frac{m}{N} \log_2 m + \frac{N-m}{N} \log_2 (N-m). \quad (12.14)$$

Таким чином, в результаті контролю k -го параметра буде отримана наступна кількість інформації:

$$I_k = \log_2 N - \left(\frac{m}{N} \log_2 m + \frac{N-m}{N} \log_2 (N-m) \right).$$

Послідовно обчислюючи кількість інформації I_k , яку отримуємо в результаті контролю кожного параметра z_k ($k = \overline{1, N}$), можна визначити значення параметрів в порядку складання величин I_k .

Очевидно, що першим контролюється параметр z_k , який дає максимальну кількість інформації. Після контролю об'єкт контролю буде володіти ентропією H_k , яка характеризує новий стан об'єкта контролю. Другим для контролю об'єкту вибирається параметр z_k , який має найбільшу умовну інформацію.

В результаті контролю h -го параметру буде отримана така кількість інформації відносно нового стану об'єкта контролю:

$$I(z_n/z_k) = H_k - H(z_n/z_k).$$

Таким чином, після контролю першого параметра необхідно знову визначити кількість інформації, яка отримується при контролі всіх залишених параметрів відносно початкового стану, який характеризується ентропією H_k .

Умовна ентропія в цьому випадку вираховується за формою:

$$H(z_n/z_k) = p(z_n/z_k)H_{z_n/z_k} - p(\bar{z}_n/z_k)H_{\bar{z}_n/z_k} + \\ p(z_n/\bar{z}_k)H_{z_n/\bar{z}_k} + p(\bar{z}_n/\bar{z}_k)H_{\bar{z}_n/\bar{z}_k},$$

де $p(z_n/z_k) = \frac{m_1}{N}$ - імовірність позитивного рішення при контролі параметра z_h при умові позитивного рішення при контролі параметра z_k ; m_1 - кількість одиниць в h - рядку таблиці станів відносно m одиниць в k - му рядку; m_2 - кількість одиниць в h - рядку відносно $N-m$ нулів в k - му рядку;

$$p(\bar{z}_n/z_k) = \frac{m - m_1}{N}; \quad p(z_n/\bar{z}_k) = \frac{m_2}{N};$$

$$p(\bar{z}_n/\bar{z}_k) = \frac{N - (m + m_2)}{N};$$

$$H_{z_n/z_k} = \log_2 m_1; \quad H_{\bar{z}_n/z_k} = \log_2 (m - m_1);$$

$$H_{z_n/\bar{z}_k} = \log_2 m_2; \quad H_{\bar{z}_n/\bar{z}_k} = \log_2 [N - (m + m_2)].$$

По максимуму умовної інформації вибирається другий параметр для контролю. Аналогічно вибираються і решта параметрів. Даний процес продовжується доки збільшення кількості контрольованих параметрів призводить до зниження ентропії об'єкта контролю.

Розглянемо приклад побудови програми пошуку

несправностей з використанням інформаційного критерію. Для цього використовуємо функціональну модель об'єкта контролю, наведену на рис. 12.5, та матрицю станів (табл. 12.3).

Таблиця 12.3

S_i	Z_i				
	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
S_1	0	0	1	1	0
S_2	1	0	1	1	0
S_3	1	0	0	0	0
S_4	1	1	1	0	0
S_5	1	1	1	1	0

Враховуючи, що імовірність різних станів об'єкта контролю однакова, то ентропія його до контролю параметрів буде

$$H_o = \log_2 5 = 2.23.$$

Кількість інформації при контролі кожного параметра дорівнює:

$$I_1 = H_o - \left(\frac{4}{5} \log_2 4 + \frac{1}{5} \log_2 1 \right) = 0.72;$$

$$I_2 = H_o - \left(\frac{2}{5} \log_2 2 + \frac{3}{5} \log_2 3 \right) = 0.972;$$

$$I_3 = H_o - \left(\frac{4}{5} \log_2 4 + \frac{1}{5} \log_2 1 \right) = 0.72;$$

$$I_4 = H_o - \left(\frac{3}{5} \log_2 3 + \frac{2}{5} \log_2 3 \right) = 0.972;$$

Як бачимо, параметр z_2 дає найбільшу кількість інфор-

мації. Після його контролю можна прийняти два рішення:

1) якщо значення параметра z_2 у допуску, то елементи 1-3 справні, а несправність знаходиться в елементах 4 або 5;

2) якщо значення параметра z_2 не в допуску, то несправність знаходиться в елементах 1-3, а елементи 4 і 5 справні.

Відповідно з цими рішеннями перебудуємо матрицю станів (див. табл. 12.4.).

Таблиця 12.4

z_i	s_i				
	s_4	s_5	s_1	s_2	s_3
z_2	1	1	0	0	0
z_1	1	1	0	1	1
z_3	1	1	1	1	0
z_4	0	1	1	1	0

Визначимо кількість інформації, яку дає контроль параметрів z_1, z_3 і z_4 , і знайдемо другий параметр, що підлягає контролю, при умові, що контроль першого параметра вже відбувся.

Опускаючи проміжні обчислення, приведемо кінцевий результат визначення кількості інформації яку дає контроль параметрів z_1, z_3 і z_4 .

$$I(z_1/z_2) = 0,548; \quad I(z_3/z_2) = 0,548;$$

$$I(z_4/z_2) = 0,948.$$

Отже, другим для контролю вибираємо параметр z_4 і знову перебудуємо матрицю станів (див. табл. 12.5). Для цього записуємо першим рядком контрольований параметр z_4 , а решту в порядку зростання номерів.

Потім знову для решти параметрів визначаємо кількість інформації при умові контролю перших двох параметрів:

Таблица 12.5

z_i	S_i				
	S_5	S_4	S_1	S_2	S_3
z_4	1	0	1	1	0
z_1	1	1	0	1	1
z_3	1	1	1	1	0

$$I(z_1/z_2, z_4) = H(z_4/z_2) - H(z_1/z_2, z_4)$$

де

$$\begin{aligned} H(z_1/z_2, z_4) = & p(z_1/z_2, z_4)H_{z_1/z_2, z_4} + p(\bar{z}_1/z_2, z_4)H_{\bar{z}_1/z_2, z_4} + \\ & + p(z_1/\bar{z}_2, z_4)H_{z_1/\bar{z}_2, z_4} + p(\bar{z}_1/\bar{z}_2, z_4)H_{\bar{z}_1/\bar{z}_2, z_4} + \\ & + p(z_1/z_2, \bar{z}_4)H_{z_1/z_2, \bar{z}_4} + \\ & + p(\bar{z}_1/z_2, \bar{z}_4)H_{\bar{z}_1/z_2, \bar{z}_4} + p(\bar{z}_1/\bar{z}_2, \bar{z}_4)H_{\bar{z}_1/\bar{z}_2, \bar{z}_4} \end{aligned}$$

На рис. 12.9 наведена схема пошуку несправностей, яка

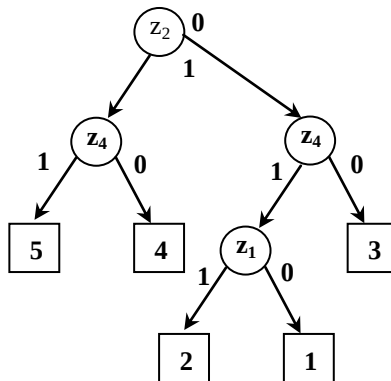


Рис. 12.9. Схема пошуку несправностей

побудована на основі інформаційного критерію для об'єкта контролю, функціональна схема якого наведена на рис. 12.6.

Якщо в ході перетворень вихідної матриці зустрічаються параметри, що не дають ніякої інформації ($I=0$), то їх не враховують при паралельних обчисленнях.

Таким чином, для пошуку несправностей в об'єкті контролю, який представлений функціональною моделлю рис. 12.6, досить контролювати послідовність із трьох параметрів: z_2 , z_4 та z_1 .

12.8. Оптимальний пошук одного несправного елемента

Розглянемо технічну систему як об'єкт контролю, яка складається із n елементів (множина G), з'єднаних між собою відповідними функціональними зв'язками. Кожний із елементів системи може знаходитись в одному із двох можливих станів: справності або відмови. Імовірність справного стану i -го елемента позначається p_i , а імовірність відмови – q_i . Величини p_i і q_i зв'язані між собою співвідношенням

$$q_i = 1 - p_i.$$

Припускається, що відмови окремих елементів системи взаємно незалежні.

Контроль працездатності та пошуку несправності, якщо система непрацездатна, зводиться до послідовного застосування спеціальних тестів, кожний з яких перевіряє справність цілком визначеної множини елементів системи.

Основною метою перевірки системи є:

- ◆ перевірити справність системи;
- ◆ відшукати несправність, якщо система несправна.

В першому випадку досить застосувати тест, який перевіряє всю систему. Проте інколи буває так, що застосування

такого загального тесту принципово неможливо або недоцільно, оскільки він вимагає дуже істотних витрат часу та засобів, а тому вигідніше використовувати послідовність декількох простих тестів.

Назвемо результати перевірки тесту T_1 успішним, якщо в множині G_1 , що ним перевіряється, не виявлено несправних елементів.

Якщо під час перевірки були виявлені несправні елементи, то результат перевірки назвемо успішним. При цьому вважаємо, що серед елементів системи, які перевіряються, є хоч принаймні один несправний.

Відмітимо, що в загальному випадку множини G_i , при перевірці їх різними тестами, можуть перетинатись.

Сукупність тестів, які використовують для контролю, задають у вигляді таблиці, рядки якої відповідають тестам, а стовпці – елементам. При цьому знак “+” на перехресті означає, що даний елемент може бути перевірений даним тестом (див. табл. 12.6).

Задача при пошуку несправності системи полягає у побудові такої програми перевірки, при якій мета цієї перевірки досягається при мінімальних в середньому витратах на її проведення.

Складення програми контролю полягає у виборі із всієї сукупності тестів $\{T_1\}$, що забезпечують вимоги по контролю працездатності системи, вибрати необхідну групу тестів та визначити порядок їх застосування так, щоб процес перевірки був оптимальним відносно прийнятого критерію.

Порядок застосування тестів представляє собою слідуючи процедуру. Спочатку визначається оптимальна умовна послідовність перевірок для вихідної множини G . Перший етап перевірки продовжується до тих пір, поки черговий тест не виявиться неуспішним (несправність виявлена). На цьому етапі перевірка справності системи закінчується.

Пошук несправності системи починає другий етап процедури. Після першого етапу перевірки справності системи

маємо: вся множина елементів системи в даному випадку поцілена на три наступні множини (див. рис. 12.10):

G' - множина елементів, які ще не перевірялись;

G^* - множина елементів, які були охоплені даним неуспішним тестом за відрахуванням тих елементів цієї множини, які були перевірені до цього успішними тестами;

$G^{(0)}$ - множина елементів, справність яких була підтверджена успішними тестами.

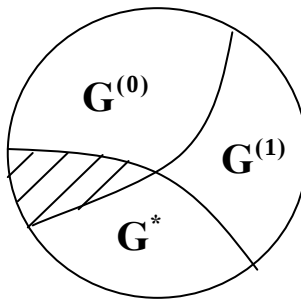


Рис.12.10

Як бачимо, на другому етапі роль вихідної множини грає G^* . Для всіх тестів сукупності $\{T\}$ виконується переоцінка імовірностей успішної реалізації, виходячи із умов застосування їх до множини G^* .

Після локалізації всіх несправних елементів у множині G^* далі процес пошуку несправностей проводиться у множині G' . Знову для всіх тестів сукупності $\{T\}$ виконується відповідна переоцінка імовірностей та здійснюється пошук несправностей з використанням вище описаної методики.

Розглянемо приклад пошуку одного несправного елемента системи. Маємо систему із n елементів. Відомо, що в системі відмовив рівно один елемент. Потрібно знайти несправний

елемент при мінімальних середніх витратах.

Розглянемо наближений алгоритм пошуку одного несправного елемента системи при довільних пересічних тестах. Нехай до початку m -го кроку процесу перевірки системи проведена послідовність тестів $\sigma^{(0)} = \{T_1, \dots, T_{m-1}\}$ і необхідно знайти несправний елемент у множині $G^{(0)}$.

Алгоритм пошуку одного несправного елемента наступний:

1) визначаються умовні імовірності відмови $\tilde{q}_i^{(0)}$ i -го елемента, якщо в множині $G^{(0)}$ є рівно один елемент, що відмовив, то

$$\tilde{q}_i^{(0)} = \frac{q_i}{p_i};$$

2) обчислюється для кожного тесту T_j імовірність неуспішного результату перевірки множини $G^{(0)}$

$$Q_j^{(0)} = \sum_{i \in G_j \cap G^{(0)}} \tilde{q}_i^{(0)}$$

3) обчислюють для кожного тесту T_j пов'язані з ним витрати $\tau_j^{(0)}$ з урахуванням того, що вже проведена послідовність тестів $\sigma^{(0)}$.

Однак слід відмітити, що витрати на проведення тесту T_f можуть як зменшуватись, так і збільшуватись при умові проведення інших тестів. Наприклад, можуть бути підключені при попередніх перевірках необхідні для даного тесту прилади або навпаки;

4) для кожного тесту T_j визначається величина

$$q_j = \frac{\tau_j^{(0)}}{Q_j^{(0)}};$$

5) вибирається такий тест T_k , для якого q_k мінімальна

$$g_k = \min_{1 \leq j \leq l} g_j ;$$

6) застосовується тест T_k :

а) якщо тест T_k закінчується успішно, то необхідно шукати несправний елемент у множині

$$G^{(1)} = G^{(0)} / G_k ;$$

б) якщо тест T_k закінчується неуспішно, то задача зводиться до пошуку несправного елемента у множині

$$G^{(1)} = G_k \cap G^{(0)} ;$$

7) фіксується нова послідовність застосованих тестів, яка включає в себе: послідовність $\sigma^{(0)}$ та останній застосований тест T_k

$$\delta^{(1)} = \{\sigma^{(0)}, T_k\} ;$$

8) до множини $G^{(1)}$ застосовується та ж методика перевірки, починаючи з п. 1, з відповідною заміною верхнього індексу (0) на індекс (1). Програма пошуку продовжується доки в п.6 на деякому кроку k сформується така множина $G^{(k)}$, яка складається з одного елемента.

Якщо для виконання поточних обчислень та вибору чергового тесту використати ЕОМ із заздалегідь внесеними у її пам'ять вихідних даних (імовірності відмов, тривалості перевірок, характеристики тестів) та програми забезпечення, то описану вище програму пошуку несправностей можна реалізувати дуже швидко.

По результатам обчислення програми отриманого пошу-

ку складають інструкцію черговості застосування тестів в залежності від результатів попередніх перевірок, наприклад, якщо тест T_k успішний, то далі провести тест T_i (див. рис. 12.11).

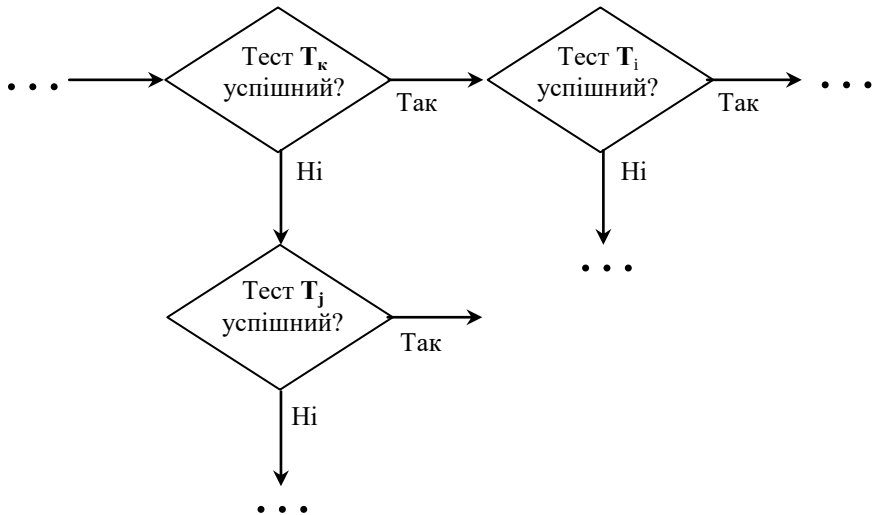


Рис. 12.11. Приклад інструкції для перевірки системи

Приклад 12. 1. Система складається з 6 елементів. Вона може бути перевірена 5 тестами. Опис тестів наведено в табл. 12.6.

Витрати, які пов'язані з проведенням кожного тесту, відповідно складають:

$$t_1=1, t_2=2, t_3=1.2, t_4=1.5, t_5=2.5.$$

Припускається, що величина t_i не залежить від порядку застосування тестів.

Апріорні імовірності відмови елементів відповідно дорівнюють:

$$\begin{aligned} q_1=0.1; q_2=0.1; q_3=0.2; \\ q_4=0.3; q_5=0.1; q_6=0.05. \end{aligned}$$

Відомо, що в системі є тільки один відмовлений елемент. Необхідно знайти цей елемент при мінімальних середніх витратах на проведення необхідних для цього тестів.

Таблиця 12.6

Номер елемента	Тест				
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
1	+			+	+
2	+	+			
3			+		+
4		+			+
5	+		+		
6	+		+	+	

Рішення.

1) знаходимо величини $\tilde{q}_i$ для кожного елемента:

$$\tilde{q}_1 = 0.11; \quad \tilde{q}_2 = 0.11; \quad \tilde{q}_3 = 0.25;$$

$$\tilde{q}_4 = 0.43; \quad \tilde{q}_5 = 0.11; \quad \tilde{q}_6 = 0.05;$$

2) обчислюємо величини $Q_j^{(0)}$ для кожного тесту:

$$Q_1^{(0)} = \tilde{q}_1 + \tilde{q}_2 + \tilde{q}_5 + \tilde{q}_6 = 0.38; \quad Q_2^{(0)} = \tilde{q}_2 + \tilde{q}_4 = 0.54;$$

$$Q_3^{(0)} = \tilde{q}_3 + \tilde{q}_5 + \tilde{q}_6 = 0.41; \quad Q_4^{(0)} = \tilde{q}_1 + \tilde{q}_6 = 0.16;$$

$$Q_5^{(0)} = \tilde{q}_1 + \tilde{q}_3 + \tilde{q}_4 = 0.79;$$

3) визначаємо для кожного тесту величини g:

$$g_1^{(0)} = \frac{1}{0.38} = 2.63; \quad g_2^{(0)} = \frac{2}{0.54} = 3.70;$$

$$g_3^{(0)} = \frac{1.2}{0.41} = 2.93; \quad g_4^{(0)} = \frac{1.5}{0.16} = 9.37;$$

$$g_5^{(0)} = \frac{2.5}{0.79} = 3.16;$$

Із обчислення g_i видно, що першим тестом повинен бути T_1 , так як g_1 є найменшою величиною.

Проведення тесту T_1 може бути успішним і неуспішним. Розглянемо перший результат, тобто несправний елемент знаходиться серед тих елементів, які не були охоплені тестом T_1 . Таким чином, залишається множина елементів $G^{(1)} = \{3, 4\}$.

4) обчислимо $Q_j^{(1)}$ для кожного із залишених тестів:

$$Q_2^{(1)} = \tilde{q}_2 + \tilde{q}_4 = 0.54; \quad Q_3^{(1)} = \tilde{q}_3 + \tilde{q}_5 + \tilde{q}_6 = 0.41;$$

$$Q_4^{(1)} = \tilde{q}_1 + \tilde{q}_6 = 0.16; \quad Q_5^{(1)} = \tilde{q}_1 + \tilde{q}_3 + \tilde{q}_4 + \tilde{q}_5 = 0.9;$$

5) обчислимо величину g_i :

$$g_2^{(1)} = \frac{2}{0.54} = 3.7; \quad g_3^{(1)} = \frac{1.2}{0.41} = 2.92;$$

$$g_4^{(1)} = \frac{1.5}{0.46} = 3.26; \quad g_5^{(1)} = \frac{2.5}{0.9} = 2.77.$$

Таким чином, після успішного тесту T_1 слід проводити T_5 . В свою чергу проведення тесту T_5 може бути успішним і неуспішним. Розглянемо на цей раз другий результат: несправний елемент знаходиться у множині серед елементів $G^{(1)} = \{3, 4\}$, тобто це один із елементів 3 або 4, що відноситься до множини $G^{(2)} = \{3, 4\}$;

5) обчислимо величину $Q_j^{(2)}$ для кожного із залишених тестів:

$$Q_2^{(2)} = \tilde{q}_2 = 0.11; \quad Q_3^{(2)} = \tilde{q}_3 = 0.25;$$

$$Q_4^{(2)} = 0;$$

б) обчислимо величини g_j :

$$g_2^{(2)} = \frac{2}{0.11} = 18.18; \quad g_3^{(2)} = \frac{1.2}{0.25} = 4.8.$$

Із обчислення видно, що слід проводити тест T_3 .

Якщо проведення цього тесту буде неуспішним, то несправність системи знайдена – це елемент 3. Якщо проведення тесту T_3 буде успішним, то несправним елементом системи є елемент 4.

На рис. 12.12 наведено інструкцію перевірки системи для прикладу 12.1.

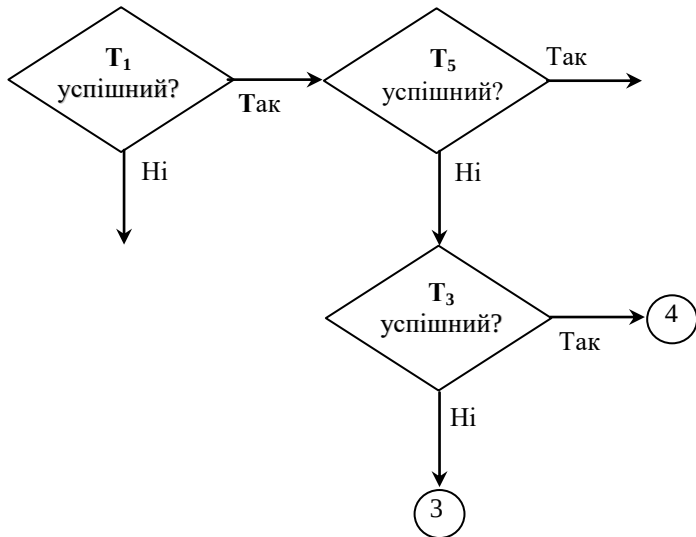


Рис. 12.12

В колах вказані номери несправних елементів, які були виявлені даною перевіркою.

12.9. Ефективність контролю

В якості основної характеристики контролю технічних пристроїв розглядалась достовірність. Це дуже важливий показник якості контролю, який характеризує його здібність давати правильний висновок про стан пристрою(об'єкту).

Разом з тим слід відмітити деяку обмеженість цього показника, оскільки він не дозволяє оцінити вплив інших властивостей контролю на якість функціонування об'єктів після їх контролю.

Цей недолік достовірності, як узагальнюючого показника якості контролю, обумовив необхідність ввести більш загальну характеристику контролю — ефективність контролю.

Під **ефективністю контролю** слід розуміти відношення ефективності функціонування пристрою при наявності та відсутності контролю. Таке визначення дозволяє розглядати операцію контролю як один з елементів системи технічного обслуговування пристрою та оцінити його якість саме з цих позицій. При цьому достовірність є одною з багатьох факторів, що впливають на ефективність контролю.

Таким чином, визначаючи ефективність контролю через ефективність роботи пристрою, який контролюється, одержують різні кількісні критерії для її оцінки. Як правило, при оцінці ефективності роботи пристрою використовують два методи в залежності від умов його використання .

В тих випадках, коли пристрій призначений для виконання конкретної задачі, в якості показника вживають імовірність виконання цієї задачі. В якості прикладу застосування цього показника на практиці для оцінки ефективності є пристрої одноразового використання.

В тих випадках, коли маємо справу з пристроями багаторазового використання, найбільш часто для оцінки ефективності

контролю в якості показника використовують виграш, який одержують від використання пристрою. Найчастіше в якості такого показника при оцінці використовується середній прибуток, який одержують від застосування пристрою.

Розглянемо критерії оцінки ефективності контролю, що базується на вище відмічених методах.

Нехай маємо пристрій, ефективність якого $E(t)$ визначається як імовірність виконання ним потрібної задачі на рівні, що вимагається від нього, в заданий час та в заданих умовах. Цей показник ϵ , при відсутності обслуговування, монотонно спадною функцією часу. Його значення для реальних пристроїв в процесі їх виготовлення заводом-виробником та в процесі експлуатації можуть бути істотно меншими величини, що вимагається від них, в результаті чого виникає необхідність в застосуванні періодичного контролю стану пристрою та відновлення його ефективності шляхом проведення відповідних ремонтно-профілактичних заходів.

Виграш в ефективності використання пристрою, який одержують в результаті проведення технічного обслуговування, визначається за формулою:

$$\Delta E(t) = E(t/t_k) - E(t), \quad t \geq t_k, \quad (12.15)$$

де $E(t/t_k)$ — ефективність пристрою при умові, що в момент часу t_k було проведено його обслуговування, $E(t)$ — ефективність пристрою при умові, що обслуговування не проводилось

Отже, показник (12.15) є важливою оцінкою ефективності обслуговування пристроїв в цілому.

Очевидно, що приріст ефективності пристрою можливий за умови проведення ремонтно-профілактичних заходів, при цьому величина цього приросту залежить як від якості їх проведення, так і від якості контролю.

Якщо припустити, що зміст обслуговування та його якість є фіксованими, то приріст (12.15) можна використати для оцінки ефективності контролю при даній стратегії обслу-

говування. Зокрема, при цьому зручно вважати обслуговування ідеальним, тобто відновлення працездатного стану відбувається миттєво з імовірністю, яка дорівнює одиниці.

Таким чином, показник (12.15) можна розглядати як критерій ефективності контролю.

На практиці для оцінки ефективності обслуговування використовують нормований показник ефективності, який визначається співвідношенням:

$$E_k(t) = \frac{E(t/t_k) - E(t)}{E_i(t/t_k) - E(t)}, \quad t \geq t_k, \quad (12.16)$$

де $E_i(t/t_k)$ — ефективність пристрою після ідеального (безпомилкового) контролю.

Діапазон можливих значень показника $E_k(t)$ знаходиться між 0 та 1.

При $E_k(t)=0$ означає, що контроль відсутній, а при $E_k(t)=1$ — має місце ідеальний контроль.

Критерій ефективності контролю, що визначається співвідношенням (12.16), визначає відносний виграш в ефективності пристрою, який може бути досягнутий при застосуванні контролю.

Даний критерій дозволяє кількісно оцінити вплив якості контролю як елемента системи технічного обслуговування при виконанні задачі пристроєм.

В цьому відношенні даний показник має більш широке значення порівняно з показниками достовірності.

Очевидно, що якість контролю тим вища, чим ближче показник його ефективності до одиниці. На практиці при певних умовах цей показник використовують для кількісного порівняння різних видів контролю.

Крім переваги, показник ефективності контролю має ряд істотних недоліків. Одним з них є складність його практичного застосування для оцінки ефективності різних пристроїв,

оскільки вона, залежить від багатьох факторів, які дуже важко врахувати.

Оцінку цього показника можна спростити, якщо значну частину факторів, які не пов'язані з контролем та обслуговуванням, виключити із розгляду. Це дасть можливість використати для оцінки ефективності контролю формулу, яка застосовується для оцінки ефективності складного пристрою:

$$E(t) = E_0(t) \cdot P(t), \quad (12.17)$$

де $E_0(t)$ — ефективність пристрою, яка не залежить від операцій контролю та обслуговування (має місце ідеальна надійність пристрою); $P(t)$ — імовірність безвідмовної роботи на протязі часу t .

Підставляючи (12.17) в формулу (12.16), одержимо:

$$E_K(t) = \frac{P(t/t_k) - P(t)}{P_i(t/t_k) - P(t)}, \quad t \geq t_k, \quad (12.18)$$

Як випливає з (12.18), для оцінки ефективності контролю можна використати відносний виграш в надійності пристрою, який може бути досягнутий в результаті застосування періодичного контролю. Вихідні дані для цього можна одержати значно легше, ніж для ефективності.

Показник (12.18) дозволяє більш просто та з більшою повнотою, ніж достовірність, характеризувати властивості контролю. Проте, при цьому залишається питання, якою ціною витрат досягнутий той чи інший виграш в надійності об'єктів. Але це вже інше питання, відповідь на яке не входить в наш розгляд.