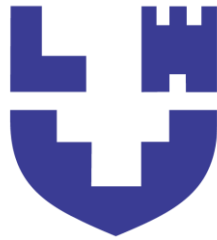


**Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет**



НАДІЙНІСТЬ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ АПАРАТАМИ

Конспект лекцій

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Системи керування безпілотними апаратами»
галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2025

УДК 621.396
НГ40

До друку

Голова вченої ради факультету комп'ютерних та інформаційних технологій _____ І. С. Кондіус

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Н. П. Поліщук

Затверджено вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____ 2025 року.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ, протокол № _ від «__» _____ 2025 року.

Завідувач кафедри АКІТ _____ О. Ю. Повстяной

Укладач: _____ Л. О. Гуменюк, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ.

Рецензент: _____ Р. Г. Редько, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної механіки та мехароніки ЛНТУ.

Відповідальний за випуск: _____ О. Ю. Повстяной, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ЛНТУ.

Надійність та діагностування систем керування безпілотними апаратами:
конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Системи керування безпілотними апаратами» галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка денної та заочної форм навчання / уклад. Л. О. Гуменюк. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 58 с.

Конспект лекцій охоплює основи теорії надійності, методи розрахунку показників надійності, а також методи підвищення надійності технічних засобів. Розглянуті питання технічної діагностики, поняття про дефекти і їх види, розглянуто способи побудови алгоритмів пошуку несправностей.

Конспект лекцій укладено в результаті опрацювання опублікованих джерел [1-10].

ЗМІСТ

1	ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ	4
	1.1 Основні цілі та задачі надійності	5
	1.2. Класифікація систем	8
	1.3. Основні поняття і визначення	9
2	ВІДМОВА ОБ'ЄКТУ	13
	2.1. Класифікація відмов	13
	2.2. Види надійності	21
	2.3. Методологія дослідження надійності	24
3	МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ	25
	3.1. Методи забезпечення надійності невідновлюваних об'єктів ..	25
	3.2. Методи забезпечення надійності відновлюваних об'єктів	28
4	ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ЧАСУ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ	32
	4.1. Закони розподілу неперервних випадкових величин	33
	4.2. Закони розподілу дискретних випадкових величин	38
5	СИСТЕМИ З РЕЗЕРВУВАННЯМ	40
6	РОЗРАХУНКИ СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ	47
	6.1 Системи з послідовним з'єднанням елементів	48
	6.2 Системи з паралельним з'єднанням елементів	49
	6.3 Системи типу " m з n "	51
	6.4. Місткові схеми	55
	6.6 Комбіновані системи	62
7	ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ	63
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	70

1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

Наука про надійність – молода наука. Її формування відноситься до середини минулого сторіччя. Але це не означає, що люди не цікавилися і не займалися питаннями надійності створюваної ними техніки до тих пір, поки не виникла наука про надійність. З перших кроків розвитку техніки стояло завдання зробити технічний пристрій таким, щоб він працював надійно. Середина минулого сторіччя ознаменувалася новим якісним стрибком в розвитку техніки – широким розповсюдженням великих і малих автоматизованих систем управління (АСУ) різного призначення. Створення і використання такої техніки без спеціальних заходів по забезпеченню її надійності не має сенсу. Небезпека полягає не тільки в тому, що нова складна техніка не буде працювати (виникатимуть простої), але головним чином в тому, що відмова в її роботі, в тому числі і неправильна робота, може привести до катастрофічних наслідків.

Очевидно, що нова автоматизована техніка, що виконує відповідальні функції, має право на існування тільки тоді, коли вона надійна. З розвитком і ускладненням техніки ускладнювалася і розвивалася проблема її надійності. Для вирішення її була потрібна розробка наукових основ нового наукового напрямку - наука про надійність. Предмет її досліджень – вивчення причин, що викликають відмови об'єктів, визначення закономірностей, яким відмови підкоряються, розробка способів кількісного вимірювання надійності, методів розрахунку і випробувань, розробка шляхів і засобів підвищення надійності.

Проблема надійності виникла з наступних причин.

1) Різке ускладнення виробів, електронної апаратури, велика кількість елементів що входять до складу виробу. Чим складніша і точніша апаратура, тим менш вона надійна.

2) Зростання складності системи перевищує зростання надійності елементів в цій системі.

3) Функція, яку виконує виріб, буває дуже відповідальною і відмова виробу може дорого обійтися.

Приклад: відмова апаратури управління виробничим процесом може привести не тільки до припинення виготовлення продукції, але може викликати серйозну аварію. До яких наслідків можуть привести відмови електронної апаратури військового призначення, враховуючи величезну руйнівну силу зброї.

4) Виключення людини – оператора з процесу управління. Це обумовлено швидким перебігом процесів або шкідливими умовами праці.

Важливим чинником безвідмовності апаратури є здатність людини ухвалювати рішення в управлінні складним об'єктом.

5) Складність умов, в яких здійснюється експлуатація апаратури.

Академік Берг: «Жодне досягнення науки і техніки, наскільки б ефективним воно не було не може бути повноцінно використане, якщо його реалізація залежатиме від «капризів» малонадійної апаратури».

1.1 Основні цілі та задачі надійності

Одна з характерних рис сучасності – створення і застосування систем, що все більш ускладнюються. Ефективність таких систем, тобто здатність оперативно і якісно виконувати поставлені перед ними задачі, багато чим визначається їх надійністю, тобто здатністю системи працювати без відмов на протязі заданих термінів при заданих умовах.

Відмови техніки викликають великі втрати засобів, сил і часу через руйнування об'єктів, необхідність проведення відновлювальних робіт і пов'язаних з ними простоїв обладнання, шкоди від невиконання певних задач. Крім того, недостатня надійність технічних пристроїв негативно впливає на безпеку їх експлуатації.

Проблема надійності по своїй суті є комплексною, системно-технічною, оскільки вона безпосередньо пов'язана з процесами проектування, дослідного відпрацювання, виробництва і використання техніки. Сукупність загальних методів, що дозволяють створювати технічні пристрої з високою надійністю і розраховувати її кількісні показники, складає основу теорії надійності.

Таким чином, умовно в проблемі надійності можна виділити два напрямки: забезпечення надійності та її контроль (розрахунок).

Якщо перший напрямок ґрунтується на рішенні традиційних конструкторських і технологічних задач по створенню високоякісних виробів та правильній їх експлуатації, то другий пов'язаний в основному з застосуванням спеціальних математичних методів.

Основною задачею теорії надійності є розробка кількісних методів оцінювання надійності і визначення найраціональніших методів забезпечення необхідного рівня надійності створюваних систем.

Основні терміни і визначення, що використовуються в теорії надійності визначені стандартом ДСТУ 2860-94, який має назву «Надійність техніки. Терміни та визначення». Тоді, користуючись даним документом, можна дати наступне визначення надійності. *Надійністю є властивість об'єкта зберігати в часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують його здатність виконувати потрібні функції в заданих*

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

Надійність – це складне комплексне поняття, за допомогою якого оцінюють такі важливі характеристики пристроїв, як працездатність, довговічність, безвідмовність, ремонтпридатність, відновлюваність та ін.

Чинники, що впливають на надійність електронної апаратури та надійність виробу.

При аналізі надійності доцільно розглядати три етапи в створенні апаратури або виробу.

1. Проєктування.
2. Виготовлення.
3. Експлуатація.

Чинники, що впливають на надійність при проєктуванні.

1. Кількість і якість елементів в системі робить вплив на надійність.

Збільшення кількості використовуваних елементів приводить до різкого погіршення надійності апаратури. До погіршення надійності приводить застосування менш надійних елементів.

2. Режим роботи елементів.

Найнадійніші елементи, що працюють у важкому, не передбаченому для їх застосування режимі, можуть стати джерелом частих відмов. Для кожного елементу встановлюються технічні умови на режим роботи елементу. Необхідно правильно вибрати режими роботи елементів.

3. Застосування стандартних і уніфікованих елементів різко підвищує надійність системи. Технологія виробництва цих елементів відпрацьована, надійність їх відома.

4. Конструктор повинен передбачити хороший доступ до блоків, елементів апаратури для огляду, ремонту; передбачити сигналізацію про відмову того або іншого елементу.

Чинники, що впливають на надійність в процесі виготовлення.

1. Якість матеріалів. Необхідний хороший вхідний контроль матеріалів і комплектуючих виробів, що поступають від інших підприємств.

2. Якість зберігання матеріалів і комплектуючих виробів.

3. Чистота робочих місць, устаткування, робочого приміщення.

4. Дотримання технології виготовлення і збірки: термообробка, антикорозійні покриття і т.п.

Чинники, що впливають на надійність в процесі експлуатації.

1. Кваліфікація обслуговуючого персоналу. Цей чинник доведений практикою.

2. На надійність впливають зовнішні умови: кліматичні умови, вібрації перевантаження, удари. Часте включення і виключення апаратури небажане.

3. На надійність впливає чинник часу. Тривалість експлуатації апаратури з моменту випуску із заводу до капітального ремонту може складати декілька років.

До кінця цього періоду підвищується небезпека виникнення відмов окремих елементів.

Шляхи підвищення надійності.

1. Усунення впливу чинників, що призводять до зниження надійності апаратури.

2. Резервування (замість одного виробу ставлять два). Другий виріб резервний – якщо відмовить 1-й виріб, то підключають 2-й виріб.

3. Збір під час експлуатації апаратури повних і достовірних даних про відмови і простої апаратури. Ця інформація може використовуватися при рішенні задачі підвищення надійності апаратури.

1.2 Класифікація систем

Надійність технічного пристрою (системи) залежить від складу та кількості елементів (вузлів), які його утворюють, від способу їх об'єднання та від характеристик кожного окремого елемента.

Основним поняттям в теорії надійності є *поняття системи*, під яким розуміють сукупність спільно діючих об'єктів, призначених для виконання заданих функцій. Поділ технічних пристроїв на «системи» та «елементи», що їх утворюють, носить умовний характер і залежить від постановки задачі та мети дослідження. Один і той самий пристрій, наприклад, бортовий комп'ютер літака, може розглядатись і як «система», яка складається з елементів, і як «елемент» більш складної системи – обладнання літака. Залежно від об'єктів досліджень, від тих задач, що поставлені перед спеціалістами, в поняття «система» можуть попадати різні сукупності об'єктів.

В подальшому будемо називати «елементом» будь-який технічний пристрій, який не підлягає подальшому розчленуванню і надійність якого вважається заданою або визначається експериментально. З'єднуючи такі елементи різноманітним чином в «системи», будемо вирішувати задачу визначення надійності системи за надійністю її елементів.

По характеру впливу відмов на виконання задачі системи діляться на прості та складні.

Проста система при відмові елементів або повністю припиняє виконання своїх функцій (виконання поставленої задачі), або продовжує

виконувати їх в повному об'ємі, якщо відмовивший елемент зарезервований. Таким чином, для простої системи поняття відмови є простим відображенням події, що полягає у припиненні виконання системою поставленої задачі.

Складні системи в результаті наявності функціональної надлишковості мають здатність при відмові окремих елементів і підсистем продовжувати виконання задачі при деякому зниженні характеристик ефективності. Існуючі і розроблювані системи у більшості випадків призначаються для експлуатації на протязі тривалого проміжку часу. Для забезпечення їх безвідмовності проводяться спеціальні ремонтно – профілактичні роботи, що об'єднуються в систему профілактичного технічного обслуговування.

1.3 Основні поняття і визначення

Елементи і системи можуть знаходитись у двох станах: працездатному і непрацездатному. Поняття працездатності є одним з основних понять теорії надійності.

Працездатність – це такий стан системи або елемента, при якому вони здатні виконати задані функції, зберігаючи значення заданих параметрів у межах, установлених нормативно-технічною документацією.

Непрацездатність – стан об'єкта, при якому значення хоча б одного заданого параметра, що характеризує здатність виконувати задані функції, не відповідає вимогам, установленим нормативно-технічною документацією.

Справність – стан об'єкта, при якому він відповідає усім вимогам, установленим нормативно-технічною документацією.

Несправність – стан об'єкта, при якому він не відповідає хоча б одній з вимог, установлених нормативно-технічною документацією.

Працездатність і непрацездатність у загальному випадку можуть бути повними або частковими. Цілком працездатний об'єкт забезпечує у визначених умовах максимальну ефективність його застосування. Ефективність застосування в тих же умовах частково працездатного об'єкта менше максимально можливої, але значення її показників при цьому ще знаходяться в межах, установлених для такого функціонування, що вважається нормальним. Частково непрацездатний об'єкт може функціонувати, але рівень ефективності при цьому нижче допустимого. Цілком непрацездатний об'єкт застосовувати по призначенню неможливо.

Поняття «справність» ширше, ніж поняття «працездатність». Працездатний об'єкт, на відміну від справного, зобов'язаний задовольняти лише тим вимогам нормативної документації, виконання яких забезпечує нормальне застосування об'єкта за призначенням. При цьому він може не

задовольняти, наприклад, естетичним вимогам, якщо погіршення зовнішнього вигляду об'єкта не перешкоджає його нормальному (ефективному) функціонуванню.

Очевидно, що працездатний об'єкт може бути несправним, однак відхилення від вимог нормативної документації при цьому не настільки істотні, щоб порушувалося нормальне функціонування.

Подія, яка полягає в порушенні роботоздатності, називається **відмовою**.

Напрацювання – тривалість або об'єм роботи об'єкту, вимірювана в будь-яких неспадаючих величинах (одиниця часу, число циклів навантаження, кілометри пробігу і т. п.).

Об'єкт може працювати безупинно або з перервами. В другому випадку враховується сумарний наробіток.

Безвідмовність називають властивість пристрою зберігати свою працездатність протягом деякого напрацювання без вимушених перерв.

Якщо пристрій не призначений для ремонту або підлягає заміні після першої відмови або відмови в ньому взагалі недопустимі за умов безпеки, то показниками її безвідмовної роботи можуть бути **інтенсивність відмов** і **час безвідмовної роботи**.

Під **інтенсивністю відмов** розуміють ймовірність відмови пристрою, що не ремонтується, за одиницю часу після даного моменту часу за умови, що відмова до цього моменту часу не виникла.

Для пристроїв, які можна ремонтувати, за аналогічні показники зазвичай беруть **напрацювання на відмову**, **параметр потоку відмов** або **ймовірність безвідмовної роботи**.

Напрацюванням на відмову розуміють середнє значення напрацювання пристрою, що ремонтується, між відмовами.

Параметр потоку відмов характеризується середньою кількістю відмов пристрою, що ремонтується, за одиницю часу.

Під **ймовірністю безвідмовної роботи** розуміють ймовірність того, що у заданому інтервалі часу або границях заданого напрацювання не виникне відмова пристрою.

Довговічність – властивість об'єкта зберігати працездатність до настання граничного стану з необхідними перервами для технічного обслуговування і ремонту.

Граничний стан – стан об'єкта, при якому його подальше застосування за призначенням недопустиме або недоцільне. Ознаки (критерії) граничного стану встановлюються нормативно-технічною документацією на даний об'єкт.

Застосування (використання) об'єкту за призначенням припиняється в наступних випадках:

- при неусувному порушенні безпеки;
- при неусувному відхиленні величин заданих параметрів;
- при неприпустимому збільшенні експлуатаційних витрат.

Для деяких об'єктів граничний стан є останнім в його функціонуванні, тобто об'єкт знімається з експлуатації, для інших – певною фазою в експлуатаційному графіку, що вимагає проведення ремонтно-відновлювальних робіт.

Під **ресурсом** розуміють величину напрацювання пристрою аж до його граничного стану.

Технічний ресурс – напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або відновлення експлуатації після ремонту до досягнення граничного стану. (Звичайно вказується, який саме технічний ресурс мається на увазі: до середнього, капітального, від капітального до найближчого середнього ремонту і т.п. Якщо конкретної вказівки немає, то мається на увазі ресурс від початку експлуатації до досягнення граничного стану після усіх видів ремонту, тобто до списання по технічному стану). Для невідновлюваних об'єктів поняття технічного ресурсу і напрацювання повністю співпадають.

Призначений ресурс – сумарне напрацювання об'єкту, досягши якого експлуатація повинна бути припинена незалежно від його стану.

Термін служби – календарна тривалість експлуатації об'єкта від її початку або поновлення після капітального або середнього ремонту до настання граничного стану.

Ремонтпридатність визначається пристосованістю пристрою до попередження, виявлення та усунення відмов та несправностей шляхом проведення профілактичних обслуговувань та ремонтів. Показниками ремонтпридатності є: середній час відновлення, ймовірність виконання ремонту в заданий час і середня вартість профілактичного обслуговування.

Готовність пристрою до переходу від режиму відновлення до робочого режиму оцінюється **коефіцієнтом готовності**, під яким розуміють ймовірність того, що пристрій буде працездатним у довільно вибраний момент часу в проміжках між виконанням планового профілактичного обслуговування.

Показник надійності кількісно характеризує, у якому ступені даному об'єктові присущі визначені властивості, що обумовлюють надійність. Показники надійності можуть мати розмірність (наприклад, середній час відновлення, термін служби) або не мати її (наприклад, ймовірність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності).

Під *експлуатацією об'єкта* розуміється стадія його існування в розпорядженні споживача за умови застосування об'єкта по призначенню, що може чергуватися зі збереженням, транспортуванням, технічним обслуговуванням і ремонтом, якщо це здійснюється споживачем.

2 ВІДМОВА ОБ'ЄКТУ

2.1 Класифікація відмов

Теорія надійності вивчає процеси, що приводять до виникнення відмов, розробляє методи попередження і визначення їх виникнення, а також способи боротьби з відмовами.

Відмовою називається подія, що полягає в порушенні працездатності системи.

Із-за складності фізичних процесів, що приводять до відмови, і неможливості врахувати всі початкові умови, а також випадковий вплив навантажень в процесі експлуатації, на сьогодні прийнято вважати появу відмови випадковою подією, тобто задана структура об'єкта і умови його експлуатації не визначають точно моменти і місце виникнення відмов. Тому для визначення показників надійності необхідно застосовувати відповідний математичний апарат, а саме, теорію випадкових функцій, теорію ймовірності та математичну статистику.

Відмова може виникнути в результаті наявності у об'єкта одного або декількох дефектів. Однак наявність дефектів не завжди буде означати, що виникла відмова. Поняття відмови є одним з найважливіших в теорії надійності. Залежно від ознак відмов розроблена їх класифікація.

За *типом* відмови підрозділяються на:

- ***відмови функціонування*** (виконання основних функцій об'єктом припиняється, наприклад, поломка зубів шестерні);

- ***відмови параметричні*** (деякі параметри об'єкту змінюються в неприпустимих межах, наприклад, втрата точності верстата).

За своєю *природою* відмови можуть бути:

- ***випадкові***, обумовлені непередбаченими перевантаженнями, дефектами матеріалу, помилками персоналу або збоями системи управління і т. п.;

- ***систематичні***, обумовлені закономірними і немінучими явищами, що викликають поступове накопичення пошкоджень: втома, знос, старіння, корозія і т.п.

Основні ознаки класифікації відмов:

- характер виникнення;
- причина виникнення;
- характер усунення;

- наслідки відмов;
- подальше використання об'єкту;
- легкість виявлення;
- час виникнення.

Розглянемо докладніше кожен з класифікаційних ознак.

Характер виникнення: *раптова відмова* – відмова, що виявляється в різкій (миттєвій) зміні характеристик об'єкту;

поступова відмова – відмова, що відбувається в результаті повільного, поступового погіршення якості об'єкту.

Раптові відмови зазвичай виявляються у вигляді механічних пошкоджень елементів (тріщини – крихке руйнування, пробої ізоляції, обриви і т. п.) і не супроводжуються попередніми видимими ознаками їх наближення. Раптова відмова характеризується незалежністю моменту настання від часу попередньої роботи.

Раптова відмова об'єкту може бути наслідком накопичення незворотних змін матеріалів. Раптовою відмова здається лише тому, що не контролюється параметр, при критичному значенні якого настає відмова об'єкту.

Поступові відмови пов'язані із зносом деталей і старінням матеріалів.

Причина виникнення: *конструкційна відмова*, викликана недоліками і невдалою конструкцією об'єкту;

виробнича відмова, пов'язана з помилками при виготовленні об'єкту внаслідок недосконалості або порушення технології;

експлуатаційна відмова, викликана порушенням правил експлуатації.

Характер усунення: *стійка відмова* – яку можливо виправити тільки після проведення ремонтних робіт;

самовиправна – це така відмова, яка може бути виправлена без використання ремонтних робіт, а лише після застосування операції регулювання або саморегулювання;

переміжна відмова – багаторазові збої об'єкту, які характеризуються постійними ознаками);

Наслідки відмов: *незалежна відмова* – яка не пов'язана з виходом з працездатного стану інших елементів

залежна відмова – яка виникає як наслідок від

переходу в непрацездатний стан іншого елемента об'єкта.

Подальше використання об'єкту:

повні відмови, що виключають можливість роботи об'єкту до їх усунення;

часткові відмови, при яких об'єкт може частково використовуватися.

усувні відмови – які можливо усунути за допомогою операції технічного обслуговування, регулювання або відновлення.

неусувні відмови – якщо за рахунок технічного обслуговування параметри об'єкту відновити неможливо і необхідно виконати заміну елемента, який відмовив

Легкість виявлення:

очевидні (явні) відмови – це відмови, виникнення яких приводить до припинення функціонування об'єкта і виявлення яких можливо без використання спеціальних робіт;

приховані (неявні) відмови – це відмови, виявлення яких потребує проведення спеціальних досліджень і їх виникнення може не співпадати з припиненням функціонування об'єкта в цілому.

Час виникнення:

припрацювальні відмови, що виникають в початковий період експлуатації;

відмови при нормальній експлуатації;

відмови зносу, викликані необоротними процесами зносу деталей, старіння матеріалів і пр.

На рисунку 2.1 приведена залежність частоти відмов об'єктів в різні періоди експлуатації: період припрацювання; період нормальної експлуатації; період кінцевої експлуатації.

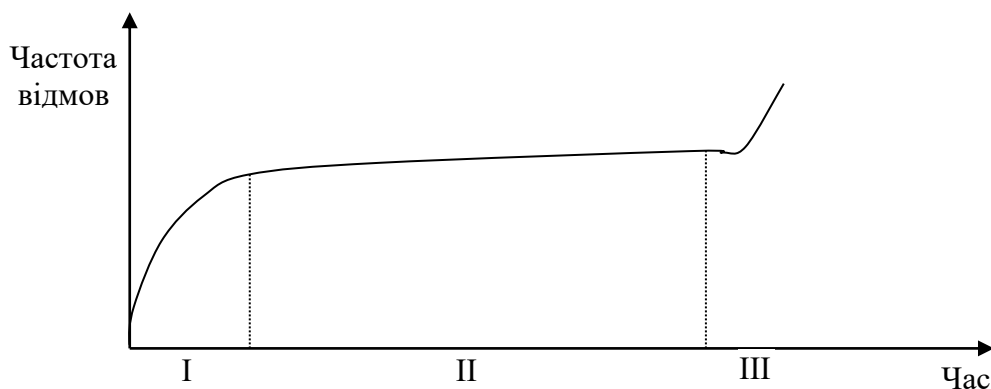


Рисунок 2.1 – Залежність частоти відмов об'єкту в різні періоди експлуатації: I – період припрацювання; II – період нормальної експлуатації; III – період кінцевої експлуатації

Для об'єктів різного призначення і складності застосовують різні показники надійності. На сьогодні виділяють чотири групи об'єктів, що відрізняються показниками і методами оцінки надійності (рис. 2.2):

- 1) об'єкти, що не підлягають ремонту, використовуються до першої відмови;
- 2) об'єкти, що підлягають ремонту, відновлення яких в процесі застосування неможливе (невідновлювані об'єкти);
- 3) об'єкти, що підлягають ремонту, які відновлюються в процесі застосування, але для яких недопустимі перерви у роботі;
- 4) об'єкти, що підлягають ремонту, які відновлюються в процесі застосування, для яких допустимі короткочасні перерви у роботі.

У зв'язку з цим, об'єкти можуть бути:

- *невідновлювані*, для яких працездатність у разі виникнення відмови, не підлягає відновленню;
- *відновлювані*, працездатність яких може бути відновлена, у тому числі і шляхом заміни.

До невідновлюваних об'єктів можна віднести, наприклад: підшипники кочення, напівпровідникові вироби, зубчаті колеса і т.п. Об'єкти, що складаються з багатьох елементів, наприклад, верстат, автомобіль, електронна апаратура, є відновлюваними, оскільки їх відмови пов'язані з пошкодженнями одного або небагатьох елементів, які можуть бути замінені.

У ряді випадків один і той же об'єкт, залежно від особливостей, етапів експлуатації або призначення, може вважатися відновлюваним або невідновлюваним.

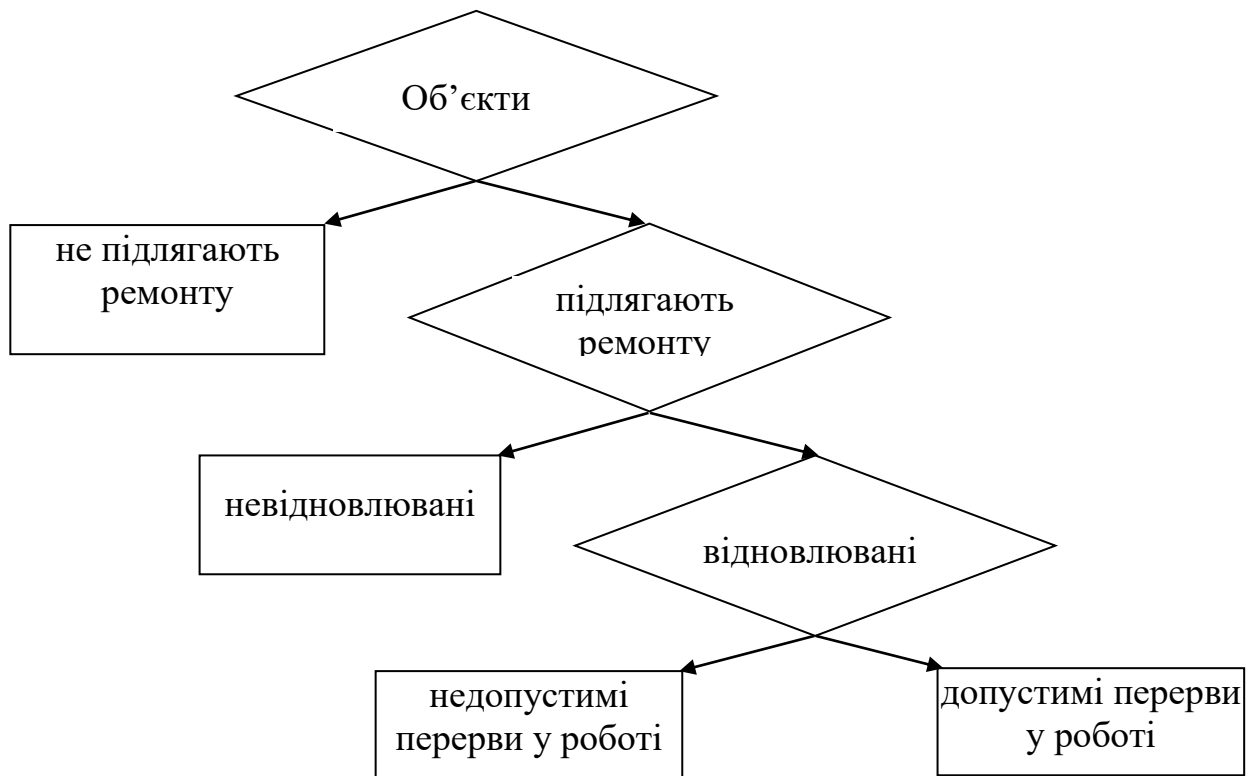


Рисунок 2.2 – Групи об'єктів, що відрізняються показниками надійності

Невідновлюваний об'єкт досягає граничного стану при виникненні відмови або при досягненні заздалегідь установленого гранично припустимого значення терміну служби або сумарного наробітку. Гранично припустимі значення терміну служби і наробітку встановлюються з розумінь безпеки експлуатації в зв'язку з необоротним зниженням ефективності використання нижче припустимої або в зв'язку зі збільшенням інтенсивності відмов, закономірним для об'єктів даного типу після встановленого періоду експлуатації.

Для відновлюваних об'єктів перехід у граничний стан визначається настанням моменту, коли подальша експлуатація неможлива або недоцільна внаслідок таких причин:

- стає неможливим підтримка його безпеки, безвідмовності або ефективності на мінімально припустимому рівні;
- у результаті зношування і (або) старіння об'єкт прийшов до такого стану, при якому ремонт вимагає неприпустимо великих витрат або не забезпечує необхідного ступеня відновлення справності або ресурсу.

Для деяких відновлюваних об'єктів граничним станом вважається такий, коли необхідне відновлення справності може бути здійснене тільки за допомогою капітального ремонту.

Відновлення – процес виявлення й усунення відмови (ушкодження) з метою відновлення його працездатності (справності).

Відновлюваний об'єкт – об'єкт, працездатність якого у випадку виникнення відмови підлягає відновленню в розглянутих умовах.

Невідновлюваний об'єкт – об'єкт, працездатність якого у випадку виникнення відмови не підлягає відновленню в розглянутих умовах.

Наприклад, апаратура метеосупутника на етапі збереження відноситься до відновлюваного, а під час польоту в космосі – невідновлюваного. Більше того, навіть той самий об'єкт можна віднести до того або іншого типу залежно від призначення: ЕОМ, використовувана для неоперативних обчислень, є об'єктом відновлюваним, тому що у випадку відмови будь-яка операція може бути повторена, а та ж ЕОМ, що керує складним технологічним процесом у металургії або хімії, є невідновлюваним об'єктом, тому що відмова або збій призводить до непоправних наслідків.

При аналізі надійності, особливо при виборі показників надійності об'єкта, істотне значення має рішення, що повинне бути прийняте у випадку відмови об'єкта. Якщо в розглянутій ситуації відновлення працездатності даного об'єкта при його відмовленні за якимись причинами визнається недоцільну або нездійсненним (наприклад, через неможливість переривання виконуваної функції), то такий об'єкт у даній ситуації є невідновлюваним. Таким чином, той самий об'єкт залежно від особливостей або етапів експлуатації може вважатися відновлюваним або невідновлюваним.

Другорядні несправності: дефекти і неполадки.

Дефект – це несправність, яка приводить до відмови не відразу, а через деякий час. Приклад: порушення ізоляції дроту, а згодом коротке замикання.

Неполадки – несправності, що не приводять до відмови виробу (перегорання лампочки освітлення шкали).

Відмови в АСУ доцільно підрозділяти на апаратурні і програмні.

Апаратурною відмовою прийнято вважати подію, при якій виріб втрачає працездатність і для його відновлення потрібне проведення ремонту апаратури або заміна виробу, що відмовив, на працездатний.

Програмною відмовою вважається подія, при якій об'єкт втрачає працездатність унаслідок недосконалості програми (недосконалість алгоритму рішення задачі, відсутність програмного захисту від збоїв, відсутність програмного контролю за станом виробу, помилки в представленні програми на фізичному носіїві і т.д.). Характерною ознакою програмної відмови є те, що усувається вона шляхом виправлення програми.

Проте для АСУ, інформаційних мереж і обчислювальної техніки виявилось, що цих понять для характеристики надійності недостатньо. У

практиці створення і використання АСУ знаходять застосування додаткові поняття, без урахування яких не можна повною мірою представити комплексне поняття «надійність». Розглянемо ці поняття.

1. Живучість – властивість об'єкту зберігати працездатність (повністю або частково) умовах несприятливих дій, не передбачених нормальними умовами експлуатації. Головний сенс вимоги до живучості об'єкту полягає не тільки в тому щоб він тривалий час працював безперервно без відмови в нормальних умовах експлуатації і щоб його можна було швидко відремонтувати, але також і в тому щоб він в ненормальних умовах експлуатації зберігав працездатність, хоч би і обмежену.

2. Достовірність інформації, що видається об'єктом. При роботі обчислювальної машини або тракту передачі інформації можуть бути відсутніми відмови. Тому об'єкт може володіти високою безвідмовністю, хорошою довговічністю, зберігаємістю і ремонтоздатністю. Проте в нім можуть мати місце збої, що спотворюють інформацію. У виробі «ламається», «псується» не апаратура, а інформація. Це не менш небезпечна «поломка».

Для систем автоматичного регулювання і управління велике значення мають збої. *Збій* – це подія, що полягає в тому, що в результаті зміни параметрів елементів під впливом внутрішніх або зовнішніх причин система (або елемент) на протязі деякого часу припиняє виконання своїх функцій. Правильна робота апаратури в цьому випадку відновлюється самовільно, без втручання зовні. Таким чином, *збій* – це самоусувна відмова, що приводить до короткочасного порушення працездатності.

Збої особливо небезпечні для систем, в яких використовується ЕОМ, оскільки наслідком збою є спотворення інформації (вихідних даних, управляючих впливів і т. д.), що приводить до неправильного функціонування системи. Складність проблеми полягає в тому, що збій триває незначний час, після чого система знову стає працездатною і встановити наявність спотворення інформації стає достатньо важким. Враховуючи специфіку появи збоїв, необхідно окремо розглядати методи розрахунку надійності і методи забезпечення надійності при наявності збоїв.

2.2 Види надійності

При дослідженні надійності часто ставиться завдання визначити причини, що приводять до формуванню тієї або іншої сторони надійності. Без цього неможливо намітити правильну програму робіт по підвищенню надійності. Це приводить до ділення надійності на:

- апаратну надійність, обумовлену станом апаратури;
- програмну надійність об'єкту, обумовлену станом програм;

- надійність об'єкту, обумовлену якістю обслуговування;
- надійність функціональну.

Особливої уваги заслуговує поняття *Програмна надійність*, оскільки її важлива роль у забезпеченні надійності АСУ є однією з найхарактерніших особливостей у прикладній теорії надійності АСУ. Поняття «Програмна надійність» виникло в результаті наступних основних причин. У інженерній практиці все більше значення набувають програмно-керовані вироби: програмно-керовані верстати; обчислювальні машини і системи машин; системи передачі даних АСУ і ін. Для цих виробів характерне те, що вони є органічним злиттям технічних засобів (апаратура) і програми. Без програмного забезпечення обчислювальний комплекс, або тракт передачі даних, – це «мертвий» набір технічних пристроїв, який оживає тоді і тільки тоді, коли він використовується як єдине ціле з програмою. Тому говорити про надійність таких пристроїв безглуздо, якщо не враховувати впливу програмного забезпечення.

Врахування впливу програмного забезпечення приводить до необхідності виділяти в особливий вид програмну надійність об'єктів.

Надійність функціональна – надійність виконання окремих функцій, що покладаються на систему. АСУ, як правило, система багатофункціональна, тобто вона призначається для виконання ряду функцій, різних по своїй значущості. Вимоги до надійності виконання різних функцій можуть бути різними (наприклад, для функції «розрахунок зарплати» потрібна висока точність, але не вимагається жорсткого обмеження часу). Тому може виявитися доцільним задавати різні вимоги до виконання різних функцій. Прикладом функціональної надійності в АСУ може бути надійність передачі певної інформації в системі передачі даних.

Розглянемо поняття відмови для систем автоматичного регулювання і управління. Для цих систем одним з найважливіших вимог є вимога *стійкості* системи. Якщо система стійка, то в цьому випадку забезпечується підтримання заданого значення деякого параметра (наприклад, курс судна) при різних зовнішніх впливах (хвилювання моря, вітер та ін.).

Відмова одного з елементів системи може привести до порушення стійкості, що представляє собою відмову системи. Порушення стійкості, а, як наслідок, і відмова системи, може трапитись за рахунок зміни параметрів у окремих елементів, що утворюють систему. Тому, виходячи з вимог до процесу функціонування системи, для окремих елементів повинні бути визначені допустимі відхилення їх параметрів (рис. 2.3).

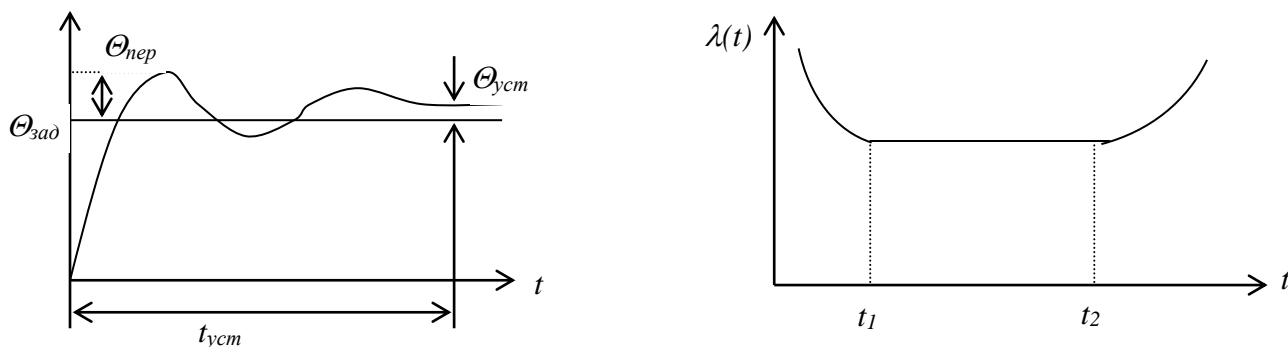


Рисунок 2.3 – Зміна регульованого параметра в часі $\Theta(t)$ та інтенсивності відмов $\lambda(t)$

Для САУ поряд з вимогами стійкості пред'являють вимоги забезпечення заданої якості перехідного процесу. Нехай, наприклад, графік зміни регульованого параметра в часі має вигляд, показаний на рисунку 2.3. Параметрами перехідного процесу є: $\Theta_{пер}$ – перерегулювання; $t_{уст}$ – час встановлення перехідного процесу. Крім того, для більшості систем існує $\Theta_{уст}$ – установа помилка. Для кожної системи величини $\Theta_{пер}$, $\Theta_{зад}$, $t_{уст}$ і $\Theta_{уст}$ є заданими, причому $\Theta_{зад}$ представляє собою усталене значення регульованого параметра.

Відмови окремих елементів, а також зміни параметрів елементів можуть привести до того, що вказані вище параметри будуть перевищувати задані, що також представляє собою відмову системи.

2.3 Методологія дослідження надійності

Теоретичне дослідження і практичне оцінювання показників надійності об'єктів можна віднести до двох етапів, які відрізняються один від одного і постановками задач, і вихідними даними, і використанням математичним апаратом.

Перший етап дослідження надійності називають апріорним аналізом надійності або проектною оцінкою. Апріорний аналіз проводиться на стадії проектування системи, коли конструкторами намічено кілька конкуруючих структурних схем системи. Цей аналіз вважає апріорі повністю відомими кількісні характеристики надійності всіх використовуваних елементів системи. В дійсності ж на стадії проектування вказані апріорні дані конструктор має лише для тих типів елементів, які тривалий час знаходились в експлуатації. Для нових елементів немає достовірних кількісних

характеристик надійності, і їх можна задавати лише по аналогії з показниками елементів, що застосовувались або по інтуїції.

Таким чином, апріорний аналіз ґрунтується на ймовірнісних характеристиках надійності, які лише приблизно і неповно відображають дійсні процеси в апаратурі. Тем не менше для порівняння показників надійності кількох структурних схем систем використання апріорного аналізу може бути дуже корисним. Цей аналіз дозволить виявити на стадії проектування слабкі з точки зору надійності місця в конструкції та прийняти необхідні заходи до їх усунення, а також відкинути незадовільні варіанти побудови системи. Саме в цьому розумінні апріорний аналіз надійності, не претендуючи на видачу достовірних кількісних характеристик, має суттєве значення в практиці проектування і тому складає невід'ємну частину технічних проектів.

Другий етап досліджень і оцінки показників надійності вже розроблених і виготовлених виробів називають апостеріорним аналізом надійності або експериментальною оцінкою. Її проводять на основі статистичної обробки експериментальних даних про працездатність і відновлюваність систем, отриманих в процесі їх відлагодження, випробувань та експлуатації. Метою випробувань на надійність є оцінка досягнутого рівня надійності системи та її елементів.

Такі оцінки отримують методами математичної статистики за результатами спостережень обмеженої виборки. При цьому вважають, що результати спостережень є випадковими величинами, які підлягають закону розподілу ймовірностей заданого типу з невідомими параметрами. В даному випадку задачею апостеріорного аналізу є перш за все оцінка невідомих параметрів за результатами спостережень та наступний розрахунок з допомогою цих оцінок необхідних показників надійності.

3 МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ

3.1 Методи забезпечення надійності невідновлюваних об'єктів

Для невідновлюваних об'єктів підхід до забезпечення надійності зовсім інший, ніж для відновлюваних, оскільки вони не підлягають ремонту.

Невідновлювані об'єкти – об'єкти, для яких ремонт із конструктивних причин або умов експлуатації є неможливим.

Основними кількісними характеристиками невідновлюваних об'єктів є:

$P(t)$ – імовірність безвідмовної роботи,

$Q(t)$ – імовірність відмови,

$a(t)$ – частота відмов,

$\lambda(t)$ – інтенсивність (небезпека) відмов,
 $T_{ср}$ – середній час безвідмовної роботи.

Імовірністю безвідмовної роботи називається імовірність того, що у визначених умовах експлуатації в межах заданої тривалості роботи відмови не виникне.

Імовірність безвідмовної роботи визначається наступною статистичною оцінкою:

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

де $N(t)$ – число справних зразків до моменту часу t ;

$N_0(t)$ – число зразків апаратури на початку випробування;

$n(t)$ – число зразків, що відмовили, за час t .

На практиці іноді зручніше користатися величиною, що характеризує імовірність несправної роботи чи імовірність відмов. Варто врахувати, що справна робота і відмова є подіями неспільними і протилежними. Тому імовірність відмови $Q(t)$ знаходиться за формулою:

$$Q(t) = 1 - P(t)$$

Частотою відмов називається відношення числа зразків апаратури, що відмовили в одиницю часу, до числа зразків, спочатку встановлених на випробування за умови, що зразки, що відмовили, не відновлюються і не замінюються справними.

Число зразків, що відмовили в інтервалі часу Δt , залежить від розташування цього проміжку часу, тобто частота відмов є функцією часу і визначається формулою

$$a^*(t) = \frac{n(t)}{N_0 \cdot \Delta t},$$

де $n(t)$ – число зразків, що відмовили в інтервалі часу від t до $t+\Delta t$;

Δt – інтервал часу;

N_0 – число зразків апаратури спочатку встановленої на випробування.

Формула для визначення $a^*(t)$ є статистичним визначенням частоти відмов.

Частота відмов є щільність розподілу часу роботи апаратури до її відмови, тобто $a(t) = f(t)$

Типова крива зміни частоти відмов апаратури в часі наведена на рисунку 3.1. Ця крива характерна для радіоелектронної апаратури й автоматичних систем.

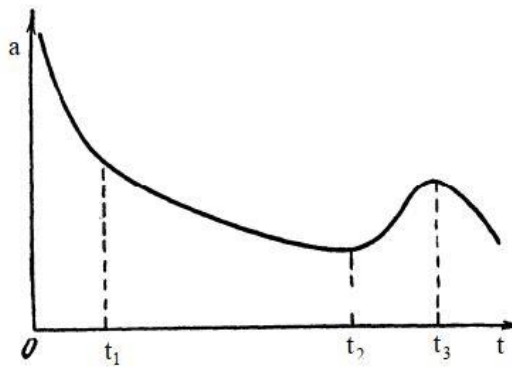


Рисунок 3.1 – Типова крива зміни частоти відмов апаратури в часі

У роботі апаратури, як впливає з графіка, можна виділити три ділянки. На ділянці 0– t_1 частота відмов різко зменшується. Висока частота відмов пояснюється наявністю прироблених відмов через елементи, що мають внутрішні дефекти, помилки виробництва й обслуговуючого персоналу. Ця ділянка називається *періодом припрацювання елементів*.

На ділянці від t_1 до t_2 частота відмов зменшується по експоненційному закону. Ця ділянка характеризує нормальну роботу апаратури і є незмірно більш довгою, чим ділянка припрацювання.

Зменшення частоти відмов з часом зовсім не означає, що надійність апаратури зростає. На ділянці від 0 до t_2 число зразків, що відмовили, з часом на кожному проміжку Δt убуває, тому що зменшується загальне число випробуваних зразків ($n(t)$ зменшується). Надійність апаратури також убуває з часом. Ділянка від t_2 до t_3 характеризується різким ростом частоти відмов, що пояснюється механічним і електричним зносом елементів. Зменшення частоти відмов після часу t_3 пояснюється не підвищенням надійності апаратури, а незначною кількістю справно працюючих до цього часу зразків, у результаті чого число зразків, що відмовили $n(t)$ за інтервал Δt , зменшується. Апаратуру не експлуатують до стану зносу, її ремонтують, після чого частота відмов знову відповідає інтервалу часу від t_1 до t_2 . Тому вивчення кривої $a(t)$ на ділянці $t > t_3$ не є предметом теорії надійності.

Інтенсивність відмов називається відношення числа зразків апаратури, що відмовили в одиницю часу, до середнього числа зразків, що справно працюють у даний відрізок часу за умови, що зразки, що відмовили, не відновлюються і не замінюються справними:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N(t) \cdot \Delta t},$$

де $n(t)$ – число зразків, що відмовили на інтервалі часу від t до $t+\Delta t$;

Δt – інтервал часу;

$N(t)$ – число справно працюючих зразків на початку інтервалу Δt .

Ця характеристика позначається $\lambda(t)$ й у ряді літературних джерел називається небезпекою відмов.

Середнім часом безвідмовної роботи називається математичне очікування часу безвідмовної роботи.

Зі статистичних даних середній час безвідмовної роботи визначається по формулі:

$$T_{\text{ср}}^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0},$$

де t_i – час безвідмовної роботи i -того зразка;

N_0 – число зразків, над якими проводиться випробування.

3.2 Методи забезпечення надійності відновлюваних об'єктів

Забезпечення надійності цих об'єктів полягає в організації ефективного ремонту обладнання з мінімальними затратами часу.

Відновлювані об'єкти – об'єкти, які в період експлуатації в разі виникнення відмов можуть бути відремонтовані шляхом заміни несправних компонентів.

При експлуатації складних систем відмови виникають у випадкові моменти часу. Тому що вони усуваються, то протягом тривалого часу експлуатації спостерігається потік відмов.

Під *потоком відмов* розуміється послідовність відмов, що відбуваються один за іншим у випадкові моменти часу за умови миттєвого відновлення. *Відновлення* – виявлення чи ушкодження несправності і їхнє усунення.

Розглянемо об'єкти для яких протягом заданого часу роботи допускаються відмови з наступними перервами в роботі на відновлення. Розглянемо процес експлуатації об'єктів з кінцевим часом відновлення. Часова діаграма показана на рисунку 3.2.

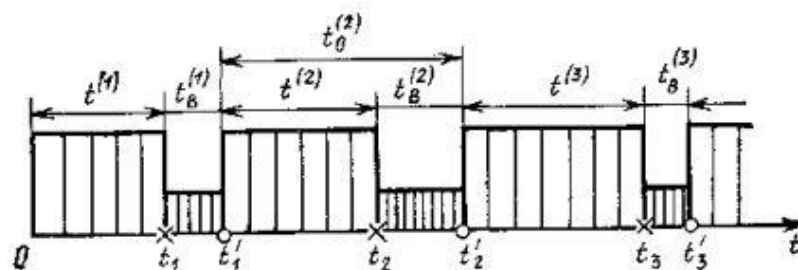


Рисунок 3.2 – Часова діаграма: t_1, t_2, \dots, t_k – інтервали часу справної роботи апаратури; $t_{B1}, t_{B2}, \dots, t_{Bk}$ – значення часу відновлення; $t^{(1)}, t^{(2)}, \dots, t^{(k)}$ – моменти часу появи відмов; $t_B^{(1)}, t_B^{(2)}, \dots, t_B^{(k)}$ – моменти часу відновлення (позначені кружечками)

Після відмови об'єкт якийсь час знаходиться в непрацездатному стані, тобто ремонтується. У результаті ремонту об'єкт приводять у працездатний стан. У такий спосіб чергуються випадкові періоди часу безвідмовної роботи t_i і часу ремонту (відновлення) t_{vi} .

Випадковий час між черговими відновленнями дорівнює

$$T_i = t_i + t_{vi}.$$

Потік відмов породжує потік відновлень. Процес відновлення характеризується часом відновлення, що є випадковою величиною, тому що навіть при відомих відмовах час відновлення буде різним через неоднакові можливості обслуговуючих компонентів (людей, механізмів, складності відмов).

Розглянемо *характеристики, що описують процес відновлення:*

1. Імовірність відновлення $V(t)$ – імовірність того, що час відновлення виробу після відмовлення не перевищить заданої величини.
2. Імовірність невідновлення за час t_n .
3. Середній час відновлення. Середній час відновлення показує середні витрати часу на виявлення і ліквідацію відмови.
4. Інтенсивність відновлення.

Найпростішим потоком відмов називається такий потік, при якому час виникнення відмов задовольняє одночасно умовам стаціонарності, відсутності післядії й ординарності.

Стаціонарність потоку відмов означає, що на будь-якому інтервалі часу Δt ймовірність виникнення відмов залежить тільки від величини проміжку Δt і не змінюється від зрушення Δt по осі часу. Параметр стаціонарного потоку є величина постійна.

Відсутність післядії означає, що ймовірність відмов протягом проміжку часу Δt не залежить від того, скільки було відмов і як вони розподілялися до цього проміжку.

Ординарність потоку відмов означає неможливість появи в той самий момент часу більше одної відмови.

Якщо обладнання складається з великої кількості частин, кожна з яких може відмовити лише з малою імовірністю, і ці відмови для різних частин незалежні між собою, то сумарний потік відмов для всього об'єкта буде близький до найпростішого.

Вид потоку відмов визначає властивості апаратури, критерії надійності і методи її розрахунку. Найбільш важливою характеристикою потоку відмов є параметр потоку.

Параметром потоку відмов $W(t)$ називається відношення числа зразків, що відмовили в одиницю часу, до числа випробовуваних зразків за умови, що всі зразки, що вийшли з ладу, замінюються справними:

$$W(t) = \frac{n(t)}{N_0 \cdot \Delta t},$$

де $n(t)$ – число зразків, що відмовили в інтервалі часу від t до $t+\Delta t$;

N_0 – число випробовуваних зразків (залишається постійним тому що всі зразки, що відмовили, замінюються справними);

Δt – інтервал часу.

Це є аналог інтенсивності відмов для неремонтуємих виробів.

Для відновлюваних об'єктів основним показником надійності вважають коефіцієнт готовності, що визначає частину корисного часу t_k протягом якого об'єкт нормально працює щодо загального часу експлуатації.

$$K_g = \frac{t_k}{t_k + t_g},$$

де t_g – час, що витрачено на відновлення працездатності $t_g = t_1 + t_2$.

Він містить дві складові: t_1 – час, що витрачають на пошук несправності; t_2 – час власне відновлення.

Особливістю сучасного електронного обладнання є його модульна побудова, тому відновлення таких об'єктів найчастіше може полягати у простій заміні несправного модуля (блока) справним. Вона не потребує великих затрат часу. Пошук несправності, навпаки, – здебільшого трудомістка процедура і може тривати довго. На коефіцієнт готовності найбільше впливає саме цей час.

До основних методів забезпечення надійності відновлюваної електронної апаратури належать:

- створення максимально сприятливих умов для прискорення ремонту. Це означає, що конструкція приладу повинна бути ремонтпридатною, має бути забезпечено зручний доступ для заміни несправних компонентів, з'єднання між типовими елементами заміни (ТЕЗ) відбувається на основі роз'ємів і т. д.;

- застосування автоматизованого пошуку несправностей на основі апаратного і (або) програмного самоконтролю функціонування апаратури, тестового діагностування та ви користання спеціальних автоматизованих систем контролю і діагностики.

4 ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ЧАСУ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ

У теорії надійності найбільш доцільно характеризувати час між сусідніми відмовами похідною від функції розподілу, тобто диференціальним законом розподілу.

Законом розподілу випадкової величини називають функцію, що установлює відповідність між можливими значеннями випадкової величини й ймовірністю її появи.

Можна стверджувати, що кривою розподілу може бути будь-яка лінія, площа під якою дорівнює одиниці. Незважаючи на велику безліч емпіричних кривих частоти відмов (знятих для конкретного пристрою у визначених умовах) переважна більшість з них може бути апроксимована з достатньою точністю обмеженим числом аналітичних залежностей. Такі залежності служать математичною моделлю надійності.

Час між відмовами, як складних систем, так і найпростіших елементів підпорядковується обмеженому числу законів розподілу. Розглянемо наступні закони розподілу:

- експоненційний закон;
- закон Вейбула;
- закон Релея;
- нормальний закон;
- логарифмічний нормальний розподіл;
- гамма-розподіл;
- біноміальний закон;
- закон Пуассона

4.1 Закони розподілу неперервних випадкових величин

Експоненційний закон

Експоненційний закон використовують для оцінювання надійності складних пристроїв, відмови яких обумовлені великою кількістю комплектуючих елементів, що входять до їх складу.

Експоненційний розподіл застосовується для систем і елементів на ділянці нормальної експлуатації.

Статистичні матеріали про відмови типових елементів радіоелектронної апаратури свідчать про те, що в основному час роботи цих елементів для нормального періоду експлуатації підлягає експоненційному закону.

Властивістю цього закону є те, що інтенсивність відмов є величиною постійною, тобто справедлива умова

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const}.$$

Експоненційний закон характерний для раптових відмов на інтервалі часу, коли період припрацювання апаратури закінчився, а період зносу і старіння не почався.

Основні формули для показників надійності при експоненційному законі розподілу:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad a(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}.$$

$$T_{cp} = 1/\lambda,$$

де λ – параметр розподілу.

Графічні залежності експоненційного розподілу представлені на рисунку 4.1.

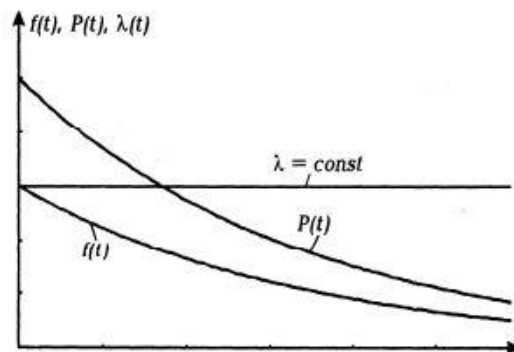


Рисунок 4.1 – Експоненційний закон розподілу випадкових величин

Закон Релея

При розподілі часу виникнення відмов за законом Релея частота відмов визначається виразом

$$a(t) = \frac{t}{\sigma^2} e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2}},$$

Тоді імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов і середній час безвідмовної роботи будуть виражатися наступними формулами

$$P(t) = \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right) \quad \lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{t}{\sigma^2}. \quad T_{cp} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma$$

де σ – параметр розподілу Релея.

Графічні залежності розподілу Релея представлені на рисунку 4.2.

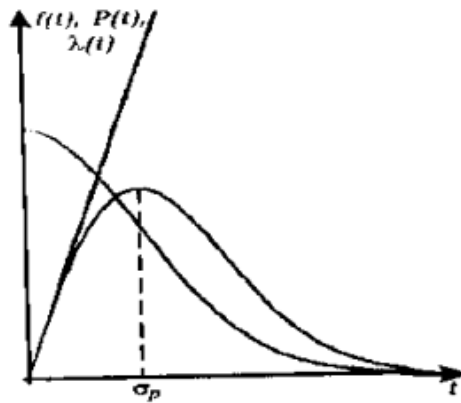


Рисунок 4.2 – Графічні залежності розподілу Релея

Видно, що інтенсивність відмов росте лінійно з часом. Це говорить про те, що відмови не задовольняють умовам стаціонарного випадкового процесу.

В області малих t , де інтенсивність відмов незначна, імовірність безвідмовної роботи системи зменшується з часом повільніше, чим при експоненційному законі. Це означає, що складні автоматичні системи, призначені для малого часу безупинної роботи, доцільно будувати на елементах, що мають релеєвский закон розподілу часу між відмовами.

В області великих значень t імовірність безвідмовної роботи системи зменшується з часом значно швидше, ніж при експоненційному законі, тобто виражений ефект старіння апаратури.

Закон Вейбулла

Закон Вейбулла характеризує розподіл неперервної випадкової величини X , яка може приймати тільки додатні значення ($X \geq 0$).

Розподіл Вейбулла використовують для оцінювання надійності пристроїв в період їх припрацювання, а також при зносі та старінні. До розподілу Вейбула можна віднести зміни в часі надійності шарикопідшипників. Розподіл Вейбула є математичною моделлю надійності підшипників.

Для розподілу Вейбула основні кількісні характеристики надійності виражаються наступними формулами

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t^k} \quad \lambda(t) = \lambda_0 k t^{k-1} \quad T = \Gamma\left(\frac{1}{k+1}\right) \alpha^{\frac{1}{k}}$$

де k і α – параметри розподілу,

Γ – гамма-функція.

При значенні параметра $k=1$ розподіл Вейбула перетвориться в експоненційний розподіл;

при $k > 1$ інтенсивність відмов починається з нуля і зростає з часом;
 при $k < 1$ інтенсивність відмов починається з $+\infty$ і з перебігом часу
 прямує до нуля: $\lambda(t) \rightarrow \infty$ при $t \rightarrow 0$, $a(t) \rightarrow \infty$ при $t \rightarrow 0$.

Графічні залежності розподілу Вейбула представлені на рисунку 4.3.

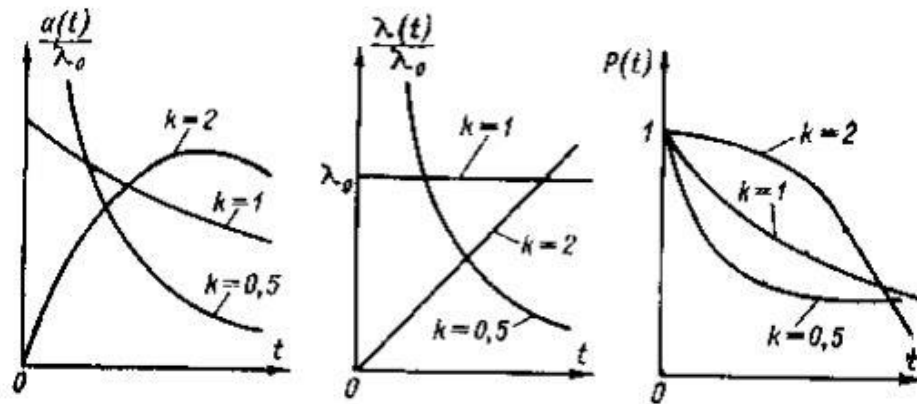


Рисунок 4.3 – Графічні залежності розподілу Вейбула

Достоїнством розподілу Вейбула є велика кількість форм кривих, які можна одержати при різних k .

Також розподіл Вейбула застосовується для опису напрацювання до відмови деяких інформаційних засобів.

Нормальний розподіл (розподіл Гауса)

Цей закон найчастіше зустрічається і використовується тоді, коли випадкова величина X залежить від великої кількості випадкових факторів, кожен з яких не має суттєвого впливу на результат. До нормального закону наближаються інші закони за типовими умовами, які часто зустрічаються.

Характеристики надійності:

$$P(t) = \frac{1 - \Phi\left(\frac{t - T_{\text{ср}}}{\sigma\sqrt{2}}\right)}{1 + \Phi\left(\frac{T_{\text{ср}}}{\sigma\sqrt{2}}\right)} \quad \lambda(t) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left[-\frac{(t - T_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}\right]}{\sigma \left[1 - \Phi\left(\frac{t - T_{\text{ср}}}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right]} \quad a(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - T_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$(T_{\text{ср}})_{\text{max}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

Графічні залежності нормального розподілу представлені на рисунку 4.4.

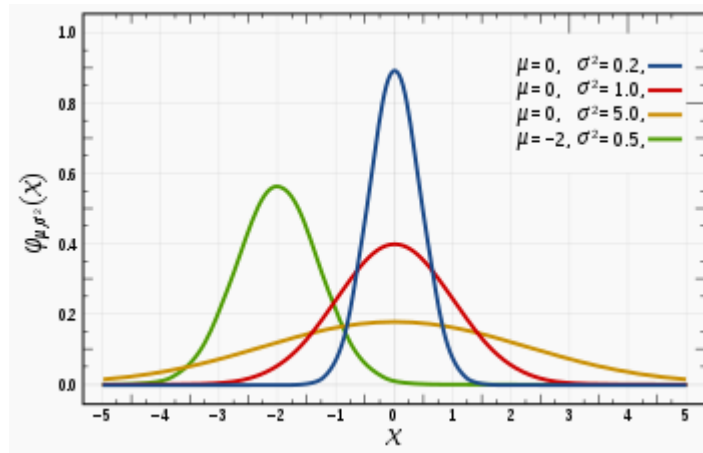


Рисунок 4.4 – Графічні залежності нормального розподілу

При $t = T_{cp}$ крива має екстремум (максимум).

Інтенсивність відмов починається з нуля і з часом сильно зростає. Це означає, що в області малих значень t старіння елементів не спостерігається і тому імовірність безвідмовної роботи системи зменшується незначно. При збільшенні t $\lambda(t)$ починає швидко зростати і надійність швидко знижується, частота відмов зростає і $P(t) \rightarrow 0$.

Для опису напрацювання до відмови на ділянках припрацювання та інтенсивного старіння і зношування елементів ІС застосовується усічений нормальний розподіл.

Гамма-розподіл

В основному, до γ -розподілу близько підходить характер зміни в часі відмов складних резервованих систем.

Частота відмов

$$a(t) = \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1} e^{-\lambda_0 t}}{(k-1)!}$$

Ймовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}$$

Середній час безвідмовної роботи

$$T_{cp} = \frac{k}{\lambda_0}$$

причому k – цілі числа.

Кількісні характеристики γ -розподілу часу між сусідніми відмовами показані на рисунку 4.5.

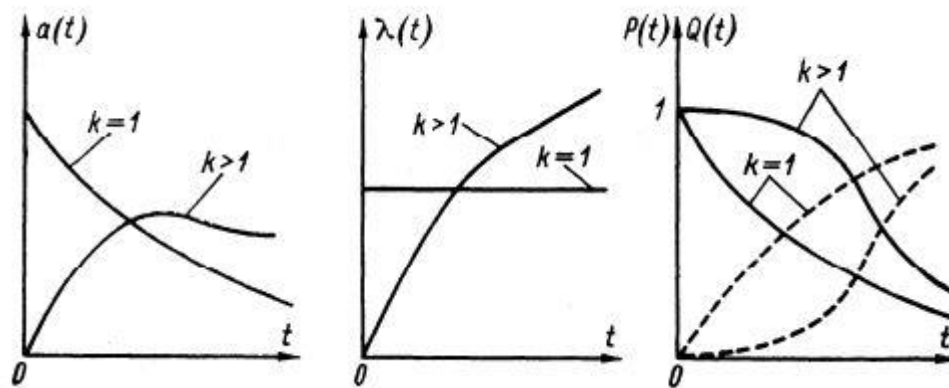


Рисунок 4.5 – Кількісні характеристики γ -розподілу часу між сусідніми відмовами

При $k=1$ γ -розподіл стає експоненційним;
при $k>1$ цей розподіл може бути моделлю відмов складних електромеханічних систем, якщо мають місце миттєві відмови.

4.2 Закони розподілу дискретних випадкових величин

Вище розглядалися закони розподілу неперервних випадкових величин. Зараз розглянемо дискретні розподіли.

Неперервною називають випадкову величину, що може приймати всі значення з деякого кінцевого чи нескінченного проміжку.

Дискретною називають випадкову величину, що приймає окремі, ізольовані можливі значення з визначеними ймовірностями.

Біноміальний розподіл

Біноміальний розподіл описує появу подій, що мають два можливих результати, що взаємно виключають один одного. Якщо є партія однакових деталей з часткою p справних і часткою q несправних, то ймовірність появи у виборці з n деталей цієї партії k справних визначиться за формулою

$$P_n(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{n-k}$$

Закон встановлює ймовірність числа k появ події A у n незалежних випробуваннях

Біноміальний закон застосовують при статистичному контролі якості, коли є дуже мало відомостей про поведінку пристроїв, а їх потрібно класифікувати на придатні та браковані.

Розподіл Пуасона

Біноміальний розподіл зручний, якщо береться вибірка малого обсягу. Якщо відбирається велика кількість виробів з вихідної партії, то тоді зручніше застосовувати розподіл Пуасона.

Ймовірність того, що у вибірці з n деталей знаходиться k несправних визначається за формулою

$$P_n(k) = \frac{a^k e^{-a}}{k!},$$

де $a = n \cdot q$;

n – обсяг вибірки;

q – імовірність появи події (інакше: частка несправних виробів у цілій партії).

Розподіл Пуасона – це граничний випадок біноміального розподілу. Біноміальний розподіл використовують для будь-якого p , а розподіл Пуасона тільки для малого p .

Розподіл Пуасона зазвичай використовують для визначення ймовірності появи заданої кількості подій на заданому інтервалі часу за умови незалежності і несумісності подій.

5 СИСТЕМИ З РЕЗЕРВУВАННЯМ

Як відомо, при досягнутих рівнях надійності комплектуючих елементів і якості проектно-конструкторських та виробничо-технологічних робіт основними шляхами забезпечення високої надійності об'єктів є резервування, а також удосконалення системи експлуатації.

Відповідно до ДСТУ 2860-94 *резервування* – спосіб забезпечення надійності об'єкта за рахунок використання додаткових засобів та (або) можливостей, надлишкових відносно мінімально необхідних для виконання потрібних функцій.

Сукупність додаткових засобів і (або) можливостей, що використовують для резервування, називають *резервом*. Залежно від характеру додаткових засобів і можливостей у цей час для забезпечення надійності використовують 5 видів резервування:

- структурне,
- інформаційне,
- функціональне,
- навантажувальне,
- часове.

Структурне резервування – резервування із застосуванням резервних елементів структури об'єкта. Воно найбільше відомо і широко використовується на практиці для підвищення надійності. Метод структурного резервування відрізняється універсальністю і дозволяє створювати з ненадійних елементів системи потрібний рівень надійності. Однак у багатьох випадках схемна реалізація даного методу пов'язана з рядом труднощів (неідеальність перемикачів, перерозподіл навантаження при відмовах елементів, обмеження на габаритні розміри, масу, вартість та ін.), які знижують його ефективність, а іноді і обмежують область застосування.

Інформаційне резервування – резервування із застосуванням резервів інформації. Резерви інформації в радіолокаційній системі створюються за рахунок відповідного розміщення на місцевості джерел радіолокаційної інформації, при якій утвориться багаторазове перекриття зон видимості РЛС у радіолокаційному полі. Коефіцієнт перекриття, значення якого залежно від висоти становить 2...10 і більше одиниць, характеризує надлишковість основної зовнішньої властивості системи. У системах обробки і передачі радіолокаційної інформації, що функціонують в умовах обмеженої надійності елементів і при наявності перешкод, інформаційне резервування забезпечується шляхом подання переданої і обробленої інформації у локаційному і корегуючих кодах, використання різних додаткових змінних, реалізації алгоритмічних (програмних) методів захисту процесів обробки і передачі даних від збоїв, відмов і завад. До основних недоліків цього виду резервування можна віднести ускладнення апаратури і алгоритмів функціонування, зниження продуктивності системи обробки і передачі даних, збільшення вартості.

Функціональне резервування – резервування, при якому використовується здатність елементів виконувати додаткові функції.

Навантажувальне резервування – резервування, при якому використовується здатність елементів об'єкта сприймати додаткові навантаження понад номінальні. Ці види резервів звичайно утворюються в складних просторово рознесених системах за рахунок структурного і функціонального ускладнення апаратури і зв'язків між її елементами, а також шляхом раціональної організації застосування таких систем. Труднощі практичного використання даних видів резервування пов'язані з необхідністю в ряді випадків додаткового перетворення форми інформації, погіршенням її точності і ймовірності, зниженням пропускну здатності та ін.

Часове резервування – передбачає використання резервів часу, виділеного для виконання об'єктом його завдань. Резерви часу вносяться не в об'єкт, як, наприклад, при структурному резервуванні, а у порядок (алгоритм)

використання об'єкта, як це іноді має місце при інформаційному або функціональному резервуванні. В основі часового резервування лежить облік характеру наслідків відмов апаратури в процесі виконання завдання. У класичній теорії надійності такий облік відсутній, при цьому будь-яка відмова апаратури вважається несприятливою ситуацією, тобто оцінка надійності фактично зводиться до вивчення перебування системи у підмножині працездатних станів на деякому інтервалі часу. Однак у реальних системах при певних вимогах до часу відновлення наслідки від відмови апаратури можуть бути усунуті, і у цьому випадку вони не вплинуть на виконання системою своїх функцій.

Основним недоліком методу часового резервування є те, що поліпшення надійності супроводжується погіршенням деяких інших характеристик системи, зокрема, зменшенням реальної продуктивності, погіршенням точності, ускладненням алгоритмів функціонування, підвищенням вимог до апаратури контролю пошуку несправностей в системі ремонту.

Розглянемо більш докладно методи структурного резервування, що найбільш глибоко досліджені і широко застосовуються на практиці. Дамо визначення основним поняттям відповідно до ДСТУ 2860-94.

Основний елемент – елемент об'єкта, необхідний для виконання потрібних функцій без використання резерву.

Резервований елемент – основний елемент, на випадок відмови якого в об'єкті передбачені один або декілька резервних елементів.

Резервний елемент – елемент, призначений для виконання функцій основного об'єкта у разі його відмови.

Кратність резерву – відношення кількості резервних елементів до кількості резервованих ними елементів, виражене нескорочуваним дробом.

Класифікація методів структурного резервування: окремі елементи об'єкта чи їх групи.

Загальне резервування – резервування, в якому резервується об'єкт в цілому.

Змішане резервування – сполучення різних видів резервування в тому самому об'єкті.

Стале резервування – резервування, в якому використовують навантажений резерв і в якому, якщо відмовляє будь-який елемент в резервованій групі, виконання об'єктом потрібних функцій забезпечується без перемикань рештою елементів.

Заміщувальне резервування – резервування, в якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного елемента.

Ковзне резервування – заміщувальне резервування, в якому група

основних елементів резервується одним чи декількома резервними елементами, кожний з яких може замінити будь-який з елементів цієї групи у випадку його відмови.

Навантажений резерв – резерв, що містить один чи декілька резервних елементів, які перебувають у режимі основного елемента.

Полегшений резерв – резерв, що складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у режимі меншого навантаження порівняно з основним елементом.

Ненавантажений резерв – резерв, що складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у ненавантаженому стані до початку виконання ними функцій основного елемента.

Резервування з відновленням – резервування, в якому відновлення основних і (чи) резервних елементів у випадку їх відмови технічно можлива без порушення працездатності об'єкта в цілому та передбачено експлуатаційною документацією.

Резервування без відновлення – резервування, при якому відновлення основних і (чи) резервних елементів у випадках їх відмови технічно неможлива без порушення працездатності об'єкта в цілому та (або) не передбачена експлуатаційною документацією. Для оцінки ефективності резервування використовується коефіцієнт виграшу в надійності за рахунок резервування η , обумовлений відношенням показника надійності резервованої системи до показника нерезерованої. Зокрема, для середнього наробітку на відмову

$$\eta = \frac{T_{OP}}{T_{OH}} > 1$$

Працездатність систем без резервування вимагає працездатності всіх елементів системи. У складних технічних пристроях без резервування ніколи не вдається досягти високої надійності, навіть якщо використовувати елементи з високими показниками безвідмовності. Система з резервуванням – це система з надмірністю елементів, тобто з резервними складовими, які є надлишковими стосовно мінімально потрібної кількості елементів в основній структурі, але виконують ті самі функції, що й основні елементи. У системах з резервуванням працездатність забезпечується доти, поки для заміни основних елементів, що відмовили, є в наявності резервні. Структурне резервування (рис. 5.1) може бути загальним (система резервується в цілому) та поелементним (резервуються окремі елементи чи групи елементів).

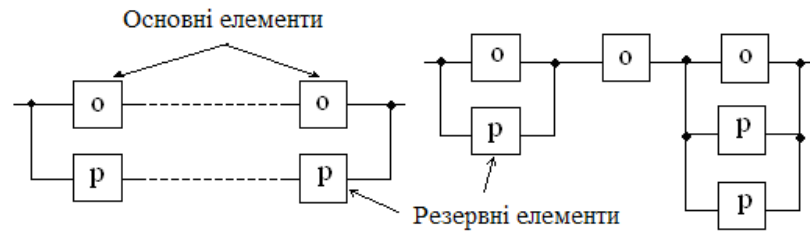


Рисунок 5.1 – Структурне резервування системи: а) – загальне, б) – поелементне (роздільне)

За видом резервування буває:

пасивним (навантаженим) – резервні елементи функціонують нарівні з основними (постійно включені в роботу); навантажений резерв на практиці часто називають «гарячим»;

активним (ненавантаженим) – резервні елементи вводять у роботу тільки після відмови основних елементів (резервування заміщенням); ненавантажений резерв на практиці часто називають «холодним».

У разі навантаженого резервування резервні елементи витрачають свій ресурс, мають однаковий розподіл наробітків до відмови, а інтенсивність відмов основних λ_o і резервних λ_p елементів однакова ($\lambda_o = \lambda_p$).

За навантаженого резервування розходження між основними і резервними елементами часто умовне. Для забезпечення нормальної роботи (збереження працездатності) системи потрібно, щоб кількість працездатних елементів не ставала меншою від мінімальної потрібної.

Різновидом навантаженого резервування є *резервування з полегшеним резервом*, коли резервні елементи також перебувають під навантаженням, але меншим, ніж основні. Інтенсивність відмов резервних елементів λ_p нижча, ніж в основних λ_o , тобто ($\lambda_o > \lambda_p$).

За ненавантаженого резервування резервні елементи не піддаються навантаженню, тому їх показники надійності не змінюються, й вони не можуть відмовити за час перебування в резерві, тобто до моменту їх використання інтенсивність відмов резервних елементів $\lambda_p = 0$.

Приклади ненавантаженого резервування показані на рисунку 5.2.

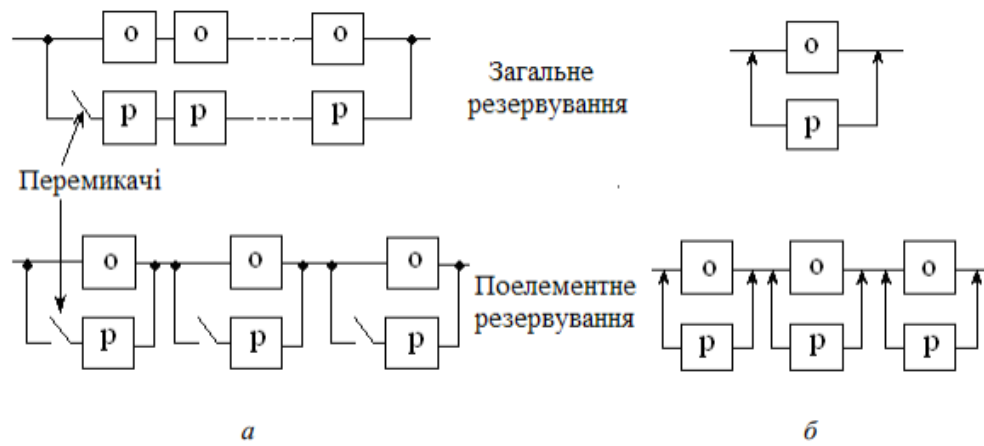


Рисунок 5.2 – Структурні схеми ненавантаженого резерву: а) – ручного (неавтоматичного) перемикання; б) – автоматичного керування перемиканням

Резервні елементи включаються в роботу тільки після відмови основних елементів. Перемикання проводять вручну (наприклад, заміна інструмента або оснащення під час виробництва) або автоматично (наприклад, автоматичне включення резервних машин та елементів у бортових мережах літаків і вертольотів).

Різновидом ненавантаженого резервування є ковзне резервування, коли той самий резервний елемент може бути використаний для заміни кожного (будь-якого) з елементів основної системи. Якщо розглянути два характерних види резервування (рис. 5.3), то очевидно, що за однакової кількості основних і резервних елементів ненавантажений резерв забезпечує більшу надійність. Але це справедливо тільки тоді, коли введення резервного елемента в роботу буде відбуватися абсолютно надійно, тобто ІБР пристрою введення резерву має дорівнювати 1,0. Виконання цієї умови часто пов'язане зі значними технічними або економічними труднощами.

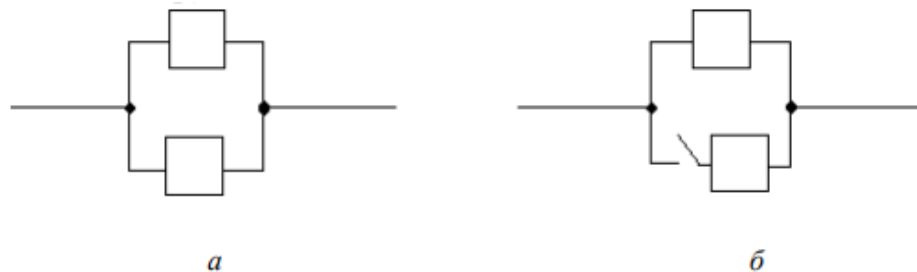


Рисунок 5.3 – Приклади навантаженого (а) і ненавантаженого (б) резерву

Позначимо:

n – загальна кількість однотипних елементів у системі;

m – кількість елементів, потрібних для функціонування системи (основних);

r – кількість резервних елементів.

Кратність резервування – це відношення кількості однотипних резервних елементів $r=n-m$ до кількості основних елементів, потрібних для роботи системи:

$$k = \frac{n - m}{m} = \frac{r}{m}.$$

Приклад системи за умов $m = 1, r = 2, n = 3$, коли $k = (3-1)/1=2$ показано на рисунку 5.4.

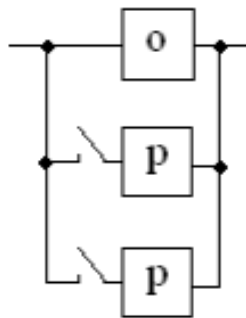


Рисунок 5.4 – Приклад системи з кратністю резервування $k = 2$

Кратність резервування може бути цілим числом, якщо $m = 1$, або дробовим, якщо $m > n - m$, тобто $m > r$.

6 РОЗРАХУНКИ СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ

Розрахунки показників безвідмовності ТС звичайно проводяться в припущенні, що як вся система, так і будь-який її елемент можуть перебувати лише в одному з двох можливих станів - працездатному та непрацездатному та відмови елементів незалежні одна від одної. Стан системи (працездатність або непрацездатність) визначається станом елементів та їх поєднанням. Тому теоретично можливо розрахунок безвідмовності будь-якої ТС звести до перебору всіх можливих комбінацій станів елементів, визначенням вірогідності кожного з них і складання ймовірностей працездатності станів системи.

Такий метод (метод прямого перебору) практично універсальний і може використовуватися при розрахунку будь-яких ТС. Проте при великій кількості елементів системи n такий шлях стає нереальним із-за великого обсягу обчислень (наприклад, при $n = 10$ число можливих станів системи становить, $2^n = 1024$, при $n = 20$ перевищує 10^6 , при $n = 30$ – більше 10^9). Тому на практиці використовують більш ефективні та економічні методи

розрахунку, не пов'язані з більшим обсягом обчислень. Можливість застосування таких методів пов'язана із структурою ТС.

6.1 Системи з послідовним з'єднанням елементів

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

В системі з послідовним з'єднанням для безвідмовної роботи протягом деякого напрацювання t необхідно і достатньо, щоб кожен з її n елементів працював безвідмовно протягом цього напрацювання. Вважаючи відмови елементів незалежними, ймовірність одночасної безвідмовної роботи n елементів визначається по теоремі множення ймовірностей: вірогідність спільної появи незалежних подій дорівнює добутку ймовірностей цих подій:

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)) \quad (6.1)$$

(Далі аргумент t в дужках, що показує залежність показників надійності від часу, опускаємо для скорочення записів формул). Відповідно, ймовірність відмови такої ТС

$$Q = 1 - P = 1 - \prod_{i=1}^n p_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i). \quad (6.2)$$

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

$$P = p_i^n, \quad Q = 1 - (1 - q)^n. \quad (6.3)$$

З формул (6.1-6.3) очевидно, що навіть при високій надійності елементів надійність системи при послідовному з'єднанні виявляється тим нижчою, чим більша кількість елементів (наприклад, при $p = 0.95$ і $n = 10$ маємо $P = 0.60$, при $n = 15$ – $P = 0.46$, а при $n = 20$ – $P = 0.36$). Крім того, оскільки всі співмножники в правій частині виразу (6.1) не перевищують одиниці, ймовірність безвідмовної роботи ТС при послідовному з'єднанні не може бути вища ймовірності безвідмовної роботи самого ненадійного з її елементів (принцип «гірше гіршого») і з малонадійних елементів не можна створити високонадійної ТС з послідовним з'єднанням.

Якщо всі елементи системи працюють у періоді нормальної експлуатації і має місце найпростіший потік відмов, напрацювання елементів і системи підкоряються експоненціальному розподілу і на підставі (6.1) можна записати

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right] = \exp(-\Lambda t), \quad (6.4)$$

де

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const} \quad (6.5)$$

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

З (6.4-6.5) випливає, що для системи з n рівнонадійних елементів ($\lambda_i = \lambda$)

$$\Lambda = n\lambda, \quad T_0 = \frac{T_{0i}}{n}, \quad (6.6)$$

Тобто інтенсивність відмов у n разів більша, а середнє напрацювання в n разів менше, ніж у окремого елемента.

6.2 Системи з паралельним з'єднанням елементів

Системою з паралельним з'єднанням елементів називається система, відмова якої відбувається тільки у разі відмови усіх її елементів. Такі схеми надійності характерні для ТС, в яких елементи дублюються або резервуються, тобто паралельне з'єднання використовується як метод підвищення надійності. Однак такі системи зустрічаються і самостійно (наприклад, системи двигунів чотиримоторного літака або паралельне увімкнення діодів у потужних випрямлячах).

Для відмови системи з паралельним з'єднанням елементів протягом напрацювання t необхідно і достатньо, щоб всі її елементи відмовили протягом цього напрацювання. Отже, відмова системи полягає в спільній відмові всіх елементів, імовірність чого (при допущенні незалежностей відмов) може бути знайдена по теоремі множення ймовірностей відмови елементів:

$$Q = q_1 q_2 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (6.7)$$

Відповідно, ймовірність безвідмовної роботи

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (6.8)$$

Для систем з рівнонадійних елементів ($p_i = p$)

$$Q = q^n, \quad P = 1 - (1 - p)^n, \quad (6.9)$$

тобто надійність системи з паралельним з'єднанням підвищується при збільшенні кількості елементів (наприклад, при $p = 0.9$ і $n = 2$ $P = 0.99$, а при $n = 3$ - $P = 0.999$).

Оскільки $q_i < 1$, добуток у правій частині (6.7) завжди менший будь-якого з співмножників, тобто ймовірність відмови системи не може бути вищою ймовірності самого надійного її елементу («краще кращого») і навіть з порівняно ненадійних елементів можлива побудова цілком надійної системи.

При експоненційному розподілі напрацювання вираз (6.9) прийме вигляд

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n, \quad (6.10)$$

звідки, після інтегрування і перетворень середнє напрацювання системи визначається

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}, \quad (6.11)$$

де $T_{0i} = 1 / \lambda_i$ - середнє напрацювання елемента.

При великих значеннях n справедлива наближена формула

$$T_0 = T_{0i} (\ln n + \frac{1}{2n} + 0.577). \quad (6.12)$$

Таким чином, середнє напрацювання системи з паралельним з'єднанням більше середнього напрацювання її елементів (наприклад, при $n = 2$ $T_0 = 1.5T_{0i}$, при $n = 3$ $T_0 = 1.83T_{0i}$).

6.3 Системи типу « m з n »

Систему типу « m з n » можна розглядати як варіант системи з паралельним з'єднанням елементів, відмова якої відбудеться, якщо з n елементів, з'єднаних паралельно, працездатними виявляться менше, ніж m елементів ($m < n$).

На рисунку 6.1 представлена система «2 з 5», яка працездатна, якщо з п'яти її елементів працюють будь-які два, три, чотири або всі п'ять (на схемі пунктиром обведені функціонально необхідні два елементи, причому виділення елементів 1 і 2 виконано умовно, насправді всі п'ять елементів однозначні). Системи типу « m з n » найбільш часто зустрічаються в електричних і зв'язкових системах (при цьому елементами виступають зв'язкові канали), технологічних лініях, а також при структурному резервуванні.

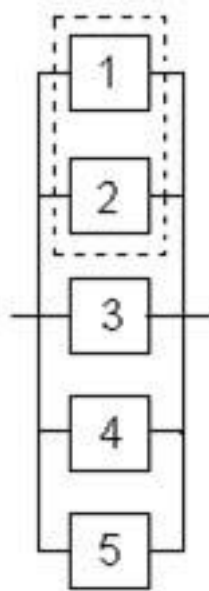


Рисунок 6.1 – Система «2 з 5»

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

Всі стани системи «2 з 5» занесені в таблиці 6.1. (В таблиці працездатні стани елементів і системи відмічені знаком «+», непрацездатні – знаком «-»). Для даної системи працездатність визначається лише кількістю працездатних елементів. За теоремою множення ймовірностей, ймовірність будь-якого стану визначається як добуток ймовірностей станів, у яких знаходяться елементи. Наприклад, у рядку 9 описано стан системи, в якій відмовили елементи 2 і 5, а інші працездатні. При цьому умова «2 з 5» виконується, так що система в цілому працездатна. Ймовірність такого стану

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

(передбачається, що всі елементи рівнонадійні). З урахуванням усіх можливих станів ймовірність безвідмовної роботи системи може бути знайдена по теоремі складання ймовірностей усіх працездатних поєднань. Оскільки в таблиці 6.1 кількостей непрацездатних станів менше, ніж працездатних (відповідно 6 і 26), простіше обчислити вірогідність відмови системи. Для цього підсумовуються ймовірності непрацезданих станів (де не виконується умова «2 з 5»).

$$\begin{aligned} Q &= P_{32} + P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31} = q^5 + 5pq^4 = \\ &= (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5. \end{aligned} \quad (6.13)$$

Тоді ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P = 1 - q = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \quad (6.14)$$

Розрахунок надійності системи « m з n » може відбутися комбінаторним методом, в основі якого лежить формула біноміального розподілу. Біноміальному розподілу підпорядковується дискретна випадкова величина k – кількість появ деякої події в серії з n дослідів, якщо в окремому досліді ймовірність появи події складає p . При цьому ймовірність появи події рівно k разів визначається

$$P_k = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \quad (6.15)$$

де C_n^k - біноміальний коефіцієнт, що називається «кількість сполучень по k з n » (тобто скількома різними способами можна реалізувати ситуацію « k з n »):

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (6.16)$$

Оскільки для відмови системи « m з n » достатньо, щоб кількість справних елементів була менша m , ймовірність відмови може бути знайдена по теоремі складання ймовірностей для $k = 0, 1, \dots, (m-1)$:

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} P_k = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (6.17)$$

Аналогічним чином можна знайти ймовірність безвідмовної роботи як суму (6.15) для $k=m, m+1, \dots, n$:

$$P = \sum_{k=m}^n P_k = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (6.18)$$

Очевидно, що $Q + P = 1$, тому в розрахунках слід вибирати ту з формул (6.17), (6.18), яка в даному конкретному випадку містить меншу кількість доданків.

Для системи «2 з 5» (рис. 3.1) за формулою (3.18) отримаємо:

$$P = C_5^2 p^2 (1-p)^3 + C_5^3 p^3 (1-p)^2 + C_5^4 p^4 (1-p) + C_5^5 p^5 = 10p^2(1-p)^3 + 10p^3(1-p)^2 + 5p^4(1-p) + p^5 = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \quad (6.19)$$

Ймовірність відмови тієї ж системи по (6.17):

$$Q = C_5^0 (1-p)^5 + C_5^1 p(1-p)^4 = (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5, \quad (6.20)$$

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

Таблиця 6.1 – Таблиця станів системи «2 з 5»

N стану	Стан елементів					Стан системи	Ймовірність
	1	2	3	4	5		стану системи
1	+	+	+	+	+	+	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p^4 q^1 = p^4(1-p)$
3	+	+	+	-	+	+	
4	+	+	-	+	+	+	
5	+	-	+	+	+	+	
6	-	+	+	+	+	+	
7	+	+	+	-	-	+	$p^3 q^2 = p^3(1-p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	
9	+	-	+	+	-	+	
10	-	+	+	+	-	+	
11	+	+	-	-	+	+	
12	+	-	+	-	+	+	
13	-	+	+	-	+	+	
14	+	-	-	+	+	+	
15	-	+	-	+	+	+	
16	-	-	+	+	+	+	
17	+	+	-	-	-	+	$p^2 q^3 = p^2(1-p)^3$
18	+	-	+	-	-	+	
19	-	+	+	-	-	+	
20	+	-	-	-	+	+	
21	-	+	-	-	+	+	
22	-	-	-	+	+	+	
23	+	-	-	+	-	+	
24	-	+	-	+	-	+	
25	-	-	+	-	+	+	
26	-	-	+	+	-	+	
27	+	-	-	-	-	-	$p^1 q^4 = p^1(1-p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	
29	-	-	+	-	-	-	
30	-	-	-	+	-	-	
31	-	-	-	-	+	-	$q^5 = (1-p)^5$
32	-	-	-	-	-	-	

У таблиці 6.2 наведені формули для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи систем типу « m з n » при $m \leq n \leq 5$. Очевидно, при $m=1$ система перетворюється на звичайну систему з паралельним з'єднанням елементів, а при $m=n$ – з послідовним з'єднанням.

Таблиця 6.2 – Формули для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи систем типу « m з n » при $m \leq n \leq 5$

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

6.4 Місткові схеми

Місткова структура (рис. 6.2, а, б) являє собою паралельне з'єднання послідовних ланцюжків елементів з діагональними елементами, включеними між вузлами різних паралельних гілок (елемент 3 на рисунку 6.2, а , елементи 3 і 6 на рисунку 6.2, б). Працездатність такої системи визначається не тільки кількістю відмовивших елементів, але і їх становищем у структурній схемі. Наприклад, працездатність ТС, схема якої наведена на рисунку 6.2, а, буде втрачена при одночасній відмові елементів 1 і 2, або 4 та 5, або 2, 3 і 4 і т.д. У той же час відмова елементів 1 і 5, або 2 і 4, або 1, 3 і 4, або 2, 3 і 5 до відмови системи не приводить.

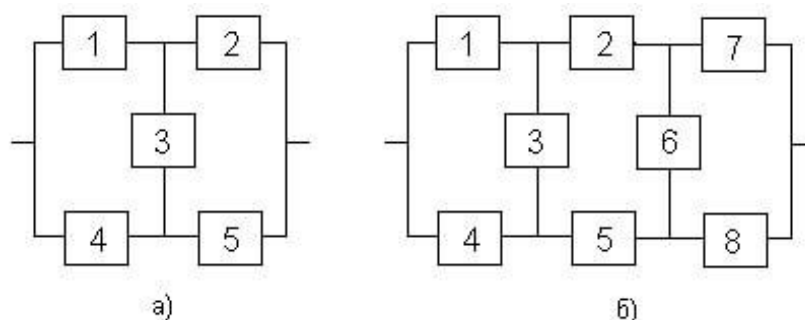


Рисунок 6.2 – Місткові системи

Для розрахунку надійності місткової системи можна скористатися методом прямого перебору, як для систем « m з n », але при аналізі працездатності кожного стану системи необхідно враховувати не тільки кількість елементів, що відмовили, але і їх положення в схемі (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Таблиця станів місткової системи

N стан у	Стан елементів					Стан системи	Ймовірність стану	
	1	2	3	4	5		в загальному випадку	при рівнонадійних елементах
1	+	+	+	+	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	$p^4 q = p^4 (1 - p)$
3	+	+	+	-	+	+	$p_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
4	+	+	-	+	+	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
5	+	-	+	+	+	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
6	-	+	+	+	+	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
7	+	+	+	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	
8	+	+	-	+	-	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
9	+	-	+	+	-	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
10	-	+	+	+	-	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	
11	+	+	-	-	+	+	$p_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	
12	+	-	+	-	+	+	$p_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
13	-	+	+	-	+	+	$q_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
14	+	-	-	+	+	+	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
15	-	+	-	+	+	+	$q_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
16	-	-	+	+	+	-	$q_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
17	+	+	-	-	-	-	$p_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	$p^2 q^3 = p^2 (1 - p)^3$
18	+	-	+	-	-	-	$p_1 q_2 p_3 q_4 q_5$	
19	-	+	+	-	-	-	$q_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	
20	+	-	-	-	+	-	$p_1 q_2 q_3 q_4 p_5$	
21	-	+	-	-	+	+	$q_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	
22	-	-	-	+	+	-	$q_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
23	+	-	-	+	-	+	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
24	-	+	-	+	-	-	$q_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
25	-	-	+	-	+	-	$q_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
26	-	-	+	+	-	-	$q_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
27	+	-	-	-	-	-	$p_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	$p q^4 = p (1 - p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	$q_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	
29	-	-	+	-	-	-	$q_1 q_2 p_3 q_4 q_5$	
30	-	-	-	+	-	-	$q_1 q_2 q_3 p_4 q_5$	
31	-	-	-	-	+	-	$q_1 q_2 q_3 q_4 p_5$	
32	-	-	-	-	-	-	$q_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	$q^5 = (1 - p)^5$

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

$$\begin{aligned}
 P = & p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 p_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 + p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 + \\
 & + q_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 q_3 q_4 p_5 + p_1 q_2 p_3 q_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + p_1 q_2 q_3 p_4 q_5.
 \end{aligned}
 \tag{6.21}$$

У випадку рівнонадійних елементів

$$P = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 + 2p^2q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.
 \tag{6.22}$$

Метод прямого перебору ефективний тільки при малій кількості елементів n , оскільки кількість станів системи складає 2^n . Наприклад, для схеми на рис. 6.2,б їх кількість становитиме вже 256. Деяке спрощення досягається, якщо в таблицю станів включати тільки поєднання, що відповідають працездатному (або тільки непрацездатному) стану системи в цілому.

Для аналізу надійності ТС, структурні схеми яких не зводяться до паралельного або послідовного типу, можна скористатися також методом логічних схем з застосуванням алгебри логіки (булевої алгебри). Застосування цього методу зводиться до складання для ТС формули алгебри логіки, яка визначить умову працездатності системи. При цьому для кожного елемента і системи в цілому розглядаються дві протилежні події - відмова і збереження працездатності.

Для складання логічної схеми можна скористатися двома методами - мінімальних шляхів і мінімальних перерізів.

Розглянемо метод мінімальних шляхів для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи на прикладі місткової схеми (рис. 6.2, а).

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

Мінімальних шляхів у системі може бути один або декілька. Очевидно, система з послідовним з'єднанням елементів має тільки один мінімальний шлях, який включає всі елементи. У системі з паралельним з'єднанням кількість мінімальних шляхів збігається з кількістю елементів і кожен шлях включає один з них.

Для місткової системи з п'яти елементів (рис. 6.2, а) мінімальних шляхів чотири: (елементи 1 і 4), (2 і 5), (1, 3 і 5), (2, 3 і 5). Логічна схема такої системи (рис. 6.3) складається таким чином, щоб всі елементи кожного мінімального шляху були сполучені один з одним послідовно, а всі мінімальні шляхи паралельно.

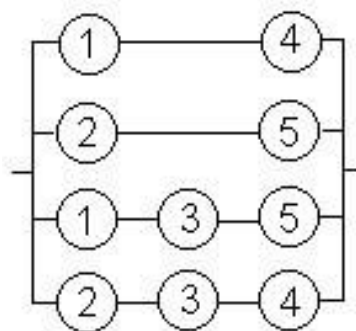


Рисунок 6.3 – Логічна схема місткової системи за методом мінімальних шляхів

Потім для логічної схеми складається функція алгебри логіки A за загальними правилами розрахунку імовірності безвідмовної роботи, але замість символів ймовірностей безвідмовної роботи елементів p_i і системи P використовуються символи події (збереження працездатності елемента a_i і системи A). Так, «відмова» логічної схеми на рисунку 6.3 полягає в одночасній відмові всіх чотирьох паралельних гілок, а «безвідмовна робота» кожної гілки – в одночасній безвідмовній роботі її елементів. Послідовне з'єднання елементів логічної схеми відповідає логічному множенню («І»), паралельне – логічному додаванню («АБО»). Отже, схема на рисунку 6.3 відповідає твердженням: система працездатна, якщо працездатні елементи 1 і 4, або 2 та 5, або 1,3 та 5, або 2,3 і 4. Функція алгебри логіки запишеться:

$$A = 1 - (1 - a_1 a_4)(1 - a_2 a_5)(1 - a_1 a_3 a_5)(1 - a_2 a_3 a_4). \quad (6.23)$$

У виразі (6.23) змінні a розглядаються як булеві, тобто можуть прийматися тільки два значення: 0 або 1. Тоді при зведенні в будь-який ступінь k будь-яка змінна a зберігає своє значення: $a_i^k = a_i$. На основі цієї властивості функція алгебри логіки (6.23) може бути перетворена до виду

$$A = a_1 a_4 + a_2 a_5 + a_1 a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_5 - 2a_1 a_2 a_4 a_5 - a_2 a_3 a_4 a_5 + 2a_1 a_2 a_3 a_4 a_5. \quad (6.24)$$

Замінивши у виразі (6.24) символи подій a_i їх ймовірностями p_i , отримаємо рівняння для визначення ймовірності безвідмовної роботи системи

$$P = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_5 - 2p_1 p_2 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2p_1 p_2 p_3 p_4 p_5. \quad (6.25)$$

Для системи рівнонадійних елементів ($p_i = p$) вираз (6.25) легко перетворюється у формулу (6.22).

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

Для розрахунку верхньої межі ймовірності безвідмовної роботи системи служить метод мінімальних перерізів.

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

У містковій системі (рис. 6.2, а) мінімальних перерізів чотири (елементи 1 і 2), (4 і 5), (1, 3 і 5), (2, 3 і 4). Логічна схема системи (рис. 6.4) складається таким чином, щоб всі елементи кожного мінімального перерізу були з'єднані один з одним паралельно, а всі мінімальні перерізи – послідовно.

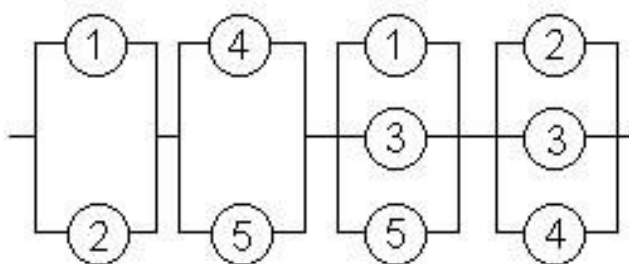


Рисунок 6.4 – Логічна схема місткової системи за методом мінімальних січень

Аналогічно методом мінімальних шляхів, складається функція алгебри логіки. «Безвідмовна робота» логічної системи на рисунку 6.4 полягає в «безвідмовній роботі» всіх послідовних ділянок, а «відмова» кожного з них – в одночасній «відмові» всіх паралельно включених елементів. Як видно, оскільки схема методу мінімальних перерізів формулює умови відмови системи, в ній послідовне з'єднання відповідає логічному «АБО», а паралельне – логічному «І». Схема на рисунку 6.4 відповідає формулюванню: система відмовить, якщо відмовлять елементи 1 і 2, або 4 та 5, або 1, 3 і 5, або 2, 3 і 4. Функція алгебри логіки запишеться

$$A = [1 - (1 - a_1)(1 - a_2)] [1 - (1 - a_4)(1 - a_5)] * [1 - (1 - a_1)(1 - a_3)(1 - a_5)] * [1 - (1 - a_2)(1 - a_3)(1 - a_4)]. \quad (6.26)$$

Після перетворень з використанням властивостей булевих змінних (6.26) набуває форму (6.24), після заміни подій їх ймовірностями переходить у вираз (6.25).

Таким чином, для місткової системи з п'яти елементів верхня і нижня межі ймовірності безвідмовної роботи, отримані методами мінімальних січень і мінімальних шляхів, збіглися з точними значеннями (6.22), отриманими методом прямого перебору. Для складних систем такого може не виникнути, тому методи мінімальних шляхів і мінімальних перерізів необхідно застосовувати спільно.

У ряді випадків аналізу надійності ТС вдається скористатись методом розкладання щодо особливого елемента, заснованим на відомій в математичній логіці теоремі про розкладання функції логіки з юудь якого аргументу.

Згідно до неї, можна записати:

$$P = p_i P(p_i = 1) + q_i P(p_i = 0), \quad (6.27)$$

де p_i і $q_i = 1 - p_i$ – ймовірності безвідмовної роботи та відмови i -го елемента,

$P(p_i = 1)$ і $P(p_i = 0)$ – ймовірності працездатного стану системи за умови, що i -й елемент абсолютно надійний і що i -й елемент відмовив.

Для місткової схеми (рис. 6.2, а) в якості особливого елемента доцільно вибрати діагональний елемент 3. При $p_3 = 1$ місткова схема перетворюється в паралельно-послідовне з'єднання (рис. 6.5, а), а при $p_3 = 0$ – у послідовно-паралельне (рис. 6.5, б).

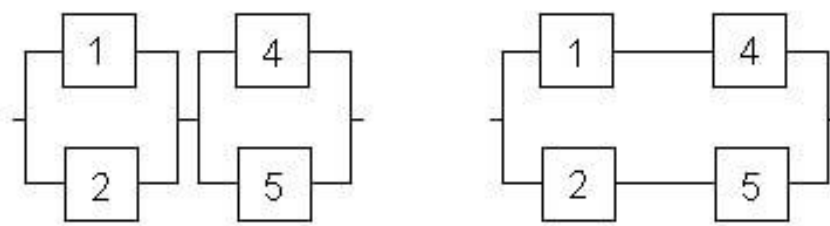


Рисунок 6.5 – Перетворення місткової схеми при абсолютно надійному (а) і відмовившому (б) центральному елементі

Для перетворених схем можна записати:

$$P(p_3 = 1) = [1 - (1 - p_3)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)], \quad (6.28)$$

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5). \quad (6.29)$$

Тоді, на підставі формули (3.27), отримаємо:

$$P = p_3 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)] + (1 - p_3) [1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)]. \quad (6.30)$$

Легко переконатися, що для рівнонадійних елементів формула (6.30) перетвориться на (6.22).

Цим методом можна скористатися і при розкладанні щодо кількох «особливих» елементів. Наприклад, для двох елементів (i, j) вираз (6.27) прийме вигляд:

$$P = p_i p_j P(p_i = 1, p_j = 1) + p_i q_j P(p_i = 1, p_j = 0) + q_i p_j P(p_i = 0, p_j = 1) + q_i q_j P(p_i = 0, p_j = 0). \quad (6.31)$$

Ймовірність безвідмовної роботи місткової схеми (рис. 6.2, б) при розкладанні щодо діагональних елементів 3 та 6 по (6.31) визначиться:

$$P = p_3 p_6 P(p_3 = 1, p_6 = 1) + p_3 q_6 P(p_3 = 1, p_6 = 0) + q_3 p_6 P(p_3 = 0, p_6 = 1) + q_3 q_6 P(p_3 = 0, p_6 = 0). \quad (6.32)$$

Ймовірність $P(p_3 p_6)$ легко ставити, виконавши попередньо перетворені схеми, подібно рисунку 6.5, а, б.

6.6 Комбіновані системи

Більшість реальних ТС має складну комбіновану структуру, частина елементів якої утворює послідовне з'єднання, інша частина – паралельне, окремі гілки елементів або гілки структури утворюють місткові схеми або типу « t з n ».

Метод прямого перебору для таких систем виявляється практично не реалізуємим. Більш доцільно в цих випадках попередньо зробити декомпозицію системи, розбивши її на прості підсистеми – групи елементів, методика розрахунку надійності яких відома. Потім ці підсистеми в структурній схемі надійності замінюються квазіелементами з ймовірностями безвідмовної роботи, що дорівнюють обчисленими ймовірностям безвідмовної роботи цих підсистем. При необхідності таку процедуру можна виконати кілька разів, до тих пір, поки квазіелементи, що залишились, не утворять структуру, методика розрахунку надійності якої також відома.

Як приклад розглянемо комбіновану систему, представлену на рисунку 6.6.

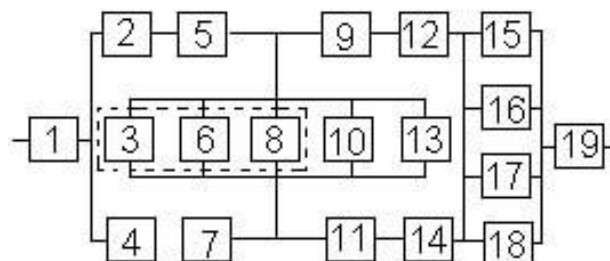


Рисунок 6.6 – Вихідна система

Тут елементи 2 і 5, 4 і 7, 9 і 12, 11 і 14 попарно утворюють один з одним послідовні з'єднання. Замінімо їх відповідно квазіелементами А, В, С,

Д, для яких розрахунок надійності елементарно виконується за формулами п. 3.1. Елементи 15, 16, 17 і 18 утворюють паралельне з'єднання, а елементи 3, 6, 8, 10 і 13 – систему «3 з 5». Відповідні квазіелементи позначимо Е і F. У результаті перетворена схема набуде вигляду, показаний на рис. 6.7, а. У ній в свою чергу елементи А, В, С, Д, F утворюють місткову схему, яку заміняємо квазіелементом G. Схема, отримана після таких перетворень (рис. 6.7, б), утворює послідовне з'єднання елементів 1, G, E, 19.

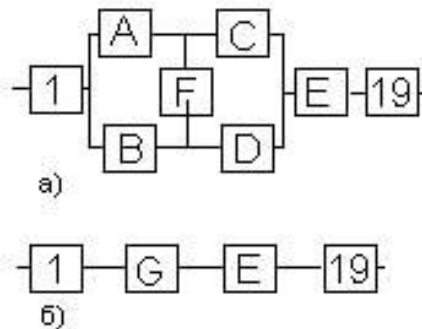


Рисунок 6.7 – Перетворені системи

Відзначимо, що метод прямого перебору для вихідної системи зажадав б розглянути $2^{19} = 524288$ можливих перетворень.

7 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

Технічна діагностика – наукова дисципліна, сутність якої становлять теорія, методи і засоби виявлення та пошуку дефектів у технічних об'єктах.

Під *дефектом* розуміють будь-яку невідповідність властивостей об'єкта заданим, необхідним або очікуваним його властивостям (ушкодження, відмова, збій і т.п.). Виявлення дефекту є встановлення факту його наявності або відсутності в об'єкті. Пошук дефекту полягає в знаходженні його місця розташування в об'єкті з певною точністю. Виявлення та пошук дефектів - це процеси визначення технічного стану об'єкта, об'єднані загальним терміном технічне діагностування.

Під *об'єктом діагностування* розуміють виріб і його складові частини або заготовку, технічний стан яких підлягає визначенню. У технічній діагностиці прийнято виділяти два класи об'єктів: аналогові (безперервні) і дискретні. В аналогових об'єктах сигнали є струмами і напругами, які можуть приймати будь-які значення в межах деякої області значень. Приклади: підсилювачі, генератори різних сигналів, блоки живлення та ін. У дискретних об'єктах сигнали можуть приймати тільки дискретні значення, наприклад, нуль або одиниця. До цього типу об'єктів належать усі логічні елементи і

схеми, цифрові ПЕОМ. Основне призначення технічної діагностики полягає в забезпеченні надійності об'єктів на етапі їхньої експлуатації, а також у попередженні виробничого браку на стадії виготовлення. Забезпечення надійності досягається, у першу чергу, скороченням часу відновлення і, як наслідок, поліпшенням таких показників як коефіцієнт готовності, коефіцієнт технічного використання, середній ресурс, середній термін служби й ін.

Будь-який технічний об'єкт після розробки проходить дві основні стадії «життя» – виробництво й експлуатацію. Для стадії експлуатації основними режимами є використання об'єкта за призначенням, технічне обслуговування, ремонт, зберігання й транспортування. Залежно від відповідності (або невідповідності) якості апаратури вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської (проектної) документації виготовлений (новий) або експлуатований об'єкт може перебувати в різних технічних станах.

Під *технічним станом* об'єкта розуміємо сукупність його внутрішніх властивостей, які можуть змінюватись при виробництві й експлуатації. На практиці розрізняють наступні види технічного стану об'єкта: справне, несправне, працездатне, непрацездатне, правильне (або неправильне) функціонування. Правильно функціонуючим вважається об'єкт, параметри (ознаки) якого, в певний момент реального часу застосування об'єкта за призначенням знаходяться у необхідних межах.

Таким чином, *завдання діагностування* – це перевірка справності, працездатності і правильності функціонування об'єкта, а також пошук дефектів, що порушують справність, працездатність або правильність функціонування.

Мета технічного діагностування, здійснюваного при підготовці до застосування об'єкта - контроль працездатності. Можливі технічні стани об'єкта - працездатний або непрацездатний.

Отже, жорстка постановка завдань технічного діагностування допускає, по-перше, пряме або непряме визначення класу можливих дефектів і, по-друге, наявність формалізованих методів побудови алгоритмів діагностування, реалізація яких забезпечує виявлення дефектів заданого класу з необхідною повнотою або пошук останніх з необхідною глибиною.

Глибина пошуку дефекту – характеристика пошуку дефекту, що задається вказівкою складової частини об'єкта діагностування або її ділянки (елемента), з точністю до яких визначається місце дефекту. Надалі елементом будемо називати ту частину об'єкта, з точністю до якої потрібно визначити місце дефекту. Наприклад, при контролі працездатності (окремий випадок пошуку дефекту) елементом є весь об'єкт. Достовірність результатів технічного діагностування кількісно оцінює імовірність того, що справжній

технічний стан об'єкта збігається зі станом, встановленим у результаті діагностування.

Достовірність результатів технічного діагностування, здійснюваного ідеальною системою, залежить від кратності дефектів, що розрізняють при діагностуванні. Тут під кратністю дефекту розуміємо число, що характеризує сукупність одночасно існуючих двох або більше одиночних дефектів.

Діагностування технічного стану будь-якого об'єкта здійснюється різними засобами діагностування: апаратними, програмними або програмно-апаратними (рис. 7.1).

Як засіб діагностування, може також виступати людина - оператор, контролер, наладчик. Засоби і об'єкт діагностування, взаємодіючи між собою, утворюють систему діагностування.



Рисунок 7.1 – Засоби діагностування

Розрізняють *системи тестового й функціонального діагностування*.

У системах тестового діагностування на об'єкт діагностування подаються спеціальні тестові впливи.

У системах функціонального діагностування, які працюють у процесі застосування об'єкта за призначенням, подача тестових впливів, як правило, виключається; на об'єкт діагностування надходять тільки робочі впливи, передбачені його алгоритмом функціонування.

Системи тестового діагностування необхідні для перевірки справності і працездатності, а також пошуку дефектів, що порушують справність або працездатність об'єкта.

Системи функціонального діагностування призначені для перевірки

правильності функціонування і для пошуку дефектів, що порушують правильне функціонування об'єкта. Слід зазначити, що засоби функціонального діагностування є, як правило, вбудованими і тому розробляються та створюються одночасно з об'єктом.

Система діагностування в процесі визначення технічного стану об'єктів реалізує деякий алгоритм діагностування (тестовий або функціональний).

Алгоритм технічного діагностування (АТД) у загальному випадку складається з певної сукупності так званих елементарних перевірок об'єкта діагностування, а також правил, що встановлюють послідовність реалізації цих перевірок, і правил аналізу результатів останніх.

Кожна елементарна перевірка визначається своїм тестовим або робочим впливом, що подається або поступає на об'єкт, і складом контрольних точок, з яких знімаються відповіді об'єкта на цей вплив. Результатом елементарної перевірки є конкретні значення відповідних сигналів об'єкта в певних контрольних точках. Остаточний висновок про технічний стан об'єкта приймається в загальному випадку за сукупністю отриманих результатів елементарних перевірок.

Послідовність елементарних перевірок утворює *тест діагностування*. Тестом перевірки називається тест для перевірки справності або працездатності об'єкта діагностування. Тест пошуку дефекту призначений для визначення місця та, при необхідності, причини й виду дефекту об'єкта.

Методи побудови алгоритму технічного діагностування деякого об'єкта припускають наявність формального опису об'єкта і його поведінки в справному (працездатному) і несправному (непрацездатному) станах. Такий формальний опис (в аналітичній, табличній, векторній, графічній або іншій формі) називають математичною моделлю об'єкта діагностування. Математична модель може бути задана в явному або неявному виді.

Явна модель об'єкта діагностування представляє собою сукупність формальних описів справного (працездатного) об'єкта і усіх (точніше, кожної з розглянутих) його несправних (непрацездатних) модифікацій.

Неявна модель об'єкта діагностування припускає наявність тільки одного опису, наприклад, справного або працездатного об'єкта, формалізованих моделей дефектів і правил одержання за заданим описом та за моделями дефектів опису всіх несправних (або непрацездатних) модифікацій об'єкта.

Застосування явних моделей на практиці звичайно обмежується аналоговими об'єктами діагностування. Для дослідження цифрових об'єктів діагностування внаслідок надзвичайно великої кількості можливих станів даного класу об'єктів використовують, як правило, неявні моделі. Побудова

алгоритмів діагностування полягає у виборі такої сукупності елементарних перевірок, за результатами яких можна відрізнити справний чи працездатний стан, або стан правильного функціонування об'єкта від його несправних станів, а також у задачах пошуку дефектів розрізняти несправні стани (або групи несправних станів).

У загальному випадку для одного й того ж самого об'єкта діагностування можна побудувати кілька алгоритмів, що розрізняються або складом перевірок, або послідовністю їхнього виконання, або тим й іншим. Тому що в загальному випадку тривалості різних перевірок відрізняються одна від іншої, то середня тривалість діагностування, здійснюваного відповідно до різних алгоритмів, також неоднакова. У зв'язку із цим виникає завдання оптимізація процесу технічного діагностування об'єкта, що зводиться до знаходження алгоритму, що забезпечує мінімальний середній час визначення технічного стану об'єкта з необхідними вірогідністю результатів і глибиною діагностування.

Побудова оптимальних алгоритмів технічного діагностування в багатьох випадках пов'язана із труднощами обчислень і тому найчастіше задовольняються оптимізованими алгоритмами діагностування, витрати на реалізацію яких певним чином зменшені, але не обов'язково мінімальні.

Оптимальний (або оптимізований) алгоритм технічного діагностування будується в кілька етапів, причому число цих етапів, а також ступінь оптимальності алгоритму залежать від обсягу й вірогідності вихідних даних про об'єкт.

На першому етапі складається функціональна схема об'єкта діагностування, причому кількість елементів визначається необхідною глибиною діагностування.

На другому етапі за функціональною схемою будується формальна математична модель об'єкта діагностування, яка використовується при побудові алгоритму. Ступінь точності моделі визначається необхідною достовірністю результатів діагностування, яка у більшості випадків задається вказівкою кратності можливих дефектів об'єкта діагностування.

На третьому етапі визначаються мінімальні тести, що перевіряють, і мінімальні тести пошуку дефекту. На підставі цих тестів будуються безумовні або умовні алгоритми технічного діагностування. При використанні безумовних алгоритмів вибір наступної перевірки не залежить від результатів попередньої - і тому технічний стан об'єкта діагностування визначається за результатами виконання всіх перевірок, що ввійшли в мінімальний тест, або мінімальний тест пошуку дефекту.

В умовних алгоритмах наступна перевірка вибирається з врахуванням

результатів попередньої. Тому технічний стан об'єкта діагностування в деяких випадках визначається за частиною перевірок, що ввійшли в мінімальний тест перевірки (тест пошуку дефекту). Отже, у середньому, умовні алгоритми забезпечують визначення технічного стану об'єкта діагностування за менше число перевірок, ніж безумовні.

Варто підкреслити, що методи побудови алгоритмів технічного діагностування аналогових і дискретних об'єктів діагностування мають специфічні особливості, які будуть розглянуті окремо.

На завершення зазначимо, що в технічній літературі по діагностиці поряд з терміном «дефект» застосовується термін «несправність». Термін «дефект» застосовують при контролі якості продукції на стадії її виготовлення, а також при її ремонті, наприклад, при дефектації, а термін «несправність» – при використанні за призначенням, зберіганні, транспортуванні. Тому надалі стосовно до об'єктів РЕТ поряд з термінами «дефект», «пошук дефекту» будемо використати терміни «несправність», «пошук несправності».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вишнівський В. В. Основи надійності та діагностики телекомунікаційних і радіотехнічних систем. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/1_1092_31009342.pdf (Дата звернення: 19.06.2024).

2. Навчально-методичний посібник з дисципліни «Діагностика та випробування приладів і машин» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування / упор. Т. Ю. Кісіль, В. М. Заїка, В. В. Туз. URL: https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/812/1/%d0%94%d1%82%d0%b0%d0%92%d0%9f%d0%9c%20%d0%bf%d0%be%d1%81_%d0%b1%d0%bd%d0%b8%d0%ba%202019%20%d0%9a%d1%96%d1%81%d1%96%d0%bb%d1%8c%20.pdf (Дата звернення: 19.06.2024).

3. Методичні вказівки до курсу лекцій з дисципліни «Надійність і діагностика електрообладнання» (для здобувачів вищої освіти спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / укладач Н. М. Філімоненко. Київ: Вид-во СНУ ім. В. Даля. 2023. 98 с.

4. Васілевський О. М., Ігнатенко О. Г. Нормування показників надійності технічних засобів. URL: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/321060/mod_resource/content/1/%D0%BA%D0%BD%D0%B8%D0%B3%D0%B0%20%20%D0%9E%D0%A2%D0%9D.pdf (Дата звернення: 19.06.2024).

5. Павлюк О. М. та інші. Основи теорії надійності технічних систем. Львів: Вид-во «Львівська політехніка», 2021. 208 с.

Інформаційні ресурси

6. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Київ, 1994. (Інформація та документація).

7. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. [Чинний від 01.01.97]. Київ, 1994. (Інформація та документація).

8. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги [Чинний від 01.01.97]. Київ, 1994. (Інформація та документація).

9. ДСТУ 2864-94 Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення. [Чинний від 01.01.97]. Київ, 1994. (Інформація та документація).

10. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. [Чинний від 01.01.96]. Київ, 1995. (Інформація та документація).

Надійність та діагностування систем керування безпілотними апаратами:
конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Системи керування безпілотними апаратами» галузі знань
17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації спеціальності 174
Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка денної
та заочної форм навчання / уклад. Л. О. Гуменюк. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 58 с.

Комп'ютерний набір

Л. О. Гуменюк

Редактор

Л. О. Гуменюк

Підп. до друку «__» 2025 р. Папір офс.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 3,6. Обл.-вид. арк. 4,1.
Тираж 30 прим.

Відділ іміджу та промоції
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ВІП ЛНТУ

