



Міністерство освіти і науки України

Харківський національний
автомобільно-дорожній університет

кафедра Метрології та БЖД

МЕТРОЛОГІЧНА НАДІЙНІСТЬ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Харків 2018



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРЬКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ
кафедра Метрології та БЖД

МЕТРОЛОГІЧНА НАДІЙНІСТЬ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

для студентів механічного факультету
спеціальності 8.05100101
“Метрологія та вимірювальна техніка”

Затверджено

Методичною радою університету,

Протокол № від 2018 р.

Харків ХНАДУ 2018

Укладачі: О.І. Богатов
Р.Е.Пащенко
А.О. Коваль

Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний
автомобільно-дорожній університет

кафедра Метрології та БЖД

До друку і в світ дозволяю
Проректор

Клец Д. М.

МЕТРОЛОГІЧНА НАДІЙНІСТЬ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

для студентів механічного факультету
спеціальності 8.05100101
“Метрологія та вимірювальна техніка”

Усі цитати, цифровий, фактичний
Матеріал та бібліографічні
Відомості перевірені, написання
Одиниць відповідає стандартам

Затверджено методичною
радою університету,
Протокол №
від 2018 р.

Укладачі:

О.І. Богатов
Р.Е. Пащенко
А.О. Коваль

Відповідальний за випуск:

О.В. Крайнюк

Харків ХНАДУ 2018

УДК 621.3.019.3

Рецензенти: док. техн. наук, проф,
док. техн. наук, проф.

Метрологічна надійність. Конспект лекцій / О.І. Богатов, Р.Е. Пащенко,
А.О. Коваль. – Харків: Харківський нац. автомобільно-дорожній ун-т, 2018. –
95 с.

В конспект лекцій включені відомості, що являють собою основні етапи роботи під час розрахунку надійності метрологічних засобів. Розглянуті основні поняття та показники теорії надійності. Викладені методи розрахунку надійності засобів вимірювання та можливості автоматизованого розрахунку надійності. Також розглянуті підходи щодо випробування на надійність засобів вимірювання.

Конспект лекцій призначений для студентів, що навчаються за спеціальністю “Метрологія та вимірювальна техніка”.

© Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
2018 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
ЛЕКЦІЯ № 1 Основні поняття теорії надійності.....	9
1.1 Етапи розвитку теорії надійності.....	9
1.2 Об'єкти, що розглядаються в теорії надійності.....	11
1.3 Основні поняття і визначення теорії надійності.....	12
ЛЕКЦІЯ № 2 Показники надійності метрологічних засобів.....	15
2.1 Загальна характеристика показників надійності.....	15
2.2 Показники безвідмовності.....	16
2.3 Показники довговічності.....	22
2.4 Показники ремонтопридатності.....	24
2.5 Показники збереженості.....	27
2.6 Комплексні показники надійності.....	27
ЛЕКЦІЯ № 3 Вплив різних чинників на показники надійності засобів вимірювання.....	31
3.1 Об'єктивні чинники, що впливають на показники надійності.....	31
3.2 Суб'єктивні чинники, що впливають на показники надійності.....	38
ЛЕКЦІЯ № 4 Структурні моделі надійності засобів вимірювання.....	40
4.1 Поняття структурної моделі надійності.....	40
4.2 Послідовна та паралельна моделі надійності.....	41
4.3 Метод перетворення складної логічної структури за базовим елементом.....	44
ЛЕКЦІЯ № 5 Методи розрахунку надійності засобів вимірювання.....	47
5.1 Приблизний розрахунок надійності.....	47
5.2 Орієнтовний розрахунок надійності.....	50
5.3 Остаточний розрахунок надійності.....	52
ЛЕКЦІЯ № 6 Розрахунок надійності засобів вимірювання, що відновлюються.....	55
6.1 Метод диференціальних рівнянь обчислення функцій і коефіцієнтів готовності засобів вимірювання, що відновлюються.....	55
6.2 Оцінка надійності нерезервованих засобів вимірювання, що відновлюються.....	56
6.3 Оцінка надійності резервованих засобів вимірювання, що відновлюються.....	62

ЛЕКЦІЯ № 7 Автоматизований розрахунок надійності засобів вимірювання.....	66
7.1 Загальні відомості про сучасні засоби автоматизованого розрахунку надійності.....	66
7.2 Короткий огляд програмних комплексів розрахунку надійності.....	67
ЛЕКЦІЯ № 8 Випробування на надійність засобів вимірювання.....	77
8.1 Особливості оцінки надійності за результатами випробувань.....	77
8.2 Основні відомості про статистичні методи обробки спостережень....	78
8.3 Перевірка статистичних гіпотез.....	80
Додаток А Квантилі розподілу Стьюдента.....	84
Додаток Б Квантилі розподілу Пірсона.....	85
Додаток В Квантилі розподілу Фішера.....	89
Додаток Г Квантилі розподілу Кохрана.....	91
ЗАКІНЧЕННЯ.....	93
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	94

ВСТУП

Навчальним планом та програмою підготовки студентів спеціальності “Метрологія та вимірювальна техніка” очної форми навчання передбачено вивчення дисципліни “Метрологічна надійність”. Програмою дисципліни на вивчення навчальної дисципліни відводиться: 75 години (2,5 кредитів ЄКТС). З них 16 годин навчального часу відводиться на читання лекцій та 16 годин на практичні заняття, також 43 години самостійна робота студента.

Метою викладання навчальної дисципліни є формування у студентів сукупності знань та навичок щодо типових підходів та методів діагностики і розрахунку надійності під час проектування та експлуатації метрологічних засобів.

Основними завданнями вивчення навчальної дисципліни є: освоєння і практичне використання основних методів розрахунку надійності метрологічних засобів; вивчення термінологічного апарату та основних показників метрологічних; ознайомлення з методами та способами підвищення надійності метрологічних засобів; отримання навичок з розв’язання інженерних задач, які мають місце при розробці та експлуатації метрологічних засобів у частині використання теорій надійності та експлуатації метрологічних засобів.

Конспект лекцій складається з восьми лекцій, які охоплюють основний теоретичний матеріал навчальної дисципліни “Метрологічна надійність”. Під час підготовки матеріалів лекцій автори спиралися на джерела інформації, які наведені наприкінці конспекту лекцій. Необхідно зазначити, що під час підготовки лекцій № 1, 2 за основу були вибрані джерела [5, 7], лекції № 3 – джерело [11], лекцій № 4, 5, 6 – джерело [8], лекції № 7 – джерело [10], а лекції № 8 – джерела [5, 7].

Частина теоретичного матеріалу навчальної дисципліни, яка не відображена у конспекті лекцій, викладена у практикумі до навчальної дисципліни “Метрологічна надійність”.

ЛЕКЦІЯ № 1

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

Навчальна мета:

розглянути етапи розвитку теорії надійності та об'єкти, що розглядаються в теорії надійності;
вивчити основні поняття теорії надійності.

Навчальні питання:

1. Етапи розвитку теорії надійності.
2. Об'єкти, що розглядаються в теорії надійності.
3. Основні поняття і визначення теорії надійності.

1.1 Етапи розвитку теорії надійності

Надійність – це властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати необхідні функції у заданих режимах та умовах використання, технічного обслуговування, ремонту, зберігання та транспортування.

Початковий етап розвитку теорії надійності охоплює період з появи перших технічних пристроїв (кінець XIX століття) і до появи електроніки та автоматики, авіації та ракетно-космічної техніки (середина XX століття).

Перші дослідження у галузі надійності та відпрацювання її концепцій відносять до кінця другої світової війни. Причиною для організації робіт у цій галузі було усвідомлення того факту, що створена у роки війни техніка не забезпечувала достатню ефективність її використання внаслідок багаточисельних відмов. Так, наприклад, до 60% літаків, які були випущені у США і призначалися для війни проти Японії, виявились непрацездатними; 50% електронної апаратури виходило з ладу під час зберігання і не могли бути використані за призначенням. Як показав аналіз, що був проведений у ті роки, найбільш низьку надійність мала електронна апаратура, тому пріоритетним напрямком у підвищення надійності стали дослідження та удосконалення саме таких видів техніки. З початком розвитку авіації і застосування в ній електроніки та автоматики теорія надійності починає бурхливо розвиватися. На цьому етапі з'явилося поняття “запас міцності”, як відношення “навантаження/міцність”. Основою теорії надійності стала теорія ймовірності і математична статистика.

В США у серпні 1952 року була організована консультативна група з надійності у галузі електронної апаратури, яка розробила перші стандарти з надійності.

Наступний розвиток робіт у галузі надійності деякі спеціалісти розділяють на чотири етапи.

Перший етап 50-ті роки – становлення теорії надійності, який ще називають ”олівцево-паперовим”. На цьому етапі було встановлено, що основними причинами виходу з ладу техніки та радіоелектронної апаратури є низька надійність окремих її елементів. Почався і був зібраний статистичний матеріал про відмови різних елементів техніки. На підставі цього матеріалу проводився статистично-імовірнісний опис напрацювань до відмови, при цьому передбачалося, що напрацювання до відмови розподіляються за експоненціальним законом. Моменти виникнення і причини відмов розглядалися як випадкові події, що мають “фатальну неминучість”, і є “внутрішньою властивістю елементів”, аналіз причин появи відмов не проводився.

Таким чином, на першому етапі розвитку теорії надійності були поставлені завдання, спрямовані на вивчення питань надійності, регулярного вивчення і забезпечення надійності елементів, а також визначені шляхи та вимоги до кількісних показників надійності техніки.

Другий етап 60-ті роки – класичної теорії надійності. Цей етап характеризувався широким проведенням робіт з експериментальної оцінки фактичної надійності, збиранням та опрацюванням експлуатаційної інформації з надійності. Почався аналіз причин відмов, який показав залежність між конструкцією техніки, технологією її виробництва, випробуваннями, експлуатаційними умовами з відмовами елементів. Було встановлено, що відмови мають причини, які потрібно виявити та усунути. З’являються нові стандарти з надійності машин.

Таким чином, на другому етапі почалося вивчення надійності техніки на всіх стадіях її створення, особлива увага приділялася експериментальному дослідженню надійності, а також розроблялося теорія діагностики складних систем.

Третій етап 70-ті роки – системних методів надійності. Характеризується як подальшим розвитком математичної теорії надійності, так і зближенням цієї науки з технічними дисциплінами, наданням надійності інженерної спрямованості. На цьому етапі були розроблені нові вимоги до надійності, що заклали основу сучасних систем та програм забезпечення надійності. Були розроблені типові методи забезпечення надійності на всіх стадіях життєвого циклу техніки.

Таким чином, на третьому етапі почалося використання всіх практично можливих способів досягнення високої надійності техніки вже на початкових стадіях проектування, здійснюється перехід на контроль надійності техніки в умовах виготовлення, а також впроваджуються методи промислового контролю на підприємствах, які спрямовані на виявлення дефектів, що приводять до відмов.

Четвертий етап почався у 80-ті роки – автоматизації оцінки надійності та оптимізації резервування. На цьому етапі разом з появою та розвитком обчислювальної техніки з’являються та розвиваються методи

автоматизованих розрахунків і прогнозу надійності техніки. Спостерігається перехід від оцінки надійності до оцінки живучості техніки та оптимізації схем її резервування.

Також на сучасному етапі розвитку теорії надійності приділяється велика увага розробці нових методів оцінки надійності цифрових інтегральних мікросхем (ЦІМС), і виготовлених на їх основі приладів. Розвиток ЦІМС характеризується зростанням їх складності та зменшенням геометричних розмірів окремих елементів напівпровідникових структур.

Зменшення геометричних розмірів елементів ЦІМС вимагає високої якості початкових матеріалів і досконалості технологічних процесів виготовлення приладів. Зменшення розмірів ЦІМС, також приводить до підвищення їх чутливості до дефектів, розміри, яких наближаються до атомних. У цих умовах виникає потреба визначення дефектності початкових матеріалів, причин виникнення дефектів у процесі виготовлення напівпровідникових структур, еволюції дефектів на подальших етапах життєвого циклу приладів та їх впливу на надійність.

Під час розробки методів оцінки надійності ЦІМС проводяться різноманітні дослідження в області фізико-хімічних процесів, що протікають у матеріалах з яких вони виготовляються. Ці дослідження можна сказати стали базою становлення фізичної теорії надійності.

Роботи які проводяться у межах цієї теорії дозволять перейти від пасивного спостереження статистичних даних з надійності до поглибленого вивчення причин виникнення відмов, виявлення механізмів деградації характеристик матеріалів та параметрів приладів. Крім того, це дозволить розробити методи адаптивного впливу на технологічні процеси і конструкцію приладів.

1.2 Об'єкти, що розглядаються в теорії надійності

У даний час замість вузького поняття “виріб” як предмету, виготовленого на виробництві, в теорії надійності використовують більш узагальнююче поняття “об'єкт”.

Під **об'єктом** розуміють предмет певного цільового призначення, що розглядається у періоди проектування, виробництва, експлуатації, досліджень і випробувань на надійність. Об'єктами можуть бути вироби, системи та їх елементи, частини споруд, установки, пристрої, машини, апарати, прилади та їх частини, агрегати та окремі деталі.

Під час розглядання метрологічної надійності під об'єктами будемо розуміти різноманітні засоби вимірювання.

Об'єкти підрозділяють на **об'єкти, що відновлюються, та об'єкти, що не відновлюються.**

Об'єкти, що відновлюються, – об'єкти, відновлення працездатного стану яких, у ситуацій, яка розглядається, передбачено нормативно-технічною та конструкторською документацією.

Об'єкти, що не відновлюються, – об'єкти, відновлення працездатного стану яких, не передбачено нормативно-технічною та конструкторською документацією.

Поняття “об'єкт, що відновлюється” і “об'єкт, що не відновлюється” необхідно відокремлювати від понять “об'єкт, що ремонтується” і “об'єкт, що не ремонтується”, оскільки останнє поняття характеризує властивість об'єкту.

Об'єктом, що ремонтується, називають такий об'єкт, справність і працездатність якого, у разі виникнення відмови або пошкодження, підлягає відновленню.

Об'єкт, у якого справність і працездатність не підлягає відновленню, називають **об'єктом, що не ремонтується.**

У ряді випадків ці поняття можуть співпадати (мікросхема – об'єкт, що не відновлюється, вона ж є об'єктом, що не ремонтується).

1.3 Основні поняття і визначення теорії надійності

Надійність – це складне поняття, об'єднуюче ряд властивостей об'єкту, пов'язаних з якістю виконання їм певних функцій протягом заданого часу. У техніці надійність має цілком конкретне значення. Вона не тільки може бути точно визначена, але і розрахована, об'єктивно оцінена, зміряна і випробувана.

Не дивлячись на різноманітність об'єктів та умов їх роботи, формування показників надійності відбувається за загальними законами, підпорядковується єдиній логіці зв'язків, розкриття яких є основою для оцінки, розрахунку та прогнозування надійності, а також для побудови раціональних систем виробництва, випробувань та експлуатації об'єктів.

Показник надійності – кількісна характеристика одного або декількох властивостей, що визначають надійність об'єкту.

Справність – стан об'єкту при якому він відповідає всім вимогам, що встановлені нормативно-технічною та (або) конструкторською документацією.

Несправність – стан об'єкту, при якому він не відповідає хоча б одній з вимог нормативно-технічної та (або) конструкторської документації.

Працездатність – стан об'єкту, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної та (або) конструкторської документації.

Непрацездатність – стан об'єкту, при якому значення хоча б одного заданого параметра, що характеризує здатність виконувати задані функції, не відповідає вимогам нормативно-технічної та (або) конструкторської документації.

Якість – сукупність властивостей об'єкту, що обумовлюють його придатність задовольняти певні потреби відповідно до призначення.

Надійність є складовою частиною якості та обумовлюється безвідмовністю, ремонтопридатністю, зберіганням і довговічністю. Вона визначається досконалістю конструкції та технологій виготовлення, багато в чому залежить від умов експлуатації і ремонту.

Розглянемо, що характеризують такі властивості як безвідмовність, ремонтопридатність, довговічність, збереженість та інші, від яких залежить надійність.

Безвідмовність – властивість об'єкту безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або деякого напрацювання.

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

Довговічність – властивість об'єкту зберігати працездатний стан до досягнення граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту.

Збереженість – властивість об'єкту зберігати значення показників безвідмовності, довговічності і ремонтотпридатності протягом зберігання та (або) транспортування, а також після цього.

Граничний стан – стан об'єкту, при якому його подальше використання за призначенням неприпустимо або недоцільно, або відновлення його справного або працездатного стану неможливе або недоцільне.

Надійність в основному визначається його безвідмовністю і довговічністю. Безвідмовність розглядається як самостійна безперервна робота об'єкту без проведення заходів щодо підтримки його працездатності. Під довговічністю об'єкту розуміють його роботу за весь період експлуатації, враховуючи, що тривала робота об'єкту неможлива без технічного обслуговування та ремонту.

Перехід об'єкту з одного стану в інший будемо називати **подією**.

Пошкодженням називають подію, яка полягає у порушенні справного стану об'єкту (його складових частин) внаслідок впливу зовнішніх чинників, що перевищують рівні, які встановлені у нормативно-технічній документації на об'єкт, і в переході його у несправний стан.

В теорії надійності також розглядається таке поняття як **відмова**, яке безпосередньо пов'язано з поняттям **працездатність**. Ознаки (критерії) відмов встановлюються нормативно-технічною документацією на даний об'єкт.

Відмова об'єкту може наступити внаслідок поломки, деформації, зносу деталей, порушення регулювань механізмів або систем, ослаблення кріплень та ін. Як правило, відмова виникає в результаті неякісного та невчасного технічного обслуговування об'єкту.

По характеру прояви відмови ділять на **поступові** та **раптові**.

Поступова відмова характеризується поступовою зміною значень одного або декількох заданих параметрів об'єкту.

Раптова відмова характеризується стрибкоподібною зміною значень одного або декількох заданих параметрів об'єкту.

Відмови також можуть бути **залежними** та **незалежними**.

Незалежна відмова – це відмова, яка не обумовлена відмовою іншого об'єкту.

Залежна відмова – це відмова, яка обумовлена відмовою іншого об'єкту.

Конструкційні відмови виникають внаслідок помилок конструктора або недосконалості методів конструювання (наприклад, недостатня міцність елементів конструкції, незахищеність важливих частин об'єкту від впливу зовнішніх чинників і т. ін.). У разі недосконалості конструкції необхідно враховувати, що конструктивні відмови будуть властиві всім екземплярам даної моделі об'єкту.

Виробничі відмови виникають у результаті недосконалості або порушення встановленого процесу виготовлення або ремонту об'єкту. Якість деталей, вузлів, агрегатів в цілому не буває однаковим. Незначні зміни якості не значно позначаються на надійності об'єкту. При значних відхиленнях якості надійність одних об'єктів буде набагато нижче за надійність інших, що приводить до виробничих відмов, пов'язаних з зниженням надійності тільки частини об'єктів.

На виробництві залежно від вибору місця і методу усунення відмови об'єкту або його елементу відмови ділять на **експлуатаційні** та **ресурсні**.

Експлуатаційні відмови виникають у результаті порушення правил експлуатації або впливу непередбачених правилами зовнішніх чинників, що приводить до передвчасних відмов, тобто прискорює передвчасне старіння об'єкту. Як правило, такі порушення торкаються лише частини об'єктів, що експлуатуються.

Ресурсні відмови усуваються шляхом застосування трудомістких розбірно-складальних, регулювальних та інших робіт. Для їх виконання використовують спеціальне обладнання та висококваліфікований обслуговуючий персонал. При цьому відновлюється міжремонтний ресурс і підвищуються інші показники надійності.

Питання для самоперевірки:

1. Що таке надійність об'єкту ?
2. Чим характерні різні етапи розвитку теорії надійності ?
3. У чому різниця між об'єктами, що відновлюються, та, що не відновлюються ?
4. Які властивості характеризують надійність об'єкту ?
5. Які існують відмови і чим вони відрізняються ?

ЛЕКЦІЯ № 2

ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ МЕТРОЛОГІЧНИХ ЗАСОБІВ

Навчальна мета:

розглянути загальну характеристику показників надійності метрологічних засобів;

вивчити показники безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності і збереженості.

Навчальні питання:

1. Загальна характеристика показників надійності.
2. Показники безвідмовності.
3. Показники довговічності.
4. Показники ремонтпридатності.
5. Показники збереженості.
6. Комплексні показники надійності.

2.1 Загальна характеристика показників надійності

Залежно від призначення об'єкту та умов його експлуатації надійність може включати окремі властивості об'єкту, такі як **безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збереженість**, або їх поєднання.

Для кількісного виразу надійності об'єкту (її складових) і для планування експлуатації використовують спеціальні характеристики – **показники надійності**. Вони дозволяють оцінювати надійність об'єкту або його елементів у різних умовах і на різних етапах експлуатації. Показники надійності можуть мати розмірність або бути безрозмірними величинами.

Оскільки на надійність об'єкту впливають численні чинники, то кількість показників надійності може бути великою.

Показники надійності повинні відповідати певним вимогам:

узгодженість з поняттям надійність;

можливість їх числового визначення або задавання;

можливість їх розрахунку за даними експлуатації і проектування;

достатня універсальність;

простота і зручність застосування.

Показники надійності повинні характеризувати кількісно властивості конкретного об'єкту, що визначають його надійність.

Під час вивчення показників надійності слід розрізняти: найменування; чисельне значення, яке може змінюватися залежно від умов експлуатації об'єкту і ступеня його досконалості; формулювання, що містить вказівки про способи визначення чисельного значення.

По кількості властивостей, що характеризуються показниками надійності, розрізняють **одиничні і комплексні показники**.

Одиничним показником надійності називають показник, що відноситься до однієї з властивостей, що визначають надійність об'єкту.

Показник, що відноситься до декількох властивостей, що становлять надійність об'єкту, називають **комплексним показником надійності**.

Залежно від умов отримання необхідних для розрахунку статистичних даних розрізняють: **дослідні, оцінні, екстрапольовані і прогнозовані** показники надійності.

Слід враховувати, що одиничні показники надійності для відновлюваних і не відновлюваних об'єктів можуть бути різними. Оскільки надійність складна властивість, то повинні бути різні одиничні показники для оцінки її часткових властивостей: безвідмовності, довговічності, ремонтопридатності і збереженості. Перелічимо ці одиничні показники.

Показники безвідмовності:

Об'єкт, що не відновлюється: ймовірність безвідмовної роботи; інтенсивність відмов; середнє напрацювання до відмови.

Об'єкт, що відновлюється: ймовірність безвідмовної роботи; параметр потоку відмов; середнє напрацювання до відмови.

Показники довговічності:

Об'єкт, що не відновлюється: середній термін служби; середній термін служби до списання; гама-відсотковий термін служби; призначений ресурс; середній ресурс; гама-відсотковий ресурс.

Об'єкт, що відновлюється: середній термін служби; середній термін служби до списання; гама-відсотковий термін служби; середній термін служби до середнього (капітального) ремонту; середній термін служби між середніми (капітальними) ремонтами; призначений ресурс; середній ресурс; гама-відсотковий ресурс; середній ресурс між середніми (капітальними) ремонтами; середній ресурс до списання; середній ресурс до середнього (капітального) ремонту;

Показники ремонтопридатності:

ймовірність відновлення в заданий час; середній час відновлення.

Показники збереженості: середній термін збереженості; гама-відсотковий термін збереженості.

До комплексних показників надійності відносяться: коефіцієнт готовності; коефіцієнт технічного використання; коефіцієнт оперативної готовності; середня і питома сумарна трудомісткість технічного обслуговування; середня і питома сумарна трудомісткість ремонтів.

2.2 Показники безвідмовності

Безвідмовність характеризує властивість об'єкту безперервно зберігати працездатність протягом деякого часу або деякого напрацювання. Поняття

безвідмовності безпосередньо пов'язане з виконанням об'єктом своїх функцій. Математичні методи оцінки безвідмовності розвинені більш за всі.

Основним показником безвідмовності є **ймовірність безвідмовної роботи** – ймовірність того, що у межах заданого напрацювання відмова об'єкту не виникне. Напрацювання визначає тривалість або обсяг роботи об'єкту.

Для позначення ймовірності безвідмовної роботи одного елементу як правило використовують малу літеру $p(t)$, а систем – велику $P(t)$.

Виникнення відмови є випадковою подією, а час появи відмови t_B є випадковою величиною. Згідно визначення ймовірності безвідмовної роботи можна записати

$$p(t) = \text{Ймовір} \{t \leq t_B\}, \quad (2.1)$$

де t – поточний час.

Ймовірність появи відмови – ймовірність того, що випадкова величина t_B буде приймати значення менше поточного часу t

$$q(t) = \text{Ймовір} \{t > t_B\}, \quad (2.2)$$

тобто її можна розглядати як величину, що зворотна ймовірності безвідмовної роботи.

Аналогічно до позначення ймовірності безвідмовної роботи, ймовірності появи відмови елементу будемо використовувати $q(t)$, а систем $Q(t)$.

Ймовірності появи відмови можна розглядати як функцію розподілу випадкової величини t_B – часу до появи першої відмови. Як функція розподілу $q(t)$ має ряд властивостей:

вона не убыває, тобто при $t_2 > t_1$

$$q(t_2) > q(t_1);$$

у початковий момент часу, тобто при $t = 0$

$$q(t) = 0;$$

при збільшенні t верхня межа прагне до 1, тобто $t \rightarrow \infty$

$$\lim q(t) = 1.$$

Функціональні залежності $p(t)$ і $q(t)$ показані на рис. 2.1.

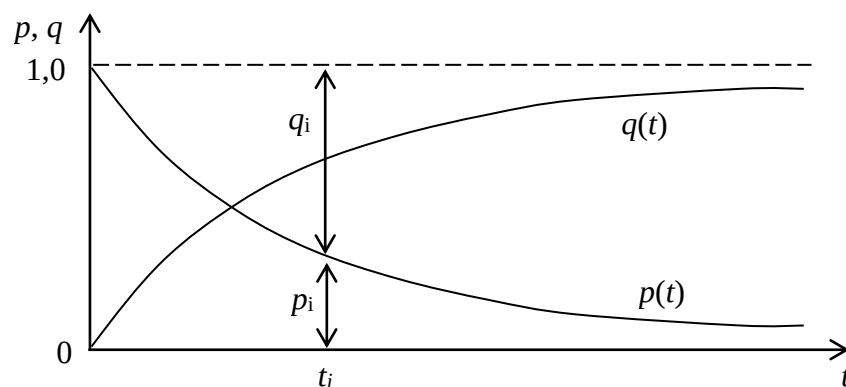


Рисунок 2.1 – Функціональні залежності $p(t)$ і $q(t)$

Функція розподілу $q(t)$ є інтегральною характеристикою. Також часто для оцінки надійності використовується диференціальна характеристика у вигляді **функції щільності розподілу** – $f(t)$

$$f(t) = \frac{q(t + \Delta t) - q(t)}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} = q'(t), \text{ якщо } \Delta t \rightarrow 0, \quad (2.3)$$

$$\text{або} \quad q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau. \quad (2.4)$$

З урахуванням виразу (2.4) вираз (2.1) можна записати як

$$p(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_0^\infty f(\tau) d\tau. \quad (2.5)$$

Аналізуючи вирази (2.4), (2.5) і (2.6), можна знайти взаємозв'язок між $q(t)$, $f(t)$ і $p(t)$

$$q'(t) = f(t) = -dp(t)/dt = -p'(t). \quad (2.6)$$

Також важливою характеристикою безвідмовності є **інтенсивність відмов** $\lambda(t)$ – умовна щільність ймовірності виникнення відмови не відновлюваного об'єкту, яка визначається для даного моменту часу за умови, що до цього моменту відмова не виникла.

Виходячи з визначення для моменту часу $(t, t + \Delta t)$ з урахуванням виразу (2.4) можна записати

$$\begin{aligned} q(t, t + \Delta t) &= p(t) \lambda(t) \Delta t; \\ q(t, t + \Delta t) &= f(t) \Delta t. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Як видно з виразу (2.7), інтенсивність відмов можна знайти як

$$\lambda(t) = f(t)/p(t). \quad (2.8)$$

З використанням виразів (2.6) і (2.8) можна отримати диференціальне рівняння безвідмовності

$$\lambda(t) = -\frac{dp(t)}{p(t)dt}, \quad \text{або} \quad \lambda(t)dt = -\frac{dp(t)}{p(t)}. \quad (2.9)$$

Рішенням цього диференціального рівняння буде ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$

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

Для нульових початкових умов ($t = 0$) ймовірність безвідмовної роботи дорівнює одиниці ($p(0) = 1$), тобто постійна C буде дорівнювати нулю ($C = 0$).

З урахування цього рішення диференціального рівняння (2.9) буде мати вигляд

$$p(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(t) dt \right\}. \quad (2.10)$$

З виразу (2.9) також можна отримати залежність

$$\int_0^t \lambda(t) dt = -\ln p(t). \quad (2.11)$$

Зв'язок між $\lambda(t)$, $f(t)$ та $p(t)$ можна знайти з використанням виразів (2.8), (2.10) та (2.11)

$$f(t) = -\lambda(t)p(t) = \lambda(t) \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(t) dt \right\}. \quad (2.12)$$

Якщо об'єкт містить N послідовно включених однотипних елементів, то інтенсивність відмов визначається виразом

$$\Lambda(t) = N\lambda(t), \text{ 1/год.} \quad (2.13)$$

Якщо об'єкт містить K груп різних елементів, то вираз (2.13) приймає вигляд

$$\Lambda(t) = \sum_{i=1}^K N_i \lambda_i(t), \text{ 1/год.} \quad (2.14)$$

Залежність інтенсивності відмов від часу експлуатації для складних об'єктів показана на рис. 2.2.

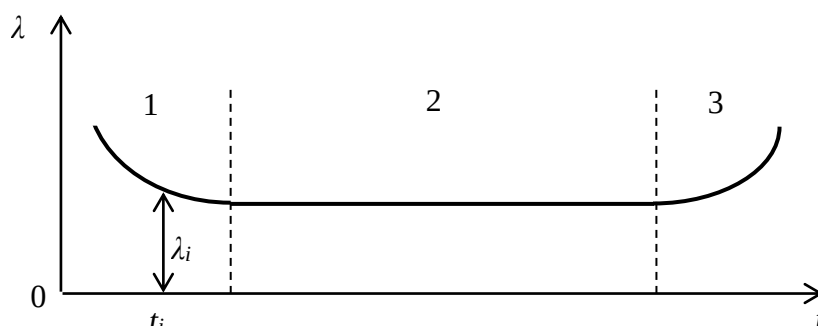


Рисунок 2.2 – Залежність інтенсивності відмов від часу експлуатації

На рисунку можна виділити три різні ділянки: 1 – прироблення; 2 – нормальна експлуатація; 3 – старіння.

На першій ділянці спостерігається зниження інтенсивності відмов з часом. Це пояснюється швидким виявленням найменш надійних об'єктів (елементів).

Друга ділянка характеризує період, коли інтенсивність відмов стабілізується на найнижчому рівні.

Третя ділянка показує різке збільшення відмов, що пояснюється наближенням об'єктів до граничного стану. Цей період з експлуатації, як правило, виключається.

Поряд з ймовірністю безвідмовної роботи та інтенсивністю відмов ще одним показником, який часто використовується для оцінки надійності об'єктів, є **середнє напрацювання до відмови** m_t , яке є математичним очікуванням напрацювання до першої відмови. Відповідно до цього визначення

$$m_t = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t p'(t) dt.$$

Інтегруючи цей вираз по частинах, одержуємо

$$m_t = -tp(t)|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} p(t) dt = \int_0^{\infty} p(t) dt. \quad (2.15)$$

Згідно виразу (2.15) середнє напрацювання до відмови дорівнює площі під кривою ймовірності безвідмовної роботи $p(t)$ (див. рис. 2.1).

Під час експлуатації об'єктів, що відновлюються, спостерігається послідовна зміна справного стану і відновлення після відмови, тобто послідовна зміна інтервалів часу працездатного і непрацездатного станів.

Поява відмов у кожному з N об'єктів можна розглядати як потік заявок на відновлення. Математичне очікування числа відмов за час t даного потоку може бути визначено виразом

$$M(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t), \quad (2.16)$$

де $m_i(t)$ – кількість відмов i -го об'єкту за час t .

У складному об'єкті результуючий потік відмов рівний сумі потоків відмов окремих пристроїв, відповідно результуючий потік буде простим, тобто буде задовольняти умовам: ординарності, стаціонарності і відсутності післядії.

Ординарність потоку означає, що ймовірність появи двох і більш відмов в один і той же момент часу є величиною вищого порядку малості, тобто практично відсутня.

Стаціонарність потоку означає, що ймовірність появи рівно m відмов за проміжок часу $t, t + \Delta t$ не залежить від t , а є функцією Δt і m .

Відсутність післядії полягає в тому, що для двох відрізків часу Δt_1 і Δt_2 число відмов в одному з них не залежить від числа відмов, що потрапили в інший.

Основною характеристикою потоку відмов є **параметр потоку відмов** – щільність ймовірності виникнення відмови відновлюваного об'єкту у поточний момент часу.

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

$$M(t) = \int_0^t \omega(t) dt. \quad (2.17)$$

У разі експоненціального розподілу

$$\omega(t) = \lambda. \quad (2.18)$$

Для об'єктів, що відновлюються, замість середнього напрацювання до відмови застосовується показник **напрацювання на відмову T** – відношення напрацювання об'єкту, що відновлюється, до математичного очікування числа його відмов протягом цього напрацювання

$$T = \frac{t_2 - t_1}{\int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt} = \frac{t_2 - t_1}{M(t_2) - M(t_1)}. \quad (2.19)$$

З використанням виразів (2.17) і (2.19) можна отримати вираз для ймовірності безвідмовності роботи об'єктів, що відновлюються,

$$p(t_1, t_1 + t_2) = \exp\left[-\int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt\right] = \exp[-M(t_2) - M(t_1)] = \exp\left(-\frac{t_2 - t_1}{T}\right). \quad (2.20)$$

Ці показники можуть бути використані для будь-якого етапу експлуатації.

Значення розглянутих параметрів можуть бути також знайдені на підставі обробки статистичного матеріалу результатів експлуатації або експерименту з групою об'єктів даного типу, що спеціально проводиться. Таке визначення показників розглянемо на практичному занятті.

2.3 Показники довговічності

Довговічність це властивість об'єкту зберігати працездатність до наступу граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонтів.

Період нормального функціонування різних об'єктів залежить від властивостей матеріалів і деталей, з яких він виготовлений і не буде однаковим. З часом настає неминуча зміна властивостей матеріалів і виникає необхідність аналізу можливості збереження працездатності об'єктів до заданої межі з необхідними перервами.

Для елементів, що не відновлюються, (мікросхеми, транзистори, резистори, конденсатори і т. ін.) значення довговічності співпадає з часом їх експлуатації повністю.

З метою кількісної оцінки властивостей об'єкту, що пов'язані з довговічністю, використовуються одиничні показники: **термін (строк) служби і ресурс**.

Термін (строк) служби – календарна тривалість експлуатації об'єкту від початку експлуатації або його відновлення після середнього (капітального) ремонту до переходу у граничний стан граничного стану.

Ресурс – напрацювання об'єкту від початку експлуатації або відновлення після середнього (капітального) ремонту до настання граничного стану.

Напрацювання – тривалість або об'єм роботи об'єкту.

Гарантійне напрацювання – напрацювання об'єкту, до завершення якого виробник гарантує і забезпечує виконання певних вимог до об'єкту за умови дотримання споживачем правил експлуатації, у тому числі правил зберігання і транспортування.

Для об'єктів, що відновлюються, і, що не відновлюються, розрізняють **середній термін служби, середній термін служби до списання і гамма-відсотковий термін служби**.

Середній термін служби $T_{ср.сл}$ – математичне очікування терміну служби

$$T_{cp.cl} = \int_0^{\infty} t_{cl,i} f(t_{cl}) dt, \quad (2.21)$$

де $t_{cl,i}$ – термін служби i -го об'єкту;

$f(t_{cl})$ – функція щільності розподілу терміну служби.

Середній термін служби до списання $T_{cp.cl.cn}$ – середній термін служби від початку експлуатації до його списання, обумовленого граничним станом. Значення цієї величини визначається на підставі статистичних даних експлуатації об'єктів.

Гама-відсотковий термін служби $T_{cl,\gamma}$ – календарна тривалість від початку експлуатації об'єкту, протягом якої він не досягає граничного стану із заданою ймовірністю γ відсотків. Гама-відсотковий термін служби визначається виразом

$$1 - q(T_{cl,\gamma}) = p(T_{cl,\gamma}) - \gamma/100, \quad (2.22)$$

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

Для експоненціального закону розподілу часу безвідмовної роботи елементів об'єкту з використанням (2.22) отримаємо

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

Після взяття логарифму даного виразу отримаємо

$$T_{cl,\gamma} = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\gamma}{100} = -m_t \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right). \quad (2.23)$$

Отриманий вираз (2.23) пов'язує безвідмовність комплектуючих об'єкт елементів з його довговічністю. Так при $\gamma = 90\%$ з виразу (2.23) можна визначити $T_{cl,90\%} = 0,105 m_t$.

Для об'єктів, що відновлюються, також розглядають **середній термін служби між середніми (капітальними) ремонтами і середній термін служби до середнього (капітального) ремонту**.

Середній термін служби між середніми (капітальними) ремонтами $T_{cp.cl.mr}$ – середній термін служби між суміжними середніми (капітальними) ремонтами. Значення цієї величини визначається на підставі статистичних даних експлуатації об'єктів.

Середній термін служби до середнього (капітального) ремонту $T_{cp.cl.cr(k,p)}$ – середній термін служб від початку експлуатації об'єкту до його першого середнього (капітального) ремонту. Його значення також визначається на підставі статистичних даних експлуатації об'єктів.

Для об'єктів, що відновлюються, і, що не відновлюються, розрізняють **призначений ресурс, середній ресурс і гама-відсотковий ресурс.**

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

Середній ресурс R_{cp} – математичне очікування ресурсу

$$R_{cp} = \int_0^{\infty} r_i f(r) dt, \quad (2.24)$$

де r_i – ресурс роботи i -го елементу (об'єкту);

$f(r)$ – функція щільності розподілу величини r .

Гама-відсотковий ресурс R_γ – напрацювання, протягом якого об'єкт не досягає граничного стану з заданою ймовірністю γ відсотків. Для визначення гама-відсоткового ресурсу використовують вираз (2.22), підставляючи замість функції розподілу терміну служби значення функції розподілу ресурсу.

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

Середній ресурс між середніми (капітальними) ремонтами $R_{cp.m.p}$ – середній ресурс між суміжними середніми (капітальними) ремонтами. Його значення визначається на підставі статистичних даних експлуатації об'єктів.

Середній ресурс до списання $R_{cp.cn}$ – середній ресурс об'єкту від початку експлуатації до його списання, обумовленого граничним станом, визначається також на підставі статистичних даних експлуатації об'єктів.

Середній ресурс до середнього (капітального) ремонту $R_{cp.c.p} (к.р)$ – середній ресурс від початку експлуатації об'єкту до його першого середнього (капітального) ремонту, визначається на основі статистичних даних експлуатації об'єктів.

2.4 Показники ремонтопридатності

Ремонтпридатність – властивість об'єкту, що полягає у пристосованості до попередження і виявлення причин виникнення його відмов, пошкоджень та усунення їх наслідків шляхом проведення ремонтів і технічного обслуговування. Тобто термін ремонтпридатність оцінює властивості об'єкту, що пов'язані з підтримкою і відновленням його працездатності.

Технічне обслуговування – сукупність технічних та організаційних заходів, що забезпечують підтримку об'єкту у працездатному стані на різних етапах його експлуатації. Технічному обслуговуванню (для попередження і

виявлення відмов) підлягають як об'єкти, що відновлюються, так і, що не відновлюються.

Ремонтом – організація і виконання робіт з відновлення працездатності і ресурсу роботи об'єкту (елементу).

Для кількісної оцінки ремонтоспридатності використовуються одиничні показники: **ймовірність відновлення у заданий час і середній час відновлення**. Ці показники розраховуються тільки для об'єктів, що відновлюються.

Ймовірність відновлення у заданий час $P_{від}(t)$ – ймовірність того, що фактична тривалість робіт з відновлення працездатності об'єкту не перевищить заданої. Математично це може бути записано у вигляді

$$P_{від}(t) = \text{Ймовір} \{t_{від} \leq t\}, \quad (2.25)$$

де $t_{від}$ — час відновлення об'єкту.

Ймовірність відновлення у заданий час може розглядатися як функція розподілу випадкової величини $t_{від}$ часу відновлення об'єкту.

Для зручності математичного опису процесу відновлення застосовують поняття **інтенсивність відновлення** $\mu(t)$ – ймовірність відновлення працездатності об'єкту в одиницю часу за умови, що до цього часу відновлення не відбулося.

Отримаємо взаємозв'язок цих показників для умови, що час відновлення розподілений за експоненціальним законом. Ця умова у ряді випадків добре описує реальні процеси.

Для цієї умови $\mu(t) = \mu = \text{const}$ будемо розглядати відновлення об'єкту у проміжку часу $t, t + \Delta t$. Ймовірність цієї події може бути розглянута як ймовірність реалізації двох несумісних подій: відновлення об'єкту до моменту t і відновлення об'єкту за проміжок часу $t + \Delta t$

$$P_{від}(t, t + \Delta t) = P_{від}(t) + [1 - P_{від}(t)] \mu \Delta t. \quad (2.26)$$

Одержуємо диференціальне рівняння першого порядку

$$\frac{dP_{від}(t)}{dt} = [1 - P_{від}(t)] \mu. \quad (2.27)$$

Рішення цього рівняння з урахуванням початкових умов $[t = 0, P(0) = 0]$ має вигляд

$$P_{від}(t) = 1 - \exp(-\mu t). \quad (2.28)$$

Середній час відновлення $T_{від.ср}$ – математичне очікування часу відновлення працездатності. Згідно визначенню

$$T_{від.ср} = M_{від.ср} = \int_0^{\infty} t f_{від}(t) dt, \quad (2.29)$$

де $f_{від}(t) = P'_{від}(t)$ – щільність розподілу випадкової величини часу відновлення.

Для випадку експоненціального розподілу часу відновлення

$$T_{від.ср} = \int_0^{\infty} t P_{від}(t) dt = \int_0^{\infty} t \mu \exp(-\mu t) dt = \frac{1}{\mu}. \quad (2.30)$$

У ряді випадків, особливо коли об'єкт за призначенням працює з перервами, вказують **допустимий час простою** для пошуку та усунення відмови $T_{n.дон}$, виходячи з умов його застосування. Якщо задовольняється нерівність $T_{n.дон} > T_{від}$, то такий об'єкт не припинятиме свого функціонування.

Звідси можна зробити висновок, що якщо замість елементу, що відмовив, можна встигнути з запасу включити новий, то не всі можливі відмови елементів будуть відмовами всього об'єкту.

В цьому випадку число відмов всього об'єкту характеризується виразом

$$n(T_{від} > T_{n.дон}) = n - nP_{від}(T_{n.дон}) = n[1 - P_{від}(T_{n.дон})], \quad (2.31)$$

де n – загальна кількість відмов;

$P_{від}(T_{n.дон})$ – ймовірність відновлення об'єкту за час $T_{n.дон}$.

Ймовірність відновлення значною мірою залежить від співвідношення допустимого часу простою до середнього часу відновлення $T_{n.дон}/T_{від}$. На величину цього відношення значно впливають конструктивні характеристики об'єктів і кваліфікація обслуговуючого персоналу.

Отже, ремонтпридатність об'єкту значною мірою визначається заходами, передбаченими і проведеними під час його проектування і виготовлення. Також на ремонтпридатність впливає експлуатація об'єкту, оскільки у цей період діють такі чинники, як організація технічного обслуговування і відновлення, підготовка операторів, постачання запасними елементами і т. ін.

Дослідження останніх років показали, що, не дивлячись на велику різноманітність об'єктів, є багато загальних закономірностей в організації технічного обслуговування і відновлення, що дозволяє використовувати загальну методику підходу до її рішення.

Організація експлуатації, відновлення і ремонту повинна ґрунтуватися на висновках і рекомендаціях теорії експлуатації.

2.5 Показники збереженості

Збереженість – властивість об'єкту зберігати задані експлуатаційні властивості на етапах зберігання і транспортування. Ця властивість є особливо важливою для об'єктів з тривалими термінами зберігання.

Збереженість може розглядатися як специфічний випадок безвідмовності, що поширюється тільки на етапи зберігання і транспортування.

Для кількісної оцінки збереженості використовують одиничні показники: **середній термін збереженості і гама-відсотковий термін збереженості.**

Середній термін збереженості – математичне очікування терміну збереженості

$$T_{\text{ср.збер}} = \int_0^{\infty} t_{\text{збер.}i} f(t_{\text{збер}}) dt, \quad (2.32)$$

де $t_{\text{збер.}i}$ – збереженість i -го об'єкту (елементу);

$f(t_{\text{збер}})$ – функції щільності розподілу величини $t_{\text{збер.}}$

Гама-відсотковий термін збереженості $T_{\text{збер.}\gamma}$ – термін збереженості, який буде досягнутий об'єктом з заданою ймовірністю γ відсотків.

Гама-відсотковий термін збереженості може бути визначений виразом (2.22), якщо підставити замість функції розподілу терміну служби значення функції розподілу терміну збереженості.

Аналітично показники збереженості можна розрахувати, використовуючи вираз для експоненціального розподілу часу безвідмовної роботи елементів і підставляючи в нього значення λ -показників елементів для етапів зберігання і транспортування.

2.6 Комплексні показники надійності

У ряді випадків для оцінки експлуатаційних якостей об'єкту одних одиничних показників надійності буває недостатньо. Виникає необхідність у показниках, які б відносилися відразу до декількох властивостей, що становлять надійність об'єкту. Такі показники називають комплексними показниками надійності.

До основних комплексних показників надійності відносять: **коефіцієнт готовності; коефіцієнт технічного використання; коефіцієнт оперативної готовності.**

Коефіцієнт готовності K_g – ймовірність того, що об'єкт (елемент) виявиться працездатним у довільний момент часу, окрім планованих періодів, протягом яких використання об'єкту за призначенням не передбачається.

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

Якщо прийняти просту систему експлуатації об'єкту (робота-відновлення-робота), то для визначення значення коефіцієнта готовності можна записати

$$K_g = \frac{m_t}{m_t + T_{vid}}. \quad (2.33)$$

де m_t – напрацювання на відмову;

T_{vid} – середній час відновлення.

З приведенного виразу видно, що для збільшення значення коефіцієнта готовності необхідно збільшити безвідмовність об'єкту або скоротити час відновлення.

Також іноді для оцінки надійності використовують **коефіцієнт простою** K_n – коефіцієнт, що визначає ймовірність того, що об'єкт (елемент) буде непрацездатним у довільно вибраний момент часу

$$K_n = \frac{T_{vid}}{m_t + T_{vid}}. \quad (2.34)$$

Згідно виразам (2.33) і (2.34) можна записати

$$K_g = 1 - K_n. \quad (2.35)$$

Коефіцієнти готовності і простою є ймовірністю протилежних випадкових подій.

Коефіцієнт технічного використання K_{me} – відношення математичного очікування часу перебування об'єкту в працездатному стані за деякий період експлуатації до суми математичних очікувань часу перебування об'єкту у працездатному стані, часу простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням, і часу ремонтів за той же період експлуатації.

$$K_{me} = \frac{M(m_t)}{M(m_t) + M(T_{TO}) + M(T_{vid})}. \quad (2.36)$$

Крім коефіцієнта технічного використання для оцінки трудомісткості технічного обслуговування також використовують і інші показники.

Середня сумарна трудомісткість технічного обслуговування – математичне очікування сумарних трудовитрат на проведення технічного обслуговування об'єкту (елементу) за певний період експлуатації.

Відношення цього показника до математичного очікування сумарного напруження об'єкту (елементу) за той же період експлуатації називають **питомою сумарною трудомісткістю технічного обслуговування**.

Для оцінки трудомісткості ремонтів використовують аналогічний показник – **середню сумарну трудомісткість ремонтів** – математичне очікування сумарних трудовитрат на всі види ремонтів об'єкту (елементу) за певний період експлуатації.

Відношення цього показника до математичного очікування сумарного напруження об'єкту (елементу) за той же період експлуатації називають **питомою сумарною трудомісткістю ремонтів**.

Коефіцієнт оперативної готовності. Ряд об'єктів працюють у режимі, якому характерні тривалі періоди очікування використання за призначенням (наприклад, телефонний апарат).

Режим очікування – режим експлуатації, коли об'єкт знаходиться в стані повного або полегшеного навантаження в очікуванні виконання своїх функцій за призначенням.

Необхідність використання виникає раптово, після чого об'єкт безвідмовно функціонує протягом часу $t_{роб}$. Для виконання завдання у момент надходження вимоги об'єкт повинен бути працездатним. Отже, у режимі очікування можлива поява відмов і виникає необхідність його відновлення.

Для оцінки надійності таких об'єктів використовується комплексний показник – **коефіцієнт оперативної готовності**.

Коефіцієнт оперативної готовності $K_{ог}$ – ймовірність того, що об'єкт, який перебуває у режимі очікування, виявиться працездатним у довільний момент часу i , починаючи з цього моменту, працюватиме безвідмовно протягом заданого інтервалу часу.

Якщо відома ймовірність безвідмовної роботи об'єкту за час $t_{роб}$ і вона не залежить від моменту надходження вимоги, то можна записати

$$K_{ог} = K_z P(t_{роб}). \quad (2.37)$$

Для врахування впливу різних чинників на об'єкт у період його експлуатації використовують коефіцієнт навантаження. Цей коефіцієнт важливий для оцінки умов експлуатації об'єкту.

Коефіцієнт навантаження K_n – відношення реального робочого навантаження, що діє на об'єкт (елемент) у даних умовах, до номінального навантаження, передбаченого для даного об'єкту (елементу) у заданих умовах експлуатації

$$K_n = H_p / H_{ном}, \quad (2.38)$$

де H_p – реальне навантаження;

$H_{ном}$ – номінальне навантаження.

При цьому поняття навантаження має значення: теплове навантаження, електричне навантаження, механічне навантаження і т. ін.

Розглянуті комплексні показники надійності визначаються на підставі статистичних даних експлуатації об'єктів, або на підставі даних експериментів, що спеціально проводяться, з цими об'єктами.

Окрім розглянутих у ряді випадків приймають і інші комплексні показники надійності. Наприклад, для оцінки вартості експлуатації використовують вартість технічного обслуговування, вартість ремонтів і т. ін.

Питання для самоперевірки:

1. Які показники можна віднести до показників надійності ?
2. Які показники характеризують властивість об'єкту безперервно зберігати працездатність ?
3. Як кількісно можна оцінити пристосованість об'єкту до попередження і виявлення причин виникнення його відмов ?
4. Які показники надійності об'єктів використовуються на етапах зберігання і транспортування ?
5. Чим відрізняються комплексні показники надійності від одиничних ?
6. В чому полягає різниця між коефіцієнтами готовності та оперативної готовності ?

ЛЕКЦІЯ № 3

ВПЛИВ РІЗНИХ ЧИННИКІВ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

Навчальна мета:

вивчити об'єктивні чинники, що впливають на показники надійності засобів вимірювання;

розглянути суб'єктивні чинники, що впливають на показники надійності засобів вимірювання.

Навчальні питання:

1. Об'єктивні чинники, що впливають на показники надійності.
2. Суб'єктивні чинники, що впливають на показники надійності.

На надійність засобів вимірювання (ЗВ) впливає велика кількість чинників, як у процесі їх виробництва так і у процесі експлуатації. Величина впливу чинників на складові надійності та їх показники відрізняється. Всі чинники можна розподілити на дві групи: **об'єктивні чинники і суб'єктивні чинники.**

3.1 Об'єктивні чинники, що впливають на показники надійності

В процесі експлуатації на відмови ЗВ найбільше впливають об'єктивні чинники. До групи об'єктивних чинників відносяться **експлуатаційні, кліматичні і біологічні**. До них відносяться: **час експлуатації; електричні режими роботи; температура середовища; вологість та атмосферні опади; знижений тиск; сонячні та інші види радіації; різного роду домішки у повітрі; механічні навантаження (перевантаження, удари і вібрації); біологічні чинники (грибки, цвіль, комахи і гризуни).** Коротко розглянемо вплив цих чинників на надійність ЗВ.

Час експлуатації є одним з основних чинників, що визначають надійність засобів вимірювання.

Технологічні і конструктивні недоліки ЗВ найчастіше виявляються в перший період експлуатації (період прироблення). На цьому етапі інтенсивність відмов значно більша (див. рис. 2.2) у порівнянні з нормальним періодом експлуатації. Наприклад, на першому періоді експлуатації до 70% всіх конденсаторів виходять з ладу внаслідок пробою діелектрика.

В період прироблення виявляються багато явних і прихованих дефектів ЗВ в цілому та їх елементів. У цей період доцільно здійснювати вихідний контроль ЗВ на виробництві. Тривалість цього періоду може коливатися від декількох десятків до сотень годин (від 1 до 15% від тривалості періоду нормальної експлуатації).

Для зменшення впливу цього чинника основні елементи ЗВ необхідно піддавати попередньому тренуванню протягом певного часу. Це необхідно для того, щоб ще до експлуатації у споживача, засіб вимірювання виробив час прироблення і ненадійні елементи і вузли були б своєчасно замінені. Ці заходи приводять до зменшення ресурсу роботи ЗВ, але підвищує їх надійність на етапі використання за призначенням.

Після закінчення періоду нормальної експлуатації ЗВ наступає період, що характеризується значним зростанням інтенсивності відмов із-за старіння і зносу елементів (див. рис. 2.2). Цей період, як правило, настає після декількох сотень або тисяч годин роботи. Зростання інтенсивності відмов пояснюється незворотними змінами параметрів і характеристик елементів.

Процес старіння ЗВ йде безперервно, це викликано складними фізико-хімічними процесами, які протікають в його елементах протягом всього часу експлуатації. До фізико-хімічних процесів, що впливають на старіння ЗВ можна віднести: структурні зміни у діелектриках і провідниках; окислення поверхонь провідників; хімічні перетворення у різних матеріалах; порушення електричної і механічної міцності матеріалів; порушення герметизації внаслідок появи тріщин; підвищення водопроникності матеріалів і т. ін.

Також необхідно зазначити, що, якщо на елементи ЗВ впливає тепло, волога, світло, тиск та інші чинники, то процес старіння може прискорюватися. Так, наприклад, сорбція (поглинання) газів і пари води навколишнього середовища обумовлює зміну механічних та електричних властивостей пластмас, каучуку, провідного шару більшості плівкових резисторів, поверхонь контактів і т. ін.

Найбільш швидко старіють каркаси котушок, корпусу перемикачів і т. ін., що виготовляються з пластмас на основі преспорошку. У змінних резисторах старіння полягає у зміні опору провідного шару та його стирання, порушенні контакту між провідним шаром і движком. Монтажні дроти приходять у непридатність із-за висихання і розтріскування ізоляції. Швидко старіє пластмасове кріплення, армоване металом.

З метою уповільнення процесу старіння широко застосовують герметизацію елементів або цілих вузлів. Наприклад, її успішно використовують при виготовленні конденсаторів. Так, для електролітичних конденсаторів, герметизація значно сповільнює старіння у перші 3000-4000 годин роботи, а після порушення герметизації їх характеристики різко погіршуються.

На механічні та електромеханічні елементи і вузли більше ніж старіння впливає знос (редуктори, сельсини, реле, підшипники і т. ін.).

Електричні режими роботи ЗВ також істотно впливають на стабільність і довговічність їх характеристик і параметрів.

Всі елементи характеризуються допустимими навантаженнями по потужності розсіювання, струмам, напругам і т. ін. Робота елементів ЗВ при гранично допустимих навантаженнях скорочує їх термін служби і не гарантує

надійної роботи. Зменшення фактичних навантажень збільшує надійність роботи ЗВ.

Величину реального навантаження визначають за статистичними даними експлуатації та вимірюванні режимів роботи окремих елементів ЗВ. Для кількісної оцінки режиму роботи використовують коефіцієнти навантаження по потужності і по напрузі.

Коефіцієнт навантаження по потужності

$$K_{nP} = P_p / P_{ном}, \quad (3.1)$$

де P_p – робоче значення потужності розсіювання;

$P_{ном}$ – номінальне значення потужності розсіювання.

Коефіцієнт навантаження по потужності використовують для оцінки режимів роботи резисторів, діодів та транзисторів.

Коефіцієнт навантаження по напрузі

$$K_{nU} = U_p / U_{ном}, \quad (3.2)$$

де U_p – робоче значення напруги;

$U_{ном}$ – номінальне значення напруги.

Коефіцієнт навантаження по напрузі використовують для оцінки режиму роботи різних конденсаторів, ізоляторів і т. ін.

Необхідно зазначити, що робота елементів з низькими значеннями коефіцієнтів навантаження, приводить до більш надійної їх роботи. Але значне його заниження приводить до збільшення ваги, габаритів, вартості елементів і в цілому ЗВ. При проектуванні коефіцієнт навантаження елементів ЗВ, як правило, приймають близько 0,4 – 0,6.

Вплив електричних навантажень головним чином зводиться до погіршення температурного режиму і появи перенапруження, що може викликати пробій ізоляції. Електричні режими роботи також впливають на залежність надійності від числа включень, оскільки сприяють виникненню перенапружень при включеннях.

Температура навколишнього середовища. Засоби вимірювання використовують у різних температурних умовах, а також при різній зміні швидкості і частоті температури. Чим більше ці швидкості і частоти, тим більше температурний вплив. Таким умовам відповідають польові умови експлуатації ЗВ, а також їх робота на борту космічних апаратів та літаків.

Температура навколишнього середовища істотно впливає на температуру всередині ЗВ і температуру окремих його елементів. Якщо засіб вимірювання знаходиться під прямою дією сонячних променів при темному забарвленні поверхні, то можливе підвищення температури на 35°C і більше. Оскільки температура елементу визначається власним нагрівом і температурою середовища, то таке збільшення температури середовища

приведе до підвищення температури елемента. За рахунок цього фактичне значення коефіцієнта навантаження стає вище розрахункового.

Крім того, підвищена температура сприяє прискоренню розпаду органічних ізоляційних матеріалів, перегріву і виходу з ладу напівпровідникових приладів. Високі температури погіршують ізоляційні властивості різного роду заливок, обмоток, механічні властивості більшості полімерів, що приводить до деформації деталей і виходу їх з ладу або появи незворотних змін параметрів.

Крім високих температур на ЗВ також впливають і низькі температури. При низьких температурах пластмаси втрачають міцність, гумові вироби стають крихкими і розтріскуються, метали робляться ламкими. У тріщини ізоляції, що утворилися, потрапляє волога, знижуючи її електричну міцність. Також легко руйнуються з'єднання пластмас з металами, спаї металів з склом, порушуються паяння, регулювання зазорів, падає ємність електричних конденсаторів і т. ін.

Велика швидкість і циклічність зміни температури всередині ЗВ приводить до появи механічних знакозмінних зусиль, що у свою чергу веде до ослаблення механічних кріплень, появи втомних тріщин, запотівання і т. ін. Періодичні зміни низьких і високих температур особливо швидко приводять до руйнування різного роду обмоток.

Вплив температури на інтенсивність відмов засобів вимірювання можна оцінювати **температурним коефіцієнтом інтенсивності відмов**

$$K_t = \left(\frac{t_p^\circ}{t_{ном}^\circ} \right)^a, \quad (3.3)$$

де t_p° – робоча температура елемента ЗВ;

$t_{ном}^\circ$ – номінальна температура елемента ЗВ;

a – показник ступеню, який визначається типом елемента.

Наприкінці зазначмо, що величина температури поверхні також залежить від стану поверхні та якості зовнішнього покриття поверхні засобу вимірювання.

Вологість та атмосферні опади є одними з найбільш сильно діючих чинників. Вологість навколишнього повітря прийнято оцінювати **відносною вологістю**, що вимірюється у відсотках відношенням вологи, що фактично міститься у повітрі, до максимально можливого її змісту при даній температурі. Нормальною вологістю вважається відносна вологість 60-65%. При вологості в 80% повітря вважається сирим.

На засоби вимірювання може діяти волога, яка з'являється в результаті: поглинання водяної пари з повітря; конденсації водяної пари у повітрі (туман); змочування бризками води (дощ, сніг); занурення у воду.

Вода активно взаємодіє з матеріалами, що використовуються у конструкціях ЗВ. Здатність матеріалу адсорбувати воду у сильному ступені залежить від мікрорельєфу поверхні і структури матеріалу. Так, діелектрики з шорсткою поверхнею здатні адсорбувати вологу більше ніж з гладкою поверхнею. Матеріали, що не поглинають воду (скло, кераміка) можуть утворювати плівку вологи на поверхні вже при 30% вологості, що приводить до зниження їх поверхневого опору.

Також вода може вступати хімічний зв'язок з матеріалами з яких вимовляються ЗВ. В цьому випадку вода входить у структуру матеріалу і приводить до створення нових речовин та перебудови кристалічної решітки.

У деяких типах діелектриків (папір, ефіри, целюлоза та ін.) вода зв'язується з матеріалом водневими зв'язками. Поглинаючи воду, діелектрики погіршують свої електричні характеристики: падають питомі об'ємний і поверхневий опір, зменшується електрична міцність. Всі ці чинники приводять до зміни фактично діючого коефіцієнта навантаження і зниження надійності. Ефект дії вологи може збільшуватися за рахунок дефектів поверхні елементів: появи тріщин в покритті, порушення герметизації і т. ін.

При добових змінах температури відбувається часткова конденсація вологи, що погіршує умови роботи ЗВ. Вплив вологості також прискорює руйнування лакофарбних захисних покриттів і порушує герметизацію. Підвищена вологість руйнує структуру резисторів, збільшуючи дійсне значення опору, і різко знижує їх стійкість. Волога також впливає і на інші елементи, погіршуючи їх характеристики: окислюючи контакти, зменшуючи опір між выводами, приводячи до корозії металевих частин конструкції.

Крім прямого впливу на електричні параметри елементів, волога при циклічній зміні позитивних і негативних температур сприяє їх механічному пошкодженню, проникаючи у тріщини та пошкоджуючи герметизацію.

Атмосферні опади сприяють зростанню вологості, що у свою чергу зменшує надійність ЗВ та їх елементів. Особливу дію на ЗВ можуть створювати атмосферні опади у вигляді снігу та обмерзання. Обмерзання впливає на зовнішні елементи засобів вимірювання, що приводить до погіршення роботи всього ЗВ, а також може привести до їх механічного руйнування. Під дією вітру сніг може забиватися у всі щілини, під чохла, у фільтри і т. ін., що неминуче приводить до погіршення роботи ЗВ або до його відмови.

Для зменшення впливу вологи найбільш важливі елементи засобів вимірювання герметизуються або заливаються епоксидною смолою. Зменшити вплив атмосферних опадів можна за рахунок створення спеціальних споруд (навіси, укриття і т. ін.), які захищають від безпосередньої дії опадів.

Знижений тиск в основному впливає на засоби вимірювання, які використовуються на літаках, вертольотах, космічних апаратах, а також у гірській місцевості на висоті понад 1000 м.

Знижений тиск погіршує відведення тепла від елементів ЗВ, що може привести до їх перегріву, особливо на великих висотах, оскільки вже на висоті 6 км теплоємність повітря падає в два рази у порівнянні з його теплоємністю біля Землі.

Крім того, знижений тиск впливає на ізоляційні властивості повітря, приводить до зміни ємності повітряних конденсаторів і характеристик інших елементів, в яких повітря використовується як ізолятор. При зниженому тиску легко виникає тліючий розряд між провідниками, що знаходяться під високою напругою. При зміні висоти з 1000 до 1600 м величина пробивної напруги повітря зменшується в чотири рази.

Для зменшення впливу цього чинника приймають заходи щодо здійснення примусового охолодження елементів ЗВ та їх герметизації.

Радіація може бути природною і штучною. Джерелами **природної радіації** є: космічне випромінювання, розпад природних радіоактивних елементів, радіація радіаційних поясів Землі і випромінювання Сонця. Основним джерелом природної радіації є випромінювання Сонця, особливо його теплове і ультрафіолетове випромінювання.

Теплове випромінювання Сонця погіршує умови охолодження елементів ЗВ і може визвати його перегрів. Вплив ультрафіолетового випромінювання приводить до активізації фізико-хімічних процесів старіння, внаслідок чого прискорюються окислювальні процеси і розпад багатьох органічних діелектриків, руйнуються лакофарбні покриття, прискорюється корозія деяких металів.

Сонячне і космічне випромінювання в основному поглинається земною атмосферою, що створює разом з розпадом природних радіоактивних елементів радіаційний фон Землі. Його рівень може змінюватися, особливо під час спалахів сонячної активності. Природний радіаційний фон не сильно впливає на надійність ЗВ.

Штучна радіація створюється при атомних і термоядерних вибухах, атомними реакторами і підсилювачами частинок високих енергій. Рівні штучної радіації можуть досягати дуже високих значень, що перевищують природну радіацію.

Ступінь впливу радіації на елементи ЗВ визначається її видом та умовами дії. Найбільше штучна радіація впливає на елементи ЗВ, які використовують органічні і напівпровідникові матеріали. Різні технології виготовлення елементів ЗВ по різному залежать від радіації. Наприклад, планарні транзистори більш стійкі до радіації, чим транзистори з меза-структурою, а тонкоплівкові транзистори на 2-3 порядки більш стійкі, ніж монокристалічні.

Під час опромінювання елементів ЗВ швидкими нейтронами порушується структура матеріалу, підвищується його температура, а в результаті захоплення нейтронів утворюються домішки інших елементів. Опромінювання електронами і протонами на структуру речовини практично

не впливає, але викликає іонізацію. При опромінюванні речовини електронами великої енергії може виникнути жорстке рентгенівське випромінювання. Під час опромінювання гамма-променями можуть активізуватися деякі реакції усередині речовин.

Для зменшення впливу радіації необхідно під час проектування та виготовлення елементів ЗВ вибирати найбільш стійкі до опромінювання матеріали, а також вживати заходи спеціального радіаційного захисту на етапі їх експлуатації.

Чистота повітря. Забрудненість повітря механічними і хімічними домішками також впливає на надійність ЗВ. Найдрібніші частинки гірських порід, ґрунту, дим промислових підприємств, залишки рослинних і тваринних організмів створюють пил, що знаходиться у повітрі. В повітрі залежно від ступеня його забруднення може міститися до 60 мг/м³ пилу.

Пил, який знаходиться в атмосфері, легко проникає у блоки ЗВ, які не герметизуються, що знижує поверхневий опір, прискорює знос рухомих частин, контактів, а також змінює параметри елементів. Дуже сильно пил знижує характеристики ЗВ, які виготовлені з використанням друкарського монтажу, що не захищений спеціальним покриттям. При цьому пил утворює струмопровідні перемички між провідниками. З метою оберігання друкарської плати від дії пилу і вологи їх покривають міцною ізоляційною плівкою. Також пил може прискорювати дію біологічних чинників. Крупніші механічні частинки розміром до 0,8 мм (пісок) руйнують захисні покриття, підшипники та інші елементи.

Окрім пилу в атмосферу промислові підприємства викидають різного роду домішки (солі, оксиди, кислоти і т. ін.), що є сильнодіючими хімічними домішками. Наприклад, сірчистий газ міститься у вихлопних газах автомашин, газах металургійних і хімічних підприємств. Оксиди азоту і хлор містяться у газах ряду хімічних підприємств. Вони збільшують корозію металів, прискорюють процес старіння у пластмасах та органічних діелектриках. Ступінь впливу цих домішок значно збільшується у вологому повітрі.

Також на надійність елементів ЗВ впливають солі і солоні тумани на морі і морському узбережжі. Висока вологість атмосфери і насиченість її солями значно прискорює процес появи відмов.

Для зменшення впливу цих чинників застосовують герметизацію елементів та ЗВ в цілому, спеціальні волого- і солестійкі покриття. Якщо у ЗВ використовується примусове охолодження, то на них встановлюють протипилові фільтри або замкнуту систему охолодження.

Механічні навантаження викликаються ударами і вібраціями під час транспортування, під час дії вітру, аеродинамічними діями і т. ін.

Удари і вібрації можуть привести до порушення цілісності паянь, контактів, руйнування кріпильних деталей, порушень регулювань. Вібрації приводять до резонансних явища у конструкціях, а також можуть привести до

руйнування спаїв скла з металом, пошкодити слюдяні ізолятори, змінити міжелектродні відстані і т. ін.

Механічні пошкодження апаратури може викликати і обслуговуючий персонал при недостатній кваліфікації і недбалому поводженні з нею.

Для зменшення впливу цього чинника застосовують необхідні амортизовані пристрої та відповідне розміщення і кріплення елементів ЗВ, що дозволяє знизити число відмов на 90%.

Під **біологічними чинниками** розуміють дію на елементи ЗВ живих організмів, тобто вплив грибкових утворень, комах, гризунів і т. ін.

Грибкові утворення, як правило, виникають у вологій атмосфері на деталях з органічних матеріалів, харчуючись продуктами їх розкладання. За наявності пилу грибкові утворення розвиваються значно інтенсивніше і можуть розвиватися на будь-якому матеріалі. Найбільш сприятливими для їх розвитку вважаються підвищена вологість і температура 25 – 35°C. Зростання цвілі припиняється при температурі нижче за 7°C.

Грибкові утворення знижують поверхневий опір ізоляторів, утворюють провідні перемички між провідниками, руйнують металеві і неметалеві деталі за рахунок дії кислот, що виділяються. Найсильніше страждають від цвілі вироби з натуральних волокнистих матеріалів (хлопок, льон і т. ін.).

Комахи і гризуни руйнують оболонки кабелів, м'які пластмасові покриття, дерев'яні деталі, приводять до замикань контактів, роз'ємів, кабелів. Для зменшення шкідливої дії комах і гризунів застосовують пластмаси із спеціальними добавками, які їх відлякують або отруюють.

3.2 Суб'єктивні чинники що впливають на показники надійності

До групи суб'єктивних чинників відносяться **помилки людей при розробці, виробництві та експлуатації.**

До чинників, що визначають надійність засобів вимірювання на етапах розробки і виробництва, відносять: **вибір схемних рішень; вибір елементів і режимів їх роботи; вибір конструктивних рішень; вибір і дотримання технології виробництва; автоматизація виробництва; тренування елементів і апаратури; контроль якості і т. ін.** Всі ці чинники значно впливають на надійність.

Дії обслуговуючого персоналу тобто помилки оператора під час експлуатації ЗВ приводять до часткового або повного невиконання завдання засобом. Вплив дій обслуговуючого персоналу у ряді випадків буває значнішим, ніж всієї решти чинників. Проведені дослідження показують, що недостатня кваліфікації обслуговуючого персоналу приводить до 30% відмов техніки. У той же час, при хорошій підготовці операторів і правильній організації експлуатації техніки надійність підвищується у 3 – 5 разів.

До чинників, що визначають ступінь впливу обслуговуючого персоналу на надійність ЗВ під час його експлуатації, відносять: кваліфікацію

обслуговуючого персоналу; дотримання правил технічної експлуатації; ступінь організованості системи технічного обслуговування.

Під кваліфікацією обслуговуючого персоналу розуміють ступінь підготовленості обслуговуючого персоналу, яка визначається знанням устрою і призначення апаратури, умов і правил її експлуатації, умінням підтримувати її в справному стані, попереджувати появу деяких відмов, усувати відмови, що з'явилися, правильно організувати роботу з ефективного використання її за призначенням.

Наприклад, при слабо підготовлених операторах кількість відмов апаратури у першу добу після проведення технічного обслуговування у 8-10 разів перевищує число відмов за добу перед технічним обслуговуванням. Це пояснюється невмінням обслуговувати, невмінням виявити несправності, неправильними діями, що викликають появу нових несправностей. Добре підготовлений персонал може забезпечити експлуатацію техніки з меншими витратами сил і засобів.

Недостатня кваліфікація обслуговуючого персоналу може бути у деякій мірі компенсована автоматизацією контролю працездатності і процесу пошуку несправностей, зменшенням числа регулювань і т. ін.

Таким чином, питанню підготовки обслуговуючого персоналу повинно приділятися першорядне значення особливо для складних систем техніки.

Дотримання правил технічної експлуатації сприяє підтриманню техніки у справному стані, оскільки ці правила передбачають дії обслуговуючого персоналу, які краще забезпечують експлуатацію даної техніки.

Організація системи технічного обслуговування визначає кращі методи і форми організації експлуатації, при яких забезпечується висока безвідмовність і довговічність техніки. Вона передбачає організацію низки заходів (профілактика, ремонт, постачання запасними деталями і т. ін.), спрямованих на забезпечення експлуатації з найбільш високим значенням коефіцієнта готовності.

Покращенню експлуатації техніки сприяє аналіз статистичних даних, який допомагає краще організувати систему технічного обслуговування, забезпечення запасними деталями і прогнозувати можливі відмови. Ці результати також корисні і при розробці нової техніки, оскільки допомагають врахувати особливості експлуатації і недоліки попередніх розробок.

Питання для самоперевірки:

1. В чому різниця між об'єктивними та суб'єктивними чинниками ?
2. Чим характерні кліматичні чинниками ?
3. Які матеріали найбільш вразливі до біологічних чинників ?
4. Як впливають помилки обслуговуючого персоналу на надійність техніки ?
5. Що розуміють під організацією системи технічного обслуговування ?

ЛЕКЦІЯ № 4

СТРУКТУРНІ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

Навчальна мета:

розглянути послідовну і паралельну модель надійності засобів вимірювання;

розглянути метод перетворення складної логічної структури за базовим елементом.

Навчальні питання:

1. Поняття структурної моделі надійності.
2. Послідовна та паралельна моделі надійності.
3. Метод перетворення складної логічної структури за базовим елементом.

4.1 Поняття структурної моделі надійності

В інженерній практиці для попередньої оцінки надійності об'єктів широко застосовуються **структурні моделі надійності**. Такі моделі представляються структурними схемами, в яких виділені елементи та їх основні функціональні зв'язки.

Графічні моделі надійності є найбільш простими та інформативними. Під час складання моделі досліджується функціонування об'єкту та виявляються можливі відмови його елементів, а також оцінюється їх вплив на працездатність об'єкту. Після цього модель об'єкту розподіляється так, щоб окремі його частини були незалежні відносно відмов. Кожна частина об'єкту (кожен компонент моделі надійності) може знаходитися в одному з двох станів: **працездатному** або **непрацездатному**.

При складанні моделі надійності функціональні та електричні зв'язки між окремими частинами об'єкту замінюються логічними, такими, що характеризують його безвідмовну роботу, при цьому у модель вносяться лише елементи, необхідні для виконання основної функції об'єкту.

Найбільш універсальними моделями надійності є **послідовна, паралельна і змішана**.

Послідовним з'єднанням елементів називають таке з'єднання, при якому відмова хоча б одного елементу приводить до відмови у роботі всього об'єкту. Цей тип з'єднання у теорії надійності є основним.

Паралельним з'єднанням елементів називають таке з'єднання, при якому відмова у роботі відбувається тільки при відмові всіх елементів, що входять до об'єкту.

Змішаним з'єднанням елементів називають поєднання послідовного і паралельного з'єднань елементів.

4.2 Послідовна та паралельна моделі надійності

Послідовна модель надійності об'єкту, що показана на рис. 4.1, складається з декількох (не менше двох) елементів, з'єднаних послідовно. При такому з'єднанні відмова одного елементу приводить до відмови об'єкту в цілому.

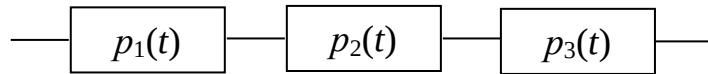


Рисунок 4.1 – Послідовна модель надійності

Під час розрахунку надійності з використанням послідовної моделі вводять низку припущення: відмови елементів є випадковими подіями, і не залежать одна від одної; відмова одного елементу приводить до відмови всього об'єкту; елементи, що відмовили, не відновлюються.

Ймовірність безвідмовної роботи всього об'єкту згідно теореми множення ймовірностей записують у наступному вигляді

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

де N – кількість елементів об'єкту;

$p_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -го елементу об'єкту, $i = 1, \dots, N$.

Ймовірність відмови об'єкту за час t складає

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

а середнє напрацювання об'єкту до першої відмови

$$m_{tc} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt. \quad (4.3)$$

Розглянемо взаємозв'язок ймовірності безвідмовної роботи елементів об'єкту з інтенсивністю відмов λ . Після підстановки у вираз (4.1) формули

$$p_i(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(t) dt\right) \text{ отримаємо}$$

$$P_c(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^N \int_0^t \lambda_i(t) dt\right). \quad (4.4)$$

Якщо об'єкт складається з великої кількості однотипних елементів з приблизно однаковою надійністю, однаковою кількістю типів елементів s і однаковою кількістю елементів кожного типу N_j ($j = 1, \dots, s$), то формула (4.4) має вигляд

$$P_c(t) = \exp\left(-\sum_{j=1}^s N_j \int_0^t \lambda_j(t) dt\right). \quad (4.5)$$

Вирази (4.4) і (4.5) є загальними формулами оцінки надійності об'єкту для будь-яких $\lambda_i(t)$. У разі експоненціального закону оцінки надійності та умов нормальної експлуатації об'єкту, коли $\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}$, ці формули мають вигляд

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_c t) = \exp\left(-t \sum_{i=1}^N \lambda_i\right); \quad (4.6)$$

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_c t) = \exp\left(-t \sum_{j=1}^s N_j \lambda_j\right). \quad (4.7)$$

З цих виразів запишемо формули інтенсивності відмов об'єкту

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^N \lambda_i; \quad (4.8)$$

$$\lambda_c = \sum_{j=1}^s N_j \lambda_j. \quad (4.9)$$

З урахуванням співвідношення $m_t = 1/\lambda$ вираз для середнього часу безвідмовної роботи має вигляд

$$m_{tc} = 1 / \sum_{i=1}^N \lambda_i; \quad (4.10)$$

$$m_{tc} = 1 / \sum_{j=1}^s N_j \lambda_j. \quad (4.11)$$

При оцінці надійності об'єкту з елементами, що працюють неодноразово, зручно використовувати показник надійності $A = \lambda t$. Позначивши $A_c = \lambda_c t_c$ та $A_i = \lambda_i t_i$ запишемо

$$A_c = \sum_{i=1}^N A_i ; \quad (4.12)$$

$$A_c = -\ln P_c(t) . \quad (4.13)$$

Таким чином, наведені вище формули широко використовуються для розрахунку надійності засобів вимірювання у складі яких є послідовне з'єднання елементів.

Паралельна модель надійності об'єкту складається з двох або більше елементів, з'єднаних паралельно (рис. 4.2). При такому з'єднанні об'єкт є працездатний, якщо хоча б один з цих елементів справний.

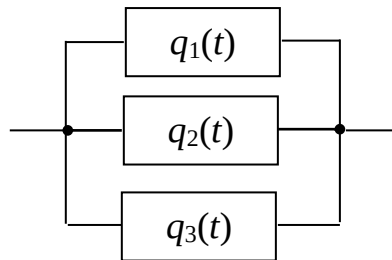


Рисунок 4.2 – Паралельна модель надійності

Оскільки відмова об'єкту настає тільки при відмові всіх його елементів та за умови незалежності відмов, то можна записати

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^N q_i(t), \quad (4.14)$$

де $Q_c(t)$ – ймовірність відмови об'єкту;

$q_i(t)$ – ймовірність відмови i -го елемента об'єкту ($i = \overline{1, m}$);

N – кількість елементів.

Ймовірність безвідмовної роботи об'єкту запишемо наступним чином

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^N q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - p_i(t)]. \quad (4.15)$$

Якщо для надійності елементів об'єкту (блоків, модулів) справедливий експоненціальний закон розподілу, то результуюча надійність вже не буде експоненціальною.

Якщо $p_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, то з виразу (4.15) запишемо

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - \exp(-\lambda_i t)]. \quad (4.16)$$

Якщо $\lambda_i t \ll 1$, то $1 - \exp(-\lambda_i t) = \lambda_i t$. При цьому $P_c(t) = \exp\left(-t^N \prod_{i=1}^N \lambda_i\right)$,

звідки видно, що інтенсивності відмов високонадійних елементів перемножуються.

Таким чином, співвідношення, що наведені вище, використовуються для оцінки надійності засобів вимірювання з загальним, по елементним і змішаним резервуванням.

4.3 Метод перетворення складної логічної структури за базовим елементом

В інженерній практиці при оцінці надійності засобів вимірювання зустрічаються випадки, коли структурну модель надійності не можливо представити простими паралельно-послідовними структурними логічними схемами надійності. Для розрахунку надійності таких ЗВ на першому етапі застосовують методи заміни складних схем надійності простішими – еквівалентними.

Один з найбільш простих методів перетворення складних структур заснований на теоремі складання ймовірності несумісних подій.

Якщо ЗВ представлений складною моделлю надійності, показаною на рис. 4.3. Спочатку у складі моделі знаходять елемент, який не дозволяє представити її у вигляді поєднання простих структур. Такий елемент називають базовим. На рис. 4.3 ймовірність безвідмовної роботи такого елемента позначена $p_6(t)$.

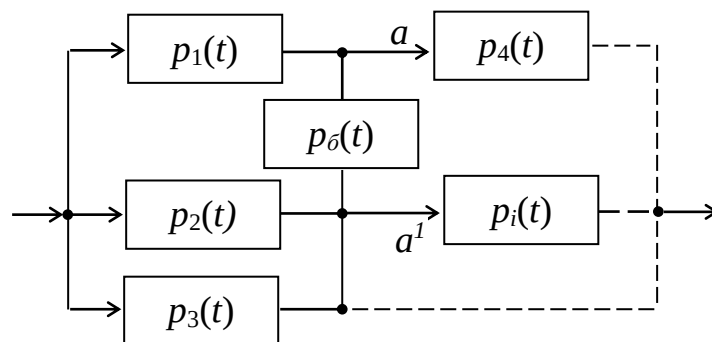
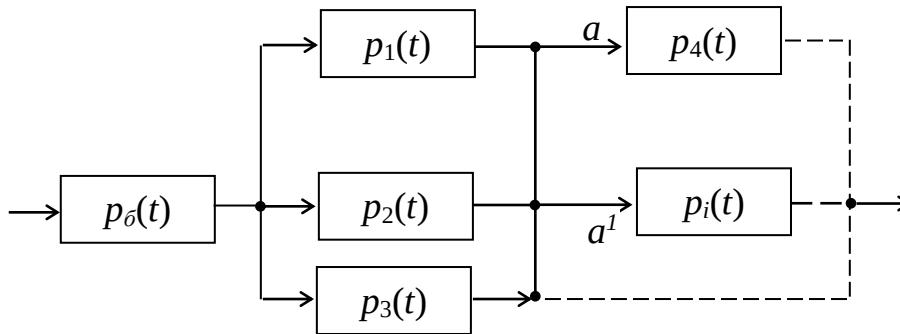


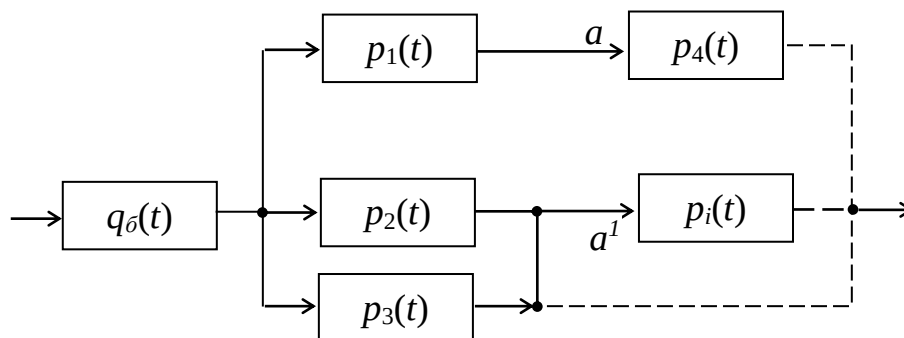
Рисунок 4.3 – Складна логічна модель надійності

Для цього базового розглядають два крайні стани. Перший стан відповідає умові, коли базовий елемент знаходиться у працездатному стані та може абсолютно повно проводити сигнал (рис. 4.4, а). Другий стан відповідає тому, що базовий елемент знаходиться у стані відмови, і сигнал через нього взагалі не проходить (рис. 4.4, б). Стан базового елемента на еквівалентній

схемі (рис. 4.4, а) імітується коротким замиканням ланцюга aa^1 , а його стан на еквівалентній схемі (рис. 4.4, б) представляється розривом цього ланцюга.



а



б

Рисунок 4.4 – Паралельно-послідовні моделі надійності: а – базовий елемент у працездатному стані; б – базовий елемент у стані відмови

Для забезпечення адекватності еквівалентних схем вихідній схемі (див. рис. 4.3), в схемі на рис. 4.4, а послідовно включений елемент з ймовірністю безвідмовної роботи $p_o(t)$, а в схемі на рис. 4.4, б – елемент з ймовірністю відмови $q_o(t)$.

На останньому етапі для цих еквівалентних паралельно-послідовних схем надійності визнають ймовірності безвідмовної роботи $P_1(t)$ і $P_2(t)$. Результуюча ймовірність безвідмовної роботи об'єкту $P_c(t)$ буде дорівнювати сумі ймовірностей несумісних подій

$$P_c(t) = P_1(t) + P_2(t). \quad (4.17)$$

Таким чином, розглянутий метод дозволяє розрахувати надійність складних засобів вимірювання, які не представляються простими послідовно-паралельними схемами.

Питання для самоперевірки:

1. Які існують структурні моделі надійності ?
2. Що буде з ЗВ при відмові одного послідовно з'єднаного елемента ?
3. У яких випадках застосовується паралельна модель надійності ?
4. Які крайні стани базового елемента розглядаються ?
5. На чому базується перетворення складної логічної структури за базовим елементом ?

ЛЕКЦІЯ № 5

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

Навчальна мета:

розглянути загальну характеристику методів розрахунку надійності засобів вимірювання;

вивчити приблизний, орієнтовний та остаточний методи розрахунку надійності.

Навчальні питання:

1. Приблизний розрахунок надійності.
2. Орієнтовний розрахунок надійності.
3. Остаточний розрахунок надійності.

5.1 Приблизний розрахунок надійності

Приблизний розрахунок надійності застосовується: під час перевірки вимог з надійності, що висуваються замовником у технічному завданні на проектування засобу вимірювання; під час розрахунку нормативних показників надійності окремих блоків і пристроїв ЗВ; для визначення мінімально допустимого рівня надійності елементів ЗВ, що проектується; під час порівняльної оцінки надійності різних варіантів побудови ЗВ на етапі передескізного проектування.

Приблизний розрахунок дозволяє визначити принципову можливість забезпечення необхідної надійності засобу вимірювання і ґрунтується на припущенні про рівнонадійність ($\lambda_i = \text{const}$) всіх його елементів.

Приблизний розрахунок може здійснюватися за допомогою трьох методів: **за усередненою інтенсивністю відмов; коефіцієнтного методу; за показником надійності.**

Розрахунок за усередненою інтенсивністю відмов застосовується для оцінки надійності блоку ЗВ при порівнянні декількох варіантів його функціональних схем, а також для визначення мінімально допустимого рівня надійності елементів блоку ЗВ, тобто рівня, що ще забезпечує задану надійність.

Розрахунок за усередненою інтенсивністю відмов рекомендується проводити у наступному порядку:

за допомогою довідників та (або) іншої технічної літератури визначається орієнтовна кількість активних елементів ЗВ N_a ;

визначається середня кількість пасивних елементів ЗВ, що доводиться на один активний елемент, N_n ;

за допомогою довідників визначається середнє значення $\lambda_{\text{ср.ел}}$ інтенсивностей відмов елементів ЗВ;

розраховується загальна кількість елементів $N = N_a + N_a N_n$ і середня інтенсивність відмов елементів ЗВ

$$\lambda_{cp} = \lambda_{cp,ел} N = \lambda_{cp,ел} (N_a N_n + N_a), \quad (5.1)$$

визначається середній час напрацювання ЗВ на відмову

$$m_{tc} = 1/\lambda_{cp}, \quad (5.2)$$

визначається ймовірність безвідмовної роботи ЗВ

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_{cp} t). \quad (5.3)$$

Також можна задати кількість елементів N та ймовірності безвідмовної роботи засобу вимірювання $P_c(t)$ за певний час t і знайти максимальну інтенсивність відмов елементів ЗВ, тобто вирішити зворотну задачу

$$\lambda_i = \frac{1}{Nt} \ln \frac{1}{P_c(t)}. \quad (5.4)$$

Метод приблизного розрахунку дозволяє оцінити надійність ЗВ, що працює у лабораторних умовах. У реальних же умовах показники надійності будуть нижчими, ніж у лабораторних, що пов'язано з наявністю різних дестабілізуючих чинників.

Для врахування цих чинників застосовують **коефіцієнтний метод розрахунку надійності**. Суть даного методу полягає у введенні корегуючого коефіцієнту K_λ , який показує у скільки разів збільшується інтенсивність відмов окремих елементів і засобу вимірювання в цілому у реальних умовах у порівнянні з лабораторними.

Для визначення очікуваної середньої інтенсивності відмов елементів ЗВ, які працюють у реальних умовах, необхідно середню інтенсивність відмов у лабораторних умовах помножити на відповідний корегуючий коефіцієнт

$$\lambda_{cp,p} = \lambda_{cp} K_\lambda. \quad (5.5)$$

Чисельні значення корегуючих коефіцієнтів вибирають з довідників та (або) іншої технічної літератури.

Розрахунок за показником надійності дозволяє обчислити параметри засобу вимірювання, який складається з елементів, що працюють неодноразово. Для цього використовують показник надійності $\Lambda = \lambda t$, що враховує не тільки інтенсивність відмов елементів, але і час їх роботи. Цей

метод також може бути зручним під час розрахунку норм надійності для окремих вузлів і блоків ЗВ при заданій надійності всього засобу.

З застосуванням цього методу можна вирішити два завдання:

Перше завдання. Засіб вимірювання складається з N елементів, що працюють неодноразово. Вони мають відповідні інтенсивності відмов $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ та час їх роботи дорівнює $t_1, \dots, t_N$. Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи ЗВ $P_c(t)$ за проміжок часу від початку роботи першого елемента до кінця роботи останнього.

Для вирішення цього завдання рекомендується розрахунок проводити у наступному порядку:

визначають показники надійності елементів ЗВ

$$\Lambda_1 = \lambda_1 t_1, \dots, \Lambda_N = \lambda_N t_N; \quad (5.6)$$

визначають показник надійності ЗВ в цілому

$$\Lambda_c = \sum_{i=1}^N \Lambda_i; \quad (5.7)$$

обчислюють ймовірність безвідмовної роботи ЗВ

$$P_c(t) = \exp(-\Lambda_c); \quad (5.8)$$

обчислюють середній час напрацювання ЗВ до першої відмови

$$m_{tc} = -\frac{\ln P_c(t)}{t}. \quad (5.9)$$

Друге завдання. Засіб вимірювання складається з N рівнонадійних елементів, що розподілені на S блоків. При цьому у блоці під номером i міститься N_i елементів. Також відома ймовірність безвідмовної роботи ЗВ $P_c(t)$. Необхідно розрахувати показники надійності Λ_i для кожного блоку ЗВ.

Для вирішення цього завдання рекомендується розрахунок проводити у наступному порядку:

обчислюють показник надійності елементів ЗВ

$$\Lambda_e = -\frac{\ln P_c(t)}{N}; \quad (5.10)$$

визначають показники надійності блоків ЗВ

$$\Lambda_i = \Lambda_e N_i, \quad i = 1, \dots, S. \quad (5.11)$$

Таким чином, приблизний розрахунок дозволяє визначити принципову можливість забезпечення необхідної надійності засобу вимірювання.

5.2 Орієнтовний розрахунок надійності

Орієнтовний метод розрахунку надійності використовується на етапі ескізного проектування засобу вимірювання після розробки його принципової електричної схеми. Цей метод дозволяє визначити раціональний склад елементів ЗВ і визначити шляхи підвищення його надійності на стадії ескізного проектування.

Якщо орієнтовний розрахунок враховує вплив на надійність ЗВ лише кількості і типу елементів з яких він складається, то він ґрунтується на тих же припущеннях, що і приблизний розрахунок, тобто для його проведення достатньо знати структуру, номенклатуру елементів та їх кількість.

Для проведення орієнтовного розрахунку надійності використовують два основних методи: **за середньогруповими інтенсивностями відмов елементів; коефіцієнтний метод.**

Розрахунок надійності за середньогруповими інтенсивностями відмов елементів припускає, що відомі інтенсивності відмов елементів різних типів λ_i та кількість елементів N_i кожного типу, що входять до ЗВ.

Дані про надійність типових елементів, як правило, усереднюються за часом і групам елементів і приводяться у вигляді таблиць значень інтенсивностей відмов у довідковій літературі. Враховуючи великий розкид даних, при орієнтовному розрахунку надійності вибирають середні табличні значення інтенсивностей відмов елементів або розраховують максимальні і мінімальні значення показників надійності засобів вимірювання, використовуючи екстремальні значення інтенсивностей відмов елементів. Приблизне число елементів різного типу у засобі вимірювання стає відомим вже на етапі ескізного проектування.

Суть розрахунку надійності даним методом полягає у визначенні основних показників, що характеризують безвідмовність засобу вимірювання: середнього часу напрацювання на відмову m_t та ймовірності безвідмовної роботи $P_c(t)$.

Розрахунок за середньогруповими інтенсивностями відмов елементів рекомендується проводити у наступному порядку:

всі елементи ЗВ розподіляють на декілька груп з приблизно однаковими інтенсивностями відмов усередині групи і підраховують орієнтовну кількість елементів N_i у кожній з цих груп;

за допомогою довідників знаходять значення інтенсивностей відмов елементів кожної групи λ_i (середнє або крайні, якщо потрібно визначити максимальні і мінімальні значення показників надійності ЗВ);

обчислюють добутки $N_i\lambda_i$, що характеризують частку відмов, яку вносять елементами даної групи у загальну інтенсивність відмов ЗВ;

розраховують загальну інтенсивність відмов ЗВ за допомогою підсумовування творів $N_i \lambda_i$ за всіма k групами елементів

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^k N_i \lambda_i ; \quad (5.12)$$

визначають середній час напрацювання ЗВ на відмову

$$m_t = 1/\lambda_c; \quad (5.13)$$

розраховують ймовірність безвідмовної роботи ЗВ

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_c t). \quad (5.14)$$

Коефіцієнтний метод орієнтовного розрахунку надійності полягає у використанні під час розрахунку показників надійності системи коефіцієнтів, що зв'язують інтенсивності відмов елементів різних типів з інтенсивністю відмов елементу, характеристики надійності якого достовірно відомі.

Вважається, що інтенсивності відмов елементів всіх типів змінюються залежно від умов експлуатації однаково, а отже, за різних умов експлуатації

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_0} = K_i = \text{const}, \quad (5.15)$$

де λ_0 – інтенсивність відмов елементу, якісні характеристики якого достовірно відомі;

K_i – коефіцієнт надійності i -го елементу.

Елемент з інтенсивністю відмов λ_0 називається **основним елементом** розрахунку засобу вимірювання.

Основну формулу для розрахунку інтенсивності відмов ЗВ даним методом можна отримати за допомогою виразу (5.12), шляхом заміни в ньому λ_i на твір середньої інтенсивності відмов елементу, який достовірно відомий, та корегуючого коефіцієнту надійності

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^k N_i \lambda_i = \lambda_0 \sum_{i=1}^k N_i K_i . \quad (5.16)$$

Решта показників надійності засобу вимірювання, тобто m_t і $P_c(t)$, розраховують за допомогою виразів (5.13) і (5.14).

З наведеного виразу (5.16) видно, що для розрахунку надійності ЗВ не потрібно знати інтенсивності відмов елементів всіх типів, а достатньо знати лише коефіцієнти K_i , кількість елементів у кожній групі N_i та інтенсивність

відмов основного елементу розрахунку λ_0 . Необхідно зазначити, що коефіцієнти K_i для однакових елементів також знаходяться у певних межах і мають розкид значень. Це обумовлено залежністю інтенсивності відмов елементів від різних чинників. В цих умовах доцільно надійність засобів вимірювання розраховувати для максимальних і мінімальних значень коефіцієнтів надійності.

5.3 Остаточний розрахунок надійності

Остаточний розрахунок надійності, який також називають схемним, проводиться на етапі технічного проектування на базі принципової електричної схеми засобу вимірювання для відомих умов експлуатації, режимів роботи всіх елементів і конструктивного оформлення. Також необхідно зазначити, що більшість розрахунків надійності приводяться у припущенні експоненціальної надійності всіх елементів ЗВ і незалежності їх відмов. При проведенні остаточного розрахунку надійності з урахуванням умов експлуатації необхідно враховувати вплив зовнішнього середовища, в якому функціонує засіб вимірювання, такі як температура, вологість, тиск, вібрація і т. ін. Також враховуються особливості енергетичного режиму роботи ЗВ, такі як теплова енергія, що виділяється його елементами, електромагнітні навантаження, механічні напруги і т. ін. Ступінь впливу різних умов експлуатації на показники надійності ЗВ буде різним.

Для остаточного розрахунку використовуються ті ж формули, що і для орієнтовного, але з тією різницею, що інтенсивності відмов елементів λ_e беруться з урахуванням реальних умов експлуатації, тобто вводиться низка корегуючих коефіцієнтів

$$\lambda_e = \lambda_0 K_p \prod_{i=1}^n K_i, \quad (5.17)$$

де λ_0 – початкова (базова) інтенсивність відмов елементів;

K_p – коефіцієнт режиму роботи, який залежить від коефіцієнта навантаження і (або) температури навколишнього середовища;

K_i – коефіцієнти, що враховують зміни інтенсивності відмов залежно від різних чинників;

n – кількість чинників, що враховуються.

Для того щоб розрахувати надійність необхідно знати реальні режими роботи всіх елементів ЗВ, які визначаються коефіцієнтами режиму роботи K_p , що залежать від коефіцієнта електричного навантаження K_n і температури T навколишнього середовища.

Коефіцієнти електричного навантаження у загальному випадку визначаються за допомогою формули

$$K_n = E_p/E_{\text{доп}}, \quad (5.18)$$

де E_p і $E_{\text{доп}}$ – реальне і допустиме значення електричного параметра.

Реальне значення електричного параметра E_p знаходиться на підставі розрахунку за принциповою електричною схемою, а допустиме значення $E_{\text{доп}}$ береться з довідників типів елементної бази, що використовуються у засобах вимірювання. Під час застосування виразу (5.18), необхідно враховувати, що величини, які використовуються в ньому, повинні бути однаковими за характером.

Для типових елементів ЗВ коефіцієнти навантаження розраховуються наступним чином.

Для **резисторів** коефіцієнт навантаження визначається за їх середньою і допустимою потужностями

$$K_{nR} = P/P_{\text{доп}}, \quad (5.19)$$

де $P = I_R^2/R = U_R^2/R$;

I_R – середній струм, що протікає через резистор;

U_R – середня напруга на резисторі.

Для **конденсаторів** коефіцієнт навантаження визначається за максимальною і допустимою напругами між обкладинками

$$K_{nC} = U_{\text{max}}/U_{\text{доп}}. \quad (5.20)$$

Для **діодів** коефіцієнт навантаження визначається залежно від їх типу.

Для **випрямного діода** використовується формула

$$K_{nD} = \max\{K_n^P, K_n^U, K_n^I\}, \quad (5.21)$$

де $K_n^P = P/P_{\text{доп}}$ – коефіцієнт навантаження по потужності;

$K_n^U = U_{\text{зв}}/U_{\text{зв max}}$ – коефіцієнт навантаження по напрузі;

$K_n^I = I_{\text{вип}}/I_{\text{вип max}}$ – коефіцієнт навантаження по струму;

P – середня потужність;

$U_{\text{зв}}$ – зворотна напруга на діоді;

$I_{\text{вип}}$ – середній випрямлений струм.

Для **імпульсного діода** використовується формула (5.21), тільки в цьому випадку до неї підставляються імпульсні значення параметрів, наприклад $P_{\text{имп}} = U_{\text{имп}}I_{\text{имп}}$ і т.д.

Для **стабілітрона** застосовується формула

$$K_{nCT} = \max\{K_n^P, K_n^I\}, \quad (5.22)$$

де K_n^P – визначається по потужності як для випрямного діода;

K_n^I – визначається по зворотному струму, $K_n^I = I_{зв} / I_{зв\ max}$.

Для **транзисторів** (біполярних або польових) коефіцієнт навантаження

$$K_{нТ} = \max\{K_n^P, K_n^I, K_{н1}^U, K_{н2}^U\}, \quad (5.23)$$

де $K_n^P = P_K / P_{K\ доп}$ – коефіцієнт навантаження по потужності, що розсіюється на колекторі (стоці), $P_K = I_K U_{K-e}$;

$K_n^I = I_K / I_{K\ доп}$ – коефіцієнт навантаження по струму колектора (стоку);

$K_{н1}^U = U_{K-e} / U_{K-e\ доп}$ – коефіцієнт навантаження по напрузі колектор-емітер (стік-витік);

$K_{н2}^U = U_{K-b} / U_{K-b\ доп}$ – коефіцієнт навантаження по напрузі колектор-база (стік-затвор).

На надійність інших типів елементів ЗВ, таких як індуктивності, трансформатори і нероз'ємні з'єднання (зваркою, паянням), електричний і температурний режими роботи помітно не впливають, тому K_n для них не обчислюється, а приймається рівним 1.

Підвищити надійність ЗВ можна шляхом зменшення коефіцієнтів навантаження елементів ЗВ, або їх заміною на елементи більшої потужності при тому ж коефіцієнті навантаження. Але такі заходи пов'язані із збільшенням економічних витрат, об'ємів, ваги, габаритів, витрат електроенергії. Тому, як правило, знаходять компроміс між необхідною надійністю та вартістю ЗВ, тобто вибирають такий склад ЗВ при якому для обмеженої надійності його вартість буде найменшою.

Питання для самоперевірки:

1. На яких етапах проектування ЗВ використовують ті чи інші типи розрахунку надійності ?
2. З якою метою використовується коефіцієнтний метод приблизного розрахунку надійності ?
3. Що спрощується під час застосування коефіцієнтного методу орієнтовного розрахунку надійності ?
4. Які чинники зовнішнього середовища враховуються за допомогою корегуючи коефіцієнтів ?
5. Чим відрізняється розрахунок коефіцієнтів електричного навантаження різних елементів ЗВ ?

ЛЕКЦІЯ № 6

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ, ЩО ВІДНОВЛЮЮТЬСЯ

Навчальна мета:

розглянути особливості розрахунку показників надійності засобів вимірювання, що відновлюються;

вивчити методику оцінки надійності нерезервованих і резервованих засобів вимірювання, що відновлюються.

Навчальні питання:

1. Метод диференціальних рівнянь обчислення функцій і коефіцієнтів готовності засобів вимірювання, що відновлюються.

2. Оцінка надійності нерезервованих засобів вимірювання, що відновлюються.

3. Оцінка надійності резервованих засобів вимірювання, що відновлюються.

6.1 Метод диференціальних рівнянь обчислення функцій і коефіцієнтів готовності засобів вимірювання, що відновлюються

Засоби вимірювання, що відновлюються, ремонтуються після відмов і після цього продовжується їх експлуатація. Надійність таких засобів вимірювання характеризується показниками у вигляді **функції готовності** $k_z(t)$ і **функції простою** $k_n(t)$. Ці функції є відповідно ймовірностями перебування ЗВ у працездатному стані і стані простою. З часом експлуатації вони прагнуть до стаціонарних значень

$$\lim_{t \rightarrow \infty} k_z(t) = K_z \quad \text{та} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} k_n(t) = K_n,$$

де K_z і K_n – відповідно коефіцієнти готовності і простою ЗВ.

Для обчислення функцій і коефіцієнтів готовності найчастіше використовується **метод диференціальних рівнянь**, який ґрунтується на основі теорії масового обслуговування, із застосуванням теорії графів.

Під час застосування цього методу перебираються всі можливі стани елементів засобу вимірювання і процеси зміни станів даного ЗВ, а далі за допомогою теорії графів будується схема станів ЗВ. Вузлами графу є стани засобу вимірювання, а гілками – переходи з одного стану в інший. Для складання диференціальних рівнянь задаються інтенсивності переходів λ із стану $i - 1$ у стан i та інтенсивності зворотних переходів μ .

Будь-який стан засобу вимірювання описується диференціальним рівнянням, яке складається за наступним правилом: у лівій частині рівняння розміщують похідну за часом ймовірності даного стану dp_i/dt , де $i = 0, 1, \dots$, а у правій частині рівняння – члени, що утворюються при множенні інтенсивностей переходів станів з різними знаками (“плюс”, якщо стрілка спрямована до стану, і “мінус” – якщо від нього). Для кожного стану ЗВ складається своє диференціальне рівняння. Отримана таким чином система диференціальних рівнянь доповнюється умовою нормування: сума ймовірностей всіх можливих станів ЗВ дорівнює одиниці. Сумісне вирішення цих рівнянь дозволяє визначити функції готовності і простою засобу вимірювання.

6.2 Оцінка надійності нерезервованих засобів вимірювання, що відновлюються

Розглянемо визначення показників надійності **нерезервованого засобу вимірювання, що відновлюється**. Такий ЗВ у будь-який момент часу t може знаходитися тільки в одному з двох можливих станів: працездатному і непрацездатному. Умовно позначимо працездатний стан – 0, а непрацездатний – 1. Інтенсивність переходу системи із стану 0 в стан 1 позначимо λ , а із стану 1 в 0 – μ (рис. 6.1).

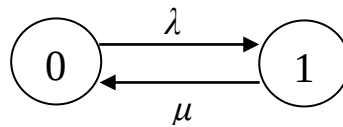


Рисунок 6.1 – Схема станів нерезервованого ЗВ, що відновлюється

Позначивши ймовірність перебування засобу вимірювання у станах 0 і 1 відповідно $p_0(t)$ і $p_1(t)$, запишемо $p_0(t) = k_e(t)$, $p_1(t) = k_n(t)$.

Використовуючи схему, представлену на рис. 6.1, та правила складання диференціальних рівнянь, побудуємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda p_0(t) - \mu p_1(t). \end{cases} \quad (6.1)$$

При вирішенні цієї системи використовується умова нормування $p_0(t) + p_1(t) = 1$, рівняння, яке може замінити будь-яке з рівнянь системи.

Вирішимо систему рівнянь (6.1) для двох випадків.

Перший випадок. У початковий момент часу ЗВ працездатний, тобто при $t = 0$ ймовірності перебування ЗВ у працездатному та непрацездатному

стані будуть $p_0(t) = 1$ та $p_1(t) = 0$, відповідно. З урахуванням цих умов рішення системи (6.1) має вигляд

$$k_z(t) = p_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t]; \quad (6.2)$$

$$k_n(t) = p_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t]. \quad (6.3)$$

Другий випадок. У початковий момент часу ЗВ непрацездатний, тобто при $t = 0$ ймовірності перебування ЗВ у працездатному та непрацездатному стані будуть $p_0(t) = 0$ та $p_1(t) = 1$, відповідно. З урахуванням цих умов рішення системи рівнянь (6.1) має вигляд

$$k_z(t) = p_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t]; \quad (6.4)$$

$$k_n(t) = p_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t]. \quad (6.5)$$

У сталому режимі експлуатації засобу вимірювання, тобто при $t \rightarrow \infty$, вирази (6.2), (6.3), (6.4) і (6.5) набувають вигляду стаціонарних коефіцієнтів готовності K_z та простою K_n і не залежать від початкових умов

$$K_z = \mu/(\lambda + \mu); \quad (6.6)$$

$$K_n = \lambda/(\lambda + \mu). \quad (6.7)$$

Позначимо середній час напрацювання на відмову m_t і середній час відновлення системи $T_{від}$. В цьому випадку $\lambda = 1/m_t$, $\mu = 1/T_{від}$. Підставивши значення λ і μ у вирази (6.6) і (6.7), отримаємо

$$K_z = \frac{m_t}{m_t + T_{від}}; \quad (6.8)$$

$$K_n = \frac{T_{від}}{m_t + T_{від}}. \quad (6.9)$$

Розглянемо **надійність нерезервованого засобу вимірювання, що відновлюється двома способами:**

повний ремонт, що характеризується інтенсивністю відмов λ_1 та інтенсивністю повного ремонту μ_1 ;

частковий ремонт, що характеризується інтенсивністю відмов λ_2 та інтенсивністю відновлення μ_2 .

Такі ЗВ можуть знаходитися у наступних станах з ймовірністю цих станів:

0 – засіб вимірювання справний після повного ремонту з ймовірністю $p_0(t)$;

1 – засіб вимірювання несправний і проводиться його частковий ремонт з ймовірністю $p_1(t)$;

2 – засіб вимірювання справний після часткового ремонту з ймовірністю $p_2(t)$;

3 – засіб вимірювання несправний і проводиться повний його ремонт з ймовірністю $p_3(t)$.

Структурна схема станів нерезервованого ЗВ приведена на рис. 6.2.

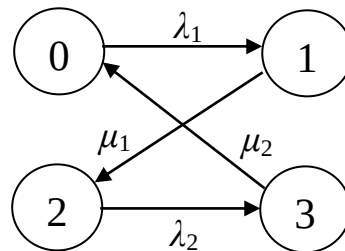


Рисунок 6.2 – Схема станів нерезервованого ЗВ

Складемо систему диференціальних рівнянь відповідно до рис. 6.2 і правилом, що були розглянуті вище:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda_1 p_0(t) + \mu_2 p_3(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_1 p_0(t) - \mu_1 p_1(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \mu_1 p_1(t) - \lambda_2 p_2(t) \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = \lambda_2 p_2(t) - \mu_2 p_3(t). \end{cases} \quad (6.10)$$

При вирішенні цієї системи використовується умова нормування $p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) = 1$, рівняння, яке може замінити будь-яке з рівнянь системи.

Ймовірність справної роботи засобу вимірювання або функція готовності

$$k_z(t) = p_0(t) + p_2(t).$$

Ймовірність відмови засобу вимірювання або функція простою

$$k_n(t) = p_1(t) + p_3(t).$$

Ймовірність безвідмовної роботи вказаних станів ЗВ у момент часу t позначені як $p_0(t)$, $p_1(t)$, $p_2(t)$ та $p_3(t)$. Ці ймовірності при $t \rightarrow \infty$ мають межі p_0 , p_1 , p_2 та p_3 . Перейдемо від системи диференціальних рівнянь (6.10) до системи алгебраїчних рівнянь у стаціонарному режимі

$$\begin{cases} -\lambda_1 p_0 + \mu_2 p_3 = 0 \\ \lambda_1 p_0 - \mu_1 p_1 = 0 \\ \mu_1 p_1 - \lambda_2 p_2 = 0 \\ \lambda_2 p_2 - \mu_2 p_3 = 0. \end{cases} \quad (6.11)$$

Вирішивши систему (6.11), отримаємо

$$\begin{aligned} K_z = p_0 + p_2 &= \frac{\lambda_1 \mu_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1 \mu_2}{\lambda_1 \lambda_2 \mu_1 + \lambda_2 \mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \lambda_2 \mu_2 + \lambda_1 \mu_1 \mu_2} = \\ &= \frac{\mu_1 \mu_2 (\lambda_1 + \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2 (\mu_1 + \mu_2) + \mu_1 \mu_2 (\lambda_1 + \lambda_2)}. \end{aligned} \quad (6.12)$$

Розглянемо **надійність засобу вимірювання з двох блоків** з двома можливими варіантами його ремонту: однією бригадою і двома бригадами при необхідності термінового відновлення.

У разі ремонту однією бригадою будемо вважати, що ЗВ вийшов з ладу унаслідок поломки одного блоку. Для такого ЗВ характерні три стани:

- 0 – засіб вимірювання справний з ймовірністю $p_0(t)$;
- 1 – один блок справний з ймовірністю безвідмовної роботи $p_1(t)$, а інший – відмовив і знаходиться у ремонті;
- 2 – несправні обидва блоки з ймовірністю $p_2(t)$.

Оскільки у стані 0 засіб вимірювання складається з двох блоків, то і його інтенсивність відмов у 2 рази вище.

При такому варіанті відновлення ЗВ інтенсивність ремонтів однакова для обох блоків ЗВ, тобто ремонт його блоків буде проводитися з однаковою інтенсивністю μ .

Схема станів ЗВ з двох блоків при його ремонті однією бригадою показана на рис. 6.3.

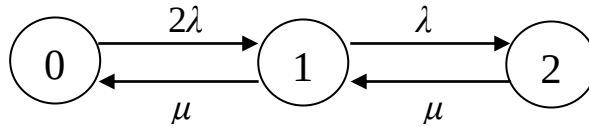


Рисунок 6.3 – Схема станів ЗВ з двох блоків при ремонті одного блоку однією бригадою

Система диференціальних рівнянь, що відповідає схемі станів ЗВ, яка показана на рис. 6.3, має наступний вигляд

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -2\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = 2\lambda p_0(t) - (\mu + \lambda)p_1(t) + \mu p_2(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda p_1(t) - \mu p_2(t). \end{cases} \quad (6.13)$$

При вирішенні цієї системи використовується умова нормування $p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) = 1$, рівняння, яке може замінити будь-яке з рівнянь системи.

Ймовірність безвідмовної роботи ЗВ, або функція готовності, визначається тільки ймовірністю $p_0(t)$. Тоді для стаціонарного стану ЗВ коефіцієнт готовності можна обчислити за формулою

$$K_z = p_0 = \frac{\mu^2}{\mu^2 + 2\lambda\mu + 2\lambda^2}. \quad (6.14)$$

Розглянемо варіант, коли при виході з ладу другого блоку ЗВ до ремонту підключається друга бригада. Схема станів системи для цього випадку приведена на рис. 6.4.

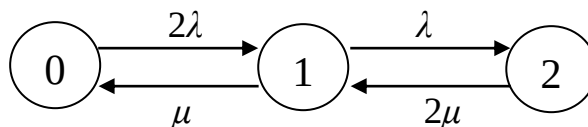


Рисунок 6.4 – Схема станів ЗВ з двох блоків при ремонті двох блоків двома бригадами

Система диференціальних рівнянь, яка відповідає схемі станів, показаній на рис. 6.4, має наступний вигляд

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -2\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = 2\lambda p_0(t) - (\mu + \lambda)p_1(t) + 2\mu p_2(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda p_1(t) - 2\mu p_2(t). \end{cases} \quad (6.15)$$

При вирішенні цієї системи використовується умова нормування $p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) = 1$, рівняння, яке може замінити будь-яке з рівнянь системи.

При такому варіанті відновлення ЗВ для стаціонарного стану ЗВ коефіцієнт готовності визначається по формулі

$$K_z = p_0 = \frac{\mu^2}{(\lambda + \mu)^2}. \quad (6.16)$$

Розглянемо варіант, коли при виході з ладу одного блоку ЗВ до ремонту підключається одна бригада і частина іншої бригади. Схема станів ЗВ для цього випадку приведена на рис. 6.5.

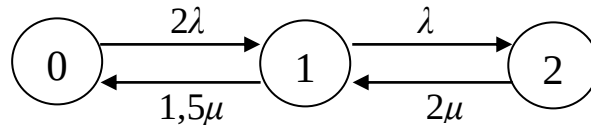


Рисунок 6.5 – Схема станів ЗВ з двох блоків при ремонті одного блоку однією бригадою і частиною іншої бригади

Система диференціальних рівнянь, яка відповідає схемі станів ЗВ, що показана на рис. 6.5, має наступний вигляд

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -2\lambda p_0(t) + 1,5\mu p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = 2\lambda p_0(t) - (1,5\mu + \lambda)p_1(t) + 2\mu p_2(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda p_1(t) - 2\mu p_2(t). \end{cases} \quad (6.17)$$

При вирішенні цієї системи використовується умова нормування $p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) = 1$, рівняння, яке може замінити будь-яке з рівнянь системи.

При такому варіанті відновлення ЗВ коефіцієнт готовності знаходиться за формулою

$$K_z = p_0 = \frac{3\mu^2}{3\mu^2 + 4\lambda\mu + 2\lambda^2}. \quad (6.18)$$

Якщо розрахувати за формулами (6.14), (6.16) і (6.18) для величини інтенсивності відмов ЗВ, що дорівнює $\lambda = 0,05$ 1/год., та інтенсивності ремонту ЗВ – $\mu = 1,0$ 1/год., то отримаємо коефіцієнти готовності і сумарний час простою t_n за 10000 годин роботи. Результати розрахунку можна представити у вигляді табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Коефіцієнти готовності та простою і сумарний час простою ЗВ за 10000 годин роботи

Варіант ремонту системи	K_z	K_n	Сумарний час простою t_n , год.
Однією ремонтною бригадою	0,9050	0,0950	950
Двома ремонтними бригадами:			
при роздільному обслуговуванні	0,9070	0,0930	930
при сумісному обслуговуванні	0,9360	0,0640	640

З аналізу даних табл. 6.1 видно, що під час відновлення ЗВ двома бригадами сумарний час простою буде нижчий, у порівнянні з ремонтом ЗВ однією бригадою. Також сумарний час простою буде нижче, якщо відновлення ЗВ відбувається двома бригадами разом.

6.3 Оцінка надійності резервованих засобів вимірювання, що відновлюються

Розглянемо надійність засобу вимірювання з ненавантаженим резервом, що складається з одного основного і $m - 1$ резервних елементів, що мають однакову надійність. Такий ЗВ може перебувати у будь-якому з наступних m станів:

- 0 – основний і резервний елементи працездатні;
- $j - j$ елементів непрацездатні ($j = 1, 2, \dots \leq m - 1$);
- m – всі m елементів непрацездатні.

Оскільки всі m елементів ЗВ ідентичні, а для умов нормальної його експлуатації необхідно і достатньо, щоб один елемент був працездатним, то інтенсивності переходів λ з працездатного стану у непрацездатний будуть однаковими, також будуть однаковими інтенсивності переходів μ з непрацездатного стану у працездатний. Будемо вважати, що перемикач

резерву має ідеальну надійність і вихід з ладу одного з елементів не викликає перерви у роботі ЗВ, а елементи, що перебувають у стані ненавантаженого резерву, мають нульову інтенсивність відмов.

Складемо схему станів ЗВ, показану на рис. 6.6.

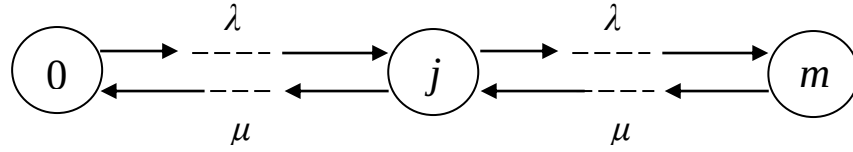


Рисунок 6.6 – Схема станів ЗВ з ненавантаженим резервом

Відповідно до схеми, що наведена на рис. 6.6, запишемо систему диференціальних рівнянь, що характеризують роботу такого ЗВ

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) \\ \frac{dp_j(t)}{dt} = \lambda p_{j-1}(t) - (\mu + \lambda) p_j(t) + \mu p_{j+1}(t) \\ \frac{dp_m(t)}{dt} = \lambda p_{m-1}(t) - \mu p_m(t). \end{cases} \quad (6.19)$$

де $p_j(t)$ – ймовірність перебування системи в станах $j = 1, 2, \dots, m - 1$.

При вирішенні цієї системи використовується умова нормування $\sum_{j=0}^m p_j(t) = 1$, рівняння, яке може замінити будь-яке з рівнянь системи.

При $t \rightarrow \infty$ система диференціальних рівнянь (6.19) перетвориться у наступну алгебраїчну систему

$$\begin{cases} -\lambda p_0 + \mu p_1 = 0 \\ \lambda p_{j-1} - (\mu + \lambda) p_j + \mu p_{j+1} = 0 \\ \lambda p_{m-1} - \mu p_m = 0. \end{cases} \quad (6.20)$$

Вирішивши систему (6.20) з урахуванням того, що ймовірність p_m дорівнює коефіцієнту простою, отримаємо

$$K_n = p_m = \frac{1}{\sum_{j=0}^m \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^j}. \quad (6.21)$$

У засобі вимірювання з навантаженим резервом, на відміну від розглянутого вище, всі $m - 1$ резервних елементів знаходяться у робочому стані. Схема станів такого ЗВ при обмеженому його відновленні показана на рис. 6.7.

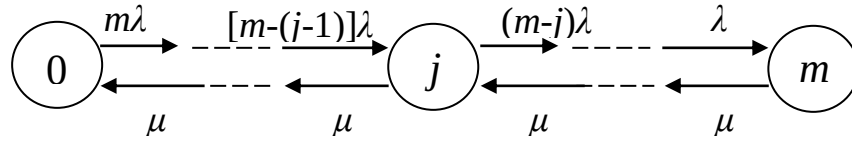


Рисунок 6.7 – Схема станів ЗВ з навантаженим резервом

Оскільки у цьому випадку одночасно всі m елементів ЗВ знаходяться у роботі, то не можливо вважати інтенсивності переходів ЗВ з стану 0 у наступні стани однаковими. У той же час переходи ЗВ з будь-якого непрацездатного стану у працездатний будуть однаковими через ідентичність його елементів.

Відповідно до схеми, що представлена на рис. 6.7, складемо систему диференціальних рівнянь, що характеризують роботу ЗВ

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -m\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) \\ \frac{dp_j(t)}{dt} = [m - (j - 1)]\lambda p_{j-1}(t) - [(m - j)\lambda + \mu]p_j(t) + \mu p_{j+1}(t) \\ \frac{dp_m(t)}{dt} = \lambda p_{m-1}(t) - \mu p_m(t). \end{cases} \quad (6.22)$$

При вирішенні цієї системи використовується умова нормування $\sum_{j=0}^m p_j(t) = 1$, рівняння, яке може замінити будь-яке з рівнянь системи.

При $t \rightarrow \infty$ система диференціальних рівнянь (6.22) перетвориться у наступну систему алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} -m\lambda p_0 + \mu p_1 = 0 \\ -[m - (j - 1)]\lambda p_{j-1} - [(m - 1)\lambda + \mu]p_j + \mu p_{j+1} = 0 \\ \lambda p_{m-1} - \mu p_m = 0. \end{cases} \quad (6.23)$$

Вирішивши систему (6.23), отримаємо коефіцієнт простою

$$K_n = p_m = \frac{1}{\sum_{j=0}^m \frac{1}{j!} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right)^j}. \quad (6.24)$$

Питання для самоперевірки:

1. В чому суть методу диференціальних рівнянь обчислення функцій і коефіцієнтів готовності ЗВ ?
2. Яким чином будується схема станів ЗВ, що відновлюється ?
3. Від яких параметрів залежать коефіцієнти готовності і простою ЗВ ?
4. На що впливає ремонт ЗВ однією або двома бригадами ?
5. Чим відрізняється розрахунок надійності ЗВ з навантаженим резервом від ЗВ з ненавантаженим резервом?

ЛЕКЦІЯ № 7

АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

Навчальна мета:

розглянути загальні відомості про сучасні засоби автоматизованого розрахунку надійності;

розглянути структуру і можливості основних програмних комплексів розрахунку надійності.

Навчальні питання:

1. Загальні відомості про сучасні засоби автоматизованого розрахунку надійності.

2. Короткий огляд програмних комплексів розрахунку надійності.

7.1 Загальні відомості про сучасні засоби автоматизованого розрахунку надійності

На сучасних підприємствах, що випускають електронні засоби вимірювання, як правило, в процесі їх проектування використовують декілька різних систем автоматизованого проектування (САПР). Це обумовлено тим, що у теперішній час не існує однієї системи, яка б забезпечувала повний супровід і автоматизацію кожного етапу проектування засобу вимірювання.

Відповідно до життєвого циклу виділяють наступні етапи проектування електронних блоків:

проектування схемотехніки вузла, що завершується розробкою принципової електричної схеми;

проектування друкарської плати вузла;

випуск карт робочих режимів і умов застосування;

розрахунок показників надійності вузла;

проектування корпусу електронного блоку;

тривимірне проектування (3D-проектування) і моделювання електронного вузла;

випуск конструкторської документації.

Як правило, проектування ЗВ є послідовно-паралельною схемою взаємодії окремих етапів проектування. Також кожний етап проектування залежить від інших етапів, тобто при рішенні задачі будь-якого етапу проектування використовується інформація, отримана на попередніх етапах.

Перенесення даних з однієї автоматизованої системи в іншу вимагає великих витрат ручної праці і часу для повторного кодування, що приводить до численних помилок, а отже, до зниження ефективності використання таких

систем. Таким чином, існує завдання інтеграції різних САПР між собою в єдиний комплекс.

Взаємодію між різними САПР можна здійснювати за допомогою функцій експорту-імпорту, для реалізації яких ці САПР повинні підтримувати який-небудь загальний формат даних, що не завжди можливо. Крім того, для забезпечення ефективної роботи інженера з розрахунку надійності, САПР повинна задовольняти наступним вимогам:

використовувати апробовані на практиці методи розрахунку надійності ЗВ;

працювати у реальному масштабі часу;

мати дружній графічний інтерфейс;

мати у своєму складі базу даних з надійності відомих ЗВ і забезпечувати можливість створення, зберігання, копіювання нових рішень;

мати можливість графічного представлення результатів розрахунків і засобу для їх документування.

Розрахунки показників надійності будь-який САПР ґрунтуються на остаточному методі розрахунку надійності з використанням єдиної довідкової бази з електрорадіоелементів, тобто резистори, конденсатори і т.д.

На ринку існує низка програмних комплексів, які дозволяють проводити автоматизований розрахунок надійності складних технічних систем, у тому числі і засобів вимірювання.

Основними (найбільш поширеними) програмними комплексами є:

Relax (Relax software Corporation, США);

FavoWeb – FRACAS (A.L.D. Group, Ізраїль);

Risk Spectrum (Relcon AB, Швеція);

ISOGRAPH (Великобританія);

АСОНИКА-К (МИЭМ-ASKsoft, Росія);

АСМ (ВАТ «СПІК СЗМА», Росія).

Розглянемо структуру і можливості деяких програмних комплексів, які можна використовувати для розрахунку надійності засобів вимірювання.

7.2 Короткий огляд програмних комплексів розрахунку надійності

Підсистема АСОНИКА-К призначена для автоматизації процесу проектування радіоелектронних засобів (РЕЗ), і дозволяє реалізувати наступні проектні завдання:

визначення показників безвідмовності всіх електрорадіоелементів і внесення змін у конструкцію з метою досягнення необхідної надійності засобу;

вибір кращого варіанту резервування з декількох наявних варіантів з метою забезпечення необхідної надійності;

обґрунтування необхідності та оцінка ефективності резервування РЕЗ.

На рис. 7.1 наведений інтерфейс підсистеми АСОНІКА-К під час розрахунку надійності РЕЗ.

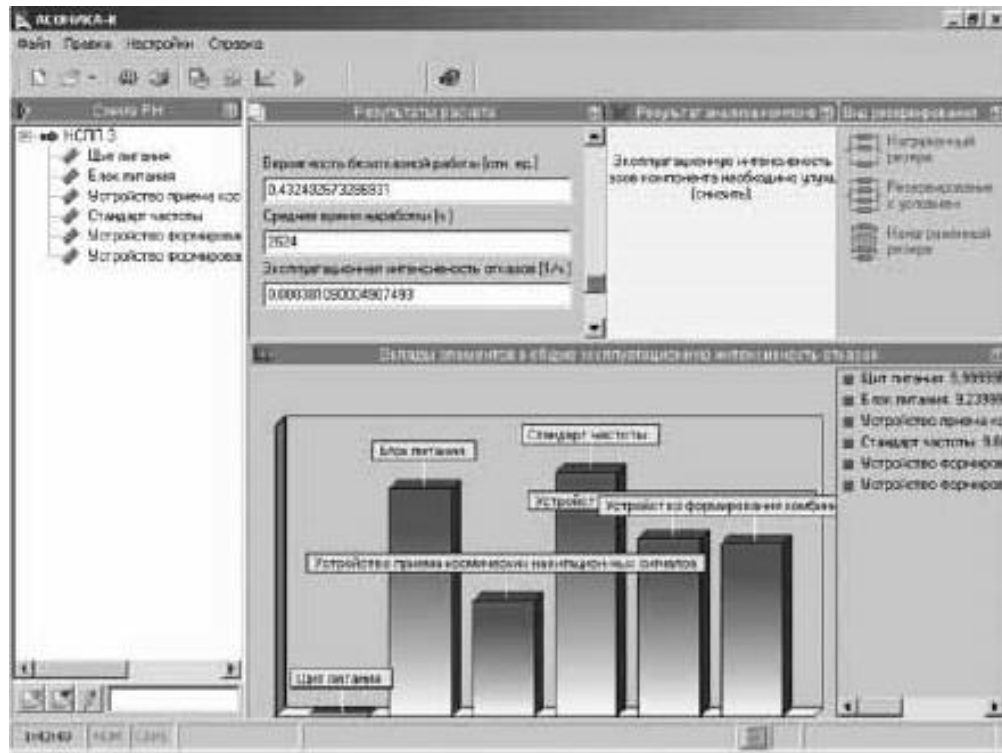


Рисунок 7.1 – Приклад інтерфейсу підсистеми АСОНІКА-К під час розрахунку надійності РЕЗ

На рис. 7.1 наведені складові частини РЕЗ (щит живлення, блок живлення і т. д.), а також результати розрахунку характеристик надійності РЕЗ: ймовірності безвідмовної роботи, середнього часу напрацювання та експлуатаційної інтенсивності відмов, повністю і внеску окремих елементів у загальну інтенсивність відмов.

На рис. 7.2 приведений приклад графічного аналізу залежності інтенсивності відмов від температури навколишнього середовища.

За допомогою підсистеми АСОНІКА-К можна досліджувати надійність (проводити розрахунок надійності) РЕЗ з різними видами резервування його складових частин: пасивне резервування з незмінним навантаженням, активне навантажене резервування, активне ненавантажене резервування, активне полегшене резервування, ковзаюче навантажене резервування і без резервування. Також підсистема забезпечує способи контролю працездатності складових частин РЕЗ (безперервний або періодичний).

На рис. 7.3 наведений інтерфейс підсистеми АСОНІКА-К під час розрахунку надійності резервованих складових частин РЕЗ.

На рис. 7.3 видно, що підсистема дозволяє виділити групи елементів складного РЕЗ, які резервуються, а також можуть бути розраховані значення

ймовірності безвідмовної роботи, коефіцієнту готовності і коефіцієнту оперативної готовності всього РЕЗ в цілому.

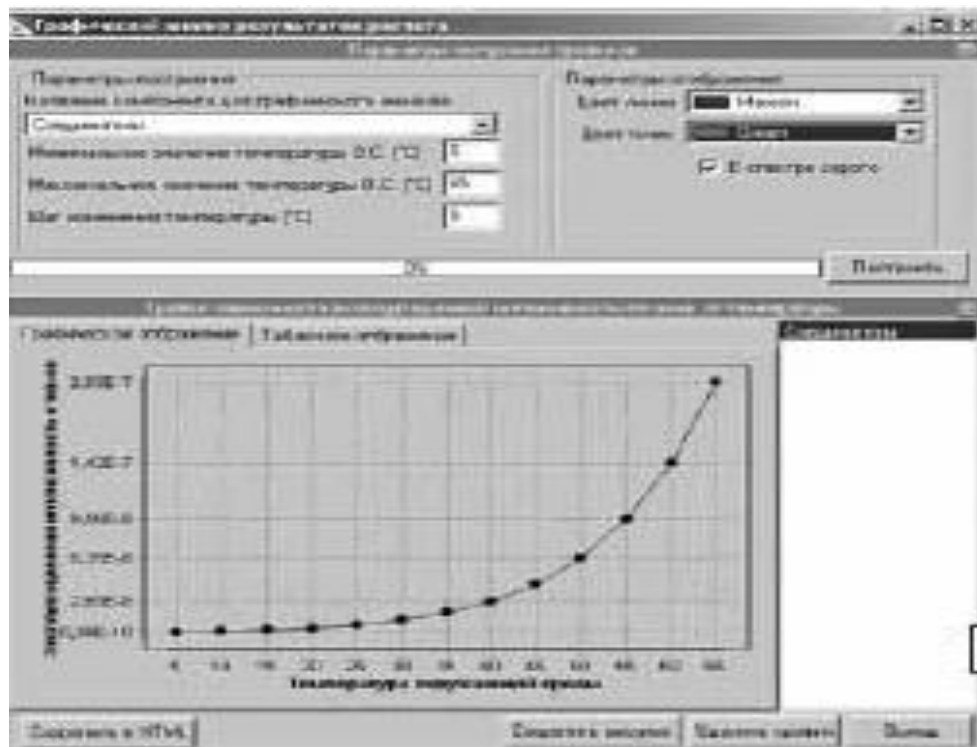


Рисунок 7.2 – Приклад графічного аналізу залежності інтенсивності відмов від температури навколишнього середовища

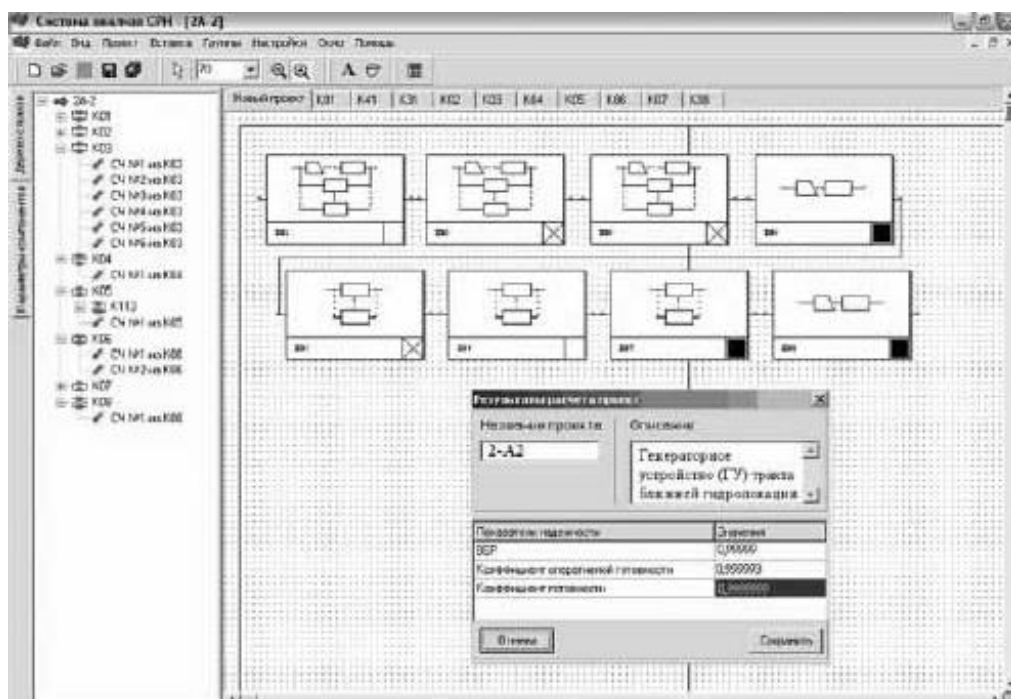


Рисунок 7.3 – Приклад інтерфейсу підсистеми АСОНИКА-К під час розрахунку надійності РЕЗ з резервуванням його складових частин

Відмови складових частин РЕЗ є раптовими і незалежними подіями, час виникнення відмови повністю випадкова величина, що розподілена за експоненціальним законом, а інтенсивності відмов постійні. На рис. 7.4 показані функція і щільність розподілу часу напрацювання на відмову, а також залежність інтенсивності відмов проєктованого РЕЗ з використанням графічного аналізу підсистеми АСОНІКА-К.

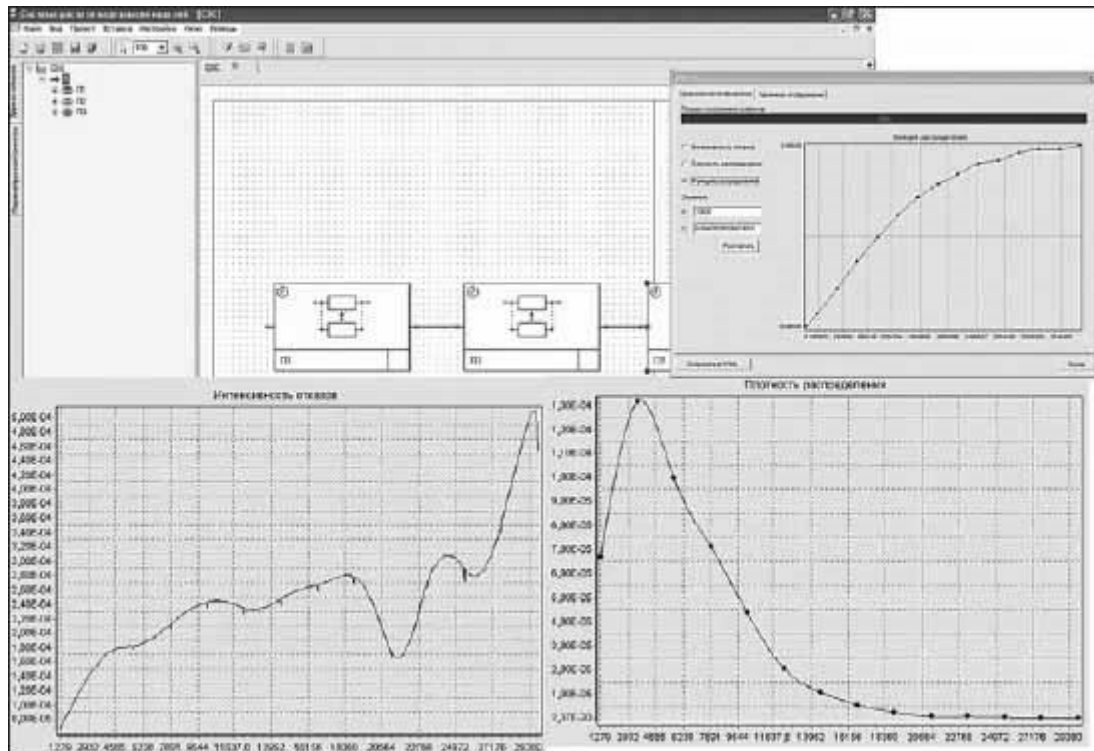


Рисунок 7.4 – Функція і щільність розподілу часу напрацювання на відмову та інтенсивність відмов проєктованого РЕЗ

Також підсистема АСОНІКА-К містить: систему аналізу результатів; систему архівації проєктів; довідкову систему; систему супроводу бази даних; систему адміністрування користувачів; систему аналізу та обліку впливу на надійність зовнішніх чинників; інформаційно-довідкову систему з характеристиками надійності компонентів сучасної складної обчислювальної техніки.

Інформація, що зберігається у базі даних підсистеми АСОНІКА-К, містить:

- номенклатуру електрорадіоелементів, які розташовані за функціональними класами (групами), що об'єднані за їх призначенням, основним параметрам і конструктивно-технологічному виконанню;
- умовне позначення засобу;
- позначення документа на постачання;
- математичні моделі для розрахунку (прогнозування) значень експлуатаційної інтенсивності відмов груп (типів) засобів, у тому числі і під час зберігання у різних умовах;

інформацію про показники надійності електрорадіоелементів і коефіцієнти моделей.

Для розрахунку надійності РЕЗ за допомогою підсистеми АСОНІКА-К необхідна початкова інформація про конструкцію РЕЗ (перелік електрорадіоелементів, приведений у відповідність з ієрархією типів конструкцій), теплові та електричні параметри режиму роботи РЕЗ, а також умови експлуатації, рівень якості виробництва електрорадіоелементів і РЕЗ.

Таким чином, підсистеми АСОНІКА-К дозволяє в автоматизованому режимі розрахувати наступні показники надійності РЕЗ: експлуатаційні інтенсивності відмов, ймовірність безвідмовної роботи і середній час безвідмовної роботи.

Програмні комплекси Relex та Risk Spectrum дозволяють проводити логіко-ймовірнісний аналіз надійності і безпеки технічних систем. Програмний комплекс Risk Spectrum у теперішній час в основному використовується для ймовірнісного аналізу безпеки об'єктів атомної енергетики на стадії проектування. Цей комплекс використовується більш ніж на 50% атомних станцій світу. Програмні комплекси Relex та Risk Spectrum також використовуються для розрахунку надійності засобів приладобудування, обчислювальної техніки, на транспорті і т. ін.

Моделювання і розрахунок показників надійності і безпеки технічних систем у цих програмних комплексах здійснюється на основі логіко-ймовірнісних методів, що використовують як засіб побудови графічних моделей безпеки (надійності) дерева подій і дерева відмов, які показані на рис. 7.5 та рис. 7.6.

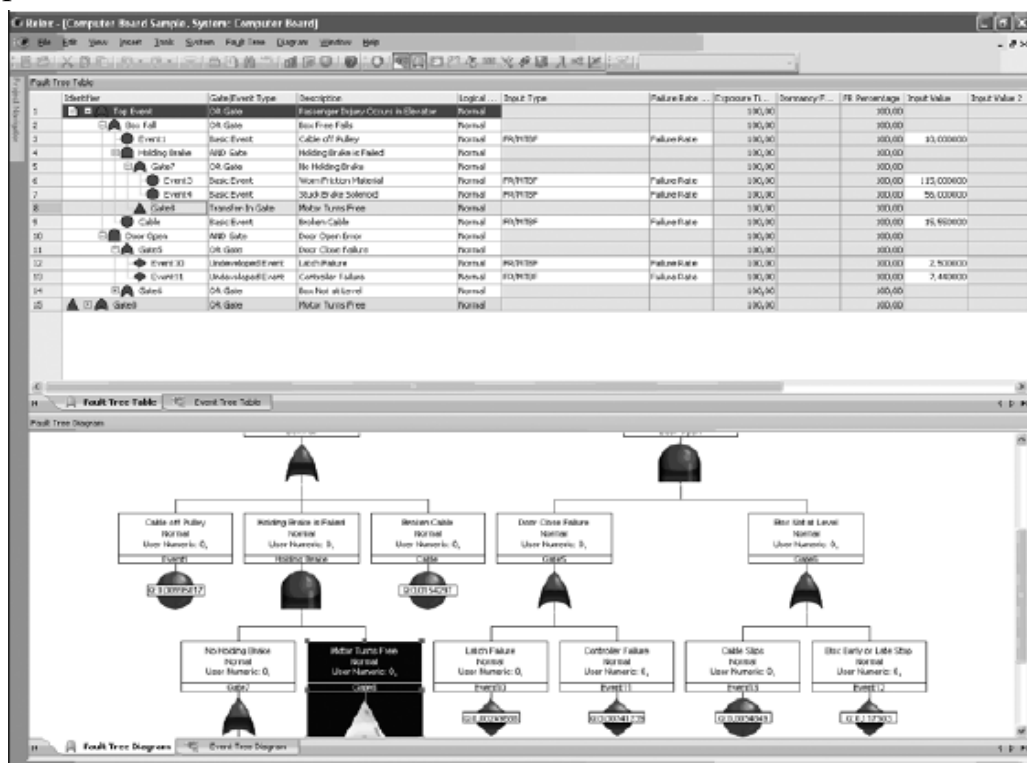


Рисунок 7.5 – Дерево відмов у програмному комплексі Relex

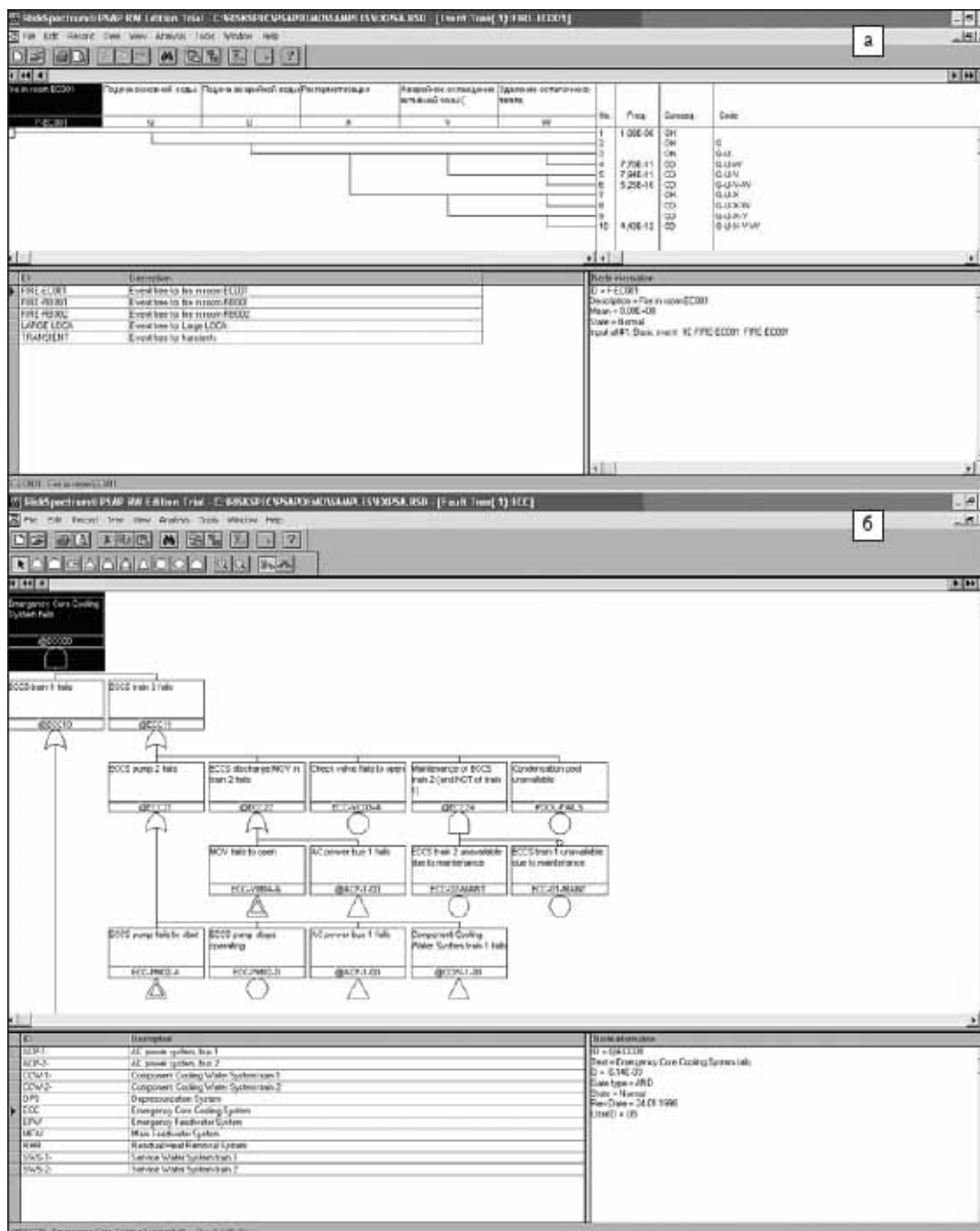


Рисунок 7.6 – Дерево подій у редакторі ДП (а) та дерево відмов у редакторі ДВ (б) програмного комплексу Risk Spectrum

Під деревом подій розуміють графічну модель, яка описує логіку розвитку різних варіантів аварійного процесу, що викликані даною вихідною подією, а під деревом відмов розуміють графічна модель, яка відображає логіку подій, що приводять до невиконання заданої функції (відмові) системою унаслідок виникнення різних комбінацій відмов обладнання та помилок персоналу.

До складу дерева відмов входять графічні елементи, які призначені для відображення елементарних випадкових подій (базисних подій) і логічних

операторів. Кожному логічному оператору булевої алгебри відповідає графічний елемент, що дозволяє проводити декомпозицію складних подій простішими (базисними або елементарними).

Використання апарату математичної логіки дозволяє формалізувати умови працездатності складних технічних систем і розрахунок їх надійності. Наприклад, якщо система працездатна у разі працездатності її елементів А і В, то можна стверджувати, що працездатність системи (подія С) і працездатність елементів А і В (подія А і подія В) зв'язані між собою логічним рівнянням працездатності: $C = A \wedge B$ (позначення $\wedge$ використовується для відображення логічної операції І). Це рівняння працездатності може бути представлено схемою послідовного з'єднання елементів А і В.

Побудувавши дерево подій, можна здійснювати розрахунок показників надійності: ймовірності відмови; параметру потоку відмов; середньої кількості відмов. Значення показників можуть розраховуватися для різних вершин дерева подій.

У програмному комплексі Risk Spectrum дерево подій представляється у вигляді таблиці. Таблиця містить рядок заголовків, поле, в якому поміщений розімкнений бінарний граф (дерево подій), а також декілька стовпців з характеристиками кінцевих станів в яких перебуває модельований об'єкт у процесі розвитку аварійних ситуацій (див. рис. 7.6, а). У заголовку 1-го стовпця таблиці розміщуються позначення вихідних подій. У наступних заголовках стовпців зліва направо вказуються назви і умовні позначення проміжних подій, які відповідають успішному або неуспішному виконанню функцій безпеки, працездатним або не працездатним станам систем безпеки або окремих компонентів (устаткування і технічних засобів), правильним або помилковим діям персоналу. У стовпцях, що характеризують кінцеві стани, вказуються їх номери, умовні позначення, типи кінцевих станів (наприклад, пошкодженням активної зони), ймовірність виникнення, логічні формули, що відповідають виникненню аварійних ситуацій.

До складу програмного комплексу Relex входять різні аналітичні модулі:

- прогнозування безвідмовності, що містить моделі для розрахунку показників надійності елементів;

- аналізу ремонтпридатності, що дозволяє вирішувати завдання прогнозування терміну проведення технічного обслуговування;

- аналізу видів, наслідків і критичності відмов за допомогою ранжирування небезпечних відмов та їх оцінки за пріоритетами ризиків;

- блок-схеми надійності, що використовується для аналізу складних резервованих систем, з використанням аналітичних методів і методів моделювання Монте-Карло;

- дерева відмов / дерева подій, який дозволяє реалізовувати процедури для дедуктивного та індуктивного аналізу розвитку відмов та подій у системі;

марківського моделювання, що дозволяє використовувати процеси, які застосовуються під час динамічного моделювання та аналізу надійності систем.

статистичного аналізу, який призначений для обробки результатів випробувань та експлуатації, з використанням різних видів розподілів: нормальне, Вейбулла, логнормальне, рівномірне, експоненціальне, Гумбеля, Релея, біноміальне та ін.;

економічних розрахунків, що призначений для оцінки вартості терміну служби на всіх етапах проектування, виробництва, експлуатації та утилізації системи.

Програмний продукт FavoWeb – це динамічна FRACAS-система, що працює в Інтернеті (Failure Reporting Analysis and Corrective Action System – Система сповіщення про відмови, аналіз і корегуючі дії), який заснований на сучасних можливостях інтернет-технологій і реалізує повний замкнутий цикл методології FRACAS.

Система FRACAS дозволяє створювати бази даних, шляхом переведу різнорідних даних у структуровану інформацію про якість. Має потужний механізм корегуючих дій: підтримку роботи груп аналізу відмов / дефектів / матеріалів, аналізу глибинних причин відмов, усунення проблем.

Програма має широкий набір функцій, можливостей оцінки і підвищення надійності обладнання за рахунок інтеграції з системою аналізу надійності RAM Commander (рис. 7.7).

Ref Des	ID	Name	Qty	Dn. FR INT	Status
TUTORIAL	1	Communication System	1	1,075L-000	..
Capacitor	1	COMM-DCB	1	20000 2000	..
Main Switch	1	SW000	2	1854 4717	..
U1	1	8086A	1	306 3073	..
U2	2	80C20	1	54 3095	..
U10	3	80C20	1	44 5401	..
U12	4	LM296	1	42 4496	..
U15	5	74LS20	1	66 5477	..
RES18	6	RLR	10	7 3089	..
RES12	7	RLR	2	1 3089	..
RES24	8	RLR	10	129 3220	..
CC1	9	CC	1	6 4040	..
CC2	10	CC	1	6 4040	..
CC3	11	CC	1	6 4040	..
CC4	12	CC	1	6 4040	..
CC5	13	CC	1	6 4040	..
W154	14	HUMP2400	4	45 31 66	..
W158	15	HUMP2400	2	22 3081	..
SW12	16	DP2	2	712 3900	..
Receiver	2	RC064	10	7510 0000	..
CS1	1	CSR	2	17 4436	..
CS2	2	CL	2	123 7166	..
UR1	3	RLR	1	27 5604	..
UR2	4	RLR	1	23 3817	..
U13	5	74LS00	1	17 3817	..
U14	6	74LS00	1	66 7504	..
U17	7	74LS32	1	145 8156	..
U18	8	74LS20	1	12 0020	..
U19	9	74LS00	1	275 2564	..
W157	10	HUMP2400	4	9 7747	..
Transmitter	2	TR067 301	1	29 45 0000	..
Control	4	Power Switch	1	6 000 0000	..
Control	2	Control Unit	1	74 046 3813	..
Monitor	1	MON201	1	0000 0000	..
System/Interf	2	RS-232	1	17000 0000	..
System/Interf	3	RS-232	1	94 096 3575	..
Hardware	1	HDC002	1	11 404 4027	..
CD-ROM	2	CD-ROM	1	14 430 0023	..
Floppy	3	FPS	1	12 503 0023	..
Modem/Mod	4	MOD0007	1	12 000 0000	..
Modem/Mod	1	MOD001	1	11 136 4944	..

Рисунок 7.7 – Вікно системи аналізу надійності RAM Commander

Система аналізу надійності RAM Commander охоплює весь спектр інженерних завдань, пов'язаних з надійністю електронних, електромеханічних, механічних та інших систем. Вона дозволяє: прогнозувати надійність, готовність і ремонтпридатність різного роду обладнання; здійснювати пропорційний розподіл між надійністю і ремонтпридатністю; управляти даними з надійності, готовності і ремонтпридатності; проводити аналіз надійності проектного обладнання методом Монте-Карло; оптимізувати складський облік запасних частин.

Крім того, програмний продукт FavoWeb містить спеціальні можливості з внесення та обліку змін, логістики та відстежування серійних номерів виробів (CALS-технологія).

Під терміном CALS-технологія (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) розуміється сукупність принципів і технологій інформаційної підтримки життєвого циклу об'єкту на всіх його стадіях. Важливим аспектом CALS-технологій є інформаційна підтримка безпосередньо самого процесу розрахунку оцінки надійності технічної системи.

Модуль RAM Commander дозволяє обчислювати середнє напрацювання на відмову / критичну відмову, середній час на ремонт, середній час між відмовами та ін.

Модуль RBD розрахунку структурної надійності RAM Commander дозволяє враховувати: вид резервування (постійне, заміщення, що ковзає); ймовірність і час успішного підключення резерву; навантаженість резерву; механізм прояву відмови; різні стратегії відновлення; наявність запасних частин, профілактичного обслуговування і технічних оглядів.

Базова конфігурація програмного продукту FavoWeb дозволяє створювати звіти (розподіл дефектів/відмов і перелік відмов/дефектів по заданим користувачем параметрам); проводити корегуючі дії; будувати дерево продукту; працювати з різними бібліотеками/довідниками; має модуль адміністратора.

Програмний комплекс АСМ (автоматизованого структурно-логічного моделювання) базується на загальному логіко-ймовірнісному методі системного аналізу, що реалізовує всі можливості основного апарату моделювання алгебри логіки на базі операцій «І», «АБО», «НЕ».

Початкова структура системи у програмному комплексі АСМ представляється схемою функціональної цілісності, яка дозволяє відображати практично всі відомі види структурних моделей систем.

Комплекс автоматично формує розрахункові аналітичні моделі надійності і безпеки систем та обчислює ймовірність безвідмовної роботи, середнє напрацювання повністю, коефіцієнт готовності, середнє напрацювання на відмову, середній час відновлення, ймовірність відмови системи, що відновлюється, ймовірність готовності змішаної системи, а також важливість і внесок елементів у різні показники надійності системи в цілому. Програмний комплекс АСМ дозволяє також автоматично визначати

найкоротші шляхи успішного функціонування, мінімальні перетини відмов та їх комбінації.

Актуальною проблемою автоматизованого розрахунку надійності в Україні є розробки вітчизняних програмних комплексів для автоматизованого моделювання і розрахунку статичних і динамічних показників надійності і безпеки складних технічних систем. Використання для цих цілей зарубіжних програмних комплексів пов'язано з високою їх вартістю, технологічною залежністю, проблемами підготовки обслуговуючого персоналу.

Питання для самоперевірки:

1. Яким вимогам повинна відповідати автоматизована система розрахунку надійності ?
2. Які розрахунки надійності можна проводити за допомогою підсистеми АСОНІКА-К ?
3. На чому базується побудова програмних комплексів Relex та Risk Spectrum ?
4. Яким чином у програмних комплексах розрахунку надійності використовується апарат математичної логіки ?
5. Чим відрізняється програмний продукт FavoWeb від інших та які його основні характеристики ?

ЛЕКЦІЯ № 8

ВИПРОБУВАННЯ НА НАДІЙНІСТЬ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

Навчальна мета:

розглянути особливості оцінки надійності засобів вимірювання за результатами випробувань;
вивчити статистичні методи обробки спостережень.

Навчальні питання:

1. Особливості оцінки надійності за результатами випробувань.
2. Основні відомості про статистичні методи обробки спостережень.
3. Перевірка статистичних гіпотез.

8.1 Особливості оцінки надійності за результатами випробувань

Розрахункові методи оцінки надійності не завжди можна використовувати для визначення показників надійності засобів вимірювання. Це пов'язано з тим, що не для всіх ЗВ розроблені такі методи, і не всі показники можна розрахувати аналітично. У цьому випадку надійність ЗВ може бути оцінена за результатами випробувань.

На стадії розробки ЗВ проводяться випробування, метою яких є визначення відповідності конструкції ЗВ вимогам з надійності, їх ще називають **визначальними випробуваннями**.

При серійному виготовленні ЗВ окрім визначальних проводять також **контрольні випробування** на надійність, які призначені для контролю відповідності серійної продукції вимогам з надійності, що приведені у технічних умовах і враховують результати визначальних випробувань.

Експериментальні методи оцінки надійності вимагають випробувань значного числа зразків, тривалого часу та витрат. Це не дозволяє проводити належні випробування з надійності ЗВ, що випускаються малими серіями, а для ЗВ, що випускаються великими серіями, це приводить до затримки отримання достовірної інформації про надійність. Тому при оцінках і контролі надійності ЗВ прагнуть до скорочення об'єму випробувань.

Об'єм випробувань, необхідний для підтвердження заданих показників надійності, скорочують шляхом: прискоренням режимів; оцінки надійності за малою кількістю відмов; зменшення кількості зразків за рахунок збільшення тривалості випробувань; використання різносторонньої інформації про надійність елементів і вузлів засобу вимірювання.

Для ЗВ, що не відновлюються, за результатами випробувань визначають ймовірність безвідмовної роботи, а для ЗВ, що відновлюються, – середній час напрацювання на відмову і середній час відновлення працездатного стану.

8.2 Основні відомості про статистичні методи обробки спостережень

За результатами визначальних або контрольних випробувань ЗВ отримується вибірка $x_1, x_2, \dots, x_n$ об'єму n . Елементами вибірки можуть бути, наприклад, кількість відмов ЗВ на певному інтервалі часу, значення напрацювання ЗВ до першої відмови, значення часу відновлення ЗВ і т. ін.

Методи математичної статистики дозволяють за властивостями вибірки визначити властивості генеральної сукупності. **Генеральна сукупність** – множина, що містить всі однорідні об'єкти, які мають якості, що цікавлять. Одним із завдань є оцінка параметрів розподілу генеральної сукупності.

За даними вибірки можна визначити так звані точкові оцінки параметрів розподілу

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (8.1)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (8.2)$$

де $\bar{x}$ і s^2 – точкові оцінки математичного очікування α і дисперсії σ^2 генеральної сукупності, відповідно.

За допомогою тільки однієї точкової оцінки параметра α_0 не можливо оцінити точність з якою проведена оцінка цього параметра α генеральної сукупності. Тому разом з точковою оцінкою α_0 застосовують довірчий інтервал $(\alpha_0 - \delta_1, \alpha_0 + \delta_2)$, в якому з високою ймовірністю $1 - p$ буде знаходитися дійсне значення параметра α генеральної сукупності. Число p є найбільшим значенням ймовірностей, при яких подія вважається практично неможливою, і називається **рівнем значущості**. Величина $1 - p$ називається **довірчою ймовірністю**.

Довірчою ймовірністю називають ймовірність того, що дійсне значення параметра, що оцінюється, або числової характеристики лежить у заданому довірчому інтервалі.

Позначимо відхилення вибіркового параметра α_0 від досліджуваного генерального α через $\Delta\alpha$. Нехай $f(x)$ і $F(x)$ є щільність і функція розподілу випадкової величини $\Delta\alpha$, а δ – деяке позитивне число.

Ймовірність $P\{|\Delta\alpha| \leq \delta\}$, того, що $|\Delta\alpha|$ не перевершує δ , можна визначити за формулами

$$P\{|\Delta\alpha| \leq \delta\} = P\{|\alpha - \alpha_0| \leq \delta\} = P\{\alpha_0 - \delta \leq \alpha \leq \alpha_0 + \delta\}; \quad (8.3)$$

$$P\{\alpha_0 - \delta \leq \alpha \leq \alpha_0 + \delta\} = \int_{-\delta}^{\delta} f(x) dx = F(\delta) - F(-\delta). \quad (8.4)$$

Таким чином, якщо відомі значення $f(x)$ або $F(x)$, то можна обчислити ймовірність нерівності $\alpha_0 - \delta \leq \alpha \leq \alpha_0 + \delta$.

На практиці основний інтерес представляють два варіанти односторонньої ймовірності: перший, що числова характеристика не менше нижньої межі і другий, що числова характеристика не вище верхньої межі. Перша умова, зокрема, відноситься до ймовірності безвідмовної роботи і середнього часу напрацювання на відмову, друга – до середнього часу відновлення.

На стадії випробувань дослідних зразків ЗВ, як правило, приймають $\alpha = 0,7 \dots 0,8$, а на стадії передачі розробки у серійне виробництво – $\alpha = 0,9 \dots 0,95$. Нижні значення характерні для дрібносерійного виробництва і високої вартості випробувань.

При оцінці надійності також часто вирішується зворотне завдання: за заданою ймовірністю p визначають довірчі межі. Звичайно рішення цієї задачі має вигляд

$$\Psi_1\left(v_{1-\frac{p}{2}}\right) \leq \alpha \leq \Psi_2\left(v_{1+\frac{p}{2}}\right), \quad (8.5)$$

де Ψ_1 і Ψ_2 – деякі функції;

$v_{1-\frac{p}{2}}$ і $v_{1+\frac{p}{2}}$ – симетричні квантилі розподілу випадкової величини v ;

α – параметр розподілу генеральної сукупності, що оцінюється.

Квантилем v_p випадкової величини v , що має функцію розподілу $F(x)$, називається таке значення випадкової величини v , при якому $p\{v < v_p\} = p$. Іншими словами, v_p є рішенням рівняння $F(v_p) = p$. Квантиль v_p називається **p -100%-им квантилем**. Квантилі того або іншого розподілу знаходяться за допомогою статистичних таблиць (див. додаток А).

Розглянемо **інтервальну оцінку середнього значення**. Нехай в результаті проведення випробувань надійності ЗВ була отримана низка незалежних спостережень випадкової величини X : $x_1, x_2, \dots, x_n$. За допомогою формул (8.1) і (8.2) обчислені вибіркове середнє $\bar{x}$ і вибіркова дисперсія s^2 . Необхідно знайти інтервальну оцінку генерального середнього α при рівні значущості p .

Якщо випадкова величина X має нормальний розподіл, оцінка генерального середнього α визначається виразом

$$\bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{1-\frac{p}{2}} \leq \alpha \leq \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{1-\frac{p}{2}}, \quad (8.6)$$

де n – об'єм вибірки;

$t_{1-\frac{p}{2}}$ – квантиль t -розподілу (розподілу Стюдента) для $f = n - 1$ ступенів свободи (див. додаток А).

Величина t розподілу Стюдента задається виразом

$$t = \frac{\bar{x} - \alpha}{s} \sqrt{n}. \quad (8.7)$$

Розподіл величини t залежить від числа ступенів свободи дисперсії s^2 .

Якщо випадкова величина X розподілена експоненціально, довірчий інтервал для її середнього значення визначається за формулою

$$\frac{2\bar{x}n}{\chi^2_{\frac{p}{2}}} \leq \alpha \leq \frac{2\bar{x}n}{\chi^2_{1-\frac{p}{2}}}, \quad (8.8)$$

де $\chi^2_{\frac{p}{2}}$, $\chi^2_{1-\frac{p}{2}}$ – кванtilі розподілу χ^2 (розподілу Пірсона) з $2n$ ступенями свободи (див. додаток Б).

Для вибірки з елементами $x_1, x_2, \dots, x_n$ через χ^2 позначається сума

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^2 = \frac{fs^2}{\sigma^2}. \quad (8.9)$$

де $f = n - 1$ – число ступенів свободи.

Довірчий інтервал для σ^2 будується за допомогою χ^2 -розподілу. Якщо випадкова величина X розподілена нормально, двостороння довірна оцінка генеральної дисперсії задається нерівністю

$$\frac{fs^2}{\chi^2_{1-\frac{p}{2}}} \leq \sigma^2 \leq \frac{fs^2}{\chi^2_{\frac{p}{2}}}. \quad (8.10)$$

8.3 Перевірка статистичних гіпотез

Статистичною гіпотезою називається деяке припущення про значення генеральних статистичних характеристик або про невідомий розподіл $F(x)$ випадкової величини. За даними вибірки обчислюються статистичні показники, які називають **критеріями перевірки**. Користуючись цими критеріями, встановлюється відповідають експериментальні дані висунутій гіпотезі. За результатами перевірки гіпотеза може бути або відкинута, або не відкинута.

Гіпотеза називається **параметричною**, якщо функція розподілу $F(x)$ задана окремими параметрами і будується щодо цих параметрів. Висуваються також гіпотези іншого виду, основою яких не є припущення про конкретний вид розподілу. Ці гіпотези називаються **непараметричними**. З їх допомогою перевіряється наявність передбачуваної функції розподілу.

Порівняння дисперсій. Нехай зроблено дві вибірки. Одна вибірка з генеральній сукупності з дисперсією σ_1^2 (дисперсія цієї вибірки s_1^2 має $f_1 = n_1 - 1$ ступенів свободи); друга – зроблена з генеральної сукупності з дисперсією σ_2^2 і характеризується вибірковою дисперсією s_2^2 з $f_2 = n_2 - 1$ ступенів свободи. Необхідно з'ясувати, чи є вибіркові дисперсії s_1^2 і s_2^2 оцінками однієї і тієї ж генеральної дисперсії при рівні значущості p . Висувається гіпотеза про рівність генеральних дисперсій: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$, яка називається **нульовою гіпотезою**.

Для перевірки цієї гіпотези застосовується відношення

$$F = \frac{s_1^2}{\sigma_1^2} / \frac{s_2^2}{\sigma_2^2}, \quad (8.11)$$

де $s_1^2 = \max(s_1^2, s_2^2)$.

Розподіл величини F називається F -розподілом Фішера (див. додаток В). У разі нульової гіпотези

$$\sigma_1^2 = \sigma_2^2, \quad F = s_1^2 / s_2^2. \quad (8.12)$$

Якщо в результаті експерименту нерівність $\sigma_1^2 < \sigma_2^2$ не виконується, то нульова гіпотеза відкидається якщо

$$\frac{s_1^2}{s_2^2} > F_{1-p}(f_1, f_2). \quad (8.13)$$

Якщо заздалегідь невідоме співвідношення між σ_1^2 і σ_2^2 , то нульова гіпотеза відкидається якщо

$$\frac{s_1^2}{s_2^2} > F_{1-\frac{p}{2}}(f_1, f_2). \quad (8.14)$$

Нехай тепер потрібно порівняти k дисперсій ($k > 2$) при рівні значущості p . Порівняння здійснюється за допомогою критерію Кохрана. При цьому порівнюється відношення

$$G = \frac{\max(s_1^2, s_2^2, \dots, s_k^2)}{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_k^2} \quad (8.15)$$

з квантилем G_{1-p} розподілу Кохрана (див. додаток Г). Якщо $G > G_{1-p}$, нульова гіпотеза відкидається.

Порівняння середніх. Нехай взято дві вибірки: $x_1, x_2, \dots, x_n$ і $y_1, y_2, \dots, y_n$, з двох різних генеральних сукупностей з генеральними середніми α_1, α_2 і дисперсіями σ_1^2 і σ_2^2 . Середні і дисперсії вибірок: $\bar{x}$ і $\bar{y}$, s_1^2 і s_2^2 .

Припустимо, що генеральні сукупності розподілені нормально. Залежно від співвідношення між s_1^2 і s_2^2 можливі два випадки. Перший з них характеризується тим, що $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ (це встановлюється за експериментальними даними за допомогою критерію Фішера). Тоді середньозважена дисперсія визначається за формулою

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}, \quad (8.16)$$

і має $f = n_1 + n_2 - 2$ ступенів свободи.

Нульова гіпотеза $\alpha_1 = \alpha_2$ відкидається, якщо

$$|\bar{x} - \bar{y}| \geq t_{1-\frac{p}{2}} s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \quad (8.17)$$

при двосторонньому критерії або

$$|\bar{x} - \bar{y}| \geq t_{1-p} s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \quad (8.18)$$

при односторонньому критерії. Тут використовуються квантілі розподілу Стьюдента з $f = n_1 + n_2 - 2$ ступенями свободи (див. додаток А).

У другому випадку, коли $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ нульова гіпотеза відкидається якщо

$$|\bar{x} - \bar{y}| > \frac{\frac{s_1^2}{n_1} t_{1-\frac{p}{2}, f_1} + \frac{s_2^2}{n_2} t_{1-\frac{p}{2}, f_2}}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}. \quad (8.19)$$

Тут використовуються квантилі розподілу Стюдента з $f_1 = n_1 - 1$ і $f_2 = n_2 - 1$ ступенями свободи. Якщо замінити $p/2$ на p , то цей двосторонній критерій перетворюється на односторонній.

Завдання про порівняння середніх доводиться вирішувати під час розгляді впливу конструктивних, технологічних та експлуатаційних чинників на зміну показників надійності ЗВ.

Питання для самоперевірки:

1. Чим відрізняються визначальні та контрольні випробування ЗВ ?
2. На що впливає об'єм випробувань під час оцінки надійності ЗВ ?
3. Які розраховуються оцінки параметрів розподілу під час статистичної обробки спостережень ?
4. Яким чином проводиться інтервальна оцінка середнього значення генеральної вибірки ?
5. За якими критеріями проводиться перевірка статистичних гіпотез ?

Квантили різних розподілів

Квантили розподілу Стюдента $t_{1-p/2}$

Число степеней свободы f	Уровень значимости p						
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
1	2	3	4	5	6	7	8
1	3,08	6,31	12,71	31,82	63,66	127,32	636,62
2	1,89	2,92	4,30	6,97	9,93	14,09	31,60
3	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84	7,45	12,94
4	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60	5,60	8,61
5	1,48	2,02	2,57	3,37	4,03	4,77	6,86
6	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71	4,32	5,96
7	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50	4,03	5,41
8	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36	3,83	5,04
9	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25	3,69	4,78
10	1,37	1,81	2,23	2,76	3,17	3,58	4,59
11	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11	3,50	4,44
12	1,36	1,78	2,18	2,68	3,06	3,43	4,32
13	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01	3,37	4,22
14	1,34	1,76	2,15	2,62	2,98	3,33	4,14
15	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95	3,29	4,07
16	1,34	1,75	2,12	2,58	2,92	3,25	4,02
17	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90	3,22	3,97
18	1,33	1,73	2,10	2,55	2,88	3,20	3,92
19	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86	3,17	3,88
20	1,33	1,73	2,09	2,53	2,85	3,15	3,85
21	1,32	1,72	2,08	2,52	2,83	3,14	3,82
22	1,32	1,72	2,07	2,51	2,82	3,12	3,79
23	1,32	1,71	2,07	2,50	2,81	3,10	3,77
24	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80	3,09	3,75
25	1,32	1,71	2,06	2,48	2,79	3,08	3,73
26	1,32	1,71	2,06	2,48	2,78	3,07	3,71
27	1,31	1,70	2,05	2,47	2,77	3,06	3,69
28	1,31	1,70	2,05	2,47	2,76	3,05	3,67
29	1,31	1,70	2,04	2,46	2,76	3,04	3,66
30	1,31	1,70	2,04	2,46	2,75	3,03	3,65
40	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70	2,97	3,55
60	1,30	1,67	2,00	2,39	2,66	2,91	3,46
120	1,29	1,66	1,98	2,36	2,62	2,86	3,37
∞	1,28	1,64	1,96	2,33	2,58	2,81	3,29

Квантили розподілу Пірсона χ^2_{1-p}

Число степеней свободы f	Уровень значимости p					
	0,99	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50
1	2	3	4	5	6	7
1	0,00016	0,0039	0,016	0,064	0,148	0,455
2	0,020	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386
3	0,115	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366
4	0,30	0,71	1,06	1,65	2,19	3,36
5	0,55	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35
6	0,87	1,63	2,20	3,07	3,83	5,35
7	1,24	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35
8	1,65	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34
9	2,09	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34
10	2,56	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34
11	3,1	4,6	5,6	7,0	8,1	10,3
12	3,6	5,2	6,3	7,8	9,0	11,3
13	4,1	5,9	7,0	8,6	9,9	12,3
14	4,7	6,6	7,8	9,5	10,8	13,3
15	5,2	7,3	8,5	10,3	11,7	14,3
16	5,8	8,0	9,3	11,2	12,6	15,3
17	6,4	8,7	10,1	12,0	13,5	16,3
18	7,0	9,4	10,9	12,9	14,4	17,3
19	7,6	10,1	11,7	13,7	15,4	18,3
20	8,3	10,9	12,4	14,6	16,3	19,3
21	8,9	11,6	13,2	15,4	17,2	20,3
22	9,5	12,3	14,0	16,3	18,1	21,3
23	10,2	13,1	14,8	17,2	19,0	22,3
24	10,9	13,8	15,7	18,1	19,9	23,3
25	11,5	14,6	16,5	18,9	20,9	24,3
26	12,2	15,4	17,3	19,8	21,8	25,3
27	12,9	16,2	18,1	20,7	22,7	26,3
28	13,6	16,9	18,9	21,6	23,6	27,3
29	14,3	17,7	19,8	22,4	24,6	28,3
30	15,0	18,5	20,6	23,4	25,5	29,3
31	15,7	19,3	21,4	24,3	26,4	30,3
32	16,4	20,1	22,3	25,1	27,4	31,3
33	17,1	20,9	23,1	26,0	28,3	32,3
34	17,8	21,7	24,0	26,9	29,2	33,3
35	18,5	22,5	24,8	27,8	30,2	34,3
36	19,2	23,3	25,6	28,7	31,1	35,3
37	20,0	24,1	26,5	29,6	32,1	36,3
38	20,7	24,9	27,3	30,5	33,0	37,3
39	21,4	25,7	28,2	31,4	33,9	38,3
40	22,2	26,5	29,1	32,3	34,9	39,3
41	22,9	27,3	29,9	33,3	35,8	40,3
42	23,7	28,1	30,8	34,2	36,8	41,3
43	24,4	29,0	31,6	35,1	37,7	42,3

Квантилі розподілу Пірсона χ^2_{1-p}

1	2	3	4	5	6	7
44	25,1	29,8	32,5	36,0	38,6	43,3
45	25,9	30,6	33,4	36,9	39,6	44,3
46	26,7	31,4	34,2	37,8	40,5	45,3
47	27,4	32,3	35,1	38,7	41,5	46,3
48	28,2	33,1	35,9	39,6	42,4	47,3
49	28,9	33,9	36,8	40,5	43,4	48,3
50	29,7	34,8	37,7	41,4	44,3	49,3
51	30,5	35,6	38,6	42,4	45,3	50,3
52	31,2	36,4	39,4	43,3	46,2	51,3
53	32,0	37,3	40,3	44,2	47,2	52,3
54	32,8	38,1	41,2	45,1	48,1	53,3
55	33,6	39,0	42,1	46,0	49,1	54,3
56	34,4	39,8	42,9	47,0	50,0	55,3
57	35,1	40,6	43,8	47,9	51,0	56,3
58	35,9	41,5	44,7	48,8	51,9	57,3
59	36,7	42,3	45,6	49,7	52,9	58,3
60	37,5	43,2	46,5	50,6	53,8	59,3
61	38,3	44,0	47,3	51,6	54,8	60,3
62	39,1	44,9	48,2	52,5	55,7	61,3
63	39,9	45,7	49,1	53,4	56,7	62,3
64	40,7	46,6	50,0	54,3	57,6	63,3
65	41,4	47,5	50,9	55,3	58,6	64,3
66	42,2	48,3	51,8	56,2	59,5	65,3
67	43,0	49,2	52,7	57,1	60,5	66,3
68	43,8	50,0	53,5	58,0	61,4	67,3
69	44,6	50,9	54,4	59,0	62,4	68,3
70	45,4	51,7	55,3	59,9	63,3	69,3
71	46,2	52,6	56,2	60,8	64,3	70,3
72	47,0	53,4	57,1	61,8	65,3	71,3
73	47,9	54,3	58,0	62,7	66,2	72,3
74	48,7	55,2	58,9	63,6	67,2	73,3
75	49,4	56,0	59,8	64,5	68,1	74,3
76	50,3	56,9	60,7	65,5	69,1	75,3
77	51,1	57,8	61,6	66,4	70,0	76,3
78	51,9	58,7	62,5	67,3	71,0	77,3
79	52,7	59,5	63,4	68,3	72,0	78,3
80	53,5	60,4	64,3	69,2	72,9	79,3

Квантилі розподілу Пірсона χ^2_{1-p}

Число степеней свободы f	Уровень значимости p					
	0,20	0,10	0,05	0,01	0,005	0,001
1	2	3	4	5	6	7
1	1,64	2,7	3,8	6,6	7,9	10,8
2	3,22	4,6	6,0	9,2	10,6	13,8
3	4,64	6,3	7,8	11,3	12,8	16,3
4	6,0	7,8	9,5	13,3	14,9	18,5
5	7,3	9,2	11,1	15,1	16,3	20,5
6	8,6	10,6	12,6	16,8	18,6	22,5
7	9,8	12,0	14,1	18,5	20,3	24,3
8	11,0	13,4	15,5	20,1	21,9	26,1
9	12,2	14,7	16,9	21,7	23,6	27,9
10	13,4	16,0	18,3	23,2	25,2	29,6
11	14,6	17,3	19,7	24,7	26,8	31,3
12	15,8	18,5	21,0	26,2	28,3	32,9
13	17,0	19,8	22,4	27,7	29,8	34,5
14	18,2	21,1	23,7	29,1	31,3	36,1
15	19,3	22,3	25,0	30,6	32,8	37,7
16	20,5	23,5	26,3	32,0	34,3	39,2
17	21,6	24,8	27,6	33,4	35,7	40,8
18	22,8	26,0	28,9	34,8	37,2	42,3
19	23,9	27,2	30,1	36,2	38,6	43,8
20	25,0	28,4	31,4	37,6	40,0	45,3
21	26,2	29,6	32,7	38,9	41,4	46,8
22	27,3	30,8	33,9	40,3	42,8	48,3
23	28,4	32,0	35,2	41,6	44,2	49,7
24	29,6	33,2	36,4	43,0	45,6	51,2
25	30,7	34,4	37,7	44,3	46,9	52,6
26	31,8	35,6	38,9	45,6	48,3	54,1
27	32,9	36,7	40,1	47,0	49,6	55,5
28	34,0	37,9	41,3	48,3	51,0	56,9
29	35,1	39,1	42,6	49,6	52,3	58,3
30	36,3	40,3	43,8	50,9	53,7	59,7
31	37,4	41,4	45,0	52,2	55,0	61,1
32	38,7	42,6	46,2	53,5	56,3	62,5
33	39,6	43,7	47,4	54,8	57,6	63,9
34	40,7	44,9	48,6	56,1	59,0	65,2
35	41,8	46,1	49,8	57,3	60,3	66,6
36	42,9	47,2	51,0	58,6	61,6	68,0
37	44,0	48,4	52,2	59,9	62,9	69,3
38	45,1	49,5	53,4	61,2	64,2	70,7
39	46,2	50,7	54,6	62,4	65,5	72,1
40	47,3	51,8	55,8	63,7	66,8	73,4
41	48,4	53,0	56,9	65,0	68,1	74,7
42	49,5	54,1	58,1	66,2	69,3	76,1
43	50,5	55,2	59,3	67,5	70,6	77,4

Квантилі розподілу Пірсона χ^2_{1-p}

1	2	3	4	5	6	7
44	51,6	56,4	60,5	68,7	71,9	78,7
45	52,7	57,5	61,7	70,0	73,2	80,1
46	53,8	58,6	62,8	71,2	74,4	81,4
47	54,9	59,8	64,0	72,4	75,7	82,7
48	56,0	60,9	65,2	73,7	77,0	84,0
49	57,1	62,0	66,3	74,9	78,2	85,4
50	58,2	63,2	67,5	76,2	79,5	86,7
51	59,2	64,3	68,7	77,4	80,7	88,0
52	60,3	65,4	69,8	78,6	82,0	89,3
53	61,4	66,5	71,0	79,8	83,3	90,6
54	62,5	67,7	72,2	81,1	84,5	91,9
55	63,6	68,8	73,3	82,3	85,7	93,2
56	64,7	69,9	74,5	83,5	87,0	94,5
57	65,8	71,0	75,6	84,7	88,2	95,8
58	66,8	72,2	76,8	86,0	89,5	97,0
59	67,9	73,3	77,9	87,2	90,7	98,3
60	69,0	74,4	79,1	88,4	91,6	99,6
61	70,0	75,5	80,2	89,6	93,2	100,9
62	71,1	76,6	81,4	90,8	94,4	102,2
63	72,2	77,7	82,5	92,0	95,6	103,4
64	73,3	78,9	83,7	93,2	96,9	104,7
65	74,4	80,0	84,8	94,4	98,1	106,0
66	75,4	81,1	86,0	95,6	99,3	107,3
67	76,5	82,2	87,1	96,8	100,6	108,5
68	77,6	83,3	88,3	98,0	101,8	110,0
69	78,6	84,4	89,4	99,2	103,0	111,1
70	79,7	85,5	90,5	100,4	104,2	112,3
71	80,8	86,6	91,7	101,6	105,4	113,6
72	81,9	87,7	92,8	102,8	106,6	114,8
73	83,0	88,9	93,9	104,0	107,9	116,1
74	84,0	90,0	95,1	105,2	109,1	117,3
75	85,1	91,1	96,2	106,4	110,3	118,6
76	86,1	92,2	97,4	107,6	111,5	119,9
77	87,2	93,3	98,5	108,8	112,7	121,1
78	88,3	94,4	99,6	110,0	113,9	122,3
79	89,3	95,5	100,7	111,1	115,1	123,6
80	90,4	96,6	101,9	112,3	116,3	124,8

Квантилі розподілу Фішера F_{1-p}

f_2	F_{1-p} при урoвнe значимості $p=0.05$ для f_1								
	1	2	3	4	5	6	12	24	∞
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	244,9	249,0	254,3
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5	4,4
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8	3,7
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,7
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7	2,5	2,3
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6	2,4	2,2
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5	2,3	2,1
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1
16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0
17	4,5	3,6	3,2	3,0	2,8	2,7	2,4	2,2	2,0
18	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,3	2,1	1,9
19	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8
22	4,3	3,4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,2	2,0	1,8
24	4,3	3,4	3,0	2,8	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7
26	4,2	3,4	3,0	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,7
28	4,2	3,3	2,9	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,6
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6
40	4,1	3,2	2,9	2,6	2,5	2,3	2,0	1,8	1,5
60	4,0	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4
120	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3	2,2	1,8	1,6	1,3
∞	3,8	3,0	2,6	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5	1,0

Квантили розподілу Фішера F_{1-p}

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Уровень значимости 0,01									
1	4052	4999	5403	5625	5764	5859	6106	6234	6366
2	98,5	99,0	99,2	99,3	99,3	99,4	99,4	99,5	99,5
3	34,1	30,8	29,5	28,7	28,2	27,9	27,1	26,6	26,1
4	21,2	18,0	16,7	16,0	15,5	15,2	14,4	13,9	13,5
5	16,3	13,3	12,1	11,4	11,0	10,7	9,9	9,5	9,0
6	13,7	10,9	9,8	9,2	8,8	8,5	7,7	7,3	6,9
7	12,3	9,6	8,5	7,9	7,5	7,2	6,5	6,1	5,7
8	11,3	8,7	7,6	7,0	6,6	6,4	5,7	5,3	4,9
9	10,6	8,0	7,0	6,4	6,1	5,8	5,1	4,7	4,3
10	10,0	7,6	6,6	6,0	5,6	5,4	4,7	4,3	3,9
11	9,7	7,2	6,2	5,7	5,3	5,1	4,4	4,0	3,6
12	9,3	6,9	6,0	5,4	5,1	4,8	4,2	3,8	3,4
13	9,1	6,7	5,7	5,2	4,9	4,6	4,0	3,6	3,2
14	8,9	6,5	5,6	5,0	4,7	4,5	3,8	3,4	3,0
15	8,7	6,4	5,4	4,9	4,6	4,3	3,7	3,3	2,9
16	8,5	6,2	5,3	4,8	4,4	4,2	3,6	3,2	2,8
17	8,4	6,1	5,2	4,7	4,3	4,1	3,5	3,1	2,7
18	8,3	6,0	5,1	4,6	4,3	4,0	3,4	3,0	2,6
19	8,2	5,9	5,0	4,5	4,2	3,9	3,3	2,9	2,4
20	8,1	5,9	4,9	4,4	4,1	3,9	3,2	2,9	2,4
22	7,9	5,7	4,8	4,3	4,0	3,8	3,1	2,8	2,3
24	7,8	5,6	4,7	4,2	3,9	3,7	3,0	2,7	2,2
26	7,7	5,5	4,6	4,1	3,8	3,6	3,0	2,6	2,1
28	7,6	5,5	4,6	4,1	3,8	3,5	2,9	2,5	2,1
30	7,6	5,4	4,5	4,0	3,7	3,5	2,8	2,5	2,0
40	7,3	5,2	4,3	3,8	3,5	3,3	2,7	2,3	1,8
60	7,1	5,0	4,1	3,7	3,3	3,1	2,5	2,1	1,6
120	6,9	4,8	4,0	3,5	3,2	3,0	2,3	2,0	1,4
∞	6,6	4,6	3,8	3,3	3,0	2,8	2,2	1,8	1,0

Квантилi розподiлу Кохрана G_{1-p} [illegible]

Квантилі розподілу Кохрана G_{1-p}

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Уровень значимости 0,01														
2	9999	9950	9794	9586	9373	9172	8998	8823	8674	8539	7949	7067	6062	5000
3	9933	9423	8831	8335	7933	7606	7335	7107	6912	6743	6059	5153	4230	3333
4	9676	8643	7814	7212	6761	6410	6129	5897	5702	5536	4884	4057	3251	2500
5	9279	7885	6957	6329	5875	5531	5259	5037	4854	4697	4094	3351	2644	2000
6	8828	7218	6258	5635	5195	4866	4608	4401	4229	4084	3529	2858	2229	1667
7	8376	6644	5685	5080	4659	4347	4105	3911	3751	3616	3105	2494	1929	1429
8	7945	6152	5209	4627	4226	3932	3704	3522	3373	3248	2779	2214	1700	1250
9	7544	5727	4810	4251	3870	3592	3378	3207	3067	2950	2514	1992	1521	1111
10	7175	5358	4469	3934	3572	3308	3106	2945	2813	2704	2297	1811	1376	1000
12	6528	4751	3919	3427	3099	2861	2680	2535	2419	2320	1961	1535	1157	0833
15	5747	4069	3317	2882	2593	2386	2228	2104	2002	1918	1612	1251	0934	0667
20	4799	3297	2654	2288	2048	1877	1748	1646	1567	1501	1248	0960	0708	0500
24	4247	2871	2295	2000	1759	1608	1495	1406	1338	1283	1060	0810	0595	0417
30	3632	2412	1913	1635	1454	1327	1232	1157	1100	1054	0867	0658	0480	0333
40	2940	1915	1508	1281	1135	1033	0957	0898	0853	0816	0668	0503	0363	0250
60	2151	1371	1069	0902	0796	0722	0668	0625	0594	0567	0461	0344	0245	0167
120	1225	0759	0585	0489	0429	0387	0357	0334	0316	0302	0242	0178	0125	0083
∞	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000

Примечание. В таблице содержатся десятичные знаки квантилей. Например, при $k=10$, $f=6$, $G_{0,99}=0,3308$.

ЗАКІНЧЕННЯ

Конспект лекцій містить відомості про етапи розвитку теорії надійності та основні поняття теорії надійності, а також про показники надійності, такі як показники безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності і збереженості. Крім того, розглянуті основні комплексні показники надійності, такі як коефіцієнт готовності; коефіцієнт технічного використання; коефіцієнт оперативної готовності. Приведені відомості щодо об'єктивних та суб'єктивних чинників, що впливають на показники надійності засобів вимірювання.

Коротко розглянуті структурні моделі надійності засобів вимірювання (послідовна та паралельна моделі), а також метод перетворення складної логічної структури за базовим елементом.

Особлива увага приділена методам розрахунку надійності засобів вимірювання під час проведення приблизного, орієнтовного та остаточного розрахунків надійності. Також розглянутий метод диференціальних рівнянь обчислення функцій і коефіцієнтів готовності засобів вимірювання, що відновлюються, як нерезервованих, так і резервованих.

В конспекті лекцій наведені загальні відомості про сучасні засоби автоматизованого розрахунку надійності та наданий короткий огляд програмних комплексів розрахунку надійності, таких як АСОНІКА-К (МИЭМ-ASKsoft, Росія); Relex (Relex software Corporation, США); Risk Spectrum (Relcon AB, Швеція); FavoWeb – FRACAS (A.L.D. Group, Ізраїль); АСМ (ВАТ “СПІК СЗМА”, Росія).

Також розглянуті особливості оцінки надійності засобів вимірювання за результатами випробувань та відомості про статистичні методи обробки спостережень і перевірку статистичних гіпотез.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Надійність техніки. Терміни та визначення. ДСТУ 2860-94. [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/5375587/>
2. Засоби радіоелектроніки. Надійність резервованих систем. ДСТУ 2566-94.
3. Недоступ Л.А. Основи надійності радіоелектронних пристроїв / Недоступ Л.А., Киселичник М.Д., Бобало Ю.Я. – Л.: ДУ "Львівська політехніка", 1998. – 219 с.
4. Семенов О.О. Основи теорії надійності / О.О. Семенов, В.Г. Мелкумян. – К.: КМУЦА, 1998. – 84 с.
5. Труханов В.М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов / Труханов В.М. – М.: Машиностроение, 2003. – 320 с.
6. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – Санкт-Петербург, 2008. – 704 с.
7. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем / Шишмарев В.Ю. – М.: Издательский центр “Академия”, 2010. – 304 с.
8. Ямпурин Н.П. Основы надежности электронных средств / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова; под ред. Н.П. Ямпурина. – М.: Издательский центр “Академия”, 2010. – 240 с.
9. Костерев В.В. Надежность технических систем и управление риском / Костерев В.В. – М.: МИФИ, 2008. – 280 с.
10. Строгонов А. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем / Строгонов А., Жаднов В., Полесский С. // Компоненты и технологии – № 5, 2007. – С. 183 – 190.
11. Фролов А.Д. Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронной аппаратуры / Фролов А.Д. – М.: Высшая школа, 1970. – 488 с.
12. Сборник задач по теории надежности / [Половко А.М., Маликов И.М., Жигарев А.Н., Зарудный В.И.]; под ред. А.М. Половко и И.М. Маликова. – М.: Сов. радио, 1972. – 408 с.
13. Надежность электрорадиоизделий, 2006: справочник / С.Ф. Прытков и др. – М.: ФГУП “22 ЦНИИ МО РФ”, 2008. – 641 с.
14. Боровиков С.М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств / Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д.; под ред. С.М. Боровиков. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.
15. Васілевський О.М. Нормування показників надійності технічних засобів / Васілевський О.М., Поджаренко В.О. [Електронний ресурс] – Режим доступа: http://posibnyky.vntu.edu.ua/v_p/1.htm

Навчальне видання

Метрологічна надійність. Конспект лекцій. Для студентів механічного факультету спеціальності “Метрологія та вимірювальна техніка”

Укладачі:

О.І. Богатов
Р.Е. Пащенко
А.О. Коваль

Відповідальний за випуск:

О.В. Крайнюк

Підп. до друку
Друковано на ризографі.
Зам №

Формат
Умовн.-др.арк.
Тираж прим.

Папір офсетний
Обл.– вид. арк..
Ціна договірна

Адреса редакції видавництва і поліграфічного підприємства
ХНАДУ 61002 Харків-02, вул. Ярослава Мудрого, 25
Надруковано видавництвом Харківського національного автомобільно-
дорожнього університету