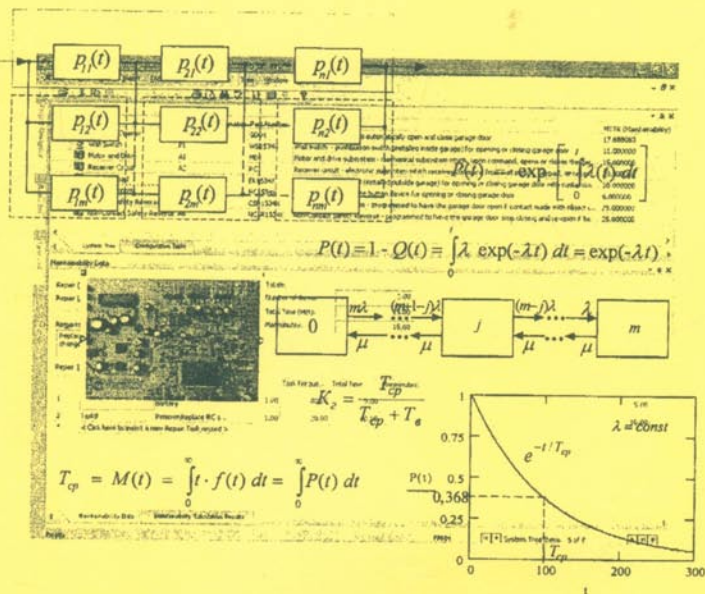


О. О. Лазарев

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. О. Лазарєв

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 621.3.019.3 (075)

ББК 30.14

Л171

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 20.01.2009 р.)

Рецензенти:

М. А. Філінюк, доктор технічних наук, професор

С. М. Зленко, доктор технічних наук, професор

О. В. Грабчак, кандидат технічних наук, доцент

Лазарєв, О. О.

Л171 Теоретичні основи надійності електронних апаратів : навчальний посібник / О. О. Лазарєв. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 129 с.

Навчальний посібник призначений для вивчення теоретичних питань надійності електронних апаратів дисципліни «Фізико-теоретичні основи конструювання електронних апаратів» студентами спеціальностей «Виробництво електронних засобів», «Технології та засоби телекомунікацій», «Біотехнічні та медичні апарати і системи». Може бути корисним студентам інших спеціальностей, науковим співробітникам і аспірантам, які цікавляться проблемами надійності електронних апаратів.

УДК 621.3.019.3 (075)

ББК 30.14

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ	
ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ	7
1.1 Терміни та визначення теорії надійності.....	8
1.2 Причини низької надійності ЕА.....	14
1.3 Методи забезпечення надійності.....	18
1.4 Закони розподілу відмов і їх основні характеристики.....	26
Контрольні запитання.....	35
2 НАДІЙНІСТЬ НЕВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ЕА	36
2.1 Показники надійності невідновлювальних ЕА.....	37
2.2 Показники надійності при різних законах розподілу напрацювання до відмови.....	41
2.2.1 Експоненціальний закон розподілу.....	41
2.2.2 Закон Вейбулла.....	43
2.2.3 Нормальний закон розподілу.....	44
2.3 Оцінювання надійності з урахуванням режимів експлуатації ЕА.....	47
Контрольні запитання.....	50
3 НАДІЙНІСТЬ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ЕА	51
3.1 Показники надійності ремонтпридатної ЕА без відновлення в процесі використання.....	52
3.2 Показники надійності ремонтпридатної ЕА з відновленням в процесі використання.....	53
3.2.1 Одиничні показники.....	53
3.2.2 Комплексні показники надійності.....	54
Контрольні запитання.....	55
4 СТРУКТУРНІ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ЕА	56
4.1 Послідовна модель надійності.....	57
4.2 Паралельна модель надійності.....	58
4.3 Метод перетворення складної логічної структури за базовим елементом.....	59
4.4 Метод перетворення трикутника в зірку та навпаки.....	62
Контрольні запитання.....	63

5 НАДІЙНІСТЬ РЕЗЕРВОВАНИХ ЕА	64
5.1 Основні визначення та класифікація способів резервуванні	64
5.2 Надійність при загальному резервуванні	66
5.3 Надійність при поелементному резервуванні	68
5.4 Надійність при змішаному резервуванні	69
5.5 Надійність резервованих невідновлювальних систем	71
5.5.1 Надійність ЕА при пасивному резервуванні з незмінним навантаженням і при навантаженому активному резервуванні	71
5.5.2 Надійність ЕА при активному ненавантаженому резервуванні	73
5.5.3 Надійність ЕА при активному полегшеному резервуванні	75
5.5.4 Надійність ЕА при ковзному резервуванні	75
5.6 Надійність резервованих відновлювальних систем	76
5.6.1 Ненавантажене резервування	76
5.6.2 Навантажене резервування	79
5.7 Мажоритарне резервування	80
5.8 Оптимальне резервування ЕА	83
Контрольні запитання	84
6 ІНФОРМАЦІЙНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ	85
6.1 Основні характеристики коригуючих кодів	87
6.2 Код з перевіркою на парність	89
6.3 Коди з повторенням	92
6.4 Коди Хеммінга	93
Контрольні запитання	98
7 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ЕА	99
7.1 Relex Reliability Studio	99
7.2 RAM Commander	102
7.3 АСОНИКА-К	105
Контрольні запитання	108
СЛОВНИК НАЙБІЛЬШ ВЖИВАНИХ ТЕРМІНІВ	109
ЛІТЕРАТУРА	115
ДОДАТОК А. Інтенсивності відмов та поправкові коефіцієнти	119

ВСТУП

Однією з головних проблем при проектуванні, виробництві та експлуатації електронних апаратів є проблема забезпечення надійності, що пояснюється постійним ускладненням електронних апаратів та технології їх виробництва, а також підвищенням вимог до них. Створення нової апаратури без забезпечення її надійності немає сенсу. Нова складна апаратура не буде працювати, оскільки постійно будуть виникати простої, а відмови та неправильна робота можуть призвести до катастрофічних наслідків. Практичний досвід показує, що часто більш вигідно витратити додаткові кошти на забезпечення надійності, ніж потім експлуатувати ненадійну апаратуру.

Науковий напрямок, що займається проблемами забезпечення надійності був започаткований на початку 50-х років минулого століття, коли розвиток техніки призвів до створення електронних апаратів з великою кількістю елементів та надання їм основних функцій автоматичного керування. В наш час методи аналізу та контролю надійності широко використовуються в багатьох галузях промисловості. В розвинутих країнах створені спеціальні служби надійності, прийняті державні та галузеві стандарти, що встановлюють основні терміни і показники надійності та методи їх розрахунку.

Сучасна теорія надійності складається з трьох розділів:

- математична теорія надійності, предметом досліджень якої є математичні закономірності появи відмов, методи кількісного визначення надійності та інженерні методи розрахунку її показників;
- статистична теорія надійності, що вивчає процеси збирання та оброблення статистичних даних про надійність;
- фізична теорія надійності, предметом досліджень якої є фізико-хімічні процеси, що зумовлюють зміни фізичних та електричних параметрів матеріалів та приладів і призводять до появи відмов. Формування цього напрямку дозволило перейти від пасивного спостереження статистичних даних про надійність до поглибленого вивчення причин виникнення відмов, виявлення механізмів деградації і активних науково-обґрунтованих дій на технологічні процеси та конструкції приладів.

Навчальний посібник присвячено викладенню основ математичної теорії надійності в межах, необхідних для практичного застосування інженерами з електронних апаратів. Посібник складається з 7 розділів. В

першому розділі наведені основні поняття, терміни та означення теорії надійності, розглянуті причини низької надійності ЕА та шляхи її підвищення. Другий розділ присвячений оцінюванню надійності невідновлювальних ЕА. Розглянуті показники надійності невідновлювальної апаратури при різних законах розподілу та вплив на надійність режимів експлуатації. В другому розділі розглянуті одиничні та комплексні показники надійності відновлювальної ЕА та методи їх розрахунків. Структурна надійність ЕА та методи перетворення складних структурних логічних схем надійності розглянуті в четвертому розділі. П'ятий розділ присвячений оцінюванню надійності при резервуванні, розглянуті різні способи резервування, визначенні їх галузі застосування, переваги та недоліки. В шостому розділі наведені основні відомості про завадостійкі коди, використання яких відноситься до інформаційних методів підвищення надійності ЕА. Розрахунок надійності є доволі трудомісткою та відповідальною задачею, ефективному розв'язанню якої на всіх стадіях життєвого циклу ЕА допомагають програмні комплекси, основні відомості про які наведені в останньому, сьомому, розділі навчального посібника.

Після кожної теми в посібнику наведені контрольні запитання, що сприяють кращому самостійному засвоєнню теоретичного матеріалу.

Навчальний посібник написаний відповідно до програми дисципліни "Фізико-теоретичні основи конструювання електронних апаратів", що викладається автором на четвертому курсі студентам спеціальностей "Виробництво електронних засобів", "Технології та засоби телекомунікацій", "Біотехнічні та медичні апарати і системи" Вінницького національного технічного університету. Від студента вимагається знання основних положень фізики, вищої математики, елементної бази електронних апаратів та схемотехніки.

При підготовці навчального посібника автор використовував матеріали робіт, що наведені в переліку літератури, які рекомендуються студентам для більш детального вивчення.

1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

Всі промислові вироби характеризуються якістю, тобто певною сукупністю властивостей, які суттєво відрізняють даний виріб від інших і визначають ступінь його придатності до експлуатації за своїм призначенням. Для електронних апаратів (ЕА) це сукупність конструкторських, технологічних, електричних, магнітних, теплових та ергономічних характеристик. Якісні показники виробів оцінюються також здатністю до функціонування в умовах зовнішніх завад (вібрації, ударних перенавантажень, змінних кліматичних умов, радіації) та рівнем уніфікації та стандартизації, що використовується при їх виробництві. В процесі експлуатації електронних апаратів внаслідок процесів зношення та незворотних процесів старіння характеристики апаратури (а відповідно, і її якість) будуть змінюватися. Зміною якості в часі характеризують один з найголовніших її показників, що називається *надійністю*.

Під *надійністю* (*reliability, dependability*) розуміють властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах протягом необхідного проміжку часу або необхідного напруження при дотриманні режимів експлуатації, правил технічного обслуговування, зберігання і транспортування. Надійність – це складне комплексне поняття, за допомогою якого оцінюють такі найважливіші характеристики виробів, як роботоздатність, довговічність, безвідмовність, ремонтпридатність, відновлюваність і ін.

У зв'язку зі складністю змісту поняття надійності її неможливо точно розрахувати; можна лише приблизно оцінити для створених раніше пристроїв і приблизно спрогнозувати для новостворюваних.

Надійність виробу зв'язана безпосередньо з вартістю. Як правило забезпечення вищої надійності виробів в період їх освоєння у виробництві обходиться дорого, оскільки це пов'язано з рядом додаткових досліджень, доопрацювань, вдосконаленням технологічних процесів і под. Але коли необхідний рівень надійності досягнутий, проведені додаткові витрати, як правило, окупаються.

Надійність сучасних електронних апаратів значною мірою визначається надійністю складових її компонентів. Тому проблема забезпечення надійності набуває тим більшого значення, чим складнішою є апаратура. Виникає закономірна суперечність, що полягає в такому: інженерні завдання, що все більш ускладнюються, вимагають створення

більш складних технічних засобів, але останні принципово мають менший рівень надійності, ніж простіші. Створювати їх є сенс лише в тому випадку, якщо надійність достатньо висока. Звідси витікає, що в наш час подальший технічний прогрес неможливий без збільшення показників надійності технічних пристроїв.

Теорія надійності є фундаментальною науковою основою конструювання електронних апаратів. Вона призначена:

- встановлювати загальні закономірності, яких слід дотримуватися на всіх стадіях розроблення, виробництва та експлуатації виробів (починаючи з вибору принципу дії та початкових матеріалів і закінчуючи правилами списання технічних засобів через неможливість подальшої їх експлуатації), знаходити методи підвищення показників надійності при розробленні та виробництві виробів, а також способи максимального збереження надійності при їх експлуатації;

- визначати закономірності виникнення у виробах різного роду відмов під впливом внутрішніх і зовнішніх дій, розробляти методи проведення випробувань на надійність і методи оброблення та достовірного оцінювання отриманих при цьому результатів, знаходити ефективні способи контролю надійності, методи, що обґрунтовують послідовність і періодичність профілактичних робіт при експлуатації виробів, а також способи знаходження в них несправностей;

- створювати раціональні методики збирання, обліку та аналізу статистичних даних, що характеризують надійність, розробляти методи оцінювання надійності (включаючи питання прогнозування відмов).

Узагальнюючи викладене, можна зазначити, що теорія надійності вивчає природу і процеси виникнення відмов в технічних системах і методи боротьби з цими відмовами.

1.1 Терміни та визначення теорії надійності

Терміни в галузі надійності виробів є загальними для різних галузей промисловості та визначаються державним стандартом України – ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення». Терміни та визначення, встановлені в ДСТУ 2860-94, відповідають міжнародному стандарту ІЕС 50(191) та стандарту СНД ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения».

Роботоздатність (up state) – стан виробу, при якому він здатен виконувати задані функції з параметрами, встановленими вимогами технічної документації. Тут і в подальшому під технічною документацією розуміють стандарти, керівні технічні матеріали, технічні умови та іншу нормативно-технічну документацію. Під параметрами виробу розуміють його продуктивність, точність, рентабельність,

економічність і ін.

Відмова (failure) – випадкова подія, що полягає в порушенні роботоздатності виробу.

За характером появи розрізняють раптові і поступові відмови.

Раптовими (миттєвими) відмовами (sudden failure) називаються такі відмови, які виникають в результаті миттєвої зміни одного або декількох параметрів виробу.

Поступові відмови (gradual failure) – такі, при яких спостерігається поступова зміна одного або декількох параметрів виробу. Поступові відмови виникають внаслідок зношення або старіння.

Оскільки в практиці експлуатації електронних апаратів мають місце випадки, коли виникає відразу декілька відмов, причому деякі з них є прямим наслідком інших, то відмови розрізняють також за взаємозв'язком між собою.

Незалежна відмова (primary failure) – відмова, виникнення якої не пов'язано з іншими відмовами.

Залежна відмова (secondary failure) – відмова, що з'явилася внаслідок попередніх відмов (наприклад, через перевантаження).

За зовнішніми проявами відмови поділяються на *явні відмови (explicit failure)* і *неявні відмови (latent failure)*. Перші можуть бути виявлені візуально (наприклад, обрив провідників) або штатними методами та засобами діагностики, другі – лише за допомогою спеціальних вимірювань (наприклад, вихід з ладу інтегральної мікросхеми).

За характером усунення відмови поділяються на *стійкі* та *самоусувні*. Сстійкі відмови порівняно просто виявити, і вони, як правило, легко усуваються. Відмови, що самоусуваються, зникають в часі самі. Їх виявити і усунути буває дуже складно. Прикладом самоусувних відмов є *збій* або *переміжна відмова*.

Збоєм (interruption) називають одноразово виникаючу відмову, що самоусувається або усувається незначним втручанням оператора та не потребує проведення ремонту.

Переміжна відмова (intermittent failure) – багаторазово виникаюча самоусувна відмова одного й того ж характеру. Переміжна відмова може виникнути, наприклад, при поганому контакті в з'єднанні.

Відмова є одним з видів прояву *несправності (fault, faulty state)* виробу, під якою мають на увазі невідповідність виробу одному або декільком вимогам, що висуваються до нього технічними умовами (наприклад, відносно робочих характеристик, зовнішнього вигляду і т. ін.). Природно, що не всі несправності є відмовами. Ті з них, які не призводять в процесі експлуатації до відмови, називають *дефектами (defect)*.

Підкреслимо, що якщо виріб справний, то він обов'язково роботоздатний. Зворотнє твердження неправильне. Наприклад, електронний апарат може знаходитися в роботоздатному стані та продовжувати функціонувати при виході з ладу ряду індикаторних пристроїв на пульті його управління. Але вважати його в цьому випадку справним не можна.

Напрацювання (operating time) – тривалість або об'єм роботи виробу, що вимірюється часом, циклами, періодами і т.ін.

Напрацювання до відмови (operating time to failure) – напрацювання об'єкта від початку експлуатації до виникнення першої відмови.

Напрацювання між відмовами (operating time between failure) – напрацювання об'єкта від закінчення відновлення його роботоздатного стану після відмови до виникнення наступної відмови.

Середнє напрацювання до відмови (mean operating time to failure) – математичне сподівання напрацювання об'єкта до першої відмови.

Середнє напрацювання на відмову, напрацювання на відмову (mean operating time between failures) – відношення сумарного напрацювання відновлювального об'єкта до математичного сподівання числа його відмов протягом цього напрацювання.

Гарантійне напрацювання є напрацюванням виробу, до завершення якого виробник гарантує і забезпечує виконання певних вимог до виробу, за умови дотримання споживачем правил експлуатації, зокрема правил зберігання і транспортування. Термін гарантії встановлюється в технічній документації або договорах між виробником і замовником.

Безвідмовність (reliability, failure-free operation) називають властивість виробу зберігати свою роботоздатність протягом деякого напрацювання без вимушених перерв. Безвідмовність вимірюється в одиницях напрацювання. Вимушені перерви обумовлюються зовнішніми причинами: перервами в живленні, короткими замиканнями і т. ін., або планово-запобіжними заходами, пов'язаними з профілактичними і ремонтними роботами. Якщо виріб не призначений для ремонту (наприклад, апаратура, що розміщена на штучних супутниках Землі) або підлягає заміні після першої відмови (наприклад, літакова апаратура), або в ньому відмови взагалі недопустимі за умовами безпеки (наприклад, космічна апаратура), то як показники її безвідмовної роботи можуть служити *інтенсивність відмов* і *час безвідмовної роботи*.

Для ремонтованих виробів за аналогічні показники, як правило, вибирають *напрацювання на відмову, параметр потоку відмов* або *ймовірність безвідмовної роботи*.

Під *інтенсивністю відмов (failure rate)* розуміють ймовірність відмови неремontованого виробу за одиницю часу за умови, що відмова до

цього моменту часу не виникла.

Під *ймовірністю безвідмовної роботи (reliability function, survival function)* розуміють ймовірність того, що в заданому інтервалі часу або в межах заданого напрацювання не виникне відмова виробу.

Параметр потоку відмов (failure intensity) характеризується середньою кількістю відмов ремонтного виробу за одиницю часу.

Довговічність (durability, longevity) визначається властивістю виробу зберігати роботоздатність до граничного стану з необхідними перервами для профілактичного обслуговування та ремонтів. Показниками довговічності можуть служити, наприклад, ресурс і термін служби.

Граничний стан виробу (limiting state) – стан об'єкта, при якому його подальша експлуатація неможлива або недоцільна, або відновлення його роботоздатного стану неможливо або недоцільно.

Під *ресурсом (useful life, life)* розуміють величину сумарного напрацювання виробу від початку його експлуатації або відновлення після ремонту до граничного стану.

На практиці розрізняють поняття: *ресурс до першого ремонту, міжремонтний, призначений, гамма-процентний і середній. Ресурс виробу до першого ремонту* характеризується його напрацюванням, після якого необхідно виконати ремонт. *Міжремонтний ресурс* визначається напрацюванням виробу між його ремонтами.

Призначений ресурс (assigned operating time) характеризується напрацюванням, обумовленим технічною документацією на виріб. Він визначається напрацюванням виробу, досягши якого його експлуатація повинна бути припинена незалежно від стану виробу. Цей ресурс призначається, як правило, з міркувань безпеки та економічності.

Гамма-процентний ресурс (gamma-percentile life) – сумарне напрацювання, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану з ймовірністю γ , що виражається у відсотках. Наприклад, якщо $\gamma = 95\%$, то це означає, що не менше 95 (з 100) виробів з випущеної партії за час ресурсу не досягнуть граничного стану.

Середній ресурс (mean life, mean useful life) характеризує середнє напрацювання, отримане у випущеній партії виробів, тобто математичне сподівання ресурсу.

Термін служби (useful lifetime, lifetime) виробу обчислюється календарною тривалістю експлуатації виробу до моменту виникнення його граничного стану. Розрізняють *термін служби до першого капітального ремонту, між капітальними ремонтами, до списання та середній термін служби виробу*.

Ремонтпридатність (maintainability) визначається пристосованістю виробу до попередження, виявлення та усунення відмов і несправностей шляхом проведення технічного обслуговування та ремонтів. Під усуненням відмов мається на увазі відновлення роботоздатності.

Показниками ремонтпридатності служать: *середній час відновлення (mean restoration time)*, *ймовірність відновлення за даний час (probability of restoration, maintainability function)* і *середня трудомісткість відновлення (mean restoration man-hours, mean maintenance man-hours)*.

Середній час відновлення (mean restoration time) характеризується часом вимушеного нерегламентованого простою, викликаного виявленням та усуненням однієї відмови та дорівнює математичному сподіванню часу відновлення роботоздатного стану об'єкта після відмови.

Ймовірність відновлення (probability of restoration, maintainability function) – ймовірність того, що час відновлення роботоздатного стану об'єкта не перевищує заданий час.

Інтенсивність відновлення (instantaneous, restoration rate) – умовна щільність ймовірності відновлення роботоздатного стану об'єкта, що визначається для даного моменту часу при умові, що до цього моменту відновлення ще не було завершено.

Електронні апарати, що належать до класу, що не обслуговується, є *неремонтпридатними*. Їх називають також *невідновлювальними* або такими, що не ремонтуються. До останньої відносять таку апаратуру, яка не підлягає відновленню.

Однією з властивостей якості електронних апаратів є їх *збережність (storability)*, тобто властивість виробу підтримувати свої експлуатаційні показники протягом та після терміну зберігання та транспортування, встановленого технічною документацією. Кількісними показниками збережності можуть служити, наприклад, *середній термін збережності (mean storage time)* і *гамма-процентний термін збережності (gamma-percentile storage time)*.

Важливою властивістю, що характеризує якість ремонтпридатної апаратури, є готовність виробів до переходу від режиму відновлення до робочого режиму. Ця властивість оцінюється *коефіцієнтом готовності (instantaneous, availability function)*, під яким розуміють ймовірність того, що виріб буде роботоздатний в довільно вибраний момент часу в проміжках між виконаннями планового профілактичного обслуговування. Виріб з абсолютною готовністю є або абсолютно безвідмовним, або ідеально відновлюваним. На додаток до цього поняття введений термін *коефіцієнт технічного використання (steady state availability factor)*, який визначається як відношення напрацювання виробу в одиницях часу за деякий період експлуатації до суми цього напрацювання і часу всіх простоїв, викликаних профілактичним обслуговуванням і ремонтами за той же період експлуатації.

Показники надійності (reliability measure) кількісно характеризують один або декілька властивостей надійності об'єктів. Розрізняють *одиночні показники надійності (simple reliability measure)*, що характеризують одну властивість надійності об'єкта, та *комплексні*

показники надійності (*integrated reliability*), що характеризують декілька властивостей надійності об'єкта.

Розрахунковий показник надійності (*predicted reliability measure*) визначається розрахунковим методом.

Експериментальний показник надійності (*assessed reliability measure*) визначається за даними випробувань.

В таблиці 1.1 наведені властивості надійності об'єктів та їх кількісні показники.

Таблиця 1.1 – Властивості та показники надійності

Властивість	Показник надійності
1. Безвідмовність	1.1. Ймовірність безвідмовної роботи
	1.2. Гамма-процентне напрацювання до відмови
	1.3. Середнє напрацювання до відмови
	1.4. Середнє напрацювання на відмову
	1.5. Інтенсивність відмов
	1.6. Параметр потоку відмов
	1.7. Усереднений параметр потоку відмов
2. Ремонтопридатність	2.1. Ймовірність відновлення
	2.2. Гамма-процентний час відновлення
	2.3. Середній час відновлення
	2.4. Інтенсивність відновлення
	2.5. Середня трудомісткість відновлення
3. Довговічність	3.1. Середній ресурс
	3.2. Середній термін служби
	3.3. Гамма-процентний ресурс
	3.4. Гамма-процентний термін служби
4. Збережність	4.1. Середній термін збережності
	4.2. Гамма-процентний термін збережності
5. Комплексні показники	5.1. Коефіцієнт готовності
	5.2. Коефіцієнт оперативної готовності
	5.3. Коефіцієнт технічного використання
	5.4. Коефіцієнт збереження ефективності

1.2 Причини низької надійності ЕА

Зміна показників надійності виробів може відбутися через найрізноманітніші причини, наприклад: через неточність розрахунків характеристик виробу на етапі його проектування, через неоптимальність ухвалених конструкторських рішень на етапі конструювання, через порушення технології виробництва на етапі виготовлення, через недотримання норм експлуатації ЕА та цілого ряду випадкових причин, які наперед передбачити та оцінити вельми складно. Таким чином, *основні причини низької надійності пов'язані з недоліком наших знань, досвіду та часу, що відводиться на розроблення.*

При теоретичних дослідженнях і розрахунках ЕА ми не в змозі точно врахувати всі фізичні явища, що мають місце в апаратурі. Навіть при машинному її конструюванні ми можемо отримувати тільки квазіоптимальні конструкторські рішення, оскільки самі критерії оптимізації вибираються нами значною мірою суб'єктивно. Нарешті, обмежені можливості експерименту через нестачу точних відомостей про умови експлуатації ЕА ще більше ускладнюють наявні труднощі. Наприклад, створюючи апаратуру для космічних досліджень, ми до цих пір не маємо в своєму розпорядженні повних даних про властивості космічного середовища, а отже, не можемо врахувати в процесі створення виробу всі дестабілізуючі чинники, що впливають на його роботу.

Розробник апаратури узагальнює накопичений досвід, усуває в подальших конструкціях помилки, що мали місце раніше, але при цьому неминуче робить нові (знову ж таки через нестачу знань і досвіду). Проте з кожним разом їх стає все менше. Це природний процес розвитку техніки в умовах науково-технічного прогресу: від простого до складного, від менш досконалих і надійних виробів до якісніших. Розглядаючи *причини низької надійності ЕА* з інженерних позицій, можна стверджувати, що вони є в основному наслідком *конструкторських, технологічних і експлуатаційних помилок.*

До *конструкторських помилок* зазвичай відносять неоптимальний вибір принципової електричної схеми виробу з точки зору виконання покладених на неї функцій, комплектуючих елементів, вихідних матеріалів, які не повною мірою враховують фізико-хімічні властивості, електричні, теплові, електромагнітні та інші режими роботи елементів і апаратури в цілому. До них відносять також недостатність заходів щодо вибору допусків і стабілізації параметрів комплектуючих компонентів,

невдалу компоновку, неефективність вибирання засобів захисту ЕА від дестабілізуючих чинників і способів її резервування, а також прорахунки чисто технічного типу (помилки в кресленнях, технологічних картах, технічних умовах, інструкціях з експлуатації і т. ін.).

До *технологічних помилок* відносять: використання незадовільних за якістю комплектуючих виробів і матеріалів, недосконалість вибраних технологічних процесів і недотримання їх точного виконання, недостатню організацію та неефективність контролю якості, недосконалість технологічного устаткування, недостатній рівень автоматизації виробничих процесів, порушення санітарно-гігієнічних норм виробництва і под.

До *експлуатаційних помилок* відносять використання ЕА в невідповідних технічних умовах, режимах експлуатації: електричних і механічних перевантажень, в умовах дії підвищених (занижених) температур, атмосферного тиску, вібрацій, прискорень, радіації, вологості, агресивних середовищ, акустичних коливань і ін. До експлуатаційних помилок слід також віднести природні та неминучі чинники старіння, що характеризуються дрейфом параметрів ЕА та виходом їх за межі встановлених допусків, викликані фізико-хімічною деградацією матеріалів в часі, а також зносом ЕА внаслідок її старіння.

Правильно розуміти фізичну природу та сутність відмов дуже важливо для обґрунтованого оцінювання надійності технічних пристроїв. У практиці експлуатації останніх розрізняють три характерні типи відмов: *відмови припрацювання, раптові та відмови через старіння та зношення*. Вони розрізняються фізичною природою, способами попередження і усунення та виявляються в різні періоди експлуатації технічних пристроїв.

Відмови зручно характеризувати «кривою життя» виробу, яка ілюструє залежність інтенсивності відмов λ , що відбуваються в ньому, від часу t . Така ідеалізована крива для ЕА наведена на рис. 1.1. Вона характеризується трьома явно вираженими періодами: припрацювання 1, нормальної експлуатації 2 і зношення 3.

Відмови припрацювання спостерігаються в перший період ($0 - t_1$) експлуатації ЕА. Вони виникають, коли частина елементів, що входять до складу ЕА, є або бракованими, або мають низький рівень надійності. Вони можуть бути також наслідком неякісного виконання складальних операцій і помилок монтажу. Фізичний сенс відмов припрацювання може бути пояснений тим, що електричні та механічні навантаження, що прикладаються до компонентів ЕА в період припрацювання, перевершують їх електричну та механічну міцність. Оскільки тривалість періоду

припрацювання ЕА визначається в основному інтенсивністю відмов неякісних елементів, що входять до її складу, то тривалість безвідмовної роботи таких елементів зазвичай порівняно низька, тому виявити та замінити їх вдається за порівняно короткий час.

Залежно від призначення ЕА період припрацювання може складати від декількох годин до сотень годин. Чим більш важливим є виріб, тим більше тривалість цього періоду. Як правило, тривалість періоду припрацювання становить від десятих частин процента до декількох процентів терміну нормальної експлуатації виробу. З рис. 1.1 видно, що ділянка «кривої життя» ЕА на періоді припрацювання 1 є монотонно спадною функцією $\lambda(t)$, крутизна якої та протяжність в часі тим менша, чим досконалішою є конструкція, вища якість виготовлення та ретельніше дотримані режими припрацювання. Період припрацювання вважають завершеним, коли інтенсивність відмов ЕА наближається до мінімально досяжної (для даної конструкції) величини $\lambda_{\min}$.

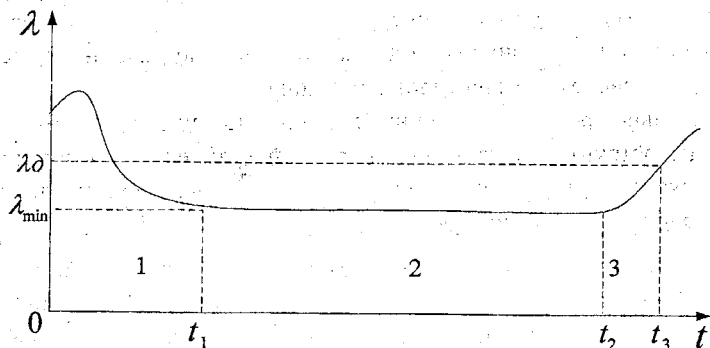


Рисунок 1.1 – Ідеалізована «крива життя» ЕА

Відмови припрацювання можуть бути наслідком технологічних (неякісне виконання складання) і експлуатаційних (порушення режимів припрацювання) помилок.

Раптові відмови спостерігаються в другий період ($t_1 - t_2$) експлуатації ЕА. Вони виникають несподівано внаслідок дій ряду випадкових чинників і попередити їх наближення практично не є можливим, адже до цього часу в ЕА залишаються тільки повноцінні компоненти, термін зношення та старіння яких ще не настав. Проте і такі відмови описуються певними закономірностями. Зокрема, частота їх

появи протягом достатнього великого проміжку часу однакова в однотипних класах ЕА.

Фізичний сенс раптових відмов може бути пояснений тим, що при швидкій кількісній зміні (зазвичай – різкому збільшенні) будь-якого параметра в компонентах ЕА відбуваються якісні зміни, в результаті яких вони втрачають повністю або частково свої властивості, необхідні для нормального функціонування апаратури. До раптових відмов ЕА відносять, наприклад, пробій діелектриків, короткі замикання провідників, несподівані механічні руйнування елементів конструкції і под.

Період нормальної експлуатації ЕА характеризується тим, що інтенсивність її відмов в інтервалі часу ($t_1 - t_2$) мінімальна і має майже сталі значення $\lambda_{\min} \approx \text{const}$. Величина $\lambda_{\min}$ тим менша, а інтервал ($t_1 - t_2$) тим більший, чим досконалішою є конструкція ЕА, вища якість її виготовлення та більш ретельно дотримані режими експлуатації. Період нормальної експлуатації ЕА загальнотехнічного призначення може продовжуватися десятки тисяч годин. Він може навіть перевищувати час морального старіння апаратури. Але слід мати на увазі і те, що час безвідмовної роботи будь-якого технічного пристрою не може перевищувати тривалості періоду його нормальної експлуатації.

Тривалість періоду 2 обмежують для ЕА зношенням і природним старінням її елементів. Відповідно до рис. 1.1 це відбувається в точці t_2 . Раптові відмови можуть бути наслідком конструкторських (наприклад, невдала компоновка), технологічних (наприклад, при використанні компонентів ЕА з прихованими і невиявленими в період припрацювання несправностями) і експлуатаційних (наприклад, через перенавантаження) помилок.

Відмови в результаті зношення та відмови, викликані старінням матеріалів, спостерігаються в третій період ($t_2 - t_3$) експлуатації ЕА. Вони в більшості випадків є закономірним наслідком поступового зношення та природного старіння використаних матеріалів і елементів. Залежать вони, головним чином, від тривалості експлуатації та «віку» ЕА. Середній термін служби компонента до зносу – величина більш визначена, ніж час виникнення відмов припрацювання та раптових відмов. Їх появу можна передбачати на базі даних, отриманих в результаті випробувань конкретної апаратури.

Фізичний сенс відмов через зношення може бути пояснений тим, що в результаті поступової та порівняно повільної кількісної зміни деякого параметра компонента ЕА цей параметр виходить за межі встановленого

допуску, внаслідок чого компонент повністю або частково втрачає свої властивості, необхідні для нормального функціонування апаратури. При зносі відбувається часткове руйнування матеріалів, при старінні – зміна їх внутрішніх фізико-хімічних властивостей. Останні носять, як правило, незворотний характер.

До відмов в результаті зносу відносять втрату чутливості, точності, механічний знос деталей і ін. Їх поява пов'язана з різким зростанням λ . Як видно з рис. 1.1, ділянка ($t_2 - t_3$) «кривої життя» ЕА, що відповідає періоду зносу, являє собою монотонно зростаючу функцію, крутизна якої тим менша (а протяжність в часі тим більша), ніж більш якісніші матеріали та комплектуючі використані в апаратурі. Завершується період зносу 3 (а разом з ним припиняється і експлуатація апаратури), коли інтенсивність відмов ЕА наблизиться до максимально допустимої для даної конструкції величини λ_0 .

На закінчення відзначимо, що всі перераховані види відмов носять випадковий характер.

1.3 Методи забезпечення надійності

Абсолютної надійності технічних пристроїв досягти принципово неможливо, але максимально підвищити показники їх надійності (відповідно до рівня розвитку техніки) – реально, і це є найважливішим науковим і технічним завданням. Підвищення рівня надійності ЕА досягається перш за все усуненням причин, що викликають в ній відмови, тобто зведенням до мінімуму (або повній ліквідації, якщо це можливо) конструкторських, технологічних і експлуатаційних помилок. Вплив на показники надійності ЕА вказаних видів помилок нерівнозначний і для їх зниження є нерівні можливості.

Методи забезпечення надійності при конструюванні. Принципові основи надійності ЕА закладаються на етапі її конструювання. Цей етап має визначальне значення для якості майбутнього виробу. Тільки конструкція визначає «фундамент надійності». Поліпшити показники надійності ЕА, закладені в конструкції, неможливо ні в процесі її виготовлення, ні в процесі експлуатації. Тому на етапі конструювання необхідно ретельно контролювати надійність створюваного виробу.

Всебічні випробування дослідних зразків і їх експериментальне доопрацювання за результатами цих випробувань є найважливішими і найбільш відповідальними етапами конструювання. Вони зумовлюють

надійність виробів в серійному виробництві. До виконання робіт цього етапу слід відноситися особливо ретельно і об'єктивно, оскільки навіть незначні помилки, допущені розробником, усунути при серійному виробництві ЕА надзвичайно складно. До того ж це приводить до великих виробничих матеріальних витрат.

Важливим чинником в підвищенні надійності ЕА є технологічність її конструкції. Мало створити навіть найдосконалішу конструкцію, необхідно її спроектувати так, щоб вона була пристосована до серійного випуску на серійних заводах з використанням типових технологічних процесів і стандартного устаткування. Добре освоєні технологічні процеси та відлагоджене виробництво гарантують випуск виробів високої якості.

Збільшенню надійності ЕА сприяють її уніфікація та стандартизація. Вони є одним з найважливіших показників технічного рівня ЕА. Стандартизація ґрунтується на об'єднаних результатах науки, техніки та практичного досвіду. Вона визначає основу не тільки сьогодення, але і майбутнього розвитку відповідно до технічного прогресу. Стандартизація є критерієм якості промислових виробів.

Надійність ЕА істотно підвищується, якщо при її конструюванні вдається дотримати принципи рівномірності складових компонентів. Очевидно, що в ідеальному випадку добре мати таку конструкцію, в якій всі компоненти мали б не тільки великий, але і однаковий термін служби. Тоді після його закінчення ЕА просто треба було б замінити новою і в ідеальному випадку взагалі не ремонтувати. Але в більшості практичних випадках це технічно недосяжно. Більш того, це не завжди і економічно доцільно, якщо вартість елементів і вузлів конструкції істотно розрізняється.

На практиці роблять так. В процесі конструювання ЕА намагаються застосувати такі елементи і вузли, термін служби яких був би не менший терміну служби ЕА.

Важливим чинником підвищення надійності ЕА на етапі конструювання є рівномірний розподіл навантажень на складові компоненти, оскільки інтенсивність відмов останніх багато в чому залежить від умов їх роботи.

Навантаження, що діють на ЕА, можна умовно розділити на дві групи: перші приводять до поступових відмов, другі — до раптових. Навантаження, що викликають поступові відмови, обумовленні в основному впливом зовнішнього середовища — кліматичними чинниками, природною та штучною радіацією і т.ін. При їх тривалій дії на ЕА

незалежно від того, працює пристрій чи знаходиться в неробочому стані, в його елементах і вузлах відбуваються незворотні зміни. Так, опір резисторів може відхилитися від своїх номіналів на 60% і більше, ємність конденсаторів – на 80%, коефіцієнт передачі струму бази та зворотний струм колектора транзисторів – на 100%. Виключити вплив таких дій при конструюванні можна тільки частково (наприклад, посиленою герметизацією, встановленням спеціальних екранів і т. ін.).

Навантаження, що викликають раптові відмови, виявляються основним чином при роботі ЕА. До навантажень відносяться електричні, механічні, теплові, магнітні та інші перевантаження; вони зменшують міцність компонентів ЕА та збільшують їх зношення. Зменшення шкідливого впливу навантажень другої групи залежить перш за все від розробника, оскільки їх значною мірою можна попереджувати. Ефект від цього виходить значним. Наприклад, зниження теплових навантажень всього на 20% збільшує надійність ЕА в середньому в 2 – 2,5 раза.

Простота конструкторських рішень – запорука надійності. Тому кожний раз, коли це можливо, слід віддавати перевагу схемам, що містять менше число елементів, а самі схеми проектувати так, щоб чутливість їх вихідних параметрів до зміни параметрів комплектуючих елементів була найменшою. Останнє сприяє зниженню поступових відмов в ЕА.

До конструкторських прийомів підвищення надійності ЕА відносять також вибір найбільш надійних схемних рішень як для окремих блоків, так і для апаратури в цілому, раціональний вибір класів точності, а також типів і режимів роботи елементів. Вибір надійного схемного рішення розуміється як використання найбільш надійної типової схеми з ряду відомих і аналогічних за призначенням. Раціональний вибір класів точності і режимів роботи комплектуючих елементів припускає вибір таких режимів, які забезпечують максимальну надійність виробів при експлуатації.

Важливим чинником в підвищенні надійності ЕА на етапі конструювання є її мікромініатюризація. Створення ЕА із застосуванням інтегральних мікросхем (ІМС) є перспективним напрямом в конструюванні, що забезпечує ряд переваг, і їх використання дозволяє створювати конструкції ЕА, які раніше практично не могли бути створені на базі дискретних електронних елементів через порівняно низький рівень надійності останніх. Сучасні ІМС характеризуються інтенсивністю відмов приблизно на три порядки нижчою, ніж дискретні напівпровідникові прилади. Конструкції, створені на ІМС, відрізняє мінімум зовнішніх з'єднань, які є основною причиною ненадійності електронної апаратури.

Сучасні методи герметизації і захисту ІМС від зовнішніх дестабілізуючих чинників дозволяють використовувати ЕА, створені на їх основі, в пайважчих кліматичних умовах, при різко виражених ударних, вібраційних, теплових, радіаційних і інших навантаженнях. Апаратура стає компактною, витрата матеріалів на її виготовлення скорочується в сотні разів, з'являється можливість в обмежених об'ємах розміщувати складні комплекси порівняно невеликої маси, швидкодія ЕА різко збільшується, а енергоспоживання зменшується.

Якщо конструктор використав всі перераховані методи збільшення надійності, але все-таки в проектованому пристрої йому не вдалося отримати заданий технічним завданням рівень надійності, то він вимушений піти на деяку структурну надмірність в пристрої, тобто *застосувати резервування*. Резервування – вельми складне і багатогранне поняття, і ми його детально розглянемо далі.

Методи забезпечення надійності при виробництві. На цьому етапі можна в кращому разі лише зберегти надійність, закладену на етапі проектування. І це є основною задачею технолога. Як би ретельно не був проведений процес конструювання, які б високі показники надійності не були отримані при випробуванні дослідних зразків виробів, виробничі дефекти можуть різко понизити якість технічних пристроїв в серійному виробництві. *Тому, щоб зберегти високу надійність виробів в серійному виробництві, необхідна висока культура виробництва.* Під культурою виробництва розуміють не тільки рівень досконалості технологічних процесів і їх практичну строгу реалізацію, високий рівень автоматизації виробництва, ритмічність роботи підприємства, ефективність системи технічного контролю, але і дотримання чистоти та необхідного рівня тиші в робочих приміщеннях, дотримання ергономічних норм і норм технічної естетики, тобто всього того, що сприяє максимальній зручності людини, зайнятої у виробничому процесі.

При виробництві ЕА всі перераховані вимоги дуже важливі. Так, в мікроелектронному виробництві чистота стає технологічною необхідністю, ряд напівпровідникових пристроїв (ІМС) виготовляють в спеціально обладнаних гермозонах, в яких крім ідеальної чистоти підтримуються на певному рівні температура, вологість, тиск. Але все ж таки культура виробництва – це перш за все його технічний рівень, і *чималу роль при цьому відіграють використовувані методи контролю.*

Сучасна ЕА включає в свій склад тисячі комплектуючих виробів, що виготовляються переважно на спеціальних підприємствах. Якість цих

виробів значною мірою визначає надійність ЕА. Тому технічний контроль є невід'ємною частиною виробничого процесу будь-якого виробу. Але часто контроль якості комплектуючих виробів здійснюють на підприємстві, що випускає апаратуру. Це відбувається через те, що завод-виробник комплектуючих виробів контролює якість продукції, що випускається, без урахування специфічних вимог, що висуваються до апаратури. Ось чому *вхідний контроль на сучасному етапі розвитку інтегральної електроніки технічно виправданий і доцільний.*

Розрізняють суцільний (100%-овий) контроль і контроль вибірковий. При суцільному автоматизованому контролі автоматичні прилади реагують на кожне порушення параметра виробу, що перевіряється. Якщо параметр, що перевіряється, виходить за поле встановленого для нього допуску, то технологічний процес виробництва виробу автоматично зупиняється. Таким чином, цей метод контролю гарантує ліпше розсортування виробів на придатні та браковані, але не дає яких-небудь відомостей про причини виникнення браку. Суцільний автоматизований контроль дозволяє оцінити якість вже завершеного виробничого процесу. Він в змозі фіксувати брак, але не попереджати його. Крім того, він вимагає великих витрат часу і матеріальних засобів.

Вибірковий контроль базується на законах математичної статистики. Тому його називають статистичним. Його сутність полягає в такому. З деякої партії виготовлених виробів (генеральній сукупності) робиться вибірка. Вироби, які потрапили у вибірку, ретельно досліджуються за контрольованим параметром. Потім результати дослідження узагальнюються на всю генеральну сукупність.

Практично використовують такий метод. Усередині поля допуску контрольованої ознаки встановлюють деякі попереджувальні межі. Зміну параметра фіксують щодо цих меж. Якщо контрольований параметр виходить за межі попереджувальних меж (але не виходить за поле допуску), то це свідчить про порушення технологічного процесу. Вироби як і раніше виходять ще придатними, але вже є інформація про появу тенденцій до погіршення якості продукції. Тому технологічний процес необхідно підкорегувати. Часто це можна здійснити, не перериваючи процесу. Тому такий активний контроль дозволяє впливати на хід виробничого процесу, а отже, і на якість продукції. Він дозволяє також передбачити якість виробів у всій партії в найближчому майбутньому.

Здійснюючи припрацювання, треба намагатись, щоб умови припрацювання максимально відображали режими роботи виробу в умовах

реальної експлуатації, включаючи режими допустимих перевантажень. Слід з великою обережністю відноситися до інтенсифікації періоду припрацювання, оскільки невинуватені перевантаження можуть привести до значного зниження ресурсу ЕА та передчасній появи відмов в період її нормальної експлуатації.

Методи забезпечення надійності при експлуатації. Після того, як виріб надійшов до споживача, починається період його промислової експлуатації. Часто витрати на експлуатацію, особливо якщо виріб розрахований на великий термін служби, набагато перевищують витрати на його розроблення і виготовлення. Величина цих витрат залежить перш за все від надійності виробу. Чим вища надійність, тим більше у виробу напрацювання, тим рідше з'являються в ньому відмови, більші міжремонтні періоди, в результаті чого дешевше обходиться його експлуатація. Так само, як на технологічному етапі, підвищити надійність ЕА в період експлуатації не можна, а підтримувати її на рівні, який гарантується виробництвом, необхідно.

Розрізняють *суб'єктивні і об'єктивні причини*, які можуть понизити надійність виробів в період експлуатації. Перші пов'язані в основному з дією кліматичних факторів, дією агресивних середовищ, електричних і магнітних полів, вібраціями і ударами; другі – з недотриманням правил експлуатації ЕОА, недостатньою кваліфікацією обслуговуючого персоналу і низьким рівнем технічної експлуатації документації (описами, інструкціями і т. ін.). Проте завжди є можливість тією чи іншою мірою понизити несприятливу дію вказаних причин.

Дійсно, якщо експлуатаційники будуть добре уявляти, як впливають на надійність апаратури зовнішні фактори, то завжди можна прийняти необхідні заходи до усунення або зменшення їх шкідливої дії. Для цього необхідно *добре знати не тільки правила експлуатації ЕА, але і умови, в яких вона працює, підвищувати свою кваліфікацію, бережно і відповідально ставитися до експлуатаційного устаткування, що є службовим обов'язком. Добре продумана організація профілактичних і ремонтних робіт, сучасне і ретельне їх виконання є найважливішим чинником, що дозволяє підтримувати показники надійності технічних виробів на необхідному рівні в період їх експлуатації.*

Профілактика проводиться з метою зменшення параметра потоку (інтенсивності) відмов. Розміняють три принципи призначення періодів експлуатації між профілактиками (*періодів профілактики*): *регламентний, календарний, комбінований. При регламентному принципі профілактику*

проводять при досягненні певного напрацювання. Такий принцип використовуються для систем, що працюють у важких умовах (електронні системи літаків, корабельне обладнання). Регламентний принцип може бути використаний також для систем, що працюють тривалий час без перерв.

В тих випадках, коли виріб зберігається (системи не функціонують) або коли інтенсивність зношення залежить більшою мірою від тривалості зберігання (залежність від напрацювання незначна), профілактику проводять за *календарними* періодами.

Оскільки у деяких систем зношення відбувається як при роботі, так і при зберіганні, то їх профілактика проводиться за *комбінованим* принципом.

Регламентну, календарну та комбіновану профілактики проводять за двома режимами: *плановому* та *змішаному*. *Плановий режим* полягає в проведенні профілактики з постійним періодом незалежно від кількості відмов. Прикладами планової профілактики є виконання регламентних робіт, профілактичних і капітальних ремонтів авіаційної техніки.

Змішаний режим полягає в поєднанні планової та непланової профілактики. Непланова профілактика проводиться після відмови, при цьому окрім ремонту виконується перелік профілактичних робіт.

Профілактичне обслуговування може містити роботи: регулювання параметрів, усунення дефектів, контроль та відновлення роботоздатності. Перша з перерахованих робіт має за мету попередити вихід певного параметра за межу допуску. При визначенні періоду профілактики знаходять значення часу t_n масових виходів певного параметра за межу допуску. Періодичність часу t_n регулювання визначають виходячи з умови $t_n \leq t_n$. Виникнення дефекту не викликає раптового виходу з ладу пристрою, але в ряді випадків сигналізує про наближення до відмови. Усуненням виявлених при профілактиці дефектів та їх причин попереджається поява можливих відмов.

Для розрахунку періодичності профілактики необхідно знати, як профілактика впливає на надійність. Через затрати часу та засобів на виконання профілактичного обслуговування знижується ефективність використання виробів. В зв'язку з цим часто оцінюється вплив профілактики не лише на надійність, але і на затрати.

Підсумовуючи вищевикладене, можна сказати: щоб технічна система була надійною, необхідно закласти високий рівень її надійності при

розробленні, максимально зберегти її при виробництві та підтримувати в період експлуатації.

Зворотний зв'язок. Зворотний зв'язок між виробником і користувачем апаратури необхідний для того, щоб виріб до початку морального старіння набув необхідної якості. Головна роль в здійсненні цього зв'язку належить заводу-виробнику, який повинен ретельно аналізувати всю інформацію, що надходить, про експлуатацію випущених ним пристроїв (про кількість, періодичність, причини і обставини виникнення відмов і т. ін.), а також систематизувати пропозиції споживачів, направлені на поліпшення якості продукції, що випускається. Без добре організованих зворотних зв'язків між користувачами і виробниками виробів неможливо добитися підвищення їх надійності.

Інформація про надійність повинна задовольняти такі основні вимоги: достовірність, повнота та безперервність надходження. Достовірність є визначальною ознакою цінності інформації, бо на її основі ухвалюються рішення, що сприяють поліпшенню якості продукції. Тому вихідні дані повинні бути максимально точними. Повнота інформації повинна бути оптимальною, тобто бути достатньою для прийняття обґрунтованих рішень і не бути надмірною. Надмірність інформації часто знижує ефективність її використання. Під безперервністю інформації мається на увазі її надходження за час всього періоду «життя» виробу (починаючи з моменту випробування дослідного зразка та закінчуючи завершенням експлуатації серійних зразків в зв'язку з їх списанням).

Замовникові апаратури необхідні усереднені дані про відмови за видами виробів, споживачеві достатньо знати гарантований час безвідмовної роботи виробу і в скільки обійдеться ремонт останнього. Отже, інформація про надійність допомагає виробникові чітко уявити, що він випускає, а споживачу – оцінити, що він хоче придбати.

Інформаційні методи забезпечення надійності. Основне застосування інформаційні методи знайшли в сучасній цифровій ЕА. Реалізуються вони у вигляді *корегуючих кодів*. Призначення цих кодів полягає в тому, щоб виявляти та виправляти помилки в ЕА без переривання їх роботи. Корегуючі коди передбачають введення деякої *надлишковості*. Розрізняють *часову* та *просторову надлишковості*. *Часова надлишковість* характеризується неодноразовим вирішенням завдання. Отримані результати порівнюються, і якщо вони збігаються, то робиться висновок, що задача вирішена правильно. *Часова надмірність* вводиться програмним шляхом. *Просторова надлишковість* характеризується

подовженням кодів чисел, в які вводять додаткові контрольні розряди таким чином, що коригуючі коди можуть виявляти та усувати помилки.

1.4 Закони розподілу відмов і їх основні характеристики

Надійність ЕА не може бути виміряна безпосередньо як будь-яка інша фізична величина. Вона може бути тільки кількісно оцінена або передбачена. Для оцінювання основних показників надійності використовують математичний апарат теорії ймовірності. Показники надійності ремонтпридатної та неремонтпридатної апаратури в загальному випадку не збігаються і мають різний математичний опис. Але в окремому випадку вони можуть і збігатися, якщо, наприклад, оцінювати надійність ремонтпридатного виробу до першої відмови.

Для кількісного оцінювання показників надійності необхідний статистичний матеріал, що одержується в результаті випробувань. Випробування можуть бути організовані за допомогою спостережень за поведінкою багатьох подібних виробів (з однієї партії) в один і той же момент часу або за допомогою тривалих спостережень за поведінкою одного виробу (з тієї ж партії) в різні моменти часу. Отримані таким чином дані відповідно до ергодичної гіпотези мають одні і ті ж статистичні властивості.

При оцінюванні надійності виробів основними об'єктами дослідження є випадкові величини та випадкові події. *Випадковою величиною* називають таку, яка в результаті досліду може приймати те або інше, але наперед невідоме значення. Випадкові величини можуть бути дискретними або неперервними. Наприклад, в результаті багатократного вимірювання одного і того ж фізичного параметра технічного пристрою отриманий ряд дискретних випадкових величин. Час роботи виробу до відмови або час, необхідний на відновлення його роботоздатності, є безперервною випадковою величиною.

Ймовірність всіх значень, які може приймати випадкова величина, називають *розподілом ймовірності*. У розподілі ймовірностей випадкових величин спостерігаються певні закономірності, що називаються *законами розподілу випадкових величин*.

Випадковою подією називають таку подію, яка в результаті досліду може відбутися або не відбутися. Наприклад, відмова, відновлення, коротке замикання електричних кіл, пробій діелектриків є випадкові події. Випадкові події, що відбуваються в часі і утворюють деяку послідовність,

називають *поток*ом подій (наприклад, відмови відновлюваного пристрою). Перехід виробу з одного стану в інший в теорії надійності розглядають як випадковий процес (наприклад, перехід від стану повної або частинної відмови виробу до режиму його нормального функціонування).

Законом розподілу випадкової величини називають співвідношення, що встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини $X = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_k)$ і відповідними ймовірностями $P = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_k)$ її появи. Закон розподілу X може бути заданий матрицею (таблицею), рядом розподілу X , багатокутником розподілу, графічною залежністю $X(p)$.

Випадкові величини підпорядковуються тому або іншому закону розподілу. Неперервні і дискретні випадкові величини X характеризуються ймовірністю того, що вони менші деякої поточної змінної x . Ця обставина виражається *інтегральним законом розподілу* або *функцією розподілу* $F(x)$ випадкової величини X :

$$F(x) = P(X < x).$$

Диференціальний закон розподілу або *щільність розподілу* $f(x)$ випадкової величини X є похідною від функції розподілу

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x).$$

Найважливішими характеристиками законів розподілу випадкових величин X є математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення і коефіцієнт варіації.

Математичним сподіванням $M(X)$ випадкової величини X називають суму добутків всіх можливих значень $X = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_k)$ на ймовірність появи цих значень $P = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_k)$.

$$M(x) = \sum_{i=1}^k x_i p_i.$$

Математичне сподівання – це середнє значення випадкової величини в генеральній сукупності; воно характеризує центр розподілу X .

Дисперсією $D(X)$ випадкової величини X називають математичне сподівання квадрата відповідної центрованої величини $\overset{0}{X}$

$$D(X) = M(\overset{0}{X}^2),$$

де центрована випадкова величина $\overset{0}{X}$, що відповідає X , є відхиленням випадкової величини X від її математичного сподівання $M(X)$, тобто

$$\overset{0}{X} = X - M(X).$$

Дисперсія – це середнє значення квадрата відхилення випадкової величини від її математичного сподівання. Вона характеризує розсіювання X . Чим більше розсіюються окремі значення випадкової величини, тим більша буде дисперсія. Дисперсія має розмірність квадрата випадкової величини. Це не цілком зручно і природніше користуватися натуральною розмірністю. Тому як одна з характеристик законів розподілу випадкових величин набуло поширення поняття середньоквадратичного відхилення $\sigma(X)$.

Середньоквадратичним відхиленням $\sigma(X)$ (або, інакше, стандартом) випадкової величини X називають вираз $\sigma(X) = \sqrt{D(X)}$. Воно так само, як і $D(X)$, характеризує розсіювання випадкової величини X .

Відношення $\sigma(X)$ і $M(x)$ називають коефіцієнтом варіації

$$V(X) = \sigma(X)/M(X),$$

який обчислюється у відсотках і характеризує розсіювання випадкової величини X у відносних одиницях.

У теорії надійності найбільшого поширення набули такі закони розподілу випадкових величин: біноміальний закон і розподіл Пуассона – для дискретних випадкових величин, експоненціальний закон, закон Вейбулла, нормальний і логарифмічно нормальний закони, розподіл Релея, закон Ерланга – для неперервних випадкових величин.

Біноміальний закон розподілу характеризує ймовірність появи події n в m незалежних дослідах. Якщо ймовірність появи події n в одному досліді дорівнює p (відповідно ймовірність його не появи дорівнює $1 - p = q$), а число незалежних випробувань дорівнює m , то ймовірність появи події n в серії m дослідів P_m^n може бути подана математичною інтерпретацією біноміального закону розподілу таким чином:

$$P_m^n = C_m^n p^n (1-p)^{m-n},$$

де число комбінацій m по n дорівнює

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

При цьому слід мати на увазі, що C_m^n є цілим додатним числом. Очевидно, що ймовірність p є членом розкладання за біномом Ньютона. Звідси впливає і назва – біноміальний розподіл. Основні характеристики біноміального закону розподілу такі:

- математичне сподівання

$$M(n) = pm;$$

- дисперсія

$$\sigma^2(n) = M(n)q;$$

- середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(n) = \sqrt{M(n)q};$$

- коефіцієнт варіації

$$V(n) = \sqrt{M(n)q / pm}.$$

На рис. 1.2. наведений графік та основні параметри, що ілюструють біноміальний закон розподілу.

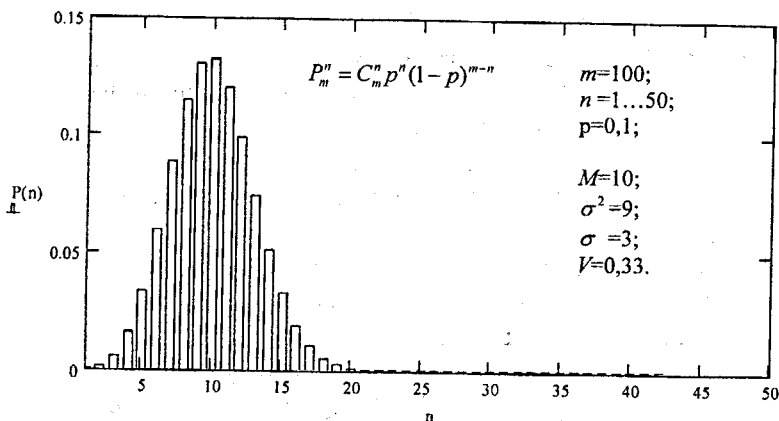


Рисунок 1.2 – Біноміальний закон розподілу

Біноміальний закон розподілу застосовують, як правило, при статистичному контролі якості, коли є дуже мало відомостей про стан виробів, а їх необхідно класифікувати на придатні та браковані.

Закон Пуассона має місце в тих випадках, коли на деякому інтервалі часу τ випадкова подія n з'являється велике число раз, але з малою ймовірністю $P_n(\tau)$. Ймовірність виникнення n на інтервалі τ є математичним виразом розподілу Пуассона, який має такий вигляд:

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda \tau)^n}{n!} \exp(-\lambda \tau),$$

де λ – інтенсивність випадкової події, деяка додатна величина, що називається параметром закону Пуассона.

Відмітимо, що в наведеній формулі величина n може приймати цілі значення. Основні характеристики розподілу Пуассона такі:

математичне сподівання

$$M(n) = \lambda \tau;$$

дисперсія

$$\sigma^2(n) = \lambda \tau;$$

середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(n) = \sqrt{\lambda \tau};$$

коефіцієнт варіації

$$V(n) = 1/\sqrt{\lambda \tau}.$$

Характерною ознакою розподілу Пуассона є рівність математичного сподівання та дисперсії $M(n) = \sigma^2(n)$.

Розподіл Пуассона виходить як граничний випадок біноміального розподілу, коли ймовірність p прямує до нуля (відповідно $q \approx 1 - p \rightarrow 1$). Такий збіг можна вважати практично прийнятним, починаючи з $p < 0,1$. Але на відміну від біноміального розподілу, при якому величина n обмежена ($n \leq m$), в розподілі Пуассона n може приймати значення $0 \leq n \leq \infty$.

Приклад графіка та основних параметрів для розподілу Пуассона наведені на рис. 1.3.

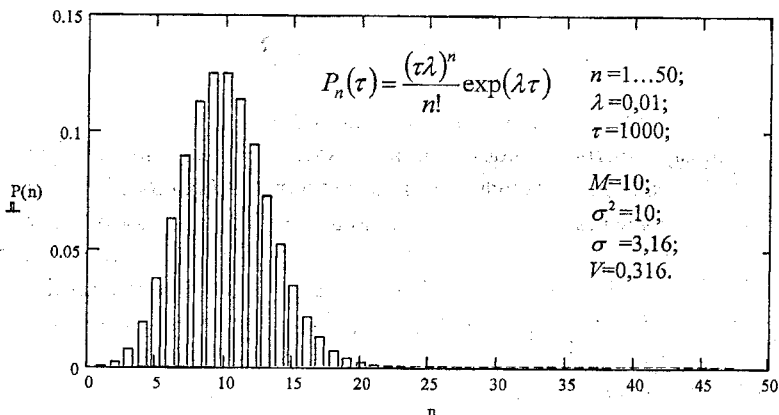


Рисунок 1.3 – Закон розподілу Пуассона

Біноміальний розподіл застосовують в принципі для будь-якого p , а розподіл Пуассона – тільки для малого p . Тому в розрахунковому сенсі закон Пуассона вужчий біноміального розподілу, але у фізичному сенсі він ширший, оскільки існує ряд процесів, в яких незалежно від значення ймовірності p розподіл Пуассона можна застосовувати, а біноміальний –

ні. Так, в ремонтпридатних виробих після закінчення періоду їх припрацювання випадкове число відмов в процесі експлуатації розподілене за законом Пуассона. Розподіл Пуассона зазвичай застосовують для визначення ймовірності появи заданого числа подій на заданому інтервалі часу за умови незалежності та несумісності подій.

Розглянемо тепер закони розподілу неперервних випадкових величин. Для їх характеристики будемо додатково користуватися поняттями щільності розподілу $f(x)$ та функції розподілу $F(x)$ випадкової величини X .

Експоненціальний закон розподілу. Розподіл випадкової величини X називають експоненціальним, якщо щільність розподілу $f(x)$ має вигляд

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x), \quad (1.1)$$

де λ – інтенсивність випадкової події – стала величина ($\lambda = \text{const}$).

Функція розподілу відповідно запишеться

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = 1 - \exp(-\lambda x). \quad (1.2)$$

Характерною ознакою цього розподілу є сталість значення λ . Основні характеристики експоненціального закону такі:

- математичне сподівання

$$M(X) = 1/\lambda;$$

- дисперсія

$$\sigma^2(X) = 1/\lambda^2;$$

- середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(X) = 1/\lambda;$$

- коефіцієнт варіації

$$V(X) = 1.$$

Приклади графіків $f(x)$, $F(x)$ для експоненціального закону розподілу наведені на рис. 1.4.

Експоненціальний закон розподілу (показниковий розподіл) найбільш часто використовують на практиці. Його використовують при оцінюванні надійності складних виробів, відмови яких обумовлені великою кількістю комплектуючих елементів. Його застосовують при дослідженні часу напрацювання на відмову виробів, що не ремонтуються, і для визначення часу між послідовними відмовами в ремонтпридатних виробих.

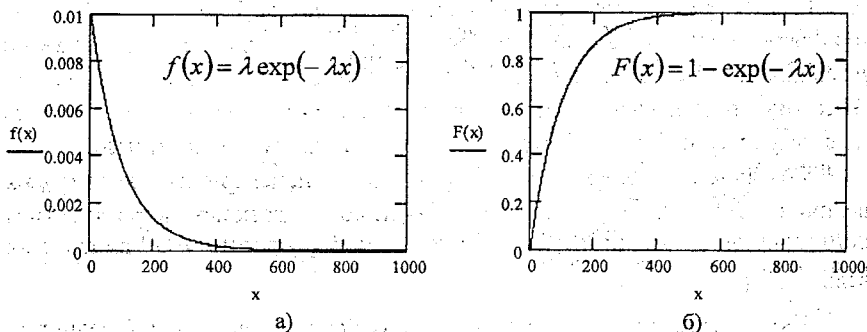


Рисунок 1.4 – Експоненціальний закон розподілу:

а) графік щільності розподілу $f(x)$; б) графік функції розподілу $F(x)$;

$$\lambda = 0,01; M = 100, \sigma^2 = 1000, \sigma = 100, V = 1.$$

Закон Вейбулла характеризує розподіл неперервної, випадкової величини X , яка може приймати тільки додатні значення ($X \geq 0$). Щільність розподілу $f(x)$ у законі Вейбулла має такий вигляд

$$f(x) = \frac{m}{t_0} x^{m-1} \exp\left(\frac{-x^m}{t_0}\right), \quad (1.3)$$

де m і t_0 – параметри розподілу закону Вейбулла – сталі величини ($m = \text{const}$, $t_0 = \text{const}$); для кожного класу виробів вони мають певні значення.

Функція розподілу має вигляд

$$F(x) = 1 - \exp\left(\frac{-x^m}{t_0}\right).$$

Основні характеристики закону Вейбулла такі:

- математичне сподівання

$$M(X) = b_m t_0^{1/m};$$

- дисперсія

$$\sigma^2(X) = C_m^2 (t_0^{1/m})^2;$$

середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(X) = C_m t_0^{1/m};$$

- коефіцієнт варіації

$$V(X) = \frac{C_m}{b_m},$$

де величини b_m і C_m відповідно дорівнюють

$$b_m = \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right);$$

$$C_m = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \left[\Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right)\right]^2};$$

Γ – гамма-функція визначається виразом: $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$.

Приклади графіків $f(x)$, $F(x)$ для закону розподілу Вейбулла наведені на рис. 1.5.

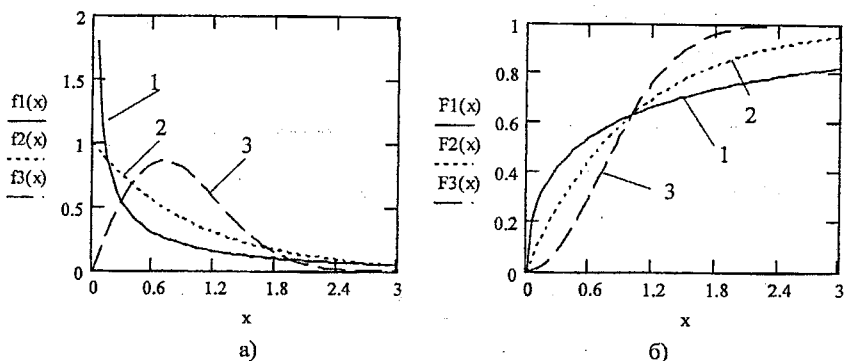


Рисунок 1.5 – Закон розподілу Вейбулла:

а) графік щільності розподілу $f(x)$; б) графік функції розподілу $F(x)$;

$t_0 = 1$; 1) $m = 0,5$; 2) $m = 1$; 3) $m = 2$.

При $m = 1$ розподіл Вейбулла перетворюється на експоненціальний. Розподіл Вейбулла використовують, як правило, при оцінюванні надійності виробів в період їх припрацювання (при $m < 1$), в період зношення та старіння (при $m > 1$), а також при визначенні надійності електромеханічних елементів.

Загальний нормальний розподіл неперервної випадкової величини X характеризується тим, що X може при цьому набувати будь-яких значень $(-\infty \leq X \leq +\infty)$.

Щільність розподілу має вигляд

$$f(x) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2b^2}\right],$$

де a і b – сталі величини, названі параметрами закону нормального

розподілу, причому b – величина додатна, a може бути додатною, від’ємною або рівною нулю.

Основні характеристики загального нормального розподілу такі:

- математичне сподівання

$$M(X) = a;$$

- дисперсія

$$\sigma^2(X) = b^2;$$

- середньоквадратичне відхилення

$$\sigma(X) = b;$$

- коефіцієнт варіації

$$V(X) = b/a.$$

Приклади графіків $f(x)$, $F(x)$ для нормального закону розподілу наведені на рис. 1.6.

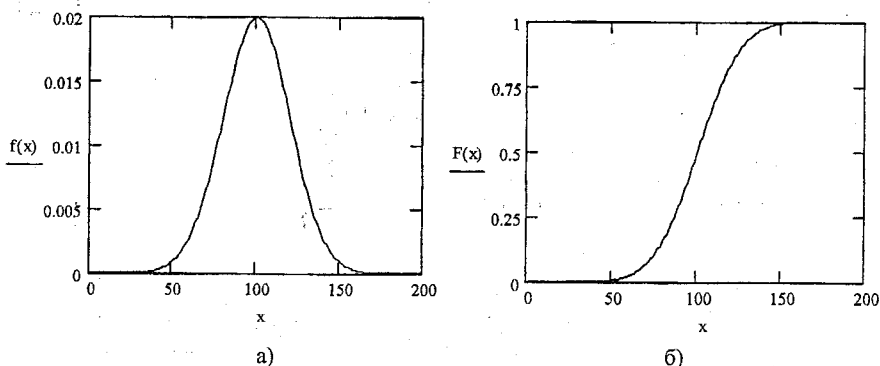


Рисунок 1.6 – Нормальний закон розподілу:

а) графік щільності розподілу $f(x)$; б) графік функції розподілу $F(x)$;

$$a = 100, b = 20, M = 100, \sigma^2 = 100, \sigma = 20, V = 0,2.$$

Цей закон досить часто використовують на практиці. Його використовують, коли випадкова величина X залежить від великої кількості випадкових чинників, однорідних за своїм впливом, причому вплив кожного з них в порівнянні зі всією сукупністю є незначним. Загальним нормальним законом розподілу добре описуються результати незалежних вимірювань фізичних величин; він також використовується при оцінюванні надійності виробів в процесі їх зносу та природного старіння, його застосовують для визначення часу напрацювання до відмови і т.ін. Загальний нормальний закон розподілу називають

граничним через те, що до нього наближаються інші закони розподілу (та їх композиції) при типових умовах. Наприклад, при достатньо великому значенні математичного сподівання біноміальний розподіл близький до нормального.

Логарифмічно нормальний розподіл неперервної величини $X \geq 0$ має місце, якщо її десятковий логарифм $z = \lg X$ розподілений за нормальним законом. Логарифмічно нормальний розподіл використовується при оцінюванні відмов через зношення. У тих випадках, коли відмова виникає через пошкодження внаслідок втомлення, напрацювання до відмови часто описується логарифмічно нормальним законом. Цей закон застосовується також для оцінювання витрат часу, необхідного для пошуку та усунення відмови. Ним також добре апроксимуються випадкові величини, які утворюються в результаті множення великої кількості незалежних або слабкорельованих випадкових величин.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення поняття надійності ЕА.
2. Назвіть властивості надійності ЕА.
3. Що являє собою відмова?
4. Наведіть класифікацію відмов.
5. Назвіть показники надійності, що кількісно характеризують безвідмовність ЕА.
6. Назвіть показники довговічності ЕА.
7. Назвіть комплексні показники надійності.
8. Що визначає коефіцієнт готовності?
9. Вкажіть відмінність між роботоздатним та справним станом.
10. Чим визначається граничний стан виробу?
11. Назвіть основні причини низької надійності ЕА.
12. Назвіть методи забезпечення надійності на різних етапах життя ЕА.
13. Назвіть закони розподілу, що найбільш часто використовуються при оцінюванні надійності ЕА. Вкажіть їх основні характеристики.
14. Що є характерною ознакою експоненціального закону розподілу?
15. Які закони розподілу дозволяють оцінити надійність ЕА з урахуванням процесів старіння та зношення?
16. Які закони розподілу використовуються для дискретних випадкових величин, а які – для неперервних випадкових величин?
17. Які державні стандарти в галузі надійності ЕА ви знаєте, та що вони регламентують?

2 НАДІЙНІСТЬ НЕВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ЕА

Електронні апарати, що не ремонтуються, є неремонтопридатними або такими, що не відновлюються. Вони працюють лише до першої відмови, після чого замінюються новими. Це апаратура, яку неможливо, або недоцільно ремонтувати. Це можуть бути найрізноманітніші ЕА: від простих (наприклад, напівпровідникових приладів, ІМС і т. ін.) до складних бортових обчислювачів, що об'єднують в своєму складі тисячі та більше компонентів. Будучи встановленими на літальних апаратах, вони не ремонтуються в період експлуатації. Всі кількісні показники надійності систем, що не ремонтуються, є загальними і виражаються одними і тими ж математичними залежностями, але їх конкретні числові значення залежать від режимів роботи систем, що вивчаються. Тому при визначенні показників надійності таких систем завжди слід мати на увазі режими їх використання.

Розрізняють три стани, в яких може знаходитися технічна система: робота, спокій і транспортування. У кожному з цих станів показники надійності навіть однієї конкретної системи можуть істотно розрізнятися. Наприклад, відмови системи при роботі під навантаженням будуть одні, а при зберіганні – інші. Більш того, навіть при одному режимі, наприклад, при зберіганні в тропічних і арктичних умовах, показники надійності кількісно розрізнятимуться. Це завжди треба пам'ятати і враховувати при розрахунках.

Різні показники надійності неремонтопридатних об'єктів є характеристиками випадкової величини T – напрацювання об'єкта до відмови, і базуються на поняттях функції надійності $P(t)$ і функції відмови $Q(t)$, зв'язаних відомою залежністю $P(t) = 1 - Q(t)$. Обидві ці функції залежать від часу t .

Функцією відмови (функцією ненадійності) $Q(t)$ випадкової величини T (або функцією розподілу $F(t)$) називають ймовірність того, що напрацювання до відмови T менше заданого напрацювання t :

$$Q(t) = P\{T < t\} = F(t).$$

Функція надійності $P(t)$ характеризує ймовірність безвідмовної роботи об'єкта протягом заданого напрацювання $(0, t)$:

$$P(t) = 1 - Q(t) = P\{T \geq t\} = 1 - F(t).$$

2.1 Показники надійності невідновлювальних ЕА

За формою подання показники надійності можна поділити на *аналітичні* та *статистичні*. Аналітичні показники визначаються теоретично за відомою функцією розподілу. В даному випадку маємо *ймовірнісне (теоретичне)* визначення показників надійності. Статистичні показники надійності визначаються за результатами статистичних даних про відмови.

Одним з найголовніших показників надійності технічних систем є *ймовірність безвідмовної роботи* $P(t)$ в період напрацювання t . Під t маємо на увазі фіксований інтервал часу $(0; t)$.

1. *Ймовірність безвідмовної роботи* $P(t)$ – ймовірність того, що в заданому інтервалі часу або межах заданого напрацювання t , відмов в системі не виникне, тобто $P(t) = P\{T > t\}$, де T – випадкова величина, що характеризує час напрацювання системи до виникнення в ній відмови.

1. Аналітичне (ймовірнісне) визначення

$$P(t) = P\{T \geq t\} = 1 - F(t), \quad (2.1)$$

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

2. Статистичне визначення

$$P^*(t) = \frac{(N(0) - \sum_{i=1}^m n_i)}{N(0)},$$

де $N(0)$ – загальна кількість виробів, що бере участь у випробуваннях, тобто кількість роботоздатних виробів на момент часу $t = 0$; n_i – число виробів, які відмовили під час випробувань на i -тому інтервалі часу; $m = \frac{t}{\Delta t}$ – число інтервалів; t_i – час випробувань; Δt – тривалість інтервалу часу.

Фізичне значення функції $P(t)$ можна пояснити таким прикладом. Нехай на випробування поставлена партія, що містить N придатних виробів. В процесі випробувань деяка їх частина, наприклад n , виходить з ладу і відкидається. Тоді до моменту t залишається $N(t)$ виробів. Зрозуміло, що $N(t) = N(0) - n$, а відношення $N(t)/N(0) \approx P(t)$. З отриманого виразу виходить, що $P(t)$ характеризує частину роботоздатних виробів у момент часу t . Безперечно, що з часом ця частина зменшуватиметься. Тому графік функції $P(t)$ називають *кривою спаду працюючих виробів* або *кривою надійності ЕА* (рис. 2.1).

Статистичне значення ймовірності безвідмовної роботи $P^*(t)$ наближається до теоретичного $P(t)$, якщо $\Delta t \rightarrow 0$, $N \rightarrow \infty$.

$$P(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{N(0) - \sum_{i=1}^m n_i}{N(0)}.$$

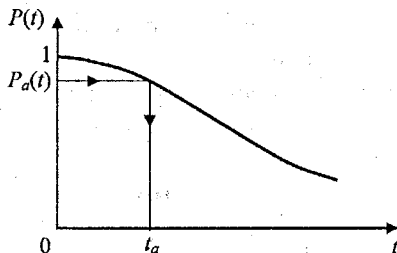


Рисунок 2.1 – Крива спаду працюючих виробів (крива надійності EA)

2. **Умовна ймовірність безвідмовної роботи** $P(t_1; t_2)$ – ймовірність того, що система буде робоздатною в інтервалі часу $(t_1; t_2)$, при умові, що в момент часу t_1 (на початку напрацювання) система знаходилась в робочому стані.

1. Аналітичне (ймовірнісне) визначення умовної ймовірності $P(t_1; t_2)$ визначається співвідношенням

$$P(t_1; t_2) = \frac{P(t_2)}{P(t_1)}, \quad (2.2)$$

де $P(t_1)$ і $P(t_2)$ – відповідно значення функцій надійності на початку (t_1) і в кінці (t_2) напрацювання.

2. Статистичне визначення

$$P^*(t_1; t_2) = \frac{N(t_2)}{N(t_1)},$$

де $N(t_2)$, $N(t_1)$ – кількість робоздатних виробів в моменти часу t_2 і t_1 , відповідно.

3. **Ймовірність відмови** $Q(t)$ – ймовірність того, що в період напрацювання $(0, t)$ обов'язково відбудеться відмова.

1. Аналітичне (ймовірнісне) визначення

$$Q(t) = P\{T < t\} = F(t) = 1 - P(t),$$

де $F(t)$ – функція розподілу випадкової величини T ; $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи в інтервалі часу $(0, t)$.

2. Статистичне визначення

$$Q^*(t) = \frac{n(t)}{N(0)},$$

де $N(0)$ – загальна кількість виробів, що бере участь у випробуваннях, тобто кількість роботоздатних виробів в початковий момент часу $t=0$; $n(t)$ – число виробів, які відмовили під час випробувань (0, t).

4. **Щільність розподілу напрацювання до відмови $f(t)$ (щільність ймовірності відмови, частота відмов).** Під цими синонімами розуміють похідну за часом від функції відмови $Q(t)$. За фізичним поняттям – це ймовірність відмови за достатньо малу одиницю часу.

1. Аналітичне (ймовірнісне) визначення

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt}.$$

Ймовірність відмови $Q(t)$ та ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ виражаються через частоту відмов $f(t)$ таким чином:

- для інтервалу часу $[0, t]$

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt;$$

$$P(t) = \int_t^\infty f(t) dt. \quad (2.3)$$

- для інтервалу часу $[t_1, t_2]$

$$Q(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt;$$

$$P(t_1, t_2) = 1 - \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt.$$

2. Статистичне визначення – це відношення кількості відмов за одиницю часу Δt до кількості роботоздатних виробів на момент часу $t=0$.

$$f^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(0)\Delta t},$$

де $n(\Delta t)$ – кількість приладів, що відмовили за малий проміжок часу Δt ; $N(0)$ – кількість роботоздатних приладів в початковий момент часу $t=0$.

5. **Інтенсивність відмов $\lambda(t)$** – є найбільш поширеним кількісним показником надійності. Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ є умовною імовірністю виникнення відмови в системі в деякий момент часу напрацювання при умові, що до цього моменту відмов в системі не було.

1. Аналітичне (ймовірнісне) визначення

$$\lambda(t) = \frac{1}{1 - F(t)} \frac{d}{dt} F(t) = \frac{1}{P(t)} \frac{d}{dt} Q(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (2.4)$$

2. Статистичне визначення

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

де $n(\Delta t)$ – число виробів, які відмовили при випробуванні протягом інтервалу часу Δt ; N – число виробів, роботоздатних до початку випробувань, тобто на початку інтервалу часу Δt .

Умову роботоздатності системи в момент початку напрацювання можна записати у вигляді $P(0) = 1$. Тоді ймовірність безвідмовної роботи можна виразити через інтенсивність відмов таким чином

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

Це одна з найважливіших формул теорії надійності невідновлювальних виробів.

Аналогічно може бути визначена умовна ймовірність безвідмовної роботи

$$P(t_1; t_2) = \exp \left[- \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right].$$

6. *Середнє напрацювання до відмови (середній час безвідмовної роботи)* T_{cp} – математичне сподівання $M(t)$ випадкової величини t .

1. Аналітичне (ймовірнісне) визначення

$$T_{cp} = M(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (2.5)$$

Вид функцій $f(t)$ і $P(t)$ визначається конкретними законами розподілу випадкової величини t . Середнє напрацювання до відмови – це очікуваний час роботи системи до першої відмови.

З аналітичного визначення видно, що *середнє напрацювання до відмови* T_{cp} дорівнює площі, що обмежена функцією надійності $P(t)$ та осями координат. Дане визначення є одним з головних теорії надійності.

Крива спаду (рис. 2.1) дозволяє досить просто визначати гарантійний ресурс системи. Роблять це таким чином: задаються деякою (необхідною за технічними умовам на систему) гарантійною ймовірністю $P_a(t)$, а далі (як показано на рис. 2.1) знаходять гарантійне напрацювання системи t_a . Наприклад, якщо $P_a(t) = 0,98$, то це означає, що до кінця гарантійного напрацювання в середньому 98% виробів будуть зберігати

роботоздатність.

б) Статистичне визначення

$$T_{\varphi}^* = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} t_i}{N(0)} \approx \frac{\sum_{i=1}^n t_i + T(N(0) - n)}{n},$$

де n – кількість об'єктів, що відмовили за час дослідження; $\sum_{i=1}^n t_i$ – сумарний час напрацювання об'єктів, що відмовили; $T(N(0) - n)$ – сумарний час напрацювання об'єктів, що не відмовили до моменту часу закінчення дослідження $t = T$.

Розглянуті функції, що визначають надійність, $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ є взаємозв'язаними. Достатньо знати одну (будь-яку з них), щоб визначити три інші (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Функціональний зв'язок показників надійності

Відома функція	Формули для визначення інших функцій			
	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	-	$1 - P(t)$	$-\frac{dP(t)}{dt}$	$-\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}$
$Q(t)$	$1 - Q(t)$	-	$\frac{dQ(t)}{dt}$	$\frac{1}{1 - Q(t)} \frac{dQ(t)}{dt}$
$f(t)$	$\int_t^{\infty} f(t) dt$	$\int_0^t f(t) dt$	-	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t) dt}$
$\lambda(t)$	$\exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right]$	$1 - \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right]$	$\lambda(t) \cdot \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right]$	-

2.2 Показники надійності при різних законах розподілу напрацювання до відмови

2.2.1 Експоненціальний закон розподілу

Експоненціальний закон розподілу напрацювання до відмови найбільш популярний в інженерній практиці. Показники надійності для нього можуть бути отримані із раніше наведених рівнянь (1.1) і (1.2). Якщо в них прийняти $x = t$, де t – час напрацювання до першої відмови, то

величину λ можна в цьому випадку розглядати як інтенсивність відмов системи за одиницю часу, функцію $F(t)$ – як імовірність відмови системи $Q(t)$ за час t , тобто $F(t) = Q(t)$. Тоді із (1.1) випливає, що щільність розподілу напрацювання до відмови

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t),$$

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

Ймовірність відмови

$$Q(t) = F(t) = 1 - \exp(-\lambda t).$$

З (1.2) і (2.1) знайдемо ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P(t) = 1 - Q(t) = \int_0^t \lambda \exp(-\lambda t) dt = \exp(-\lambda t). \quad (2.6)$$

Якщо розглядати досить малий інтервал часу t , на якому $\lambda < 0,1$, то можна скористатися наближеними більш простими виразами:

$$Q(t) \approx \lambda t; P(t) \approx 1 - \lambda t.$$

Середнє напрацювання до відмови в відповідності до (2.5)

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda}.$$

Відзначимо, що ймовірність безвідмовної роботи в інтервалі часу від 0 до T_{cp} дорівнює

$$P(T_{cp}) = \exp(-\lambda T_{cp}) = 1/e \approx 0,368.$$

Як видно із отриманих виразів, експоненціальний закон характеризується математичною простотою. В цьому полягає його основна привабливість для практичного застосування. Але користуватися цим законом потрібно дуже обережно. Для цього потрібно вміти оцінювати фізичні основи його застосування. Пояснимо фізичну сторону експоненціального закону розподілу таким прикладом. Розглянемо два послідовних моменти часу t і $t + \Delta t$. Нехай в момент часу t система знаходиться в робочому стані. Потрібно визначити ймовірність безвідмовної роботи системи $P(\Delta t)$ в інтервалі часу Δt . Очевидно, що за рівняннями (2.2) і (2.6)

$$P(\Delta t) = \frac{\exp[-\lambda(t + \Delta t)]}{\exp(-\lambda t)} = \exp(-\lambda \Delta t).$$

З отриманого виразу випливає, що $P(\Delta t)$ не залежить від напрацювання t до початку інтервалу часу $t + \Delta t$, тобто $P(\Delta t) \neq \varphi(t)$; таким чином, експоненціальний закон розподілу не враховує передісторію. Теоретично цей закон може бути застосований лише до виробів, які не піддаються зношенню в процесі експлуатації та старінню в часі. Але таких

виробів, як відомо, в природі не існує. Тому на практиці експоненціальний розподіл застосовують в тих випадках, коли процеси старіння та зношення в системах протікають досить повільно і аналізується порівняно невеликий період «життя» виробу. Експоненціальний закон доцільно застосовувати і в тих випадках, коли в виробах мають місце приховані дефекти, які призводять до раптових відмов. Великою перевагою цього закону є те, що у нього всього один параметр λ . Недолік – коефіцієнт варіації $V(t) = 1$; на практиці в ряді випадків він значно менший. Тому, показники надійності при експоненціальному законі характеризуються деяким запасом, який тим більший, чим більша різниця між теоретичним (рівним 1) і дійсним (меншим 1) коефіцієнтами варіації.

На рис. 2.2 наведені графіки показників надійності при експоненціальному законі розподілу.

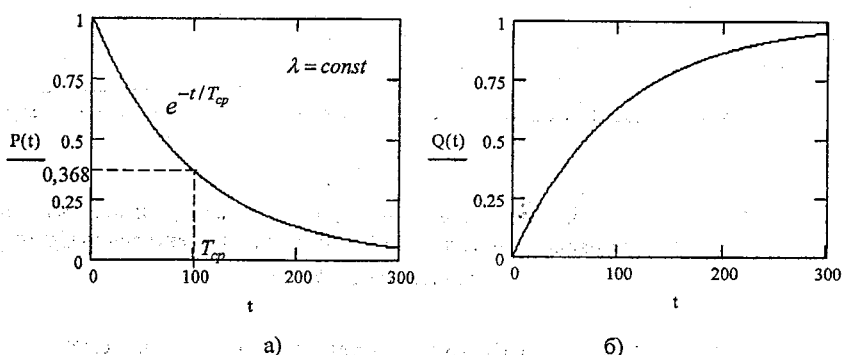


Рисунок 2.2 – Графіки показників надійності при експоненціальному законі розподілу: а) функція надійності $P(t)$; б) функція ненадійності $Q(t)$

2.2.2 Закон Вейбулла. Показники надійності для цього закону розподілу можуть бути отримані таким чином.

З рівняння (1.3) випливає, що щільність розподілу напрацювання до відмови

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} \exp\left(-\frac{t^m}{t_0}\right). \quad (2.7)$$

Тоді ймовірність безвідмовної роботи системи може бути отримана з (2.3) в такому вигляді:

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t^m}{t_0}\right). \quad (2.8)$$

Інтенсивність відмов з (2.4) із врахуванням (2.7) і (2.8) буде

$$\lambda(t) = \left(\frac{m}{t_0}\right) t^{m-1}.$$

Середнє напруцювання до відмови

$$T_{\text{ср}} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) t_0^{\frac{1}{m}}.$$

Приклад графіків показників надійності при законі розподілу Вейбулла наведені на рис. 2.3.

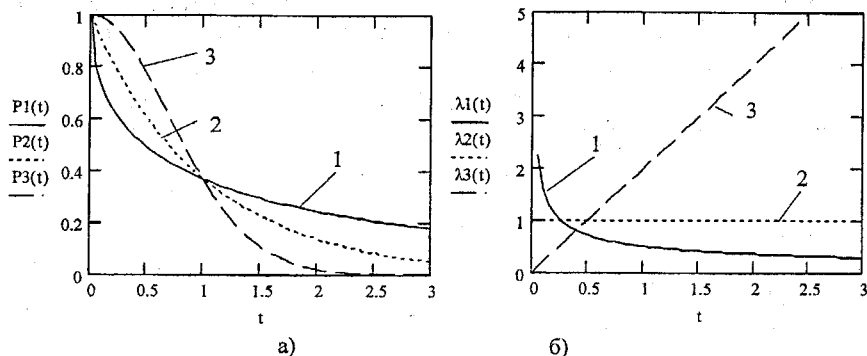


Рисунок 2.2 – Графіки показників надійності при законі розподілу Вейбулла:
а) ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$; б) інтенсивність відмов $\lambda(t)$.
 $t_0 = 1$; 1) $m = 0,5$; 2) $m = 1$; 3) $m = 2$

При $m = 1$ розподіл Вейбулла перетворюється на експоненціальний ($\lambda(t) = \text{const}$) (рис. 2.2, крива 2). Розподіл Вейбулла використовують, як правило, при оцінюванні надійності виробів в період їх припрацювання, оскільки при $m < 1$ інтенсивність відмов $\lambda(t)$ монотонно зменшується (рис. 2.2, крива 1); та в період зношення та старіння, оскільки при $m > 1$ інтенсивність відмов $\lambda(t)$ монотонно збільшується (рис. 2.2, крива 3).

2.2.3 Нормальний закон розподілу. Ймовірність безвідмовної роботи системи не може бути від'ємною, тому кількісні показники надійності потрібно розглядати лише при зрізаному гаусівському розподілі. Його одержують шляхом відсікання частини розподілу при $t < 0$ та введенням множника C_0 . В цьому випадку щільність розподілу напруцювання до відмови

$$f(t) = \frac{C_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - t_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2.9)$$

де t_0 і σ^2 – відповідно середнє значення (математичне сподівання) і дисперсія випадкової величини t ; C_0 – стала зрізаного нормального розподілу, що дорівнює

$$C_0 = \frac{1}{\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{t_0}{\sigma}\right)}.$$

Вона знаходиться з умови $\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$; Φ – функція Лапласа.

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи визначається виразом

$$P(t) = C_0 \left[\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{(t - t_0)}{\sigma}\right) \right]. \quad (2.10)$$

З (2.9) і (2.10) інтенсивність відмов системи

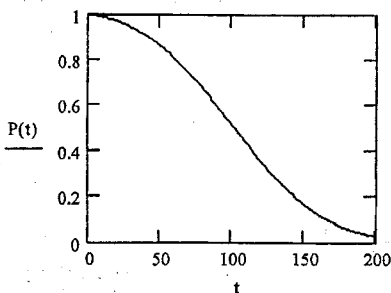
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left[-\frac{(t - t_0)^2}{2\sigma^2}\right]}{\sigma \left\{ 1 - 2\Phi\left[\frac{(t - t_0)}{\sigma}\right] \right\}}.$$

Середнє напрацювання до відмови

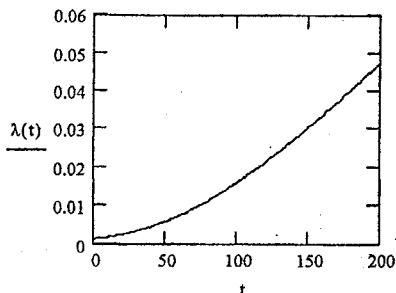
$$T_{cp} = t_0 + \sigma k,$$

$$\text{де } k = \frac{C_0}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t_0}{\sigma}\right)^2\right].$$

На рис. 2.3 наведені графіки показників надійності при нормальному законі розподілу.



а)



б)

Рисунок 2.3 – Графіки показників надійності при нормальному законі розподілу:

а) ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$;

б) інтенсивність відмов $\lambda(t)$. $t_0=100$, $\sigma=50$

Таблиця 2.2 – Формули для показників надійності при різних законах розподілу напруцювання до відмови

Показники надійності	Назва розподілу		
	Експоненціальний (показниковий)	Вейбулла	Нормальний (Гаусса)
Щільність розподілу	$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$	$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} \times \exp\left(-\frac{t^m}{t_0^m}\right)$	$f(t) = \frac{C_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times \exp\left[-\frac{(t - t_0)^2}{2\sigma^2}\right];$ $C_0 = \frac{1}{\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{t_0}{\sigma}\right)}$
Інтенсивність відмов	$\lambda = \lambda(t) = \text{const}$	$\lambda(t) = \left(\frac{m}{t_0}\right) t^{m-1}$	$\lambda(t) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left[-\frac{(t - t_0)^2}{2\sigma^2}\right]}{\sigma \left\{1 - 2\Phi\left[\frac{(t - t_0)}{\sigma}\right]\right\}}$
Ймовірність безвідмовної роботи	$P(t) = \exp(-\lambda t)$	$P(t) = \exp\left(-\frac{t^m}{t_0^m}\right)$	$P(t) = C_0 \times \left[\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{(t - t_0)}{\sigma}\right)\right]$
Середнє напруцювання до відмови	$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}$	$T_{\text{ср}} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) t_0^{\frac{1}{m}}$	$T_{\text{ср}} = t_0 + \sigma k;$ $k = \frac{C_0}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t_0}{\sigma}\right)^2\right]$

2.3 Оцінювання надійності з урахуванням режимів експлуатації ЕА

Інтенсивність відмов суттєвим чином залежить від режиму роботи елементів та умов навколишнього середовища і в загальному випадку визначається виразом

$$\lambda = \lambda_0 k_1 k_2 k_3 k_4,$$

де λ_0 – інтенсивність відмов в нормальних умовах експлуатації (температурі навколишнього середовища $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, атмосферному тиску (100 ± 4) Па, відносній вологості повітря $(65 \pm 15)\%$, природному фоні радіації, коефіцієнті електричного навантаження $K_n = 1$); k_i – поправкові коефіцієнти, що враховують режим експлуатації ЕА: k_1 враховує вплив механічних факторів (вібрацій та ударних навантажень), k_2 – вплив вологості та температури, k_3 – вплив тиску (висоти над рівнем моря), $k_4 = f(K_n)$ враховує вплив коефіцієнта електричного навантаження K_n . Значення інтенсивностей відмов λ_0 та поправкових коефіцієнтів для елементів ЕА у відповідності до галузевого стандарту ОСТ4 ГО.202.014 наведені в додатку А.

Добуток всіх поправкових коефіцієнтів $k_\lambda = k_1 k_2 k_3 k_4$ завжди більший одиниці. Фізично це характеризує той факт, що при експлуатації ЕА в реальних умовах відмов в ній може бути в десятки разів більше, ніж при експлуатації в лабораторних умовах.

В тих випадках, коли докладне врахування впливу всіх факторів умов експлуатації є неможливим через відсутність таких даних або є недоцільним, використовуються узагальнений коефіцієнт експлуатації K_e , який наближено враховує зниження надійності виробів в певних узагальнених умовах експлуатації (в наземних спорудах, на борту літака тощо) в порівнянні до нормальних (лабораторних) умов експлуатації. Деякі значення коефіцієнта K_e наведені в таблиці 2.3.

Коефіцієнт навантаження K_n враховує вплив на інтенсивність відмов електричного навантаження і визначається виразом

$$K_n = \frac{H}{H_n},$$

де H і H_n – відповідно електричне навантаження в реальному та номінальному режимах.

Таблиця 2.3 – Коефіцієнт K_e для різних умов експлуатації

Умови експлуатації ЕА	Узагальнений коефіцієнт K_e
Лабораторні (нормальні) умови	1
Приміщення з регульованою температурою і вологістю	1,1
Стаціонарні наземні умови	2,5
Польова рухома апаратура (в т.ч. переносна)	4,0
Бортова літакова	13

Коефіцієнт навантаження K_n може бути більший і менший одиниці. Для кожного типу елементів він встановлюється за таким параметром електричного навантаження, що найбільш сильно впливає на надійність елемента.

Для резисторів

$$K_n = \frac{P}{P_n},$$

де P – реальна потужність, що розсіюється на резисторі, P_n – номінальна потужність резистора.

Для конденсаторів

$$K_n = \frac{U}{U_n},$$

де U – реальна напруга на конденсаторі, U_n – номінальна робоча напруга конденсатора.

Для діодів

$$K_n = \frac{I_{np}}{I_{np.макс}},$$

де I_{np} – реальне середнє значення прямого постійного струму діода, $I_{np.макс}$ – максимально допустимий середній прямий струм через діод.

Для транзисторів

$$K_n = \frac{P}{P_{макс}},$$

де P – потужність, що розсіюється на транзисторі, $P_{макс}$ – максимально допустима потужність транзистора.

На практиці значення коефіцієнтів навантаження вибирають в межах $K_n = 0,6 \dots 0,8$.

Якщо відомі інтенсивності відмов λ_i окремих елементів системи, то інтенсивність відмов системи λ_c при послідовному з'єднанні елементів системи, тобто коли вихід з ладу одного елементу призводить до виходу з ладу всієї системи, визначається як сума інтенсивностей відмов елементів системи

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

де n – кількість елементів системи.

Інтенсивність відмов λ_i враховує лише раптові відмови. Для врахування поступових відмов, що виникають внаслідок старіння та зношення, необхідно скорегувати сумарну інтенсивність відмов з урахуванням частини поступових відмов, що припадають на них.

Для багатьох типів радіоелектронної апаратури має місце таке співвідношення між поступовими і раптовими відмовами

$$\frac{\lambda_{\text{рапт}}}{\lambda_{\text{рапт}} + \lambda_{\text{пост}}} = 0,25 \div 0,75,$$

де $\lambda_{\text{рапт}}$ – інтенсивність раптових відмов, $\lambda_{\text{пост}}$ – інтенсивність поступових відмов.

Якщо більш конкретні співвідношення для певного типу пристроїв відсутні, то можна вважати, що раптові відмови складають половину всіх відмов.

Ймовірність безвідмовної роботи P_c та середній час безвідмовної роботи системи $T_{\text{сер}}$ для експоненціального закону розподілу визначаються виразами

$$P_c = \exp(-\lambda_c t),$$

$$T_{\text{сер}} = 1/\lambda_c.$$

Якщо інтенсивність відмов обмежується нерівністю $\lambda t \leq 0,1$, то можна скористатися наближеною формулою

$$P = \exp(-\lambda t) \approx 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2}.$$

Помилка в розрахунках при цьому не перевищує (0,5 – 1) %.

Контрольні запитання

1. Які електронні апарати відносяться до невідновлювальних ЕА?
2. В яких станах може знаходитися технічна система?
3. Характеристика якої випадкової величини є різні показники надійності невідновлювальної ЕА?
4. Дайте визначення функції надійності.
5. В чому полягає відмінність аналітичних та статистичних показників надійності?
6. Назвіть основні показники надійності невідновлювальної ЕА.
7. Дайте аналітичне та статистичне визначення ймовірності безвідмовної роботи ЕА.
8. В чому полягає фізичний зміст функції надійності?
9. В чому полягає відмінність між ймовірністю безвідмовної роботи та умовною ймовірністю безвідмовної роботи ЕА?
10. Який показник є найбільш поширеним кількісним показником надійності ЕА?
11. Як пов'язані між собою функції надійності та відмови ЕА?
12. Дайте аналітичне та статистичне визначення інтенсивності відмов ЕА.
13. Які закони розподілу напрацювання до відмови використовують при оцінюванні надійності невідновлюваної ЕА?
14. Який закон розподілу напрацювання до відмови найбільш часто використовують в інженерній практиці? Чому?
15. Що є характерною ознакою експоненціального закону розподілу?
16. Що не враховує експоненціальний закон розподілу?
17. Які закони розподілу дозволяють оцінити надійність ЕА з урахуванням процесів старіння та зношення?
18. Яким чином при оцінюванні надійності ЕА враховують режим роботи та умови навколишнього середовища?
19. Які умови називають нормальними умовами експлуатації ЕА?
20. Яким чином визначають вплив на інтенсивність відмов електричного навантаження?
21. Наведіть формулу для наближеного розрахунку ймовірності безвідмовної роботи для експоненціального закону розподілу. В яких випадках її можна використовувати?

3 НАДІЙНІСТЬ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ЕА

До відновлювальних ЕА відносяться системи, які відновлюють при відмовах, після чого продовжують їх подальшу експлуатацію. Такі ЕА називають також *ремонтпридатними* ЕА. Надійність відновлювальних (ремонтпридатних) систем оцінюють більшою мірою характеристиками потоку відмов, які розглядають як випадкові події. В теорії надійності ремонтпридатних систем широкого поширення набули найпростіші потоки.

Найпростіший потік подій характеризується ординарністю, стаціонарністю та відсутністю післядії. *Ординарний потік* подій має місце, коли ймовірність появи двох і більше відмов в одиничному інтервалі часу дуже мала в порівнянні з імовірністю появи однієї відмови. *Стаціонарний потік подій* має постійне число відмов в одиничному інтервалі часу. *Відсутність післядії* означає, що ймовірність появи відмов в одиничному інтервалі часу не залежить від виникнення відмов у всіх інших інтервалах часу, які не перетинаються, тобто відмови виникають незалежно одна від одної.

Найпростіший потік відмов має також такі властивості: ймовірність того, що за час t відбудеться m відмов, визначається законом Пуассона (див. п. 1.4); час між відмовами описується експоненціальним законом (див. п. 1.4); середнє число відмов за час t дорівнює λt ; ймовірність того, що за час t не виникне ні однієї відмови, дорівнює $\exp(-\lambda t)$.

Найпростіший потік називають також пуассонівським потоком, який характерний для складних високонадійних систем. Пояснюється це такими причинами. В сучасних і досить складних системах відмови є дуже рідкими подіями; число відмов в період їх нормальної експлуатації наближається до постійної величини; за ступенем впливу відмови виконують приблизну однакову дію на надійність системи, внаслідок чого їх можна розглядати незалежними; післядія в таких системах незначна.

Всі ремонтпридатні ЕА можна умовно поділити на дві групи: ремонтпридатні ЕА без відновлення в процесі використання; ремонтпридатні ЕА з відновленням в процесі використання.

До ремонтпридатної ЕА без відновлення в процесі використання відносяться ті об'єкти, відмова яких призводить до невиконання поставленого завдання; ремонт об'єктів виконується лише після завершення виконання завдання.

До ремонтпридатної ЕА з відновленням в процесі використання

відносяться об'єкти, в процесі роботи яких можливі відмови та викликані ними перерви в роботі; ремонт таких об'єктів виконується в процесі виконання завдання.

Для кожної даної групи ЕА використовують свої показники надійності.

3.1 Показники надійності ремонтпридатної ЕА без відновлення в процесі використання

1. *Параметр потоку відмов* $\omega(t)$ – характеризує середню кількість відмов за одиницю часу:

а) аналітичне визначення

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M\{r(t, \Delta t)\}}{\Delta t},$$

де $M\{r(t, \Delta t)\}$ – математичне сподівання кількості відмов в діапазоні часу $(t, \Delta t)$;

б) статистичне визначення

$$\omega^*(t) = \frac{r(t, \Delta t)}{N \cdot \Delta t},$$

де $r(t, \Delta t)$ – кількість відмов в діапазоні часу $(t, \Delta t)$; N – загальна кількість пристроїв.

Для стаціонарних потоків відмов $\lambda = \text{const}$, а значення ω і λ збігаються, тобто $\omega(t) = \lambda(t) = \omega = \lambda$.

2. *Ймовірність* $P_i(t_1, t_2)$ *того, що в системі в період напруження* (t_1, t_2) *відбудеться* i *відмов.*

Для пуассонівських потоків відмов

$$P_i(t_1, t_2) = \frac{1}{i!} [(t_2 - t_1) \omega_{cp}]^i \exp[-\omega_{cp} (t_2 - t_1)],$$

де

$$\omega_{cp} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt.$$

Для стаціонарних потоків $\omega = \text{const}$,

$$P_i(t_1, t_2) = \frac{1}{i!} [(t_2 - t_1) \omega]^i \exp[-\omega (t_2 - t_1)].$$

3. *Умовна ймовірність неперервної безвідмовної роботи* $P(t)$ *протягом напруження* $(0, t)$ – ймовірність того, що в системі протягом

напрацювання $(0, t)$ не відбудеться жодної відмови, тобто $l = 0$, при умові, що система була в роботоздатному стані в початковий момент часу.

$$P(t) = P_{l=0}(0, t) = \exp \left[- \int_0^t \omega(t) dt \right].$$

При $\omega = \text{const}$

$$P(t) = \exp[-\omega(t)dt].$$

4. *Середнє напрацювання на відмову* T_{cp} – середній час роботи між сусідніми відмовами:

а) аналітичне визначення.

Для стаціонарного потоку при експоненціальному розподілі напрацювання між відмовами має місце співвідношення

$$T_{cp} = \frac{1}{\omega};$$

б) статистичне визначення

$$T_{cp}^* = \frac{\sum_{i=1}^r t_i}{r},$$

де r – кількість відмов за час t ; t_i – час роботи системи між $i-1$ -ою та i -ою відмовами.

3.2 Показники надійності ремонтпридатної ЕА з відновленням в процесі використання

3.2.1 Одиничні показники

1. *Параметр потоку відмов* $\omega(t)$.

2. *Середнє напрацювання на відмову (середній час безвідмовної роботи)* T_{cp} .

3. *Параметр потоку відновлення (інтенсивність відновлення)* $\mu(t)$

– характеризує середню кількість відновлень за одиницю часу:

а) аналітичне визначення

$$\mu(t) = \frac{f_b(t)}{1 - F_b(t)},$$

де $F_b(t)$ – функція розподілу часу відновлення; $f_b(t)$ – частота відновлення (щільність функції розподілу часу відновлення),

$$f_b(t) = \frac{dF_b(t)}{dt};$$

б) статистичне визначення

$$\mu(t) = \frac{r_e(\Delta t)}{N_e(t) \cdot \Delta t},$$

де $r_e(\Delta t)$ – кількість відновлених пристроїв за інтервал часу Δt ;
 $N_e(t)$ – кількість пристроїв, що не відновлені протягом інтервалу часу від 0 до t .

4. Середній час відновлення T_e :

а) аналітичне визначення

$$T_e = M\{t_e\} = \int_0^{\infty} [1 - F_b(t)] dt = \int_0^{\infty} t \cdot f_b(t) dt,$$

де $M\{t_e\}$ – математичне сподівання часу відновлення; $F_b(t)$ – функція розподілу часу відновлення; $f_b(t)$ – частота відновлення (щільність функції розподілу часу відновлення), $f_b(t) = \frac{dF_b(t)}{dt}$.

Для стаціонарного потоку при експоненціальному розподілі часу відновлення має місце співвідношення

$$T_e = \frac{1}{\mu};$$

б) статистичне визначення

$$T_e^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_e} t_{ei}}{N_e},$$

де N_e – кількість відновлень; t_{ei} – тривалість i -го відновлення.

3.2.2 Комплексні показники надійності

1. **Коефіцієнт готовності K_z** – ймовірність знаходження пристрою в усталеному режимі роботи ($t \rightarrow \infty$) в роботоздатному стані в довільний момент часу

$$K_z = \lim_{t \rightarrow \infty} K_z(t),$$

де $K_z(t)$ – функція готовності (нестационарний коефіцієнт готовності) – ймовірність того, що пристрій знаходиться в роботоздатному стані в момент часу t .

$$K_z = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_e},$$

де T_{cp} – середній час безвідмовної роботи; T_e – середній час відновлення.

Для експоненціальних розподілів часу безвідмовної роботи та часу відновлення

$$K_z = \frac{\mu}{\mu + \omega}.$$

Нестационарний коефіцієнт готовності при умові, що в початковий момент ($t = 0$) часу ЕА знаходилась в роботоздатному стані

$$K_z(t) = K_z + (1 - K_z) \cdot e^{-(\omega + \mu)t}.$$

2. Коефіцієнт простою K_n – ймовірність знаходження пристрою в усталеному режимі роботи ($t \rightarrow \infty$) в нероботоздатному стані в довільний момент часу

$$K_n = \lim_{t \rightarrow \infty} K_n(t),$$

де $K_n(t)$ – функція простою (нестационарний коефіцієнт простою) – ймовірність того, що пристрій знаходиться в нероботоздатному стані в момент часу t .

$$K_n = \frac{T_e}{T_e + T_{cp}}.$$

Для експоненціальних розподілів часу безвідмовної роботи та часу відновлення

$$K_n = \frac{\omega}{\omega + \mu}.$$

Коефіцієнти готовності та простою зв'язані між собою співвідношенням

$$K_n = 1 - K_z.$$

Контрольні запитання

1. Які електронні апарати відносяться до невідновлювальних ЕА?
2. Дайте характеристику найпростішого потоку подій.
3. Чому пуассонівський потік відмов є характерним для складних електронних систем?
4. На які дві групи можна умовно поділити ремонтпридатні ЕА?
5. Назвіть одиничні показники надійності відновлювальних ЕА.
6. Назвіть комплексні показники надійності ЕА.
7. Який фізичний зміст функції готовності?
8. Яким співвідношенням зв'язані коефіцієнт готовності та простою?
9. В чому полягає відмінність між стаціонарним та нестационарним коефіцієнтами готовності?
10. Що характеризує параметр потоку відмов? Як він пов'язаний з інтенсивністю відмов?

4 СТРУКТУРНІ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ЕА

Для оцінювання надійності ЕА використовують відповідні моделі надійності. Найбільш простими і інформативними моделями надійності є графічні, що являють собою логічні структурні схеми ЕА. Вони складаються таким чином. В результаті дослідження функціонування системи визначають можливі відмови її елементів і оцінюється їх вплив на роботоздатність ЕА. Потім ЕА поділяється на окремі частини так, щоб показники надійності кожної з частин легко обчислювалися або визначалися експериментально.

Поділ початкової системи проводиться так, щоб окремі її частини були незалежними за відмовами. При цьому передбачається, що утворені таким чином частини ЕА (компоненти моделі надійності) можуть знаходитися в двох станах: роботоздатному і нероботоздатному. Бажано, щоб такий поділ здійснювався за конструктивними ознаками (наприклад, поблочно). При складанні моделі надійності функціональні (або електричні) зв'язки між виділеними частинами ЕА замінюють логічними, які характеризують безвідмовну роботу системи залежно від роботоздатного або нероботоздатного стану її елементів. У модель надійності включають лише ті елементи системи, які необхідні для виконання основної функції. Елементи, що несуть допоміжні функції (наприклад, контроло, сигналізації і под.), зазвичай в схему моделі надійності не включаються, а врахування впливу їх відмов на загальну ймовірність безвідмовної роботи ЕА проводиться при оцінюванні показників надійності тих частин системи, з якими вони функціонально зв'язані. При складанні моделей надійності конструктивні елементи, відмови яких взаємопов'язані, об'єднують.

Структурна надійність будь-якого радіоелектронного апарата – його результуюча надійність при відомій структурній логічній схемі та відомих значеннях надійності всіх елементів, що входять до структурної логічної схеми надійності. При цьому під елементами розуміють як інтегральні мікросхеми, резистори, конденсатори і под., що виконують певні функції і включені в загальну електричну схему ЕА, так і з'єднання паянням, роз'єми, кріплення тощо.

При побудові структурних схем використовують послідовне, паралельне та змішане (послідовно-паралельне) з'єднання елементів. Інколи структурні логічні схеми надійності системи не можна відразу подати простими (послідовно-паралельними) структурними логічними

схемами надійності, що легко розраховуються. В цих випадках використовують методи заміни складних схем надійності простішими еквівалентними. Ці методи засновані на тому, що сумарна надійність еквівалентних схем дорівнює надійності початкової структури. Еквівалентні схеми є комбінаціями простих з'єднань елементів.

4.1 Послідовна модель надійності

Послідовну модель надійності можна зобразити структурною логічною схемою надійності з послідовним з'єднанням елементів (рис. 4.1). При послідовному з'єднанні елементів для робоздатного стану схеми необхідна робота всіх елементів. Вихід з ладу одного елементу призводить до виходу з ладу всієї схеми.

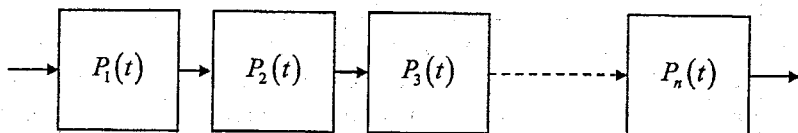


Рисунок 4.1 – Схема послідовного з'єднання елементів

Ймовірність безвідмовної роботи $P_c(t)$ схеми буде дорівнювати добутку ймовірностей безвідмовної роботи всіх елементів схеми

$$P_c(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t),$$

де n – кількість елементів в схемі, $P_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента схеми.

Якщо ймовірність безвідмовної роботи всіх елементів однакова, тобто $P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_n(t) = P(t)$, то

$$P_c(t) = [P(t)]^n.$$

Для експоненціального закону розподілу

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

де λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента схеми.

Тоді ймовірність безвідмовної роботи схеми

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t} = e^{-\lambda_{\Sigma} t},$$

де $\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n$ – сумарна інтенсивність відмов схеми.
Середній час напрацювання на відмову в цьому випадку

$$T_{cp} = 1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 / \lambda_{\Sigma}.$$

При рівній надійності всіх елементів ($\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda$)

$$\lambda_{\Sigma} = n\lambda; P(t) = e^{-n\lambda t}; T_{cp} = 1/n\lambda.$$

4.2 Паралельна модель надійності

Паралельну модель надійності ЕА можна зобразити структурною логічною схемою надійності з паралельним з'єднанням елементів (рис. 4.2). Для даної схеми відмова одного елементу не призводить до відмови всієї схеми. Відмова схеми матиме місце лише при відмові всіх елементів.

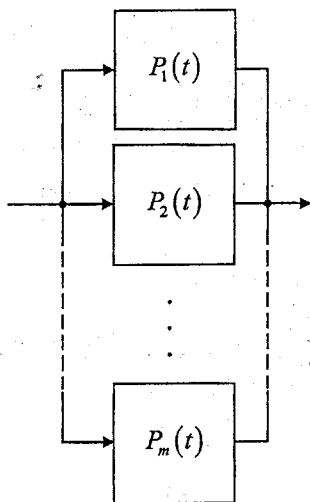


Рисунок 4.2 – Схема паралельного з'єднання елементів

Ймовірність відмови $Q_c(t)$ схеми дорівнює добутку ймовірностей $q_j(t)$ елементів схеми

$$Q_c(t) = q_1(t)q_2(t)q_3(t)\dots q_n(t) = \prod_{j=1}^m q_j(t) = \prod_{j=1}^m [1 - p_j(t)],$$

де $q_j(t) = 1 - p_j(t)$ – ймовірність відмови j -го елемента схеми, $p_j(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи j -го елемента схеми, m – кількість елементів схеми.

Ймовірність безвідмовної роботи $P_c(t)$ дорівнює

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - p_j(t)].$$

В випадку рівнонадійних елементів $P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_m(t) = P(t)$,

$$P_c(t) = 1 - [q(t)]^m = 1 - [1 - p(t)]^m.$$

Для експоненціального закону розподілу ($P(t) = e^{-\lambda t}$) середній час напрацювання на відмову дорівнює

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \dots + \frac{1}{m\lambda}.$$

Більшість структурних логічних схем надійності ЕА можна подати у вигляді комбінацій послідовного та паралельного з'єднання елементів. В тих випадках, коли це неможливо, використовують методи перетворення складних схем до більш простих схем послідовно-паралельного з'єднання елементів.

4.3 Метод перетворення складної логічної структури за базовим елементом

За базовий елемент (або групу елементів) в початковій структурі вибирають той, який не дає можливості подати складну структуру у вигляді сукупності простих структур. Далі розглядають два крайніх стани базового елемента: коли він знаходиться в роботоздатному стані і має абсолютну провідність сигналу та коли він знаходиться в стані відмови і сигнал через нього взагалі не проходить. Зроблені припущення дають можливість замінити початкову схему двома еквівалентними, що відображають вказані можливі стани базового елемента. Очевидно, що перший стан може бути імітований в першій еквівалентній схемі коротким замиканням кола, в якому розташований базовий елемент. Відповідно другий стан може бути поданий розривом того ж кола в другій еквівалентній схемі. Для того, щоб отримані таким чином еквівалентні

схеми були адекватні початковій структурі, послідовно з першою включають базовий елемент, що характеризується ймовірністю безвідмовної роботи $p_6(t)$, а до другої – базовий елемент, що характеризується ймовірністю відмови $q_6(t)$. Для кожної з цих схем визначають ймовірність безвідмовної роботи. Тоді сума цих ймовірностей характеризує ймовірність безвідмовної роботи початкової складної структури.

Для пояснення викладеного методу перетворення логічних схем надійності розглянемо структуру (рис. 4.3), яка не може бути відразу перетворена за допомогою комбінацій простих логічних схем. Система складається з п'яти елементів, кожен з яких характеризується відповідною ймовірністю безвідмовної роботи $p_i(t)$, $i = 1 \dots 5$.

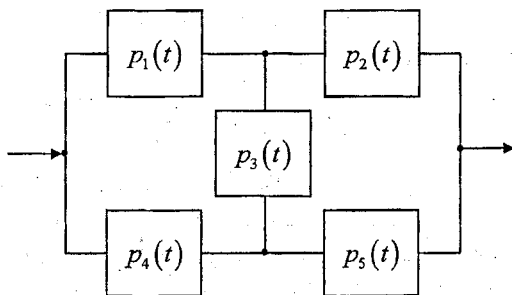


Рисунок 4.3 – Структурна логічна схема надійності складної системи

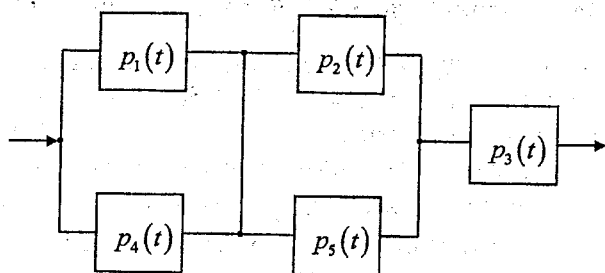
Перетворимо схему до простішого вигляду. Очевидно, що за базовий елемент необхідно вибрати розміщений в діагоналі схеми, що характеризується ймовірністю безвідмовної роботи $p_3(t)$. Відповідно до вищевикладеного правила замінимо початкову схему двома еквівалентними (рис. 4.4, а, б) і визначимо ймовірність безвідмовної роботи кожної з них.

Для схеми на рис. 4.4, а отримаємо

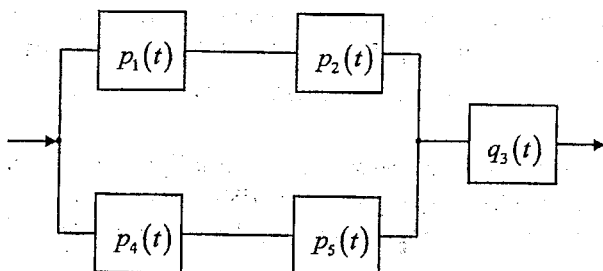
$$P_1(t) = p_3(t) \{1 - [1 - p_1(t)][1 - p_4(t)]\} \{1 - [1 - p_2(t)][1 - p_5(t)]\}.$$

Для схеми на рис. 4.4, б

$$P_2(t) = p_3(t) \{1 - [1 - p_1(t)p_2(t)][1 - p_4(t)p_5(t)]\}.$$



а)



б)

Рисунок 4.4 – Приклад перетворення складної структури за базовим елементом

При однаковій надійності елементів еквівалентних схем ($p_i = p(t)$, $i=1...5$) вирази для ймовірностей безвідмовної роботи еквівалентних схем приймуть відповідно вигляд

$$P_1(t) = p(t) \{1 - [1 - p(t)]^2\}^2,$$

$$P_2(t) = [1 - p(t)] \{1 - [1 - p^2(t)]^2\}.$$

Сумарна ймовірність безвідмовної роботи початкової схеми

$$P_c(t) = P_1(t) + P_2(t).$$

Метод перетворення складних структур за базовим елементом базується на теоремі про суму ймовірностей несумісних подій, оскільки прийняті нами стани, в яких може знаходитися базовий елемент, є несумісні.

4.4 Метод перетворення трикутника в зірку та навпаки

Структурну логічну схему надійності, що наведена на рис. 4.3 можна подати у вигляді більш простішої еквівалентної схеми використовуючи метод перетворення трикутника в зірку чи навпаки. Так елементи з ймовірностями $p_1(t)$, $p_3(t)$, $p_4(t)$ на схемі утворюють трикутник, а елементи з ймовірностями $p_1(t)$, $p_3(t)$, $p_2(t)$ – зірку. При цьому складну схему можна перетворити до паралельно-послідовного з'єднання елементів.

Метод перетворення трикутника в зірку та навпаки є наближенням. Похибка, яка виникає при перетворенні, залежить від значення ймовірностей, що характеризують елементи. Чим менші ці ймовірності, тим менша похибка оцінювання надійності системи. Оскільки значення ймовірностей безвідмовної роботи елементів $p(t)$ в нормальному режимі експлуатації близькі до 1, то доцільно використовувати ймовірності відмови $q(t)$.

Визначимо взаємозв'язок між ймовірностями відмов схем «трикутника» та «зірки» (рис. 4.5) виходячи з припущення, що надійність схем, які з'єднують однойменні точки в різних схемах, є однаковою.

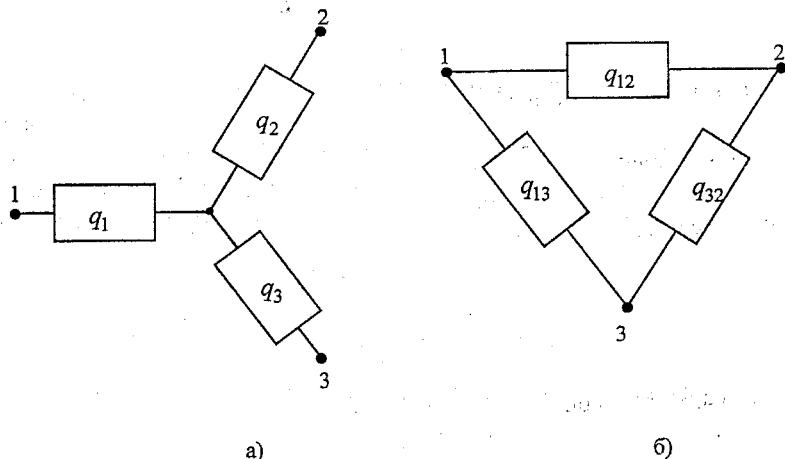


Рисунок 4.5 – Структурні схеми «зірка» (а) та «трикутник» (б)

При перетворенні з зірки в трикутник ймовірності відмов елементів визначаються виразами:

$$q_{12} \approx \frac{q_1 q_2}{q_3}, q_{13} \approx \frac{q_1 q_3}{q_2}, q_{32} \approx \frac{q_3 q_2}{q_1}.$$

Ймовірність відмови елементу, що знаходиться між двома точками в схемі трикутника, наближено дорівнює добутку ймовірностей відмов елементів, що приєднані до цих точок в схемі зірки, поділеному на ймовірність відмови елементу, що приєднаний до протилежної точки.

При перетворенні з трикутника в зірку ймовірності відмов елементів визначаються виразами:

$$q_1 \approx q_{12} q_{13}, q_2 \approx q_{12} q_{32}, q_3 \approx q_{13} q_{32}.$$

Ймовірність відмови елементу, що приєднується до певної точки в схемі зірки, наближено дорівнює добутку ймовірностей відмов елементів, що приєднані до цієї точки в схемі трикутника.

Контрольні запитання

1. Яким чином складають структурні логічні схеми надійності ЕА?
2. Які з'єднання елементів використовують при побудові структурних логічних схем надійності ЕА?
3. Наведіть вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи логічної схеми надійності з послідовним з'єднанням елементів.
4. Наведіть вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи логічної схеми надійності з паралельним з'єднанням елементів.
5. Яке з'єднання елементів в структурних логічних схемах забезпечує більшу надійність?
6. Які методи перетворення складних структурних логічних схем надійності ви знаєте?
7. Який елемент (або групу елементів) приймають за базовий при перетворенні складної логічної структурної схеми за базовим елементом?
8. Поясніть сутність методу перетворення за базовим елементом.
9. Поясніть сутність методу перетворення зірки в трикутник та навпаки при розрахунку надійності складних схем.
10. Чому в методі перетворення зірки в трикутник та навпаки як показники надійності використовують ймовірності відмови, а не ймовірності безвідмовної роботи елементів?

5 НАДІЙНІСТЬ РЕЗЕРВОВАНИХ ЕА

5.1 Основні визначення та класифікація способів резервування

Резервуванням називають введення в технічний пристрій додаткового числа компонентів і зв'язків у порівнянні до мінімального необхідного для його нормального функціонування.

Мета резервування – підвищення надійності пристрою.

Розрізняють такі види резервування *загальне, поелементне та змішане*.

При *загальному* резервуванні резервується увесь виріб, тобто, в разі виходу з ладу він замінюється таким же.

При *поелементному* резервуванні резервуються окремі частини пристрою і в разі відмов вони замінюються ідентичними.

При *змішаному* резервуванні великі та найбільш відповідальні функціональні частини пристрою мають загальне резервування, решта – поелементне.

Резервування відноситься до схемної надлишковості та називається *структурним резервуванням*. Підвищення надійності досягається шляхом ускладнення пристрою.

Перераховані види резервування відносяться до схемної надлишковості, що називається *структурним резервуванням*. Підвищення надійності досягається шляхом ускладнення пристрою.

За способом введення резерву розрізняють *постійне* ввімкнення, ввімкнення *заміщенням* і *ковзне*.

Постійне ввімкнення характеризується тим, що всі резервні елементи ввімкненні постійно та знаходяться в робочому стані протягом всього часу роботи основних елементів. Постійне резервування ефективно тільки в тому разі, якщо відмови, які виникли, статистично незалежні, тобто не впливають одна на одну. Оскільки в цьому випадку відмови основних елементів відразу усуваються і роботоздатність виробу не порушується, тому нема необхідності в пошуку елементів, що відмовили. Постійне резервування набуло найбільшого поширення в виробках, які не ремонтуються, особливо в випадках, коли неприпустима навіть короткочасна перерва в роботі.

Ввімкнення заміщенням характеризується тим, що при відмовах елементу замість нього вмикається резервний і пристрій знову продовжує

нормально функціонувати. Перед підключенням робочого вузла замість неробочого відбувається виявлення останнього, причому пошук і підключення може здійснюватися як вручну, так і автоматично. Таке резервування дозволяє мати один резервний вузол на декілька основних.

Ковзне ввімкнення характеризується тим, що-будь-який резервний елемент може замінити будь-який основний, який вийшов з ладу, і застосовується лише у тому разі, якщо пристрій складається тільки з однотипних елементів. Для виконання такого резервування необхідно мати автоматичний прилад для пошуку неробочого елемента та підключення замість нього резервного. Перевага такого резервування полягає в тому, що при ідеальному автоматичному пристрої воно дає найбільший вигрash в надійності.

Резервування буває *активним і пасивним*.

Активним називають резервування, коли елемент, що відмовив, замінюється резервним. При цьому в залежності від режимів роботи резервних елементів розрізняють навантажений (гарячий), полегшений і ненавантажений (холодний) резерви.

Навантажений резерв характеризується тим, що умови роботи резервних елементів і умови роботи основних елементів, повністю збігаються, тобто має місце постійне резервування і ресурс резерву витрачається одночасно і однаково з ресурсом основного елемента.

Полегшений резерв характеризується тим, що резервний елемент знаходиться в менш навантаженому режимі, ніж основний до моменту його ввімкнення, тому його ресурс витрачається частково.

При *ненавантаженому* резерві резервний елемент відключений і вмикається тільки після виходу з ладу основного елемента, ресурс його не витрачається, оскільки елемент знаходиться в неробочому стані.

Пасивним резервуванням називають таке, при якому відмова одного чи кількох елементів системи не впливає на її роботоздатність. Таке резервування характеризується постійним увімкненням елементів в систему. При пасивному резервуванні розрізняють *резервування з незмінним навантаженням* та з *перерозподілом навантаження*.

Резервування з незмінним навантаженням характеризується тим, що при відмові одного або кількох елементів системи навантаження на решту роботоздатних елементів залишається незмінним.

При *резервуванні з перерозподілом навантаження* при відмові одного або декількох елементів системи навантаження на роботоздатні елементи відповідно збільшується.

Резервування, при якому роботоздатність будь-якого основного і резервного елементів системи в разі виникнення відмов підлягає відновленню в процесі експлуатації системи, називають *резервуванням з відновленням*. В іншому випадку має місце резервування *без відновлення*.

Ступінь надмірності структурного резервування характеризується *кратністю резервування*.

Кратність резервування — це відношення кількості резервних елементів до кількості основних елементів, які резервуються.

Коли один основний елемент резервується одним або кількома резервними елементами, має місце резервування з *цілою кратністю*. При *резеруванні з дробовою кратністю* два або більше однотипних елементи резервуються одним або більше резервними елементами. Резервування, кратність якого дорівнює одиниці, називають *дублюванням*.

Структурне резервування використовує *структурні моделі надійності* у вигляді структурних логічних схем, в яких виділені елементи та з'єднання, що виконують основні функції даного пристрою, причому відмови будь-якого функціонального елементу структурної схеми не залежать і не визначають відмови інших елементів. При складанні моделей надійності конструктивні елементи, відмови яких взаємозв'язані, об'єднують. Найпростішими і універсальними моделями надійності є послідовні та паралельні схеми, що складаються з незалежних елементів.

5.2 Надійність при загальному резеруванні

Модель надійності системи з загальним резервуванням має вигляд рис. 5.1.

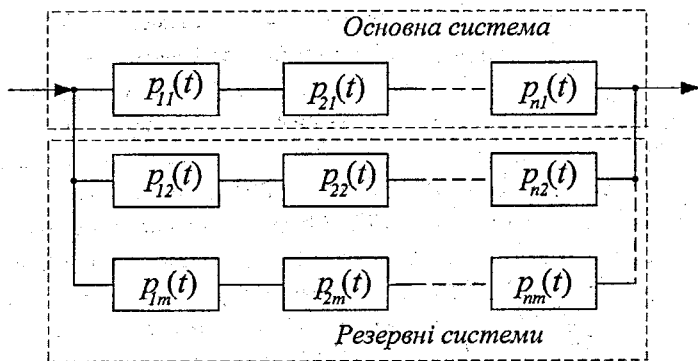


Рисунок 5.1 — Модель надійності системи з загальним резервуванням

Модель складається з основної системи та $(m-1)$ резервних систем. Кожна система (резервнi та основна) мiстить n елементiв. Тодi, у вiдповiдностi до формули для послiдовної моделi надiйностi, ймовiрнiсть безвiдмовної роботи основної системи без резервування $P_{c1}(t)$ запишеться як

$$P_{c1}(t) = \prod_{i=1}^n p_{i1}(t), \quad (5.1)$$

а ймовiрнiсть появи у нiй вiдмови $Q_{c1}(t)$

$$Q_{c1}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n p_{i1}(t). \quad (5.2)$$

Аналогiчнi вирази можна записати i для будь-якої резервної системи. Наприклад, ймовiрнiсть безвiдмовної роботи j -ї резервної системи $P_{cj}(t)$ i ймовiрнiсть появи в нiй вiдмови $Q_{cj}(t)$ будуть дорiвнювати

$$\begin{aligned} P_{cj}(t) &= \prod_{i=1}^n p_{ij}(t), \\ Q_{cj}(t) &= 1 - \prod_{i=1}^n p_{ij}(t). \end{aligned} \quad (5.3)$$

Ймовiрнiсть безвiдмовної роботи системи iз загальним резервуванням $P_{3,p}(t)$ запишеться як

$$P_{3,p}(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_{cj}(t)], \quad (5.4)$$

а ймовiрнiсть появи у нiй вiдмови

$$Q_{3,p}(t) = \prod_{j=1}^m [1 - P_{cj}(t)], \quad (5.5)$$

де значення величин $P_{cj}(t)$ визначаються iз (5.3). Будемо для простоти вважати, що елементи в основнiй i резервнiй системах характеризуються рiвномоймовiрними вiдмовами, тобто

$$\begin{aligned} p_{11}(t) &= \dots = p_{n1}(t); \quad p_{12}(t) = \dots = p_{n2}(t); \quad p_{1m}(t) = \dots = p_{nm}(t); \\ p_{n1}(t) &= \dots = p_{nm}(t). \end{aligned}$$

Нехай ймовiрнiсть їх безвiдмовної роботи дорiвнює $p(t)$, тодi з (5.4) з урахуванням (5.3) отримаємо

$$P_{s,p}(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - p^n(t)] = 1 - [1 - p^n(t)]^m. \quad (5.5)$$

Отриманий вираз є основним для оцінювання надійності технічних систем із загальним резервуванням, модель надійності яких відповідає структурній схемі на рис. 5.1, при виконанні умов рівномірних відмов компонентів, що входять до її складу.

5.3 Надійність при поелементному резервуванні

Модель надійності системи з поелементним резервуванням має вигляд рис. 5.2.

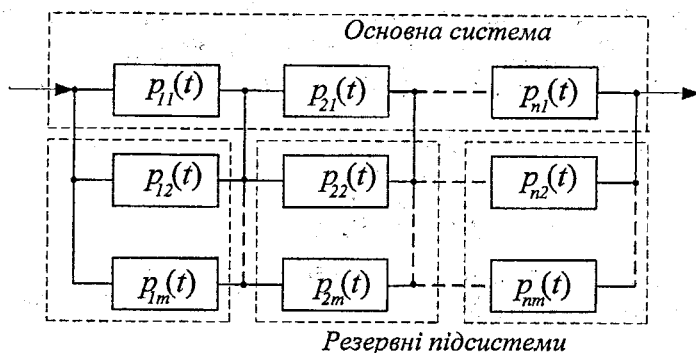


Рисунок 5.2 – Модель надійності системи з поелементним резервуванням

Модель складається з основної системи та $(m-1)$ резервних підсистем, кожна з яких містить n елементів. Ймовірність безвідмовної роботи основної системи та ймовірність появи в ній відмов можна виразити формулами (5.1) і (5.2). Ймовірність безвідмовної роботи j -ї резервуючої підсистеми $P_{qj}(t)$ з наявних n груп, що містять $(m-1)$ елементів, буде дорівнювати

$$P_{qj}(t) = 1 - \prod_{f=1}^m [1 - p_{jf}(t)],$$

а ймовірність появи у ній відмови

$$Q_{qj}(t) = \prod_{j=1}^m [1 - p_{jf}(t)].$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи з поелементним резервуванням $P_{n,p}(t)$ буде дорівнювати

$$P_{n,p}(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=1}^m [1 - p_{ij}(t)] \right\}, \quad (5.6)$$

а ймовірність появи у ній відмови

$$Q_{n,p}(t) = 1 - P_{n,p}(t).$$

Якщо всі елементи, що входять в основну і резервну системи, мають рівноймовірну інтенсивність відмов (як при загальному резервуванні), то вираз (5.6) приймає вигляд

$$P_{n,p}(t) = \{1 - [1 - p(t)]^m\}^n. \quad (5.7)$$

Отриманий вираз є основним для оцінювання надійності технічних систем з поелементним резервуванням.

5.4 Надійність при змішаному резервуванні

Модель надійності системи з змішаним резервуванням має вигляд рис. 5.3.

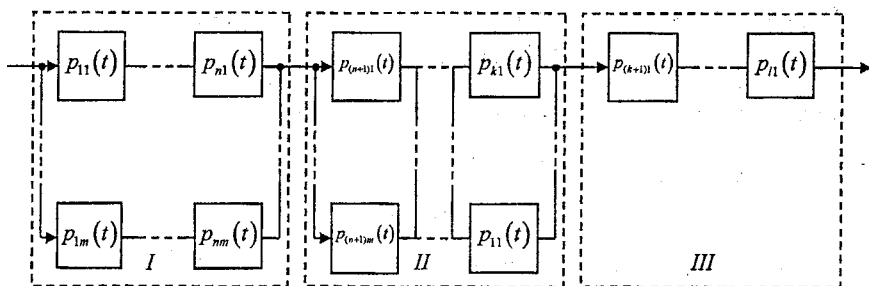


Рисунок 5.3 – Модель надійності системи з змішаним резервуванням

Виділимо групи I – III з однаковим методом резервування. Оцінимо надійність кожної з груп, а потім – надійність системи в цілому. Позначимо надійність виділених груп (I – III) відповідно $P_I(t)$, $P_{II}(t)$, $P_{III}(t)$, що дорівнюють

$$P_I(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_{ej}(t)],$$

$$P_{II}(t) = \prod_{j=n+1}^k \{1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_{Ij}(t)]\},$$

$$P_{III}(t) = \prod_{l=k+1}^I P_l(t).$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи зі змішаним резервуванням $P_{z,p}(t)$ запишеться

$$P_{z,p}(t) = P_I(t)P_{II}(t)P_{III}(t). \quad (5.8)$$

Відмітимо, що число резервуючих підсистем в групах в загальному випадку може і не збігатись. В розглянутому прикладі (рис. 5.3) вони дорівнювали величині $(m-1)$ і збігались.

Незалежно від складності ЕА модель її надійності може бути в більшості випадків подана комбінацією послідовних, паралельних і послідовно-паралельних з'єднань елементів.

З'ясуємо, який із способів резервування забезпечує більшу надійність технічних систем. Для цього кількісно порівняємо загальне і послелементне резервування. Раніше для них були наведені аналітичні вирази ймовірностей безвідмовної роботи (5.5) і (5.7).

Позначимо

$$p(t) = 1 - Q(t) \quad (5.9)$$

і (5.9) підставимо (5.5) і (5.7), в результаті отримаємо

$$P_{z,p}(t) = 1 - \{1 - [1 - Q(t)]^n\}^m, \quad (5.10)$$

$$P_{n,p}(t) = [1 - Q^m(t)]^n. \quad (5.11)$$

Розкладемо в ряд вирази (5.10) і (5.11) і обмежимо подальший розгляд лінійними членами ряду. Таке спрощення виправдане, оскільки для реальних промислових систем значення $p(t)$ близьке до одиниці, а $Q(t)$ відповідно мале. Приймаючи до уваги, що при цьому

$$[1 - Q(t)]^n \approx 1 - nQ(t),$$

з (5.10) і (5.11) відповідно одержимо

$$P_{z,p}(t) = 1 - [nQ(t)]^m; \quad Q_{z,p}(t) = [nQ(t)]^m;$$

$$P_{n,p}(t) = 1 - nQ^m(t); \quad Q_{n,p}(t) = nQ^m(t),$$

де $Q_{з,р}(t)$ і $Q_{н,р}(t)$ – відповідно ймовірності виникнення відмов в системах із загальним і поелементним резервуванням.

Взявши їх відношення, отримаємо

$$Q_{з,р}(t)/Q_{н,р}(t) = n^{m-1}.$$

Цей вираз показує, що поелементне резервування в n^{m-1} разів ефективніше загального резервування.

5.5 Надійність резервованих невідновлювальних систем

Вище були розглянуті основні методи структурного резервування ЕА і проведено їх оцінювання за ймовірностями безвідмовної роботи і виникнення відмов з позицій подання систем послідовними і паралельними (або їх комбінацією) моделями надійності. Визначимо тепер основні показники надійності з позицій можливих режимів навантаження, що можуть мати місце при експлуатації ЕА.

5.5.1 Надійність ЕА при пасивному резерзуванні з незмінним навантаженням і при навантаженому активному резерзуванні

В обох випадках основні показники надійності вказаних систем оцінюються одними і тими ж математичними виразами. Логічна схема надійності для даного випадку зображена на рис. 5.4 і складається з одного основного елементу (системи) та $(m-1)$ резервних елементів (систем).

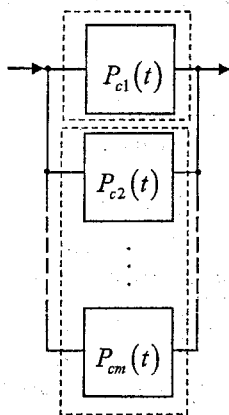


Рисунок 5.4 – Модель надійності системи при активному навантаженому резерзуванні

Вважатимемо, що перемикач, що вмикає резерв, має миттєву швидкодію та абсолютну надійність. Тоді при загальному резервуванні ймовірність безвідмовної роботи ЕА

$$P_{s,p}(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_{sj}(t)],$$

де $P_{sj}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи j -ї резервної системи протягом напрацювання $(0; t)$; m – число паралельно з'єднаних систем.

Якщо всі системи мають однакову надійність, а розподіл їх напрацювання до відмови описується експоненціальним законом, то

$$P_{s,p}(t) = 1 - [1 - \exp(-\lambda_0 t)]^m,$$

де λ_0 – інтенсивність відмов однієї з паралельно увімкннутих систем.

Середнє напрацювання ЕА до відмови

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P_{s,p}(t) dt = \frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{2\lambda_0} + \dots + \frac{1}{m\lambda_0} = T_{cp0} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{m}\right),$$

де $T_{cp0} = \frac{1}{\lambda_0}$ – середнє напрацювання до відмови однієї з систем.

Інтенсивність відмов ЕА $\lambda_{s,p}$ дорівнює

$$\lambda_{s,p}(t) = \frac{\lambda_0 m \exp(-\lambda_0 t) [1 - \exp(-\lambda_0 t)]^{m-1}}{1 - [1 - \exp(-\lambda_0 t)]^m}.$$

Якщо $\lambda_0 t \leq 0,1$, то для оцінювання основних показників надійності ЕА можна скористатися наближеними формулами:

$$P_{s,p}(t) \approx 1 - (\lambda_0 t)^m,$$

$$\lambda_{s,p}(t) \approx m \lambda_0^m t^{m-1}.$$

При поелементному резервуванні ймовірність безвідмовної роботи

$$P_{n,p}(t) = \prod_{i=1}^n \{1 - \prod_{j=1}^m [1 - p_{ij}(t)]\}.$$

де n – число ділянок резервування основної системи; p_{ij} – ймовірність безвідмовної роботи j -ї резервної системи (елементу).

Якщо елементи основної та резервної систем мають однакову надійність і експоненціальний закон розподілу напрацювання до відмови, то ймовірність безвідмовної роботи

$$P_{n,p}(t) = \{1 - [1 - \exp(-\lambda_0 t)]^m\}^n.$$

Середнє напруцювання ЕА до відмови дорівнює

$$T_{cp.n,p} = \int_n^{\infty} P_{n,p}(t) dt = \frac{(n-1)!}{\lambda_0^m} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{1}{\frac{i+1}{m} \left(\frac{i+1}{m} + 1 \right) \dots \left(\frac{i+1}{m} + n-1 \right)},$$

а інтенсивність відмов ЕА

$$\lambda_{n,p}(t) = \frac{mn\lambda_0 \exp(-\lambda_0 t) [1 - \exp(-\lambda_0 t)]^{m-1}}{1 - [1 - \exp(-\lambda_0 t)]^m}.$$

При $\lambda_0 t \leq 0,1$ мають місце наближені співвідношення

$$P_{n,p}(t) \approx (1 - \lambda_0 t)^n [1 + \lambda_0 t + (\lambda_0 t)^2 + \dots + (\lambda_0 t)^{m-1}]^n,$$

$$\lambda_{n,p}(t) \approx nm\lambda_0^m t^{m-1}.$$

Якщо при активному навантаженому загальному резервуванні необхідно врахувати надійність перемикача резерву, то ймовірність безвідмовної роботи ЕА $P_{s,p}(t)$ визначають за формулою

$$P_{s,p}(t) = 1 - [1 - p_n(t)P_{cf}(t)]^m,$$

де $p_n(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи перемикача протягом напруцювання $(0; t)$.

При поелементному резерзуванні ймовірність безвідмовної роботи з врахуванням надійності перемикача визначається виразом

$$P_{n,p}(t) = \{1 - [1 - p_n(t)P_{cf}(t)]^m\}^n.$$

5.5.2 Надійність ЕА при активному ненавантаженому резерзуванні

При ненавантаженому резерзуванні резервний елемент відімкнений і вмикається лише після виходу з ладу основного елементу. Логічна схема надійності для даного випадку зображена на рис. 5.5 і складається з одного основного елементу та $(m-1)$ резервних елементів, що відімкнені.

Вважатимемо, що перемикач резерву – ідеальний. У разі загального резервування ймовірність безвідмовної роботи з ЕА, що складається з одного основного та $(m-1)$ резервних пристроїв, визначається за формулою

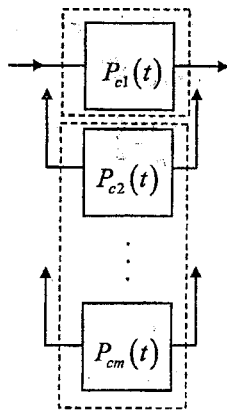


Рисунок 5.5 – Модель надійності системи при активному ненавантаженому резервуванні

$$P_c(t) = P_{m-2}(t) = \int_0^t P_m(t-\tau) f_{m-2}(\tau) d\tau, \quad (5.1)$$

де $P_{m-2}(t)$, $f_{m-2}(\tau)$ – відповідно ймовірність безвідмовної роботи і щільність розподілу напрацювання до відмови ЕА, що складається з одного основного і $(m-2)$ резервних пристроїв;
 $P_m(t-\tau)$ – ймовірність безвідмовної роботи m -го резервного пристрою в період напрацювання $(t-\tau)$ за умови, що до моменту часу τ цей пристрій знаходився в роботоздатному стані.

Якщо елементи основної та резервних систем мають однакову надійність і має місце експоненціальний закон розподілу напрацювання до відмови, то вираз (5.1) можна записати у вигляді

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_0 t) \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}, \quad (5.2)$$

а середнє напрацювання ЕА до відмови

$$T_{cp} = m / \lambda_0. \quad (5.3)$$

При поелементному резервуванні формули (5.2), (5.3) справедливі для окремих резервованих ділянок основної системи.

5.5.3 Надійність ЕА при активному полегшеному резервуванні

При ідеальному перемикачі резерву ймовірність безвідмовної роботи ЕА визначається виразом

$$P_c(t) = P_{m-2}(t) + \int_0^t P_m(\tau) P_m(t-\tau) f_{m-2}(\tau) d\tau,$$

де $P_m(\tau)$ – ймовірність безвідмовної роботи m -го резервного пристрою до моменту τ увімкнення його в роботу.

При експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови

$$P_c(t) = P_{m-2}(t) + \frac{C_{m-1}}{(m-1)!} \exp(-\lambda t) [1 - \exp(-\lambda_i t)]^{m-1},$$

де λ і λ_i – відповідно інтенсивності відмов працюючого основного пристрою та i -го пристрою, який знаходиться в полегшеному резерві;

$$C_{m-1} = \prod_{i=0}^{m-2} (i + \lambda / \lambda_i),$$

Середнє напрацювання системи до відмови

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{1}{1 + i\lambda_i / \lambda}.$$

5.5.4 Надійність ЕА при ковзному резервуванні

При ідеальному перемикачі резерву, якщо ЕА складається з n основних і одного резервного елемента, що знаходиться в навантаженому стані, то протягом часу роботи $(0; t)$ така ЕА може знаходитися в двох несумісних роботозданих станах: коли всі її $(n+1)$ елементи роботоздатні або хоча б один з них відмовив. Логічна схема надійності для даного випадку зображена на рис. 5.6.

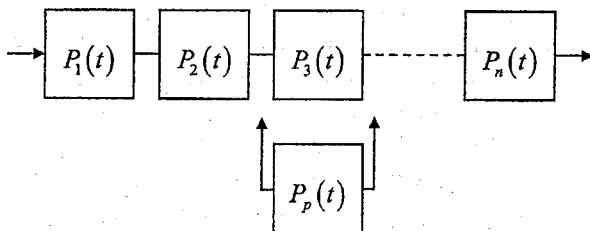


Рисунок 5.6 – Модель надійності системи при ковзному резервуванні

Ймовірність безвідмовної роботи ЕА, $P_c(t)$ оцінюють сумою ймовірностей безвідмовної роботи для кожного стану:

$$P_c(t) = P^{n-1}(t) \left[p(t) + n \int_0^t p_n(\tau) p(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \quad (5.4)$$

де $p(t)$, $p_n(\tau)$ і $p(t-\tau)$ – відповідно ймовірність безвідмовної роботи одного (із n) елемента основної системи, перемикача до моменту t увімкнення резервного елемента і резервного елемента з моменту τ його увімкнення; $f(\tau)$ – щільність розподілу напрацювання до відмови одного елемента основної системи.

При експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови вираз (5.4) набуває вигляду

$$P_c(t) = \left\{ 1 + n \frac{\lambda_1}{\lambda_n} [1 - \exp(-\lambda_n t)] \right\} \exp(-n \lambda_1 t),$$

де λ_1 і λ_n – відповідно інтенсивності відмов працюючого елемента та перемикача резерву.

5.6 Надійність резервованих відновлювальних систем

5.6.1 Ненавантажене резервування

Розглянемо ЕА, що складається з однієї основної і $(m-1)$ резервних підсистем, причому всі вони мають однакову надійність. Очевидно, що така система може перебувати в будь-якому з m станів: коли основна і резервні підсистеми роботоздатні, коли j підсистем нероботоздатні ($j = 1, 2, \dots, \leq m-1$) і коли всі m підсистем знаходяться в нероботоздатному стані. Позначимо ці стани відповідно індексами $0, j, m$ і відповідно до цього складемо схему станів ЕА (рис. 5.7). В стані 0 всі підсистеми є роботоздатними, але працює лише одна підсистема, оскільки використовується ненавантажене резервування. З інтенсивністю λ (λ – інтенсивність відмов однієї підсистеми) система перейде в стан 1 , коли одна з підсистем відмовила. Оскільки всі m підсистем ідентичні і для умов нормальної експлуатації ЕА необхідно і достатньо, щоб одна її підсистема була роботоздатною (в цей час її $m-1$ резервних підсистем відключені), то зрозуміло, що інтенсивності переходів системи з одного стану в інший будуть однаковими і дорівнювати λ . В останньому стані m всі підсистеми відмовили, ЕА знаходиться в нероботоздатному стані. При експлуатації ЕА

в умовах обмеженого відновлення, тобто коли при відмові більше однієї підсистеми вони не можуть бути одночасно відновлені, а існує черга на їх ремонт, система буде переходити з нероботоздатного стану в роботоздатний з інтенсивністю відновлень μ .

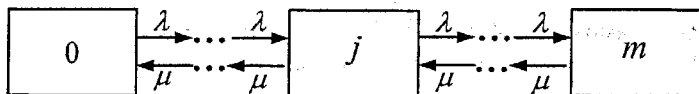


Рисунок 5.7 – Схема станів відновлювальної системи з ненавантаженим резервуванням

Для спрощення розрахунків вважатимемо, що перемикач резерву має ідеальні властивості (тобто вихід з ладу однієї з підсистем не викликає перерви в роботі ЕА), а підсистеми, що перебувають в стані ненавантаженого резерву, мають інтенсивність відмов $\lambda = 0$. Врахуємо також і те, що ЕА експлуатується в умовах обмеженого відновлення. З урахуванням зроблених припущень, відповідно до схеми станів (рис. 5.7) запишемо систему диференціальних рівнянь, що характеризують поведінку системи в часі.

Кожному стану ЕА відповідає диференціальне рівняння, складене за таким правилом: у лівій частині поміщають похідну за часом ймовірності даного стану $\frac{dP_j(t)}{dt}$, $j = 0, 1, \dots, m$, а в правій – члени рівняння, що утворюються множенням інтенсивностей переходу, пов'язаних з даним станом, на відповідні ймовірності цих станів. Знаки членів правої частини рівнянь визначаються напрямом інтенсивностей переходів: плюс, якщо стрілка направлена до стану, і мінус – якщо від нього. Отриману таким чином систему диференціальних рівнянь доповнюють умовою нормування, що полягає в тому, що сума ймовірностей всіх можливих станів дорівнює одиниці.

Система диференціальних рівнянь буде мати вигляд:

для стану 0

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t);$$

для стану j

$$\frac{dP_j(t)}{dt} = \lambda P_{j-1}(t) - (\lambda + \mu) P_j(t) + \mu P_{j+1}(t);$$

для стану m

$$\frac{dP_m(t)}{dt} = \lambda P_{m-1}(t) - \mu P_m(t);$$

умова нормування

$$\sum_{j=0}^m P_j(t) = 1,$$

де $P_j(t)$ – ймовірність перебування системи в станах $j = 0, 1, (j-1), j, (j+1), \dots, (m-1), m$.

Спільний розв'язок цих рівнянь дає можливість визначити функції готовності $K_z(t)$ та простою $K_n(t)$ системи.

В усталеному режимі експлуатації ЕА, тобто при $t \rightarrow \infty$, система диференціальних рівнянь вироджується в алгебраїчну

$$\left. \begin{aligned} -\lambda P_0 + \mu P_1 &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ -\lambda P_{j-1} - (\lambda + \mu)P_j + \mu P_{j+1} &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ -\lambda P_{m-1} + \mu P_m &= 0 \\ \sum_{j=0}^m P_j(t) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

Спільне розв'язання рівнянь (5.5) дозволяє визначити стаціонарні коефіцієнти готовності K_z та простою K_n .

Коефіцієнт готовності K_z дорівнює сумі ймовірностей роботоздатних станів системи

$$K_z = \sum_{j=0}^{m-1} P_j.$$

Коефіцієнт простою K_n дорівнює ймовірності нероботоздатного стану системи

$$K_n = P_m.$$

Для системи рівнянь (5.5)

$$K_n = \frac{1}{\sum_{j=0}^m \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^j},$$

і відповідно $K_z = 1 - K_n$.

5.6.2 Навантажене резервування

Розглянемо ЕА, що складається з рівнонадійних основної і $(m-1)$ резервних навантажених підсистем. Схема станів такої системи при обмеженому відновленні показана на рис. 5.8. Оскільки в даному випадку одночасно всі m підсистем знаходяться в роботі, то ми вже не можемо (як раніше) вважати інтенсивності їх відмов рівними нулю. Тому інтенсивності переходів ЕА із стану 0 в подальші будуть неоднаковими. Ця обставина відображена на схемі станів системи відповідними позначеннями над стрілками переходів. В стані 0 працюють всі m підсистем, тому з інтенсивністю $m\lambda$ система перейде в стан 1, коли одна з підсистем відмовила і т.д. Переходи ж системи μ з нероботоздатного стану в роботоздатні будуть як і раніше однаковими через ідентичність підсистем.

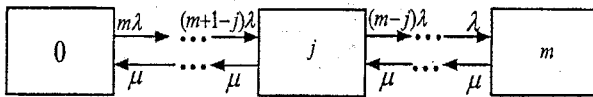


Рисунок 5.8 – Схема станів системи з навантаженим резервом

Система диференціальних рівнянь в даному випадку буде мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_0}{dt} &= -m\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dP_j(t)}{dt} &= (m+1-j)\lambda P_{j-1}(t) - (m\lambda - j\lambda + \mu)P_j(t) + \mu P_{j+1}(t) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dP_m(t)}{dt} &= \lambda P_{m-1}(t) - \mu P_m(t) \\ \sum_{j=0}^m P_j(t) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

В усталеному режимі експлуатації ЕА ($t \rightarrow \infty$), система диференціальних рівнянь (5.6) вироджується в алгебраїчну

$$\left. \begin{aligned} -m\lambda P_0 + \mu P_1 &= 0 \\ (m+1-j)\lambda P_{j-1} - (m\lambda - j\lambda + \mu)P_j + \mu P_{j+1} &= 0 \\ \lambda P_{m-1} - \mu P_m &= 0 \\ \sum_{j=0}^m P_j &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (5.7) одержимо вирази для коефіцієнтів
готовності та простою ЕА.

Часто число нероботоздатних станів значно менше числа роботоздатних. При цьому зручніше обчислювати коефіцієнт простою

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

Коефіцієнт готовності $K_z = 1 - K_n$.

5.7 Мажоритарне резервування

Мажоритарне резервування є одним з різновидів структурної надлишковості. Застосовується воно для резервування цифрових систем. При мажоритарному резервуванні сигнал в двійковому коді (0 або 1) подається на непарне число ідентичних елементів. З виходів цих елементів сигнали надходять на вхід так званого елемента прийняття рішення, призначенням якого є виділення з групи сигналів (серед яких можуть бути і помилкові) безпомилкового сигналу. Елемент прийняття рішення видає сигнал (0 або 1) на своєму виході тільки в тому випадку, якщо на його вхід надійшли аналогічні сигнали від більшості ідентичних елементів, тобто його вихідний сигнал завжди приймає значення, рівне значенню більшості вхідних сигналів.

В загальному випадку елемент прийняття рішення реалізує функцію відображення вхідних станів на множину вихідних. Найпростіший і найбільш розповсюджений вид цієї функції – закон більшості або

мажоритарний закон. Елемент прийняття рішення, що реалізує мажоритарний закон, називають мажоритарним елементом. Найбільше застосування отримали мажоритарні елементи, що реалізують функцію "2 з 3". В цих елементах значення вихідного сигналу дорівнює значення двох однакових входних сигналів. Окрім цього, існують мажоритарні елементи, що працюють за законом "3 з 5", "4 з 7" і т.д. Виконують мажоритарні елементи зазвичай з логічних елементів "І" та "АБО". Структурна схема надійності системи з мажоритарним резервуванням та схема мажоритарного елементу "2 з 3" на логічних елементах наведені на рис. 5.9. Мажоритарний елемент працює за виразом $z = x_1x_2 + x_2x_3 + x_1x_3$.

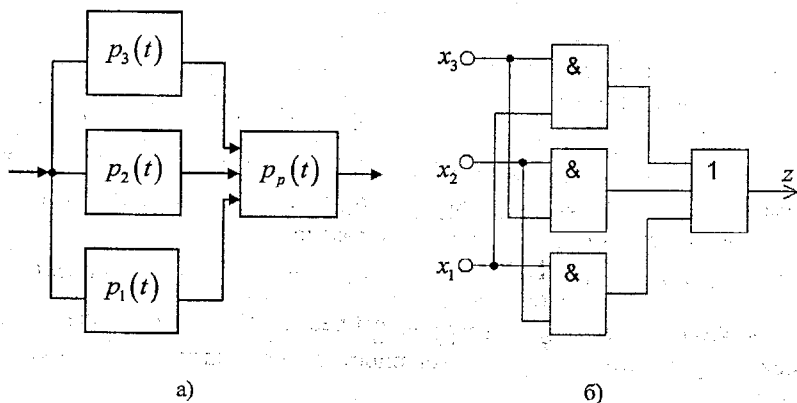


Рисунок 5.9 – Структурна схема системи з мажоритарним резервуванням (а), схема мажоритарного елементу "2 з 3" на логічних елементах (б)

Для визначення ймовірності системи з мажоритарним резервуванням, наведеної на рис. 5.9, запишемо таблицю істинності (табл. 5.1), що відображає всі можливі стани елементів. Стани відмови та роботоздатності в ній відповідно позначені символами 0 і 1. Кількість можливих станів системи $2^3 = 8$. Будемо вважати, що елемент прийняття рішень має ідеальну надійність, тобто $p_p(t) = 1$. Сигнал на виході елементу прийняття рішення приймає значення, що визначається більшістю входних сигналів з ідентичних елементів з ймовірностями безвідмовної роботи $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$. Тобто система з мажоритарним резервуванням "2 з 3" буде в роботоздатному стані (на виході елементу $p_p(t)$ сигнал 1), якщо в роботоздатному стані знаходяться два або більше елементів $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$.

Таблиця 5.1 – Таблиця істинності мажоритарного елементу "2 з 3"

Стан	$p_1(t)$	$p_2(t)$	$p_3(t)$	$p_p(t)$
1	0	0	0	0
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	1
5	1	0	0	0
6	1	0	1	1
7	1	1	0	1
8	1	1	1	1

З табл. 5.1 видно, що є лише чотири роботоздатних стани системи (сигнал на виході елементу $p_p(t)$ 1). Ймовірність безвідмовної роботи системи $P_M(t)$ буде визначатися сумою ймовірностей знаходження системи в цих роботоздатних станах. Вибравши з таблиці істинності лише рядки роботоздатних станів системи, одержимо

$$P_M(t) = q_1(t)p_2(t)p_3(t) + p_1(t)q_2(t)p_3(t) + p_1(t)p_2(t)q_3(t) + p_1(t)p_2(t)p_3(t),$$

де $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$ – ймовірності безвідмовної роботи ідентичних елементів; $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$ – ймовірності відмов відповідних елементів, $q_i(t) = 1 - p_i(t)$.

Якщо всі елементи є рівнонадійними, $p_1(t) = p_2(t) = p_3(t) = p(t)$, $q_1(t) = q_2(t) = q_3(t) = q(t)$, то ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P_M(t) = p^2(t)[3 - 2p(t)].$$

Якщо елемент прийняття рішень не ідеальний, тобто $p_p(t) \neq 1$, то

$$P_M(t) = p_p(t)p^2(t)[3 - 2p(t)].$$

Якщо логічні схеми надійності елементів не ідентичні, то мажоритарний закон неможливо застосовувати. В цьому випадку використовують зважені входи елементу прийняття рішення. Його роботу описують пороговою функцією алгебри логіки. Елемент, що реалізує цю функцію називається *пороговим*. Ваги входів порогового елементу вибирають в залежності від ймовірності відмови відповідної логічної схеми. Логічній схемі з більшою ймовірністю відмови відповідає менша вага, а більш надійній схемі – більша вага.

5.8 Оптимальне резервування ЕА

Необхідність в оптимальному резервуванні виникає, коли потрібно забезпечити заданий рівень надійності ЕА за наявності обмежень, наприклад, за габаритами, масою, споживаній потужності, вартості і т. ін. Будь-яке з обмежень, накладене умовами завдання, називають *витратами*. Розрізняють два найбільш поширених роди завдань оптимального резервування. *Завдання першого роду* формулюються таким чином: визначити необхідну кількість резервних підсистем, що забезпечують задане значення показників надійності системи при мінімально можливих витратах. Такого роду завдання називаються *прямими*.

Завдання другого роду формулюються так: визначити необхідну кількість резервних підсистем, що забезпечують максимально можливе значення показників надійності системи при витратах, що не перевищують наперед встановлені. Такі завдання називаються *зворотними*.

У прямих завданнях домінуюче значення мають витрати, в зворотних – показники надійності. Природно, що між вказаними граничними класами екстремальних завдань існує і цілий ряд проміжних.

Завдання оптимального резервування (на відміну від всіх інших завдань, пов'язаних з надмірністю) є найбільш поширеними в практиці конструювання ЕА, оскільки в реальних ситуаціях не виникає зазвичай завдань, не пов'язаних з обмеженнями. Останні можуть бути фізичними, технічними, техніко-економічними і т.ін. При їх вирішенні доводиться враховувати ряд умов. Наприклад, для встановлення оптимального числа резервних підсистем ЕА останню намагаються розділити на окремі блоки, близькі за показниками надійності. Чим більше буде таких блоків, тим менше вони міститимуть елементів, тим менше буде ймовірність виникнення відмов в резервованих частинах ЕА, але більше буде резервованих підсистем.

Тут ми маємо як мінімум два обмеження: технічного характеру, оскільки число блоків обмежене реальною конструкцією, і економічного характеру, оскільки збільшення числа резервних підсистем прямо пов'язане з подорожчанням конструкції. Відмітимо, що витрати на виробництво і експлуатацію ЕА зростають приблизно лінійно із зростанням числа резервних підсистем. Більш того, на практиці може статися так, що збільшення числа резервних підсистем призведе до зниження показників надійності ЕА. Це може відбутися через велику кількість перемикальних пристроїв (що вмикають резервні кола), якщо

вони мають недостатню надійність. Розробник повинен мати це на увазі, щоб вибрати оптимальний варіант в умовах накладених обмежень.

Вирішення задач оптимального резервування базується на математичних методах оптимізації. До їх числа відносяться: методи диференціальних рівнянь, невизначених множників Лагранжа, лінійного і нелінійного програмування, перебору та цілий ряд інших, вибір яких визначається конкретними практичними завданнями.

Контрольні запитання

1. Що називають резервуванням? Яка його мета?
2. Наведіть класифікацію видів резервування.
3. Що визначає кратність резервування?
4. Який спосіб резервування забезпечує більшу надійності при однаковості інших умов?
5. В чому полягає відмінність активного та пасивного резервування?
6. Як здійснюється ковзне резервування?
7. Як режим навантаження резервних елементів впливає на надійність системи?
8. Наведіть вираз для ймовірності безвідмовної роботи системи з навантаженим резервуванням.
9. Наведіть вираз для ймовірності безвідмовної роботи системи з ненавантаженим резервуванням.
10. При оцінюванні надійності яких систем необхідно складати схеми станів системи?
11. Як визначити коефіцієнт готовності системи з ненавантаженим резервуванням?
12. За яким правилом складається система диференціальних рівняння, що характеризує поведінку резервованої відновлювальної системи в часі?
13. В чому полягає відмінність між функцією готовності та коефіцієнтом готовності?
14. Скільки є можливих станів відновлювальної системи з кратністю резервування k ?
15. Поясніть принцип мажоритарного резервування.
16. В чому полягає оптимальне резервування?

6 ІНФОРМАЦІЙНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ

Один з найбільш зручних і гнучких методів підвищення надійності цифрових ЕА та систем є введення *інформаційної надлишковості*. Інформаційні методи дозволяють підвищити надійність при короткочасних сеансах роботи ЕА, коли фізичні ресурси надійності майже не витрачаються, корегувати роботу при збоях, що обумовлені різного роду завадами і мають вирішальне значення для забезпечення нормального функціонування цифрових систем управління та телекомунікаційних систем передавання даних.

Інформаційна надлишковість може бути або *часовою*, або *просторовою*.

Часова надлишковість характеризується багаторазовістю розв'язання задач. Одержані результати порівнюються, і якщо вони збігаються, то робиться висновок, що задача розв'язана правильно. Часова надлишковість вводиться в ЕОМ програмним шляхом.

Просторова надлишковість полягає в подовженні кодів чисел, в які вводять додаткові контрольні розряди. Одержані надлишкові коди називають *коригуючими кодами* або *завадостійкими кодами*. Переваги коригуючих кодів такі: а) виправлення помилок без перерв в роботі; б) спосіб кодування та коригуючий код вибираються в залежності від алгоритму функціонування даного цифрового пристрою, що дає можливість узгодження властивостей коригуючих кодів із характеристиками потоку помилок пристрою та зменшення надлишковості.

Ідея виявлення і виправлення помилок з використанням коригуючих кодів полягає в такому. Всю множину N_0 *вихідних слів пристрою* розбивають на підмножину N_0 *дозволених кодових слів*, тобто таких слів, які можуть з'явитися в результаті правильного функціонування пристрою, і підмножину $(N_0 - N_0)$ *заборонених кодових слів*, тобто таких слів, які можуть з'явитися тільки в результаті помилки. Слово, що з'явилося на виході пристрою y_j піддають аналізу: якщо слово y_j відноситься до підмножини дозволених слів, то воно вважається правильним результатом і декодуєчий пристрій переводить його у відповідне вихідне слово y_0 ; якщо ж слово y_j виявляється елементом підмножини заборонених слів, то це свідчить про наявність помилки. Для виправлення виявлених помилок заборонені кодові слова розбиваються на групи: кожному дозволеному кодовому слову відповідає одна така група. При декодуванні виявлене на

виході пристрою заборонене кодове слово замінюється дозволеним словом, до групи якого воно входить. Тим чином помилка виправляється. При цьому робота декодуючого пристрою ускладнюється.

Процес побудови корегуючого коду складається з таких етапів:

Етап 1 – виявлення найбільш ймовірних помилок для заданого способу функціонування пристрою або найбільш небезпечних в умовах його використання.

Етап 2 – формування надлишкової множини вихідних слів, розділення цієї множини на підмножини дозволених і заборонених кодових слів і утворення декодуючих груп.

Етап 3 – розроблення раціонального способу декодування вихідних слів, що дозволяє реалізувати відносно нескладними технічними засобами виявлення і виправлення помилок.

Етап 4 – організація множини вхідних слів так, щоб задане перетворення, виконане над будь-яким словом цієї множини, дало на виході слово, що належить до підмножини дозволених кодових слів.

При побудові цифрових ЕА важливим є питання про раціональний вибір рівня, на якому слід застосовувати коригуючі коди. ЕОМ, наприклад, складається з окремих пристроїв: запам'ятовуючого, арифметичного, зовнішніх та інших, в кожному з яких інформація зазнає певні зміни. Ці пристрої складаються з окремих блоків – суматорів, регістрів і под., які набрані з простих логічних елементів (тригерів, схем І, АБО, НІ і т. ін.). Коригуючі коди можна застосовувати на будь-якому з цих рівнів структури машини. Проте результати при цьому будуть різні. Оптимальний вибір коригуючих кодів визначається функціональним призначенням пристроїв та режимом їх експлуатації.

В наш час відомо багато завадостійких кодів, що дозволяють виявляти та виправляти помилки. Коригуючі коди можна поділити на два великих класи – *блокові* та *згорткові*. До *блокових* відносяться такі коди, у яких кодування та декодування здійснюється в межах блоку, що складається з певної кількості кодових символів. До *згорткових* (*неперервних*) відносять такі коди, в яких процеси кодування та декодування мають неперервний характер, без явного виділення меж при формуванні кодового сигналу.

Блокові коди, в свою чергу поділяються на *лінійні* та *нелінійні*. До лінійних відносяться такі коди, в яких формування блоків, тобто кодування проводиться з використанням лінійних операцій над інформаційними символами. В іншому випадку коди відносяться до нелінійних.

Лінійні коди поділяються на *систематичні* та *несистематичні*. В систематичних кодах інформаційні символи на виході кодера подані в явному вигляді. Належність до систематичного або несистематичного коду визначається вибором алгоритму кодування.

Значну частину лінійних кодів займають *циклічні коди*, які знаходять широке застосування в комп'ютерних та телекомунікаційних системах. *Циклічним кодом* називають лінійний код, в якому дозволені кодові комбінації можуть бути одержані шляхом циклічного зсуву інших дозволених кодових комбінацій. Ідея побудови циклічного коду базується на використанні простих неприведених поліномів. Перевагою циклічних кодів є простота кодування та декодування. До циклічних кодів відноситься доволі велика кількість завадостійких кодів, серед яких найбільш відомими є:

- *коди Хеммінга*, запропоновані Хеммінгом у 1950 році;
- *коди Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема (БЧХ)*, які характеризуються високою коректувальною властивістю, запропоновані Хоквінгемом в 1959 р. та Боузом і Чоудхурі – в 1960 р.;
- *коди Файра* (1959 р.), що виправляють пакети помилково прийнятих кодових символів.
- *коди Ріда-Соломона* (1960 р.) – недвійкові циклічні коди, що дозволяють виправляти помилки в блоках даних.

Згорткові коди, як і блокові, можна розділити на *систематичні* та *несистематичні*. Перші найчастіше декодуються відносно простим методом – пороговим, а другі – з використанням алгоритму послідовного декодування і алгоритму Вітербі. В наш час несистематичні згорткові коди, декодовані за алгоритмом Вітербі, знаходять широке застосування в системах зв'язку.

6.1 Основні характеристики коригуючих кодів

1. Число інформаційних, контрольних розрядів та довжина коду.

Кодові комбінації коригуючих кодів складаються із двох частин: інформаційної та контрольної. При довжині коду n розрядів число інформаційних розрядів дорівнює k , а число контрольних розрядів $r = n - k$.

2. Число дозволених і заборонених кодових комбінацій.

Для двійкового n -розрядного коду загальне число можливих кодових комбінацій визначається значенням:

$$N_0 = 2^n$$

Число дозволених кодових комбінацій при наявності k інформаційних розрядів у коді дорівнює:

$$N_k = 2^k.$$

Число заборонених кодових комбінацій дорівнює:

$$N_3 = N_0 - N_k = 2^n - 2^k,$$

$$N_0/N_k = 2^n/2^k = 2^{n-k} = 2^r.$$

3. Надлишковість коду.

Надлишковістю коригуючого коду називають величину:

$$\chi = \frac{r}{n} = \frac{n-k}{n} = 1 - \frac{k}{n}.$$

Надлишковість показує яку частину загального числа символів кодової комбінації складають контрольні символи.

4. Мінімальна кодова відстань.

Для того, щоб можна було виявляти і виправляти помилки, дозволена кодова комбінація повинна якнайбільше відрізнятися від забороненої. Якщо помилки є незалежними, то ймовірність перетворення однієї кодової комбінації в іншу буде тим менша, чим більшим числом символів вони розрізняються.

Якщо інтерпретувати кодові комбінації як точки в просторі, то відмінність виражається в близькості цих точок, тобто у відстані між ними.

Кількість розрядів (символів), якими відрізняються дві кодові комбінації, можна прийняти за кодову відстань між ними. Для визначення цієї відстані потрібно скласти дві кодові комбінації за модулем 2 і підсумувати число одиниць в отриманій сумі. Наприклад, кодова відстань між комбінаціями 01010001 та 00111001 становить $d = 3$.

Особливу важливість для характеристики коригуючих властивостей коду має мінімальна кодова відстань d_{min} , що також називають відстанню Хеммінга. Мінімальна кодова відстань d_{min} визначається шляхом додавання за модулем 2 всіх дозволених кодових комбінацій, і дорівнює мінімальній кількості розрядів, якими відрізняються будь-які дозвалені комбінації коригуючого коду.

У ненадлишковому коді всі комбінації є дозволеними, його мінімальна кодова відстань дорівнює одиниці, $d_{min} = 1$. Досить

спотворитися одному символу, щоб замість переданої комбінації була прийнята інша дозволена комбінація. Щоб код мав коригуючі властивості, необхідно ввести в нього надлишковість, що забезпечувала б мінімальну кодову відстань між будь-якими двома дозволеними комбінаціями не менше двох, $d_{min} > 2$.

Мінімальна кодова відстань є найважливішою характеристикою завадостійких кодів, що вказує на гарантоване число помилок, що код здатен виявляти та виправляти.

5. Число (кратність) помилок, що здатен виявляти та виправляти код.

Число помилок, що здатен виявляти та виправляти код характеризує коригуючі властивості коду. Для двійкових кодів можливі помилки, що полягають в дискретних спотвореннях, при яких одиниця переходить у нуль ($1 \rightarrow 0$) або нуль переходить в одиницю ($0 \rightarrow 1$). Таке спотворення лише в одному розряді кодової комбінації називають *одиночною помилкою* (одиничним спотворенням). *Кратністю помилки* g називають число розрядів кодової комбінації, в яких під дією завад одні символи виявилися заміненими на інші. Наприклад, при помилці з кратністю $g=2$ в двох розрядах кодової комбінації відбулися спотворення символів.

Кратність помилок, що здатен виявляти код

$$g_{вияв} = d_{min} - 1.$$

У цьому випадку ніяка помилка з кратністю, що менше або дорівнює $g_{вияв}$ не може перевести одну дозволена кодова комбінація в іншу дозволена.

Кратність помилок, що здатен виправляти код

$$g_{випр} = (d_{min} - 1) / 2.$$

Так, наприклад, код з мінімальною кодовою відстанню $d_{min} = 2$ здатен лише виявляти однократні помилки. Код з мінімальною кодовою відстанню $d_{min} = 3$ здатен виявляти двократні помилки та виправляти однократні.

6.2 Код з перевіркою на парність

Код з перевіркою на парність є одним з найбільш простих та поширених завадостійких кодів. Одержується він шляхом додавання до k інформаційних розрядів одного контрольного розряду, значення якого

вибирають виходячи з умов парності кількості одиниць в результуючому кодовому слові. Тобто сума всіх розрядів дозволеної кодової комбінації за модулем 2 повинна дорівнювати нулю. Код з перевіркою на парність дозволяє виявляти одиничну помилку при прийманні кодової комбінації, тому що така помилка порушує умову парності, переводячи дозволу комбінацію в заборонену.

Якщо позначити інформаційні розряди символами $x_1, x_2, \dots, x_k$, то значення контрольного розряду визначається виразом

$$r_1 = x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_k.$$

Сума всіх розрядів $x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_k \oplus r_1 = 0$.

В цьому випадку підмножини дозволених та заборонених кодових слів ділять повну множину $N = 2^{k+1}$ слів на дві однакові частини.

$$\text{Надлишковість коду } \chi = \frac{1}{k+1}.$$

Мінімальна кодова відстань коду $d_{\min} = 2$. Код здатен виявляти однократні помилки, а також помилки більш високої кратності, якщо кратність непарна (3, 5, ...). Помилки з парними кратностями (2, 4, ...) кодом не виявляються.

Детально розглянемо властивості коду на прикладі.

Для чотирирозрядного інформаційного коду виду $x_4 x_3 x_2 x_1$ код з перевіркою на парність буде мати вигляд $x_4 x_3 x_2 x_1 r_1$, де x_4, x_3, x_2, x_1 — інформаційні розряди, r_1 — контрольний розряд. Позиція, в якій знаходиться контрольний розряд не має значення. Звичайно його ставлять в кінці кодового слова після всіх інформаційних символів. Наприклад, для інформаційного коду 0010 код з перевіркою на парність буде 00101.

Схема кодера та декодера коду наведені на рис. 6.1. На схемі логічний елемент DD1 виконує операцію додавання за модулем 2.

Якщо всі розряди коду є рівнонадійними і ймовірність помилки (відмови) в одному розряді дорівнює q_i , то ймовірність помилки в коді довжиною n визначається виразом

$$Q_{\text{пом}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) = 1 - (1 - q_i)^n.$$

Ймовірність відсутності помилки (ймовірність безвідмовної роботи коду)

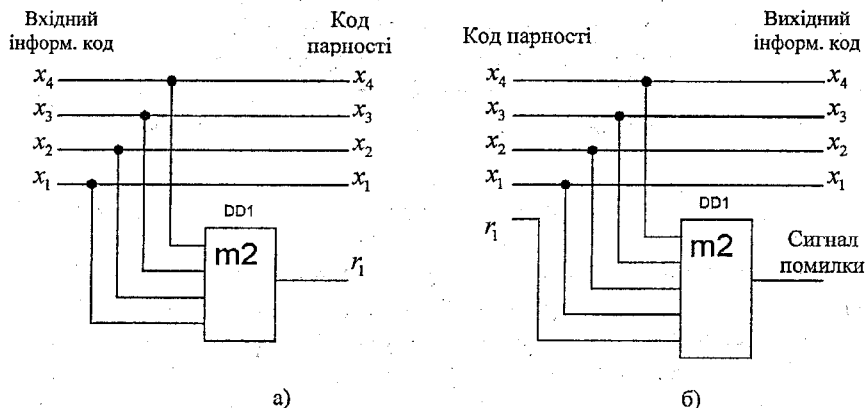


Рисунок 6.1 – Схема кодера (а) та декодера (б) кода з перевіркою на парність

$$P = 1 - Q_{\text{пом}} = \prod_{i=1}^n p_i = p_i^n,$$

де p_i – ймовірність відсутності помилки в одному розряді коду (ймовірність безвідмовної роботи одного розряду коду), $p_i = 1 - q_i$.

Наприклад, якщо $q_i = 0,01$ (1%), то для чотирирозрядного інформаційного коду $Q'_{\text{пом}} = 1 - (1 - 0,01)^4 = 0,039$ (3,9%). Для коду з перевіркою на парність кількість розрядів збільшилася до 5, тому ймовірність помилки в коді також збільшиться, $Q''_{\text{пом}} = 1 - (1 - 0,01)^5 = 0,049$ (4,9%), однак наявність помилки тепер можна визначити.

В першому випадку ймовірність невиявленої помилки дорівнює ймовірності помилки в коді, в нашому прикладі $Q'_{\text{н.пом}} = Q'_{\text{пом}} = 3,9\%$. В другому випадку код з перевіркою на парність дозволяє виявляти всі помилки непарної кратності (1, 3, 5). Помилки парної кратності (2, 4) не виявляються, тому ймовірність невиявленої помилки дорівнює сумі ймовірностей цих помилок.

Ймовірність помилки кратністю g визначається виразом

$$Q_{\text{пом},g} = C_n^g q_i^g (1 - q_i)^{n-g},$$

де $C_n^g = \frac{n!}{g!(n-g)!}$ – кількість комбінацій по g з n , q_i – ймовірність

помилки в одному розряді, n – довжину коду.

Необхідно зауважити, що чим більша кратність помилки, тим значно менша ймовірність її появи. Так для п'ятирозрядного коду з перевіркою на

парність, що ми розглядаємо, ймовірність однократної помилки $Q_{\text{пом.1}} = 4,8 \%$, ймовірність помилки з кратністю два $Q_{\text{пом.2}} = 0,097 \%$, ймовірність помилки з кратністю три $Q_{\text{пом.3}} = 0,001 \%$ і т.д.

Ймовірність виявленої помилки для коду з перевіркою на парність в нашому прикладі

$$Q_{\text{н.пом}}'' = \frac{5!}{2!(5-2)!} \cdot 0,01^2 (1-0,01)^{5-2} + \frac{5!}{4!(5-4)!} \cdot 0,01^4 (1-0,01)^{5-4} = 0,09703 \%.$$

Таким чином, код з перевіркою на парність, незважаючи на свою простоту, має гарні виявляючі властивості (в нашому прикладі ймовірність виявлення помилки 99,9 %), що і обумовлює його широке використання.

Для того, щоб код міг не лише виявляти, але й виправляти помилки, необхідно збільшити кількість контрольних розрядів, тобто надлишковість коду.

6.3 Коди з повторенням

В кодах з повтореннями необхідна надлишковість створюється багатократним повторенням одного і того ж слова. Якщо вхідне інформаційне слово складається з n_0 символів, то до слова добавляється $(k_{\text{повт}} - 1) \cdot n_0$ контрольних розрядів, де $k_{\text{повт}}$ — число повторень інформаційного слова. Загальна довжина коду $n = n_0 k_{\text{повт}}$. Використання цих кодів дає можливість виявляти і виправляти помилки.

Слово y_j на виході кодера коду з повторенням є $k_{\text{повт}}$ -кратним повторенням слова y_0 на його вході. Наприклад, для інформаційного коду 0110 код з повторенням з кратністю 3 буде 0110 0110 0110.

За відсутності помилок будь-яка з $k_{\text{повт}}$ частин слова y_j може бути взята за результат. Завдання декодуючого пристрою в цьому випадку зводиться до виділення однієї частини слова y_j . За наявності випадкових помилок деякі з частин, що входять в слово y_j , відрізняються від слова y_0 . Порівнюючи між собою $k_{\text{повт}}$ частин слова y_j , можна виявити помилки, якщо число однакових помилок менше $k_{\text{повт}}$. Порівняння частин слова і вироблення сигналу помилки (при незбіганні їх) виконує декодуючий пристрій. Якщо ймовірність помилки в одній частині слова невелика і можна припустити, що велика частина з $k_{\text{повт}}$ частин слова є правильна, то помилки можуть бути легко виправлені. Для цього досить прийняти за правильний результат ті значення розрядів, що зустрічаються в словах більшу кількість разів, використовуючи мажоритарні елементи.

Коригуючі властивості коду визначаються кількістю повторень.

Для виявлення всіх помилок кратності $g_{\text{вияв}}$ необхідно, щоб кількість повторень була $k_{\text{повт}} = g_{\text{вияв}} + 1$.

Для виправлення всіх помилок кратності $g_{\text{випр}}$ необхідне число повторень $k_{\text{повт}} = 2g_{\text{випр}} + 1$.

Вибираючи достатньо велике значення $k_{\text{повт}}$, можна отримати скільки завгодно високу надійність при використанні кодів з повторенням.

Окрім позитивних властивостей коди з повтореннями мають два істотні недоліки: 1) підвищення надійності досягається введенням відносно дуже великої інформаційної надлишковості; 2) коди з повтореннями корегують тільки випадкові помилки (збої) в роботі пристрою. Якщо пристрій дає систематичну помилку (відмову), то ніякою кількістю повторень ця помилка не може бути виявлена, а тим більше виправлена.

У багатьох випадках можна побудувати коди, що забезпечують такий же ефект корегування при значно меншій надлишковості, ніж коди з повтореннями.

6.4 Коди Хеммінга

Побудова кодів Хеммінга базується на принципі перевірки на парність інформаційних символів. Код Хеммінга дозволяє виявляти двократні помилки або виправляти однократні помилки, мінімальна кодова відстань коду $d_{\text{мін}} = 3$. У такому коді до інформаційних символів двійкового k -розрядного коду додаються r контрольних символів. Довжина коду $n = k + r$. Кількість контрольних символів повинна бути достатня, щоб відобразити число $n+1$, оскільки помилка може бути в одному з n розрядів, плюс ще одна комбінація, що визначає відсутність помилки. Число контрольних розрядів вибирають з умови $2^r - 1 \geq n$. Для кожного числа контрольних символів $r = 3, 4, 5, \dots$ існує класичний код Хеммінга з маркуванням (n, k) , тобто $-(7, 4), (15, 11), (31, 26)$ тощо. При інших значеннях числа інформаційних символів k одержують так звані зрізані укорочені коди Хеммінга. Контрольні символи розміщують в розрядах, номери яких визначають як 2^i , де $i = 0, 1, 2, 3, \dots$, тобто в позиціях 1, 2, 4, 8, і т.д. На інших позиціях розміщують інформаційні символи.

Наприклад, для інформаційного чотирирозрядного коду $x_4 x_3 x_2 x_1$ кількість контрольних розрядів $r = 3$, код Хеммінга буде мати вигляд $x_4 x_3 x_2 r_3 x_1 r_2 r_1$, де x_i – інформаційні розряди, r_i – контрольні розряди.

Значення контрольних розрядів визначають шляхом додавання за модулем 2 інформаційних символів, що знаходяться в позиціях, двійкові

номери яких мають одиницю в позиції, що визначається номером контрольного розряду. Так, як це видно з табл. 6.1, для коду Хеммінга (7, 4) при визначенні значення першого контрольного розряду r_1 беруть інформаційні символи, що знаходяться в позиціях 3, 5, 7, тобто x_1, x_2, x_4 . Для визначення значення другого контрольного розряду r_2 – інформаційні символи, що знаходяться в позиціях 3, 6, 7, тобто x_1, x_3, x_4 . І так далі. Контрольні розряди розміщують та їх значення визначають таким чином, щоб у випадку виникнення однократної помилки, що призводить до порушення умов парності, при декодуванні можна було б визначити розряд, в якому відбулася помилка.

Таблиця 6.1 – Визначення позицій для розрахунку контрольних розрядів коду Хеммінга

№	r_3	r_2	r_1	Позначення позицій
1	0	0	1	r_1
2	0	1	0	r_2
3	0	1	1	x_1
4	1	0	0	r_3
5	1	0	1	x_2
6	1	1	0	x_3
7	1	1	1	x_4

Значення контрольних розрядів визначаються виразами

$$r_1 = x_1 \oplus x_2 \oplus x_4,$$

$$r_2 = x_1 \oplus x_3 \oplus x_4,$$

$$r_3 = x_2 \oplus x_3 \oplus x_4.$$

Схема кодера коду Хеммінга наведена на рис. 6.2. Логічні елементи DD1 – DD3 виконують додавання за модулем 2 (логічна операція XOR – «Виключне АБО»).

Так, наприклад, для інформаційного коду 0100 код Хеммінга буде мати вигляд 0101010.

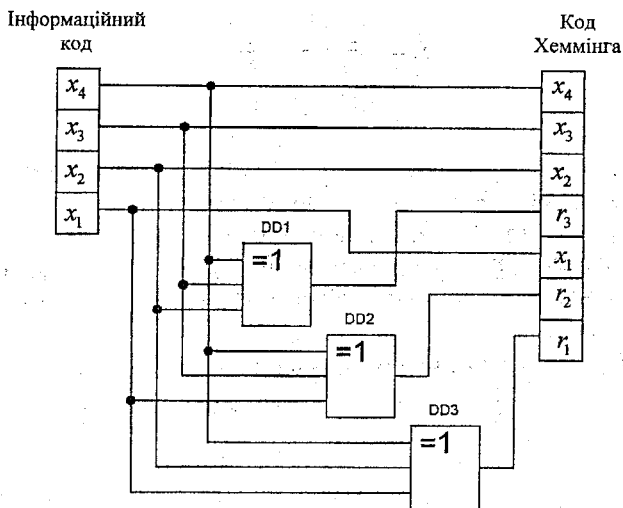


Рисунок 6.2 – Кодер коду Хеммінга

Критерієм відсутності помилки в коді Хеммінга є рівність нулю синдрому помилки S , значення якого визначає декодер коду (рис. 6.3) шляхом перевірки на парність відповідних інформаційних та контрольних розрядів кодової групи.

Розрядність синдрому помилки S визначається кількістю контрольних розрядів коду r .

Число можливих значень синдрому визначається виразом

$$S = 2^r.$$

При визначенні першого розряду синдрому виконується перевірка на парність першого контрольного розряду та всіх інформаційних розрядів, що до нього відносяться. При визначенні другого розряду синдрому – другого контрольного розряду та відповідних інформаційних розрядів. І так далі.

При кількості контрольних розрядів $r = 3$ синдром помилки має три розряди $S = (S_2, S_1, S_0)$ і є вісім можливих значень синдрому. Нульовий синдром (000) вказує на те, що помилки в коді відсутні або невиявлені. Усякому ненульовому синдрому відповідає певна конфігурація помилки, що виправляється.

Синдром помилки S визначається виразами

$$S_1 = r_1 \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus x_4,$$

$$S_2 = r_2 \oplus x_1 \oplus x_3 \oplus x_4,$$

$$S_3 = r_3 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4.$$

Виправлення помилки відбувається шляхом інвертування розряду, в якому, за визначенням синдрому S , є помилка.

Наприклад, нехай код Хеммінга 0101010 при передаванні зазнав спотворення внаслідок дії завад – відбулася помилка в п'ятому розряді, і код набув вигляду 0111010.

Синдром помилки в цьому випадку S

$$S_1 = r_1 \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus x_4 = 0 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1,$$

$$S_2 = r_2 \oplus x_1 \oplus x_3 \oplus x_4 = 1 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 0 = 0,$$

$$S_3 = r_3 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4 = 1 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 0 = 1.$$

Двійковий код синдрому помилки $S = 101$ визначає десяткове число 5, тобто синдром вказує, що помилка відбулася в п'ятому розряді і може бути виправлення шляхом інвертування. В результаті декодування одержимо вихідну інформаційну кодову комбінацію 0100.

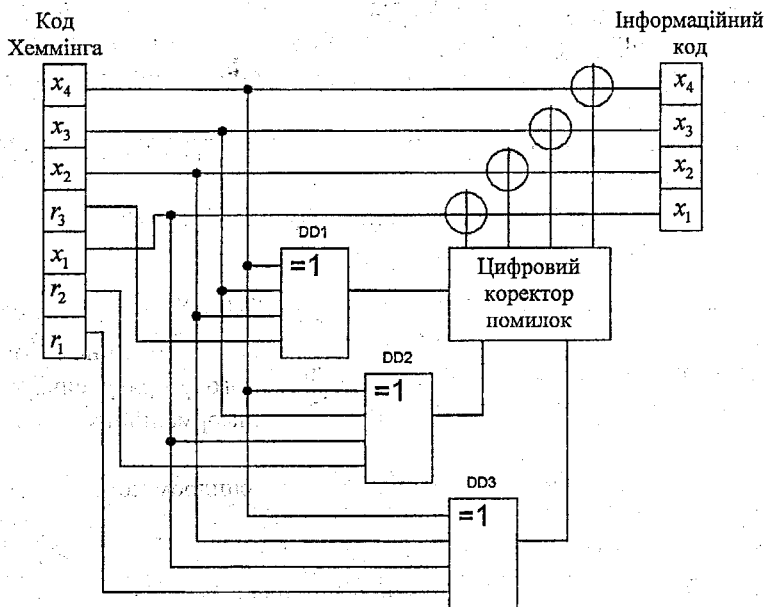


Рисунок 6.3 – Декодер коду Хеммінга

Класичні коди Хеммінга мають число синдромів, точно рівне їх необхідному числу і дозволяють виправити всі однократні помилки в будь-якому інформаційному та контрольному символах і включають один нульовий синдром. Такі коди називаються щільноупакованими. Зрізані коди є нещільноупакованими, тому що число синдромів у них перевищує необхідне.

Дві або більше помилки перевищують коригувальні можливості коду Хеммінга, і декодер буде помилятися. Це означає, що він буде вносити неправильні виправлення й видавати спотворенні інформаційні символи.

Додавання ще одного контрольного розряду дозволяє збільшити мінімальну кодову відстань до 4, в результаті одержимо розширений код Хеммінга (8, 4), що дозволяє виправляти однократні помилки та виявляти двократні помилки або лише виявляти трикратні помилки.

Розглянемо, як використання кодів Хеммінга дозволяє покращити надійність ЕА.

Наприклад, якщо для чотирирозрядного інформаційного коду ймовірність помилки в одному розряді $q_i = 1\%$, то ймовірність помилки в кодовій комбінації (ймовірність відмови)

$$Q_{\text{пом}} = 1 - (1 - q_i)^n = 1 - (1 - 0,01)^4 = 3,94\%.$$

Ймовірність безпомилкового прийняття кодової комбінації (ймовірність безвідмовної роботи)

$$P = 1 - Q_{\text{пом}} = 96,06\%.$$

Застосувавши код Хеммінга число розрядів коду збільшиться до 7, але з'явиться можливість виправляти однократні помилки. Помилки більшої кратності виправлятися не будуть, тому ймовірність помилки в даному випадку дорівнює сумі ймовірностей помилок кратностей 2, 3, 4, 5, 6, 7.

$$Q'_{\text{пом}} = Q_{\text{пом.2}} + Q_{\text{пом.3}} + Q_{\text{пом.4}} + Q_{\text{пом.5}} + Q_{\text{пом.6}} + Q_{\text{пом.7}}.$$

Обмежившись в розрахунках лише першими двома доданками, оскільки ймовірності помилок більшої кратності є дуже малими, одержимо

$$Q'_{\text{пом}} = \frac{7!}{2!(7-2)!} \cdot 0,01^2 (1 - 0,01)^{7-2} + \frac{7!}{3!(7-3)!} \cdot 0,01^3 (1 - 0,01)^{7-3} = 0,203\%.$$

Таким чином, використання коду Хеммінга в даному випадку зменшило ймовірність помилки з 3,94 % до 0,203 % (в 19,4 раза), а ймовірність безвідмовної роботи збільшилася з 96,06 % до 99,797 %.

Контрольні запитання

1. В чому полягають інформаційні методи підвищення надійності?
2. В чому полягає часова надлишковість?
3. Яким чином введення часової надлишковості дозволяє підвищити надійність ЕА?
4. В чому полягає просторова надлишковість?
5. В яких випадках доцільно використовувати інформаційну надлишковість, а в яких – структурну надлишковість для підвищення надійності ЕА?
6. Які коди називають завадостійкими?
7. В чому полягає принцип виявлення та виправлення помилок за допомогою завадостійких кодів?
8. Які коди називають циклічними?
9. Які завадостійкі коди ви знаєте?
10. Назвіть основні характеристики коригуючих кодів.
11. Що характеризує мінімальна кодова відстань?
12. Поясніть принцип утворення кодів з перевіркою на парність.
13. Поясніть принцип виявлення та виправлення помилок за допомогою кодів з повторенням.
14. Поясніть принцип побудови кодів Хеммінга.
15. Виходячи з яких міркувань визначають кількість контрольних розрядів в коригуючих кодах?
16. Поясніть алгоритм визначення синдрому помилки для коду Хеммінга.
17. Яким чином використання кодів Хеммінга дозволяє підвищити надійність ЕА?
18. Які завадостійкі коди ви знаєте і де вони використовуються?

7 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ЕА

Розрахунок надійності сучасної ЕА є досить складною та відповідальною задачею, оскільки вимагає врахування параметрів всіх елементів, з'єднань, режимів роботи, умов навколишнього середовища тощо. Для полегшення цієї задачі створені програмні комплекси, що дозволяють виконувати автоматизований розрахунок надійності складних технічних систем, в тому числі радіоелектронної апаратури та радіоелементів. Найбільш поширеними програмними комплексами для розрахунку надійності є Relex (Relex Software Corporation, США), RAM Commander (A.L.D. Group, Ізраїль), АСОНІКА-К (МИЭМ-ASKSoft, Росія). Розглянемо ці програмні комплекси більш детально.

7.1 Relex Reliability Studio

З програмним забезпечення Relex (Relex Software Corporation, США, www.relex.com) працює багато відомих іноземних компаній, такі як 3М, Boeing, CiscoSystem, Dell, Honda, HP, Intel, LG, Motorola, NASA, Nokia, Samsung, Siemens. До складу програмного комплексу Relex Reliability Studio входять аналітичні модулі для вирішення таких завдань: прогнозування безвідмовності (Reliability Prediction), ремонтпридатності (Maintainability Prediction); аналізу видів, наслідків і критичності відмов (FMEA/FMECA); марковського аналізу (Markov Analysis), статистичного аналізу (Weibull Analysis), оцінювання вартості терміну служби обладнання (Life Cycle Cost); а також блок-схеми надійності (Reliability Block Diagram); дерева відмов/подій (Fault Tree/Event Tree); система оповіщення про відмови, аналіз та коригуючі дії, FRACAS-система (Failure Reporting Analysis and Corrective Action System); система оцінювання людського фактора та аналізу ризиків (Human Factors, Risk Analysis).

Модуль прогнозування безвідмовності (Reliability Prediction) містить моделі для розрахунку показників надійності елементів. До його складу входить велика база даних, що містить класифікаційні ознаки елементів і їх характеристики надійності. База даних містить бібліотеки компонентів фірм: AMD, Analog Devices, Dallas Semiconductor, Hitachi, Infineon, Intel, Microsemi, Motorola, National Semiconductor, Panasonic, Philips, Texas Instruments, Toshiba тощо. Розрахунки проводяться у відповідності до іноземних стандартів з надійності: MIL-HDBK-217, Telcordia (Bellcore),

IEC TR 62380, RDF 2000, PRISM, NSWC Mechanical, HRD5, GJB299. Модуль дозволяє визначати показники надійності (інтенсивність відмов, середній час безвідмовної роботи тощо), а також вплив на них температури та інших факторів навколишнього середовища.

Модуль аналізу ремонтпридатності (Maintainability Prediction) реалізує положення стандарту з дослідження ремонтпридатності систем – MIL-HDBK-472. Вирішуються завдання прогнозування профілактики та технічного обслуговування (рис. 7.1).

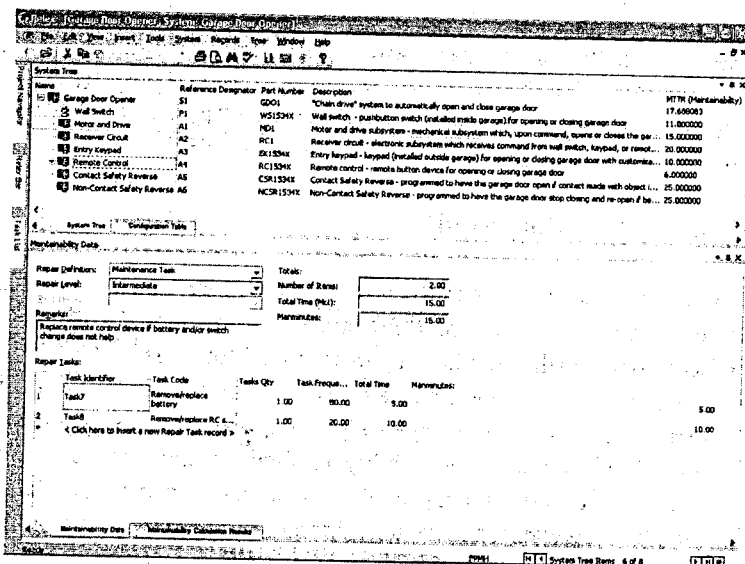


Рисунок 7.1 – Таблиця розрахунків показників надійності в Relex

Модуль аналізу видів, наслідків і критичності відмов (FMEA/FMECA) відповідає MIL-STD-1629, SAE ARP 5580 тощо. Відбувається ранжування небезпечних відмов та їх оцінювання за пріоритетами ризиків.

Модуль блок-схеми надійності (RBD, Reliability Block Diagram) використовується для аналізу складних систем. Містить як аналітичні методи, так і статистичні методи моделювання Монте-Карло. Приклад блок-схеми складної системи в Relex наведений на рис. 7.1.

Модуль дерева відмов/подій (Fault Tree/Event Tree); дозволяє реалізовувати процедури для дедуктивного та індуктивного аналізу розвитку відмов, подій в системі. Використовується для аналізу надійності та безпеки. Містить широкий набір логіко-функціональних вершин.

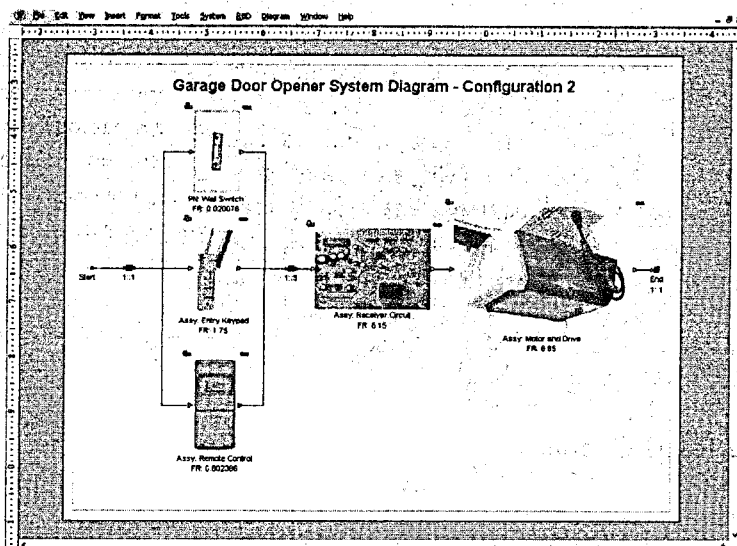


Рисунок 7.2 – Блок-схема складної системи в Relex

Модуль марковського аналізу (Markov Analysis) дозволяє використовувати процеси, що використовуються при моделюванні та аналізі надійності систем. Моделі, що розробляються за допомогою цього апарату, є динамічними та враховують необхідні часові умови та інші особливості, що визначають траєкторію переходів системи в просторі можливих станів, які утворюються відмовами та відновленням елементів. В модулі Relex Markov Analysis реалізовані марковські процеси з дискретною множиною станів та неперервним часом, що враховують такі особливості функціонування та резервування систем: несумісні види відмов елементів; послідовність виникнення відмов; зміну інтенсивностей відмов елементів в залежності від подій, які вже відбулися (зокрема, ступінь навантаження резерву); кількість бригад з відновлення (обмежене/необмежене); черговість відновлення; обмеження на запасні частини; різну ефективність функціонування в різних станах системи та прибуток (втрати) за переходи в стани. Розраховуються показники: ймовірність кожного із станів; ймовірність безвідмовної роботи (відмови) на заданому інтервалі часу тощо.

Модуль статистичного аналізу (Weibull Analysis) призначений для оброблення результатів досліджень, експлуатації. Для опису відмов використовується нормальний, логарифмічно нормальний, рівномірний,

експоненціальний, Релея, Гумбеля, біноміальний розподіли, розподіл Вейбулла та інші. Наприклад, розподіл Вейбулла, який є розподілом мінімальних величин, найбільш часто використовується при прогнозуванні ймовірності безвідмовної роботи та середнього часу напрацювання на відмову при заданому часі експлуатації складної технічної системи. Логарифмічно нормальний і вейбуллівський розподіли однаково добре описують відмови, що характерні для періоду старіння. Модуль дозволяє використовувати методи регресійного аналізу та виконувати перевірку адекватності моделей і значимості коефіцієнтів регресії.

За допомогою модуля економічних розрахунків (LCC) здійснюється оцінювання вартості терміну служби на всіх етапах створення, експлуатації, утилізації системи.

7.2 RAM Commander

Система аналізу надійності RAM Commander (A.L.D. Group, Ізраїль, www.aldservice.com) охоплює весь спектр інженерних задач, пов'язаних з надійністю електронних, електромеханічних, механічних та інших систем. Вона дозволяє прогнозувати надійність, готовність, ремонтпридатність різного роду обладнання, пропорціональний розподіл між надійністю та ремонтпридатністю; керувати даними про надійність; проводити аналіз надійності обладнання, що проектується, методом Монте-Карло; оптимізувати складський облік запасних частин. Методи прогнозування надійності відповідають стандартам MIL-HDBK-217, TR332 - Bellcore Issue 6, SR332 - Telcordia 2001, RDF 95 - French Telecom, UTEC 80810 (CNET 2000), HRD - British Telecom, GJB299 (China), IRPH93 - Italtel, ALCATEL, RADC 85-91, NPRD-95, NSWC-98/LE1 Mechanics, Siemens SN 29500-1, FIDES, IEC 62380. RAM Commander є модульним програмним забезпеченням. Користувачі можуть змінювати склад системи та використовувати ті модулі, що відповідають вимогам проекту.

Модуль прогнозування надійності (Reliability Prediction) дозволяє розрахувати показники надійності та оцінити вплив на надійність температури та інших факторів навколишнього середовища. Інформація про компоненти системи та їх надійність подається у вигляді таблиці дерева компонентів системи (рис. 7.3).

Використовуючи модуль блок-схем надійності (Reliability Block Diagram, RBD-модуль) можна побудувати різні варіанти (функціонально-логічні схеми надійності) з послідовним, паралельним, паралельно-

послідовним з'єднанням компонентів системи, а також виконати аналіз надійності блок-схеми з використанням статистичного аналізу за методом Монте-Карло. Приклад блок-схеми надійності та графік функції надійності наведені на рис. 7.4.

Ref	Desc	ID	Name	Qty	Ops	FR (FIT)	Status
TUTORIAL	1		Communication System	1	1	0754 -005	++
Communcie	1		CN017000	1	20663	3082	++
Main Switch	1		CN017004	2	1054	4717	++
Receiver	2		CN017016	10	7513	0696	++
C12	1		CRP	2	17	4936	++
C35	2		CL	3	123	7106	++
UR1	3		RZ	1	27	9604	++
UR2	4		RZ	1	23	3432	++
U1	5		74HC04	1	31	5262	++
U4	6		74451025	1	60	2484	++
U2	7		26LS32	1	145	9498	++
U5	8		74LS123	1	72	0022	++
U3	9		28001	1	239	2594	++
LD1	10		HLMP-2400	1	9	7742	++
Transmitter	3		CN017009	1	2945	6656	++
PS	4		CN017001	1	4250	0003	0
Control	2		CN017334	1	75495	2918	++
Monitor	1		CN017012	1	8000	0000	++
Keyboard	5		CN017039	1	17000	0000	2

Рисунок 7.3 – Таблиця дерева компонентів системи в RAM Commander

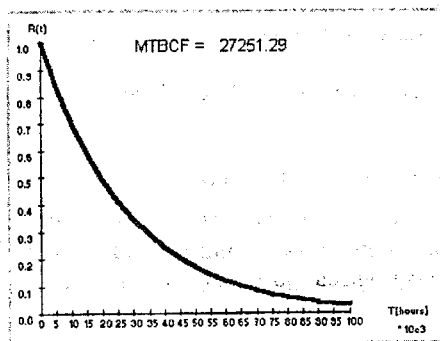
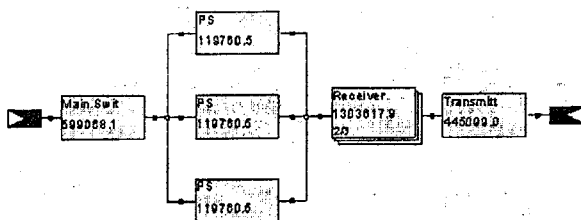


Рисунок 7.4 – Блок-схема надійності на графік функції надійності в RAM Commander

Модуль аналізу ремонтпридатності (Maintainability) базується на стандарті MIL-HDBK-472 і призначений для визначення показників технічного обслуговування різного класу обладнання на всіх стадіях експлуатації.

Модулі аналізу дерева відмов (Fault Tree Analysis) та подій (Event Tree Analysis) забезпечують графічне зображення логічної структури, яка відображає небажані події (відмови) та їх наслідки, що дозволяє визначати надійність системи та ризики відмов в залежності від її конфігурації. Приклад головного вікна модуля дерева відмов в програмі RAM Commander наведено на рис. 7.5. Дані модулі використовують схожий логічний та математичний апарати, проте модуль дерева відмов використовує дедуктивний підхід (від відмови системи до її причин), а модуль дерева подій використовує індуктивний підхід (від елементарної відмови до її наслідків).

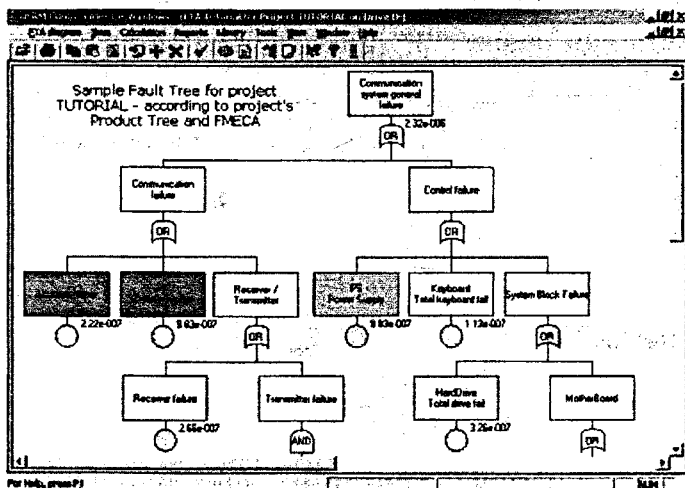


Рисунок 7.5 – Головне вікно модуля Fault Tree Analysis в програмі RAM Commander

До складу RAM Commander також входять інші модулі (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA); Process&Design FMEA; Derating module; Spare Parts analysis and optimization; Safety Module), що дозволяють вирішувати увесь комплекс задач пов'язаних з надійністю електронних систем.

7.3 АСОНИКА-К

Програмний комплекс АСОНИКА-К розробляє компанія ASKSoft на базі Московського інституту електроніки та математики (Росія), адреса в Інтернеті: www.asonika-k.ru. За своїми можливостями АСОНИКА-К не поступається RBD-модулям іноземних програм Relex та RAM Commander. Програмний комплекс створений в забезпечення російського стандарту ГОСТ Р В 20.39.302-98 "Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к программам обеспечения надежности" і рекомендований РД В 319.01.05-94, ред. 2-2000 "Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Принципы применения математического моделирования при проектировании". База даних повністю відповідає положенням РД В 319.01.20-98 "Положение о справочнике "Надежность электрорадиоизделий".

Програмний комплекс АСОНИКА-К містить такі програмні модулі.

1. Система розрахунку показників надійності виробів.
2. Система розрахунку характеристик надійності складових частин.
3. Система аналізу результатів.
4. Система архівації проектів.
5. Довідкова система.
6. Система супроводу бази даних.
7. Система адміністрування користувачів.

АСОНИКА-К дозволяє розрахувати всі основні показники і характеристики надійності, такі як інтенсивності відмов в режимах експлуатації і зберігання, ймовірність безвідмовної роботи тощо.

АСОНИКА-К – програмний засіб, створений в технології «клієнт-сервер». База даних серверної частини на СУБД Oracle містить інформацію, що постійно оновлюється, про надійність як вітчизняних, так і іноземних виробів електронної техніки, побудовану на унікальних принципах, які істотно полегшують завдання її адміністрування, зокрема: редагування даних про надійність електрорадіовиробів; редагування математичних моделей електрорадіовиробів; додавання нових класів електрорадіовиробів. Взаємодія між клієнтом та сервером програмного комплексу здійснюється через канал зв'язку за HTTP-протоколом передавання даних.

Основні функції комплексу АСОНІКА-К.

1. Розрахунок повної номенклатури показників безвідмовності відновлюваних і невідновних виробів.

2. Розрахунок показників збережності виробів, до складу яких входять електрорадіовироби російського та іноземного виробництва.

3. Розрахунок надійності виробів на основі даних, наведених у російських довідниках "Надёжность ЭРИ", "Надёжность зарубежных аналогов" (редакція 2006 р.), спеціалізованому довіднику ФГУП "НИИ ТП" з компонентів комп'ютерної техніки, американському довіднику MIL-HDBK-217F (включаючи Notice 1, Notice 2) і китайському довіднику GJB 299. Довідник «Надёжность ЭРИ» постійно оновлюється та є офіційним виданням Міністерства оборони РФ. Довідник містить відомості про показники надійності електрорадіовиробів, що використовуються при розробленні (модернізації), виробництві і експлуатації апаратури, приладів, пристроїв і устаткування військового призначення.

4. Розрахунок надійності виробів, схема розрахунку надійності яких містить різні види з'єднання складових частин (резервування, розгалуження та ін.) і способи контролю їх роботоздатності (безперервний, періодичний і ін.).

5. Розрахунок експлуатаційної інтенсивності відмов електро-радіовиробів з урахуванням механічних режимів роботи (дій вібрації, ударів і ін.)

6. Розрахунок функцій параметричної чутливості показників надійності виробів до зміни коефіцієнтів математичних моделей експлуатаційної інтенсивності відмов і режимів роботи електрорадіовиробів.

7. Аналіз результатів розрахунків і синтез рекомендацій, направлених на забезпечення необхідного рівня надійності.

8. Створення і ведення архіву проєктів і використання цих проєктів (частково або повністю) для новостворюваних виробів або таких, що модифікуються.

9. Імпорт даних з промислових вітчизняних і іноземних CAD- і CAE-систем (PCAD, ТриАНА і ін.) і експорт даних в програмні засоби автоматизованого випуску карт робочих режимів як безпосередньо, так і в рамках PDM-систем.

Фрагмент файлу звіту розрахунку надійності в АСОНІКА-К наведений на рис. 7.6.

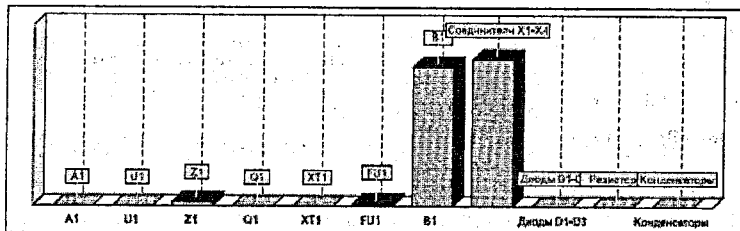
Расчет Изделия

Название Изделия: Таймер задержки

Децимальный номер: ИСКРА-Т

Л.ж. 2,09469172066891Е-6

Интенсивность отказов в режиме ожидания: 7,85621057243966Е-9



Наименование компонента	Дец.номер/Тип изделия	Эксплуатационная интенсивность отказов	Интенсивность отказов в режиме ожидания
A1	Печатный монтаж	1,70Е-11	1,70Е-13
U1	U	5,83Е-10	1,17Е-11
Z1	Z	2,90Е-08	2,90Е-10
Q1	Q	1,79Е-10	1,79Е-12
XT1	Пайка ЭРИ волной	1,38Е-10	1,38Е-12
FU1	Предохранитель	1,00Е-08	1,00Е-10
B1	B1	1,00Е-06	2,92Е-11
Соединители X1-X4	Печатные разъемы	1,05Е-06	5,27Е-09
Диоды D1-D3	1	6,62Е-10	2,16Е-09
Резисторы	1	2,64Е-10	2,64Е-12
Конденсаторы	1	2,80Е-11	2,80Е-13

Рисунок 7.6 Фрагмент файла звіту розрахунку надійності в АСОНІКА-К

Використання програмного комплексу АСОНІКА-К дозволяє реалізувати сучасні методи проектування РЕА, засновані на CALS-технологіях. Під терміном CALS-технології (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) розуміється сукупність принципів і технологій інформаційної підтримки життєвого циклу виробу на всіх його стадіях. Україномовний аналог CALS – інформаційна підтримка життєвого циклу виробів. Останнім часом за кордоном разом з CALS використовується також термін Product Lifecycle Management (PLM). Важливим аспектом CALS-технологій є інформаційна підтримка безпосередньо самого процесу розрахунку оцінки надійності технічної системи.

Перевагою АСОНІКА-К у порівнянні до іноземних програмних комплексів є відповідність вітчизняним стандартам у галузі надійності та підтримка вітчизняних електрорадіовиробів, доступність як фахівцям з надійності, так і безпосередньо інженерам-схемотехнікам і конструкторам.

Контрольні запитання

1. Чому оцінювання надійності ЕА є трудомісткою та важливою задачею?
2. Які програмні комплекси для розрахунку надійності ЕА ви знаєте?
3. Дайте загальну характеристику програмного комплексу для розрахунку надійності Relex Reliability Studio.
4. Які переваги та недоліки має програмний комплекс Relex Reliability Studio?
5. Дайте загальну характеристику системи аналізу надійності RAM Commander.
6. В чому полягає відмінність модулів дерева відмов (Fault Tree Analysis) та подій (Event Tree Analysis) програми RAM Commander?
7. Які переваги та недоліки має RAM Commander?
8. Дайте загальну характеристику комплексу АСОНІКА-К.
9. Які переваги та недоліки має програмний комплекс АСОНІКА-К?
10. Назвіть основні функції АСОНІКА-К.
11. На основі даних яких довідників та для яких електрорадіовиробів здійснюється розрахунок надійності в програмі АСОНІКА-К?
12. Що розуміється під терміном CALS-технології?
13. Що розуміють під терміном Product Lifecycle Management (PLM)?
14. Яким чином використання програмних комплексів з оцінювання надійності та CALS-технологій дозволяє підвищити якість та надійність ЕА?

СЛОВНИК НАЙБІЛЬШ ВЖИВАНИХ ТЕРМІНІВ

CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support) – сукупність принципів і технологій інформаційної підтримки життєвого циклу виробу на всіх його стадіях.

Безвідмовність (reliability, failure-free operation) – властивість виробу зберігати свою роботоздатність протягом деякого напрацювання без вимушених перерв. Безвідмовність вимірюється в одиницях напрацювання.

Відмова (failure) – випадкова подія, що полягає в порушенні роботоздатності виробу.

Гамма-процентний ресурс (gamma-percentile life) – сумарне напрацювання, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану з ймовірністю γ , що виражаються у відсотках. Наприклад, якщо $\gamma = 95\%$, то це означає, що не менше 95 (з 100) виробів з випущеної партії за час ресурсу не досягнуть граничного стану.

Гарантійне напрацювання – напрацювання виробу, до завершення якого виробник гарантує і забезпечує виконання певних вимог до виробу, за умов дотримання споживачем правил експлуатації, зокрема правил зберігання і транспортування. Термін гарантії встановлюється в технічній документації або договорах між виробником і замовником.

Граничний стан виробу (limiting state) – стан об'єкта, при якому його подальша експлуатація неможлива або недоцільна, або відновлення його роботоздатного стану неможливе або недоцільне.

Дефект (defect) – несправність, що не приводить в процесі експлуатації до відмови.

Довговічність (durability, longevity) – властивість виробу зберігати роботоздатність до граничного стану з необхідними перервами для профілактичного обслуговування та ремонтів. Показниками довговічності можуть служити, наприклад, ресурс і термін служби.

Дублювання (duplication) – резервування з кратністю резерву один до одного.

Експериментальний показник надійності (assessed reliability measure) – показник надійності, що визначається за даними випробувань.

Завадостійкий код (noise combating code) – код, що дозволяє виправляти та (або) виявляти помилки.

Загальне резервування (whole system redundancy) – резервування, при якому резервується об'єкт в цілому.

Залежна відмова (secondary failure) – відмова, що з'явилася внаслідок попередніх відмов (наприклад, через перевантаження).

Збережність (storability) – властивість виробу підтримувати свої експлуатаційні показники протягом та після терміну зберігання та транспортування, встановленого технічною документацією.

Збій (interruption) – одноразово виникаюча відмова, що самоусувається або усувається незначним втручанням оператора та не потребує проведення ремонту.

Інтенсивність відмов (failure rate) – ймовірність відмови неремонтованого виробу за одиницю часу за умови, що відмова до цього моменту часу не виникла.

Інтенсивність відновлення (instantaneous, restoration rate) – умовна щільність ймовірності відновлення роботоздатного стану об'єкта, що визначається для даного моменту часу при умові, що до цього моменту відновлення ще не було завершено.

Ймовірність безвідмовної роботи (reliability function, survival function) – ймовірність того, що в заданому інтервалі часу або межах заданого напруцювання не виникне відмова виробу.

Ймовірність відновлення (probability of restoration, maintainability function) – ймовірність того, що час відновлення роботоздатного стану об'єкта не перевищує заданий час.

Ковзне резервування (sliding redundancy) – резервування заміщенням, при якому група основних елементів резервується одним або декількома резервними елементами, кожен з яких може замінити будь-який основний елемент, що відмовив.

Код з перевіркою на парність (parity-check code) – завадостійкий код, в якому використовується один контрольний розряд, значення якого вибирають виходячи з умов парності кількості одиниць в результуючому кодовому слові. Тобто сума всіх розрядів дозволеної кодової комбінації за модулем 2 повинна дорівнювати нулю.

Код з повторенням (repetition code) – завадостійкий код, що утворюється шляхом повторення інформаційних символів певну кількість разів.

Код Хеммінга (Hamming code) – завадостійкий лінійний циклічний код запропонований Хеммінгом з мінімальною кодовою відстанню 3. Дозволяє виправляти однократні помилки або виявляти двократні помилки. В основі побудови коду лежать перевірки на парність.

Коефіцієнт готовності (instantaneous, availability function) –

ймовірність того, що виріб буде роботоздатний в довільно вибраний момент часу в проміжках між виконаннями планового профілактичного обслуговування. Виріб з абсолютною готовністю є або абсолютно безвідмовним, або ідеально відновлюваним.

Коефіцієнт технічного використання (steady state availability factor) – відношення напрацювання виробу за одиницю часу за деякий період експлуатації до суми цього напрацювання і часу всіх простоїв, викликаних профілактичним обслуговуванням і ремонтами за той же період експлуатації.

Комплексні показники надійності (integrated reliability) – показники, що характеризують декілька властивостей надійності об'єкта.

Кратність резерву (redundancy ratio) – відношення числа резервних елементів до числа основних елементів, що резервуються. Виражається нескороченим дробом.

Лінійний код (linear code) – код в якому формування блоків, тобто кодування проводиться з використанням лінійних операцій над інформаційними символами.

Мінімальна кодова відстань (Hamming distance) – мінімальне число розрядів, в яких будуть відрізнятися будь-які дозволені комбінації коду.

Навантажений резерв (active reserve, loaded reserve) – резерв, який містить один або декілька резервних елементів, що знаходяться в режимі основного елементу.

Надійність (reliability, dependability) – властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах протягом необхідного проміжку часу або необхідного напрацювання при дотриманні режимів експлуатації, правил технічного обслуговування, зберігання і транспортування. Надійність – це складне комплексне поняття, за допомогою якого оцінюють такі найважливіші характеристики виробів, як роботоздатність, довговічність, безвідмовність, ремонтпридатність, відновлюваність і т. ін.

Напрацювання (operating time) – тривалість або об'єм роботи виробу, що вимірюється часом, циклами, періодами і т.ін.

Напрацювання до відмови (operating time to failure) – напрацювання об'єкта від початку експлуатації до виникнення першої відмови.

Напрацювання між відмовами (operating time between failure) – напрацювання об'єкта від закінчення відновлення його роботоздатного стану після відмови до виникнення наступної відмови.

Незалежна відмова (primary failure) – відмова, виникнення якої не

пов'язане з іншими відмовами.

Ненавантажений резерв (standby reserve, unloaded reserve) – резерв, який містить один, або декілька резервних елементів, що знаходяться в ненавантаженому режимі до початку виконання ними функцій основного елементу.

Несправність (fault, faulty state) виробу – невідповідність виробу одному або декільком вимогам, що висуваються до нього технічними умовами (наприклад, відносно робочих характеристик, зовнішнього вигляду і т. ін.). Не всі несправності є відмовами.

Неявна відмова (latent failure) – відмова, що може бути виявлена лише за допомогою спеціальних вимірювань (наприклад, вихід з ладу інтегральної мікросхеми).

Одиничні показники надійності (simple reliability measure) – показники, що характеризують одну властивість надійності об'єкта.

Основний елемент (major element) – елемент об'єкта, необхідний для виконання функцій об'єкта без використання резерву.

Параметр потоку відмов (failure intensity) – середня кількість відмов ремонтного виробу за одиницю часу.

Переміжна відмова (intermittent failure) – багаторазово виникаюча самоусувна відмова одного й того ж характеру. Переміжна відмова може виникнути, наприклад, при поганому контакті в з'єднанні.

Поелементне резервування (segregated redundancy) – резервування, при якому резервуються окремі елементи об'єкта.

Показники надійності (reliability measure) – кількісно характеризують один або декілька властивостей надійності об'єктів.

Постійне резервування (continuous redundancy) – резервування, при якому використовується навантажений резерв і при відмові основного елементу його функції виконуються резервним без перемикань.

Поступова відмова (gradual failure) – відмова, при якій спостерігається поступова зміна одного або декількох параметрів виробу. Поступові відмови виникають внаслідок зношення або старіння.

Призначений ресурс (assigned operating time) – напрацювання, обумовлене технічною документацією на виріб. Він визначається напрацюванням виробу, досягши якого його експлуатація повинна бути припинена незалежно від стану виробу. Цей ресурс призначається, як правило, з міркувань безпеки та економічності.

Рантова (миттєва) відмова (sudden failure) – відмова, яка виникає в результаті миттєвої зміни одного або декількох параметрів виробу.

Резерв (reserve) – сукупність додаткових засобів і (або) можливостей, що використовуються для резервування.

Резервний елемент (redundant element) – елемент, призначений для виконання функцій основного елементу у випадку його відмови.

Резервування (redundacy) – спосіб забезпечення надійності об'єкта за рахунок використання додаткових засобів і (або) можливостей, надлишкових у порівнянні до мінімально необхідних для виконання необхідних функцій.

Резервування з відновленням (redundancy with restoration) – резервування, при якому відновлення основних і (або) резервних елементів, що відмовили, технічно можливо без порушення роботоздатності об'єкта в цілому та передбачено документацією з експлуатації.

Резервування заміщенням (standby redundancy) – резервування, при якому функції основного елементу передаються резервному лише після відмови основного елементу.

Ремонтпридатність (maintainability) – пристосованість виробу до попередження, виявлення та усунення відмов і несправностей шляхом проведення технічного обслуговування та ремонтів. Під усуненням відмов мається на увазі відновлення роботоздатності.

Ресурс (useful life, life) – величина сумарного напрацювання виробу від початку його експлуатації або відновлення після ремонту до граничного стану.

Роботоздатність (up state) – стан виробу, при якому він здатен виконувати задані функції з параметрами, встановленими вимогами технічної документації. Тут і в подальшому під технічною документацією розуміють стандарти, керівні технічні матеріали, технічні умови та іншу нормативно-технічну документацію. Під параметрами виробу розуміють його продуктивність, точність, рентабельність, економічність і ін.

Розрахунковий показник надійності (predicted reliability measure) – показник надійності, що визначається розрахунковим методом.

Середнє напрацювання до відмови (mean operating time to failure) – математичне сподівання напрацювання об'єкта до першої відмови.

Середнє напрацювання на відмову, напрацювання на відмову (mean operating time between failures) – відношення сумарного напрацювання відновлювального об'єкта до математичного сподівання числа його відмов протягом цього напрацювання.

Середній ресурс (mean life, mean useful life) – середнє напрацювання,

досягнуте у випущеній партії виробів, тобто математичне сподівання ресурсу.

Середній час відновлення (mean restoration time) – час вимушеного нерегламентованого простою, викликаного виявленням та усуненням однієї відмови та дорівнює математичному сподіванню часу відновлення робоздатного стану об'єкта після відмови.

Термін служби (useful lifetime, lifetime) – календарна тривалість експлуатації виробу до моменту виникнення його граничного стану.

Циклічний код (cyclic code) – лінійний код, в якому дозволені кодові комбінації можуть бути одержані шляхом циклічного зсуву інших дозволених кодових комбінацій. Ідея побудови циклічного коду базується на використанні простих неприведених поліномів.

Явна відмова (explicit failure) – відмова, що може бути виявлена візуально (наприклад, обрив провідників) або штатними методами та засобами діагностики.

СУБД – система управління базами даних.

Fault Tree/Event Tree – дерево відмов/подій.

FMEA/FMECA – аналіз видів, наслідків і критичності відмов.

LCC – модуль економічних розрахунків, що здійснює оцінювання вартості терміну служби на всіх етапах створення, експлуатації, утилізації системи.

Maintainability Prediction – аналіз ремонтпридатності технічної системи.

PLM (Product Lifecycle Management) – система управління інформаційною та технічною підтримкою виробів на всіх стадіях життєвого циклу.

RAM Commander – програмний комплекс компанії A.L.D. Group (Ізраїль), призначений для аналізу надійності електронних, електромеханічних та механічних систем.

RBD (Reliability Block Diagram) – блок-схеми надійності.

Relex Reliability Studio – програмний комплекс компанії Relex Software Corporation (США), призначений для розрахунку показників надійності складних технічних систем.

Reliability Prediction – прогнозування безвідмовності технічної системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1995. – 37 с.
2. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги. Чинний від 01.01.97. – К.: Держстандарт України, 1995. – 38 с.
3. ДСТУ 2864-94. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення. Чинний від 01.01.97. – К.: Держстандарт України, 1995. – 28 с.
4. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Чинний від 01.07.95. – К.: Держстандарт України, 1995. – 34 с.
5. ДСТУ 2861-94 Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Чинний від 01.01.97. – К.: Держстандарт України, 1995. – 33 с.
6. ДСТУ 3433-96 Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. Чинний від 01.01.99. – К.: Держстандарт України, 1998. – 46 с.
7. ДСТУ 3524-97 (ГОСТ 27.205-97) Надійність техніки. Проектна оцінка надійності складних систем з урахуванням технічного і програмного забезпечення та оперативного персоналу. Основні положення. Чинний від 01.07.99. – К.: Держстандарт України, 1999. – 22 с.
8. ДСТУ 2566-94 Засоби радіоелектронні. Надійність резервованих систем. Загальні положення. Чинний від 01.07.95. – К.: Держстандарт України, 1994. – 21 с.
9. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 01.07.90. – М.: Изд. стандартов, 1990. – 37 с.
10. ГОСТ 27.202-83 Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции. – Взамен ГОСТ 23641-79, ГОСТ 16467-70, ГОСТ 16304-74, ГОСТ 16306-74. Введен с 01.07.1984 г. – 50 с.
11. ГОСТ 27.203-83 (СТ СЭВ3945-82) Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности. – Взамен ГОСТ 22955-78. Введ. 01.01.84. – М.: Изд. стандартов, 1984. – 6 с.
12. ГОСТ 27.204-83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам

- производительности. Введ.01.01.85. – М.: Изд. стандартов, 1984. – 37 с.
13. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – Взамен ГОСТ 27.410-87. В части п.2.
 14. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. Введ. 01.01.1997. – М.: Изд.стандартов, 1996. – 19 с.
 15. ГОСТ 27.402-95. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Часть 1. Экспоненциальное распределение. Введ.01.01.97. – К.: Госстандарт Украины, 1998. – М.: Изд.стандартов, 1997. – 38 с.
 16. ГОСТ 27.410-87 Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность (в части п.2 заменен ГОСТ 27.301-95).
 17. ГОСТ 27.003-90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – Взамен РД 50-650-87. Введен с 01.01.1992. – 27 с.
 18. РД В 319.01.05-X1 Аппаратура электронная военного назначения. Принципы применения математического моделирования при проектировании: Методические указания // Андреев А. И., Кофанов Ю. Н., Жаднов В. В. / Науч. рук. Андреев А. И. – М.: ЦНИИ 22 МО РФ. 1997. – 71с.
 19. Автоматизация проектных исследований надёжности радиоэлектронной аппаратуры: Научное издание // Жаднов В. В., Кофанов Ю. Н., Малютин Н. В. и др. – М.: Изд-во «Радио и связь», 2003. – 156 с.
 20. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадёжных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий: Том 1. / А. С. Шалумов, Ю. Н. Кофанов, В. В. Жаднов и др. // Под ред. Ю. Н. Кофанова, Н. В. Малютина, А. С. Шалумова. – М.: Изд-во "Энергоатомиздат", 2007. – 538 с.
 21. Андреев А. И. Виды и причины отказов РЭС: Учебное пособие. // Андреев А. И., Жаднов В. В., Кофанов Ю. Н. – М.: РИО МГИЭМ, 1995. – 66 с.
 22. Ахрамович И. Л., Жулинский С. Ф., Кофанов Ю. Н. Менеджмент качества радиоэлектронных средств: Учебное пособие. – М.: ФГУП «ГНПО «Агат», 1999. – 132 с.

23. Винниченко С. Е. Применение автоматизированной системы обеспечения надёжности и качества аппаратуры: Учебное пособие. // Винниченко С. Е., Жаднов В. В., Засыпкин С. В. и др. / Под ред. Кофанова Ю. Н. – М.: РИО МИЭМ, 1993. – 247 с.
24. Власов Е. П. Расчёт надёжности компьютерных систем: Учебное издание. // Власов Е. П., Жаднов В. В., Жаднов И. В. и др. – К.: Изд-во "Корнійчук", 2003. – 187 с.
25. Воронков Э. И. Под ред. К. В. Шалимовой. Надёжность полупроводниковых приборов и микросхем. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1986. – 47 с.
26. Готра З. Ю., Николаев И. М. Контроль качества и надёжность микросхем. – М.: Радио и связь, 1989. – 168 с.
27. Дружинин Г. В. Надёжность автоматизированных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
28. Дубіненко С. Б., Штовба С. Д. Основи теорії надійності систем управління і автоматики. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 65 с.
29. Жаднов В. В. Автоматизация проектных исследований надёжности радиоэлектронной аппаратуры: Научное издание. // Жаднов В. В., Кофанов Ю. Н., Малютин Н. В. и др. – М.: Изд-во "Радио и связь", 2003. – 156 с.
30. Жаднов В. В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств // Жаднов В. В., Сарафанов А. В. – М.: Изд-во "Солон-Пресс", 2004. – 464 с.
31. Калінін В. І., Костюк О. А., Грудін А. А. Збірник задач та вправ з надійності електронної апаратури. Навч. посібник. – Вінниця: ВДТУ, 1998. – 103 с.
32. Калінін В. І., Костюк О. А., Грудін А. А. Математичні моделі та методика оцінки експлуатаційної надійності елементів і виробів електронної техніки. Частина 3: Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 1999. – 64 с.
33. Калінін В. І., Костюк О. А., Грудін А. А. Математичні моделі та методика оцінки експлуатаційної надійності елементів і виробів електронної техніки. Частина 2: Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 1999. – 71 с.
34. Калінін В. І., Костюк О. А., Грудін А. А. Математичні моделі та методика оцінки експлуатаційної надійності елементів і виробів

- електронної техніки. Частина 1: Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 1999. – 56 с.
35. Кичак В. М., Федун І. В. Надійність і контроль якості виробів електронної техніки: Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 1998. – 122 с.
36. Кофанов Ю. Н. Основы теории надёжности и параметрической чувствительности РЭС: Учебное пособие // Кофанов Ю. Н., Жаднов В. В. – М.: РИО МИЭМ, 1990. – 80 с.
37. Кофанов Ю. Н., Увайсов С. У., Долматов А. В. Информационная технология тепловизионного контроля РЭС: Учебное пособие – М.: РПО МИЭМ, 2001. – 98 с.
38. Надежность ЭРИ: Справочник // С. Ф. Прытков, В. М. Горбачева, А. А. Борисов и др. / Науч. рук. С. Ф. Прытков – М.: ФГУП, 22 ЦНИИ МО РФ, 2004. – 574 с.
39. Пономарев Л. И. Методы осуществления статистического контроля и анализа качества электронных средств: Научное издание / Л. И. Пономарев, В. В. Жаднов, А. А. Иофин и др. – М.: Изд-во "Радио и связь", 2005. – 72 с.
40. Преснухин Л. Н., Шахнов В. А. Конструирование электронных вычислительных машин и систем: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1996. – 512 с.
41. Программный комплекс АСОНИКА-К: Краткое руководство / ASK-Soft. – М.: МИЭМ, 2006. – 64 с.
42. Прытков С. Ф. Надежность аналогов ЭРИ зарубежного производства: Справочник / С. Ф. Прытков, В. М. Горбачева, А. А. Борисов и др. // Науч. рук. С. Ф. Прытков. – М.: ФГУП «22 ЦНИИ МО РФ», 2004. – 50 с.
43. Управление качеством: Учебник для вузов // ЮНШТИ / Под ред. Ильенковой С. Д. – М.: Изд-во «Банки и биржи». 1998. – 199 с.
44. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
45. Чернышев А. А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
46. Яншин А. А. Теоретические основы конструирования, технологии надежности ЭВА: Учебн. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1983. – 312 с.

ДОДАТОК А

ГАЛУЗЕВИЙ СТАНДАРТ АПАРАТУРА РАДІОМОВЛЕННЯ ПОВУТОВА МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ОСТ4 ГО.202.014

ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ ТА ПОПРАВКОВІ КОЕФІЦІЄНТИ

ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

СЕРІЯ ІС	ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ x10E-6, 1/год	СЕРІЯ ІС	ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ x10E-6, 1/год
цифрові ІС			
K 121	0.20	K 500	0.06
K 131	0.35	K 511	0.03
K 144	0.10	K 556	0.20
K 155	0.01	K 566	0.10
K 158	0.04	K 592	0.70
K 160	0.02	K 599	0.70
K 194	0.40		
аналогові ІС			
K 101	0.05	K 125	0.20
K 122	0.20	K 127	0.20
K 140	0.03	K 224	1.50
K 153	0.03	K 237	2.70
K 157	3.70	K 276	2.20
K 159	0.10	K 278	0.20
K 174	2.30	K 416	2.70
K 217	0.02	K 553	0.40
Мікросхеми для калькуляторів		Мікропроце- сорний набір	
K 145 (ІА1, 886, РЕ1, 8Х1, ІП8, ІК6, ІК16	4.0	K 536 ІК-9	2.20
Мікросхеми ОЗП		K 536 ІК-8	3.60
K 535 РУ1	0.24	K 536 ІК-5	0.64
K 535 РУ2	4.90	K 536 ІК-3	1.20
K 535 РУ3	2.60	K 536 ІР-1	1.80
гібридні мікросхеми		K 536 ГГ-1	0.64
K2УС 242	0.40	K 536 УИ-2	0.72
K2УС 371	0.80	K2УС 245	0.80
K2УС 373	0.80	K2УС 372	0.80
K2ГС 371	0.60	K2ГС 241	0.60
K2ХА 371	1.23	K2ХА 242	0.45
K2ХА 373	1.23	K2ХА 372	1.23
K2ХА 376	1.23	K2ХА 375	1.23
K174 УВ4	1.50	K1УТ 401Б	1.00
K80111А 35	0.77	K20П 241	0.36

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ
Д І О Д И

Найменування та тип діода	Інтенсивність відмов $\times 10^6$, 1/год	Найменування та тип діода	Інтенсивність відмов $\times 10^6$, 1/год
Випрямні діоди і блоки			
ГД 107(а,б)	0.07	ГД 402(а,б)	0.11
Універсальні діоди			
ГД 403(а,б,в)	0.11	Д 2(Б-И)	0.05
Д 7(А-Х)	0.25	Д 9(Б-М)	0.05
Д 101(А)	0.10	Д 102(А)	0.10
Д 103(А)	0.10	Д 104(А)	0.10
Д 105(А)	0.10	Д 106(А)	0.10
Д 202-Д 205	0.10	Д 223(А,В)	0.10
Д 226(А-Д)	0.10	Д 219	0.19
Д 242(А,В)	0.21	Д 243(А,В)	0.21
Д 245(А,В)	0.21	Д 246(А,В)	0.21
Д 247(А,В)	0.21	Д 248(В)	0.21
КД 102(А,В)	0.20	КД 103(А,В)	0.20
КД 105(Б,В,Г)	0.35	КД 202(А-Н)	0.35
КД 202(Р,С)	0.35	КД 203(А-Д)	0.43
КД 401(А,В)	0.27		
Варикапи			
Д 902	0.27	КВ 103(А,В)	0.27
КВ 104(А-Д)	0.27		
Стабілітрони і стабістори			
КС 133А	0.10	КС 139А	0.10
КС 147А	0.10	КС 156А	0.10
КС 162А	0.10	КС 168А,В	0.10
КС 170	0.10	КС 175А	0.10
КС 182А	0.10	КС 191А	0.10
КС 210В	0.10	КС 213В	0.10
7ГЕ1А2С-ГЕ3А-С	0.09	Д 815(А-Ж)	0.09
Д 816(А-Д)	0.09	Д 817(А-Г)	0.09
Селенові випрямлячі			
22ГМ4Я-Д	0.50	30ГМ4Я-Д	0.50
40ГМ4Я-Д	0.50	30ГМ4У-Д	0.50
АВС-80-260	0.66	АВС-120-270	0.66
Примітка. Коефіцієнт електричного навантаження для селенових випрямлячів не повинен бути більшим 0.8			

ТРАНЗИСТОРИ

Найменування та тип транзистора	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год	Найменування та тип транзистора	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год
Транзистори малої потужності низької частоти			
ГТ 108 (А-Г)	0.15	ГТ 109 (А-И)	0.15
КП 102 (Е-Л)	0.08	КП 103 (Е-И)	0.08
КТ 118 (А-В)	0.12	МП 20 (А, В)	0.18
МП 21 (В-Е)	0.18	МП 25 (А, В)	0.18
МП 26 (А, В)	0.18	МП 35	0.15
МП 36А	0.15	МП 37 (А, В)	0.15
МП 38	0.15	МП 39 (А, В)	0.15
МП 40А	0.15	МП 42 (А, В)	0.15
МП 115	0.10	МП 116	0.10
Транзистори малої потужності середньої частоти			
П 29А	0.23	МП 30	0.23
Транзистори малої потужності високої частоти			
ГТ 308 (А-В)	0.36	ГТ 309 (А-Е)	0.36
ГТ 310 (А-Е)	0.36	ГТ 311 (Е, Ж, И)	0.36
ГТ 313 (А, В)	0.50	ГТ 320 (А-В)	0.50
ГТ 321 (А-Е)	0.50	ГТ 322 (А-Е)	0.50
ГТ 329 (А-В)	0.30	ГТ 330 (Д, Ж, И)	0.30
ГТ 341 (А-В)	0.30	КП 301В	0.10
КП 302 (А-В)	0.10	КП 306 (А-В)	0.10
КП 350 (А-В)	0.10	КТ 301 (А-Ж)	0.31
КТ 306 (А-Д)	0.31	КТ 307 (А-Г)	0.31
КТ 312 (А-В)	0.31	КТ 315 (А-Е)	0.31
КТ 339	0.28	КТ 342	0.28
КТ 345 (А-В)	0.28	КТ 361 (А-Г)	0.28
П 401	0.33	П 402	0.33
П 403А	0.33	П 416 (А, В)	0.33
П 422	0.33		
Транзистори середньої потужності низької частоти			
ГТ 402 (А-Г)	0.37	ГТ 403 (А-Д)	0.37
ГТ 404 (А-Г)	0.37	П 201З	0.25
П 210Е	0.25	КТ 3102	0.15
КТ 513	0.27	КТ 3107	0.18
КТ 626	0.27		
Транзистори середньої потужності середньої частоти			
П 601Ц	0.27	П 601АИ	0.27
П 601БИ	0.27	П 602Ц	0.27
П 605 (А)	0.27	П 606 (А)	0.27
Транзистори середньої потужності високої частоти			
КТ 601А	0.27	КТ 601А	0.27
КТ 602 (А-Г)	0.27	КТ 603 (А-Е)	0.27
КТ 604 (А)	0.27	КТ 605 (А, В)	0.27
П 607 (А)	0.37	П 608 (А)	0.37
П 609 (А)	0.37		
Транзистори великої потужності низької частоти			
ГТ 701А	0.51	П 213 (А-В)	0.35
П 214 (А-Г)	0.35	П 217	0.35
Транзистори великої потужності середньої частоти			
ГТ 806 (А-Д)	0.70	КТ 801 (А, В)	0.46
КТ 802 (А)	0.57	КТ 803 (А)	0.57
КТ 805 (А, В)	0.57	КТ 808 (А)	0.57
КТ 807	0.35		
Примітка. Коефіцієнт електричного навантаження для транзисторів не повинен бути більшим 0.8			

РЕЗИСТОРИ

Найменування та тип резистора	Інтенсивність відмов $\times 10^6$, 1/год	Найменування та тип резистора	Інтенсивність відмов $\times 10^6$, 1/год
Резистори постійні недротяні			
BC-0.125(a)	0.008	BC-0.25(a)	0.01
BC-0.5(a)	0.03	BC-1(a); МОН-1	0.10
BC-2	0.15	С1-4-0.125	0.06
С1-4-0.25	0.03	МЛТ-0.125	0.007
MT-0.125	0.007	ОМЛТ-0.125	0.007
МУН-0.125	0.007	МГП-0.125	0.007
МЛТ-0.25	0.01	MT-0.25; ОМЛТ-0.25	0.01
МУН-0.25; МГП-0.25	0.01	МЛТ-0.5; MT-0.5	0.02
ОМЛТ-0.5; МУН-0.5	0.02	МГП-0.5; УЛИ-0.5	0.02
МЛТ-1; MT-1; ОМЛТ-1	0.08	МУН-1; МГП-1	0.08
МЛТ-2; MT-2; ОМЛТ-2	0.12	МУН-2; МГП-2	0.12
КИМ-0.05	0.05	КИМ-0.125	0.10
КЛМ, КВМ	0.12	УЛИ-0.125	0.08
УЛИ-0.25	0.01	УЛИ-1	0.06
МОН-0.5	0.02	МОН-1	0.08
Резистори постійні дротяні			
С5-5(Т); С5-16Т	0.10	ПЗ; ПЗВ; СПЗВЕ; ПЗВТ	0.06
Терморезистори			
ММТ; КМТ;	0.18	СТ1-17; СТ3-17	0.15
Резистори змінні недротяні			
СП-I; СП-V	0.20	СП-II; СП-0.4	0.15
СП-IIІ; СП2-3а	0.30	СП-IV	0.25
СП2-3б; СП3-22	0.30	СП3-1(a, б)	0.45
СП3-4М(a-г)	0.65	СП3-4Мд	0.70
СП3-8	0.57	СП3-12(a-в, к)	0.45
СП3-12(г-е, и, л)	0.80	СП3-23; СП3-26	0.30
СП3-27	0.30	ВК	0.31
ВКУ	0.33	ТК	0.58
ТКД(a, б)	0.77	СНК(a, б)	0.45
СНКВД(a, б)	0.89	СП-015; СПО-0.5	0.28
СПО-1; СПО-2	0.40		
Резистори змінні дротяні			
ППЗ-40; ППЗ-41	0.40	ППЗ-43	0.40
Примітка. Коефіцієнт електричного навантаження для резисторів не повинен бути більшим 0.7			

КОНДЕНСАТОРИ

Найменування та тип конденсатора	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год	Найменування та тип конденсатора	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год
Конденсатори постійної ємності з керамічним діелектриком			
КЛГ; К10-70	0.10	КЛС	0.06
КЛС-Е; КМ; КП; КЛС	0.08	КД	0.018
КДУ	0.015	КТ; КТП	0.012
К10-15; К10-17	0.07	К10-26; К10-28	0.07
К10-35	0.07		
Конденсатори постійної ємності з скляним діелектриком			
К21У-1; К21У-3	0.06	К21-5; К21-7; К21-8	0.06
СКМ; СКМ-Т; К22У-1	0.04	КС	0.10
Конденсатори постійної ємності з слоюним діелектриком			
КСГ; КСО; КСОТ	0.02	СТМ; К31У-3Е	0.02
Конденсатори постійної ємності з паперовим діелектриком			
ВМ; К4011	0.10	ВМТ	0.12
КВГ	0.02	СМ; К42У-2	0.05
К40П-1; К40П-2	0.08	К40П-3	0.08
К40-5; МВГВ; МВГИ	0.03	МВГО; МВГП; МВГТ	0.03
МВГЧ; К42-4	0.03	МВГ; МВН	0.04
МЕМ	0.09		
Конденсатори постійної ємності з діелектриком із оксидного шару на вентильних металах			
КЭ; ЭГЦ; К53-1	0.06	К53-4; К53-14	0.06
ЭМ; К50-12; К52-2	0.12	К50-3; К50-3(А,В)	0.10
К50-6	0.07	К50-7; К50-9	0.09
Конденсатори постійної ємності з органічним діелектриком			
ПМ; МПО; МПГО	0.10	МПГ-П; МПГ-Ц	0.10
К70-7	0.08	К71-3; К71-4; К71-5	0.09
ФЧ; К72-9; ПМГП	0.04	К73-5	0.07
К73-6; К73П-2	0.05	К73П-4	0.05
К73-9	0.06	К76П-1; К76-3	0.11
Конденсатори з твердим діелектриком			
КПК; КПК-МТ	0.03	КТ4-1; КТ4-2	0.05
Примітка. Коефіцієнт електричного навантаження не повинен бути більшим 0.9 для електролітичних конденсаторів, і більшим 0.7 - для інших конденсаторів.			

РАДІОКОМПОНЕНТИ
Трансформатори і дроселі

Найменування та тип приладу	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год	Найменування та тип приладу	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год
Трансформатори :			
Силові	0.96	Вихідні звуку	1.0
Вихідні кадрові	0.70	Вихідні рядкові	2.0
Дроселі :			
Фільтрів	0.14		

НИЗЬКОЧАСТОТНІ З'ЄДНУВАЧІ

Тип виробів	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год	Тип виробів	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год
Ц И Л І Н Д Р И Ч Н І			
Нормальних габаритів			
ОНЦ-ВН;ОНЦ-ВН-1-2	0.12	ОНЦ-ВН-2-2	0.14
ШП	0.08	ШРГ; СШР; ШРГП	0.24
СШРГ; 2РТ-А	0.16	Р; РРН27	0.12
РГ; РГП	0.30	РРН28; СН113,9,10	0.02
Малогабаритні			
ОНЦ-ВГ-11-5	0.12	ОНЦ-12-5;ОНЦ-ВГ-3	0.12
ОНЦ-ВГ-10;ОНЦ-ВГ-8	0.12	ОНЦ-ВГ-1-3;ОНЦ-ВГ-1-5	0.12
ОНЦ-ВГ-2;ОНЦ-ВГ-4	0.09	ОНЦ-КГ-3-3	0.14
СНЦ-4	0.24	МР-4	0.02
П Р Я М О К У Т Н І			
Нормальних габаритів			
РГП0	0.08	РГП-5	0.05
РГП4; РГП4А	0.10	РШАВ-А; РШАГ-А	0.10
РПН-4	0.19	СНО45; СНО46	0.12
Малогабаритні			
РГ; РШ "Набор"	0.31	ГРП МШТ	1.26
РПМ	0.18	РПМ23	0.09
СНО8	0.14	ОНП-КГ-29;ОНП-КГ-25	0.07
ОНП-ВГ-8	0.05	ОНП-ВГ-25;ОНП-КГ-22	0.08
Для друкованого монтажу			
РППМ10; РППМ17	0.44	ГРПМ1; РППМ24	0.10
МРН	0.08	РГ1Н3	0.40
РШ2Н2; РГ1Н2	0.37		

П'ЄЗООЛЕКТРИЧНІ ВИРОБИ

Тип виробів	Інтенсивність відмов $\times 10E-5$, 1/год	Тип виробів	Інтенсивність відмов $\times 10E-5$, 1/год
Резонатори кварцеві вакуумні			
PB-72	2.29	PK19M, ЭД	0.49
PK233	3.39	PK296; PK2723, 273C	0.23
PK724A; PK34	0.19	PK2003	2.41
PK207; PK208	0.48	От 40 до 120 кГц	2.31
От 499 до 1001 кГц	2.31	От 840 до 4000 кГц	0.49
От 4000 до 100 МГц	0.81		
Фільтри п'єзоелектричні кварцеві			
ФП2П-307	5.21	ФП2П-276, 225, 379	1.20
ФП2П8-429	1.59	ФП2П-338	2.89
ФП1ПГ-22В	3.71		
Фільтри п'єзоелектричні на ПАВ			
ФП3П9-451	1.71		
Компоненти і елементи п'єзокерамічні			
ДТК-1М	1.45	ПДС-21	1.59
УПЧЗ-1	4.21	УПЧЗ-1М	0.64
ТПК-583	2.21	ПДС-7	0.77

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТА ФОТОЕЛЕКТРОННІ ПРИБАДИ

Тип виробів	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год	Тип виробів	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год
25ЛК2Ц	1.93	32ЛК1Ц	8.33
51ЛК2Ц	1.62	61ЛК3Ц	4.53
61ЛК4Ц	2.60	11ЛК1В	4.26
16ЛК1В	4.54	23ЛК13В	1.32
31ЛК4В	3.11	40ЛК6В	0.99
50ЛК1В	1.27	50ЛК2В	0.97
61ЛК1В	1.42	61ЛК3В	1.40

ІНДИКАТОРИ ЗНАКОСИНТЕЗУЮЧІ

Тип виробів	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год	Тип виробів	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год
Вакуумні			
ИВ-3А	0.76	ИВ-4	1.10
ИВ-6	0.29	ИВ-8	2.50
ИВ-11	1.80	ИВ-12	0.38
ИВ-22	0.98	ИВ-18	0.86
ИВ-21	1.73	ИВ-26	1.10
ИВ-27	8.60	ИВ-28, А	1.50
ИВЛМ1-5/7	1.60	ИВЛ2-8/12	4.10
ИВЛМ1-1/7	1.70	ИВЛ2-7/5	1.97
ИВЛШУ1-11/2	1.94	ИВ-9	1.70
ИВ-10	3.40	ИВ-16	1.70
Рідкокристалічні			
ИЖКЦ3-6/7	1.20	ИЖКЦ2-4/7	5.60
ИЖКЦ1-6/5	7.90	ИЖКЦ2-4/3	3.90
Напівпровідникові без вбудованого керування			
АЛ341 (А-Е)	0.28	АЛС314А	0.23
АЛС333 (А-Г)	0.83	АЛС338 (А-В)	0.55
АЛС320 (А-Г)	0.56	АЛС321А, В	0.71
АЛС324 (А-В)	0.12	АЛС340А	1.00
АЛС317 (А-Г)	0.56		
Електролюмінесцентні			
СЭЛ-5	-	ИТИ2Г, Ж, З, К	100.00

П Р И Л А Д И Н В Ч

Тип виробів	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год	Тип виробів	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год
Магнетрони генераторні імпульсної дії			
МИ-262	1490.7э	МИ-158	-
МИ-302	521.2э	МИ-346, МИ-507	-
Магнетрони генераторні неперервної дії			
М-93; М-96, М-101	-	М-95	77.5
М-104, М-571	-	М-105-1	73.3
М-112	358.4		
Клістроны підсилювальні імпульсної дії			
КИУ-12А, М; КИУ-53	118.0	КИУ-80	118.0
КИУ-15; КИУ-37	-		
Клістроны підсилювальні неперервної дії			
КУ-308	75.6	КУ-318	73.3
Лампи біжучої хвилі підсилювальні неперервної дії			
УВ-7-1	11.5	УВ-304	4.9
УВ-92; УВ-229-1	-	УВ-278	-
Лампи біжучої хвилі фазообертальні неперервної дії			
УВФ-5	4.7		
Лампи біжучої хвилі генераторні неперервної дії			
ОВ-19	10.9	ОВ-20; ОВ-44; ОВ-53	-
Прилади феритові			
ФВВ2-21; ФЦВ2-40	2.98	ФЦВ2-41А; ФЦВ2-42	2.98
ФЦВ2-43; ФЦВ2-44	2.98	ФКВН2-5; ФКВН2-7	13.91
ФКВН3-3	13.91	ФВП2-10А; ФЦП2-19	2.01
ФЦП2-20А; ФЦП2-21	2.01	ФФЛК2-16А; ФФЛК2-17	8.09
ФФЛК2-24	8.09		

ВУЗЛИ ТА МЕХАНІЗМИ

Найменування та тип вузла або механізму	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год	Найменування и тип вузла або механізму	Інтенсивність відмов $\times 10E-6$, 1/год
Кнопкові	0.17	Перемикачі діапазонів	6.00
Движкові	0.40	Барабанного типу	3.00
		Галетні	
Блоки конденсаторів змінної ємності			
З повітряним діелектриком	0.52	Малобааритні КПВМ	0.35
З твердим діелектриком	0.35	КПЧ-5	0.42
		КПТ-4/240	0.69
Трансформатори			
Силові	0.60	Вихідні НЧ	0.19
Міжкаскадні НЧ	0.15		
Дроселі			
Низькочастотні	0.15	Високочастотні	0.10
Лампи підсвічування НСМ9х60	0.42	Роз'єми	
МН-2.5, МН-6.3, А-12	0.19	- антенні	0.12
П'єзофільтри	0.12	- телефонні	0.18
Роз'єми	0.05	Вимикачі мережні	0.65
Пайки	0.001	Телескопічна антена	3.10
Лампові панелі	0.05	Транзисторні панелі	0.05
Перемикачі напруги мережі	0.20	Колодки:	
Механізм настройки для приймачів II групи		- запобіжників	0.30
		- живлення транзисторних приймачів	0.30

- ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ, ВУЗЛІВ І БЛОКІВ СХЕМИ, ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ ЯКІ НЕОБХІДНО ВРАХОВУВАТИ В РОЗРАХУНКАХ НАДІЙНОСТІ АПАРАТУРИ
- Резистори
 - Конденсатори
 - Лампи
 - Напівпровідникові прилади
 - Гучномовці
 - Трансформатори
 - Котушки індуктивності
 - Дроселі ВЧ і НЧ
 - Блоки КПС
 - Механізми настройки
 - Вернієрно-шкальні пристрої
 - Перемикачі діапазонів
 - Магнітні антени
 - Телескопічні антени
 - Блоки УКВ
 - Блоки стереодекодерів
 - П'єзофільтри
 - Електронно-променеві пристрої
 - Магнітофони панелі
 - Вимикачі та перемикачі
 - Роз'єми
 - Пайки

ПОПРАВКОВІ КОЕФІЦІЄНТИ

КОЕФІЦІЄНТ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ, УДАРІВ (K_v) НА УМОВИ ВИКОРИСТАННЯ

Типові елементи	K_v	
	Літаки	Ракети
Резистори недротяні	1	2
Резистори дротяні	2	4
Резистори змінні	4	5
Конденсатори	2	3
Напівпровідникові прилади:		
- точкові	3	5
- площинні	2	3
Реле і контактори	3	5
Трансформатори і дросели	3	4
Електричні машини	3	5
Електровакуумні прилади	2	3
Пайки	2	3
Інші елементи	1	1

Примітка. В таблиці наведені значення K_v для приладового відсіку другого ступеня. Для апаратури хвостового відсіку першого ступеня K_v необхідно збільшити в 18 разів, приладового відсіку першого ступеня та хвостового відсіку другого ступеня - в 6 разів.

КОЕФІЦІЄНТ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ І УДАРІВ (K_v) НА ТРАНСПОРТНІ УМОВИ

Вид апаратури	K_v		
	Вібрації	Удари	Результат впливу
Лабораторна	1	1	1
Польові стаціонарні	1.04	1.03	1.07
Автофургонні	1	1.08	1.46
Залізничні	1.40	1.10	1.54

КОЕФІЦІЄНТ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ (K_z) ДЛЯ НЕГЕРМЕТИЗОВАНОЇ АПАРАТУРИ

Відносна вологість, Z , %	t , град С	K_z
60 · 70	20 · 40	1.0
80 · 90	20 · 25	1.5
90 · 98	20 · 25	2.0
90 · 98	30	2.5

КОЕФІЦІЄНТ ВПЛИВУ ТИСКУ (K_d) ДЛЯ ВИСОТНИХ УМОВ

Висота, [км]	0	1·2	3	5	6	7·8	10·11
K_d	1.0	1.05	1.1	1.14	1.16	1.2	1.25

Висота, [км]	12·14	15·18	30	40	40·50
K_d	1.30	1.35	1.38	1.45	1.50

Навчальне видання

Лазарєв Олександр Олександрович

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

Навчальний посібник

Редактор О. Скалоцька

Оригінал-макет підготовлено О. Лазарєвим

Підписано до друку 2.07.2010 р.

Формат 29,7х42¹/₄. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 8.1.

Наклад 100 прим. Зам. № ~~2010-127~~

Вінницький національний технічний університет,
науково-методичний відділ ВНТУ.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, к. 2201.

Тел. (0432) 59-87-36.

Свідцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-81-59.

Свідцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.