

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Гончаренко Ю.П.,
Денисюк А.Ю.,
Яковенко В.А.,
Соколовський О.Ф.

ТЕОРІЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Житомир

2025

УДК 620.9:62-192

Т-34

Затверджено Вченою радою Поліського національного університету як навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 «Електрична інженерія»

Гриф надано Вченою Радою Поліського національного університету(протокол №3 від 29.10.2025)

Рецензенти:

Пількевич Ігор Анатолійович, д-р. техн. наук, професор,

Житомирський військовий інститут

Дубина Олександр Федорович, канд. техн. наук, доцент, Державний університет

«Житомирська політехніка»

Журавльов Валерій Пилипович, д-р фіз.- мат. наук, професор,

Поліський національний університет

Автори:

Гончаренко Юрій Павлович, канд. техн. наук, доц.

Денисюк Анатолій Юрійович, канд. техн. наук, доц.

Яковенко Віталій Адольфович, канд. техн. наук, доц.

Соколовський Олег Феліксович, канд. техн. наук, доц.

Т-34 Теорія надійності та експлуатація технічних засобів: навч. посібник для студентів, галузі знань 14 «Електрична інженерія» / Ю. П. Гончаренко, А. Ю. Денисюк, В. А. Яковенко, О. Ф. Соколовський. Житомир : Поліський нац. університет, 2025. 170 с.

Навчальний посібник підготовлено відповідно до освітніх навчальних програм бакалаврів галузей знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», а також навчального курсу «Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання, засобів керування і надійності електрообладнання». У посібнику розглянуто завдання теорії надійності, кількісні показники надійності, питання забезпечення необхідних показників надійності, наведені методики оцінки надійності технічних засобів, програмного забезпечення та елементної бази, а також принципи експлуатації, технічного обслуговування, ремонту та контролю технічного стану ТЗ.

Для студентів, бакалаврів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», фахівців даної галузі.

© Гончаренко Ю. П.,

© Денисюк А. Ю.,

© Яковенко В. А.,

© Соколовський О. Ф.,

© Поліський національний університет, 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	6
Глава 1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ТЗ.....	7
1.1. Основні завдання теорії надійності ТЗ	7
1.1.1. Задачі і проблеми теорії надійності ТЗ	7
1.1.2. Основні терміни і визначення теорії надійності ТЗ.....	8
1.1.3. Класифікація властивостей показників надійності ТЗ.	12
1.2. Одиничні показники надійності ТЗ.....	15
1.2.1. Показники безвідмовності і ремонтпридатності ТЗ..	15
1.2.2. Показники довговічності та збереження ТЗ.....	23
1.2.3. Закони розподілення наробітку до відмов.	24
1.3. Комплексні показники надійності ТЗ	25
1.3.1. Коефіцієнти готовності та простою, їх оцінка за графом стану ТЗ	25
1.3.2. Визначення та фізичне значення коефіцієнтів оперативної готовності, технічного використання та справної дії.	31
1.4. Забезпечення необхідних параметрів показників надійності ТЗ.....	33
1.4.1. Вплив об'єктивних та суб'єктивних факторів на кількісні значення показників надійності ТЗ.....	33
1.4.2. Засоби підвищення показників надійності при проектуванні, виробництві та експлуатації ТЗ.....	38
1.4.3. Схеми з'єднання елементів для розрахунку показників надійності ТЗ	41
1.5. Підвищення надійності ТЗ шляхом резервування	44
1.5.1. Постійне резервування елементів ТЗ	44
1.5.2. Характеристики надійності ТЗ при динамічному резервуванні.....	50
1.5.3.. Організація резерву на рівні комп'ютера й КС.	55
Глава 2. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТЗ.....	59
2.1. Методика оцінки надійності ТЗ на різних етапах життєвого циклу	59
2.1.1. Обґрунтування вимог до надійності ТЗ.	59
2.1.2. Вимоги до надійності елементів ТЗ і способи отримання їх числових значень	61
2.1.3. Методика оцінки надійності пристроїв ТЗ і систем.....	63
2.2. Надійність програмного забезпечення	66
2.2.1. Надійність програмного забезпечення.....	66
2.2.2. Моделі надійності програм	69
2.3. Моделювання надійності ТЗ	75
2.3.1. Місце і значення моделювання при оцінці надійності ТЗ.....	75

2.3.2. Рішення задач надійності ТЗ на основі математичного моделювання.	79
2.4. Методика оцінки інтенсивності відмов функціональних вузлів інтегральних схем (ІС, МКП, МКК, ПЛІС)	82
2.4.1. Введення.....	82
2.4.2. Призначення й область застосування методики.....	83
2.4.3. Допущення методики.....	84
2.4.4. Вихідні дані.....	84
2.4.5. Зміст методики.....	84
2.4.6. Аналіз моделі прогнозування інтенсивності відмов мікросхем з погляду можливості поділу інтенсивності відмов мікросхеми на суму інтенсивностей відмов кристала й корпусу	85
2.4.7. Розрахунки інтенсивності відмов комірки пам'яті запам'ятовувальних пристроїв, що входять до складу мікросхем пам'яті, мікропроцесорів і мікроконтролерів.....	87
2.4.8. Розрахунки інтенсивності відмов функціональних вузлів мікропроцесорів і мікроконтролерів.....	90
2.4.9. Розрахунки інтенсивності відмов функціонально закінчених вузлів мікросхем пам'яті.....	93
2.4.10. Розрахунки інтенсивності відмов функціонально закінчених вузлів програмувальних логічних інтегральних схем і базових матричних кристалів.....	94
2.4.11. Перевірка результатів розрахунків	95
2.4.12. Приклад розрахунків інтенсивностей відмов функціональних вузлів ПЛІС і перевірка результатів розрахунків.....	95
2.4.13. Висновки	100
Глава 3. ПРИНЦИПИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЗ. ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЗ.....	103
3.1. Організація та зміст експлуатація ТЗ.....	103
3.1.1. Характеристика головних принципів і етапів експлуатації ТЗ....	103
3.1.2. Керуючі документи, які визначають порядок зберігання і експлуатації ТЗ. Розробка та значення рекламацій в процесі експлуатації ТЗ.....	108
3.1.3. Види та порядок проведення ремонту ТЗ.....	111
3.1.4. Керівні документи з організації і проведення ремонту ТЗ	112
3.2. Система технічної діагностики ТЗ	114
3.2.1. Місце і значення технічної діагностики у забезпеченні надійності систем. Методи пошуку відмов.....	114
3.2.2. Апаратні засоби діагностування цифрових і мікропроцесорних пристроїв	122
3.2.3. Програмні засоби діагностування ПК	127
3.3. Організація технічного обслуговування ТЗ	132
3.3.1. Зміст, види, принципи організації технічного обслуговування	

ТЗ.	132
3.3.2. Основні показники ефективності технічного обслуговування ТЗ	133
3.4. Контроль технічного стану ТЗ	140
3.4.1. Задача контролю технічного стану ТЗ	141
3.4.2. Види контролю та їх зміст	142
3.4.3. Показники ефективності контролю ТЗ	146
3.5. Прогнозування технічного стану ТЗ	150
3.5.1. Методи прогнозування надійності ТЗ	150
3.5.2. Аналітичні методи прогнозування технічного стану ТЗ	151
3.5.3. Статистичні методи прогнозування відмов ТЗ.	155
3.5.4. Апаратурні методи прогнозування і забезпечення необхідної надійності ТЗ при експлуатації.....	156
3.6. Забезпечення надійності ТЗ при експлуатації шляхом укомплектування комплектом ЗІП	159
3.6.1. Види систем ЗІП	159
3.6.2. Показники достатності ЗІП.	160
3.6.3. Методичні основи розрахунку необхідної кількості запасних елементів.	162
Список прийнятих скорочень	165
Список літератури	167
Предметний покажчик	168

ВСТУП

У навчальному посібнику розглянуті питання пов'язані з кількісними показниками надійності ТЗ, забезпеченням необхідних показників надійності, оцінкою надійності, принципами експлуатації технічних засобів, технічним обслуговуванням та ремонтом ТЗ.

Конспект лекцій призначений для студентів Поліського національного університету. Він виконаний з метою систематизації матеріалу, необхідного для вивчення навчальної дисципліни «Теорія надійності та експлуатація технічних засобів», яка відповідає спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка»

Конспект лекцій структурно складається з трьох глав.

У першій главі розглядаються такі питання: класифікація показників надійності ТЗ, одиничні показники надійності, комплексні показники надійності ТЗ, способи підвищення надійності при конструюванні, виробництві та експлуатації ТЗ, характеристика методів резервування.

У другій главі дається оцінка надійності технічних засобів на різних етапах життєвого циклу, розглядаються питання забезпечення надійності програмного забезпечення, моделювання надійності ТЗ, надійність функціональних вузлів інтегральних схем (ІС, МКП, МКК, ПЛІС).

У третій главі розглядаються питання пов'язані з принципами експлуатації технічних засобів, а саме: характеристика головних принципів і етапів експлуатації ТЗ, керуючі документи, які визначають порядок зберігання і експлуатації ТЗ, система технічної діагностики. В цьому розділі також висвітлюються питання пов'язані з принципами технічного обслуговування, прогнозування технічного стану ТЗ, видами та порядком проведення ремонту, забезпеченням технічних засобів запасними елементами, розглядаються задачі контролю технічного стану та показники ефективності систем контролю ТЗ, дається класифікація видів контролю та розкривається їх зміст.

У всіх главах наводяться контрольні запитання для закріплення навчального матеріалу.

Глава 1

ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ТЗ

1.1. ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

1.1.1. Задачі і проблеми теорії надійності ТЗ.

Теорія надійності – це наука, яка займається вивченням закономірностей виникнення і розвитку відмов технічних систем, відновлення їх працездатності, методів забезпечення і способів контролю відповідних показників під час проектування, виробництва, експлуатації і спеціальних випробувань.

Основна задача теорії надійності – закласти теоретичну основу грамотної експлуатації технічних засобів та оптимальної організації технічного забезпечення РТЗ.

З аналогічною проблемою людство зіткнулося з перших кроків використання технічних засобів. Однак, поки технічні засоби були достатньо прості, ця проблема вирішувалась порівняно просто – методами спроб та помилок. Зі зростанням складності технічних засобів все гостріше стали виступати наступні проблеми надійності:

1. кількісна оцінка надійності, як одна з якостей технічних засобів;
2. порівняння різних конструкцій за принципом дії, призначенням і надійністю технічних засобів;
3. аналіз причин зниження надійності технічних засобів;
4. розробка рекомендацій, методів і прийомів по підвищенню надійності технічних засобів.

В теперішній час в зв'язку з великою складністю ТЗ, високим ступенем автоматизації їх роботи, насиченістю радіоелектронним обладнанням, складністю задач, які вирішуються, істотною неоднорідністю елементної бази, з'являються нові наукові напрямки в теорії надійності. Крім того, в зв'язку з цим, стали з'являться нові проблеми надійності.

З таких проблем можна виділити наступні:

1. фізико-математичне моделювання процесів виникнення і розвитку відмов елементної бази, що використовується в апаратурі і розробка на цій основі методик довгострокового прогнозування показників її надійності;
2. розробка теорії надійності складних електронних засобів і високонадійних систем;
3. наукова організація обслуговування складних засобів, яка забезпечує їх найбільш повне та ефективно використання;
4. створення інженерних методик конструювання складних електронних засобів з заданими експлуатаційними якостями;
5. удосконалення статистичних методів контролю показників надійності складних електронних засобів за результатами, що отриманні під час експлуатації та спеціальних випробувань;

6. розвиток апаратних методів попередження відмов складних електронних засобів, створення автоматизованих і автоматичних систем управління станом технічних засобів.

З цих проблем теорії надійності витікає, що знання основ теорії надійності дозволить успішно засвоїти передові прийоми і методи забезпечення високих ступенів готовності технічних засобів.

1.1.2. Основні терміни і визначення теорії надійності ТЗ.

Класифікація видів технічного стану ТЗ.

Теорія надійності, як наука, має дуже багато термінів, властивих лише їй.

В зв'язку з цим був розроблений ДСТ 27 002-83, де і наведені всі основні терміни та визначення теорії надійності. Згідно вказаному стандарту будемо розглядати основні терміни та визначення, необхідні для вивчення теорії надійності.

Одним з важливіших якостей цієї сукупності є надійність об'єкту.

Надійність – це якість об'єкту зберігати в часі та в встановлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання та транспортування.

Предметом дослідження теорії надійності є об'єкт.

Під об'єктом в загальному випадку розуміють предмет певного цільового призначення, що розглядається в періоди проектування, виробництва і випробування. Кожну частину об'єкту будемо називати *елементом*. *Деталлю* будемо називати такий елемент, який не може бути поділений під час експлуатації без його порушення. Як відомо любий об'єкт характеризується однією з найбільш важливих характеристик – це характеристикою якості об'єкту.

Якість об'єкту – це сукупність властивостей об'єкту, які обумовлюють його придатність до використання за призначенням і відповідність всім встановленим вимогам, які обговорені в технічній документації.

Надійність є комплексною властивістю, яка в залежність від призначення об'єкту та умов його застосування складається з сполучення властивостей: безвідмовності, довговічності, ремонтоздатності і збереження (рис.1.1.1)

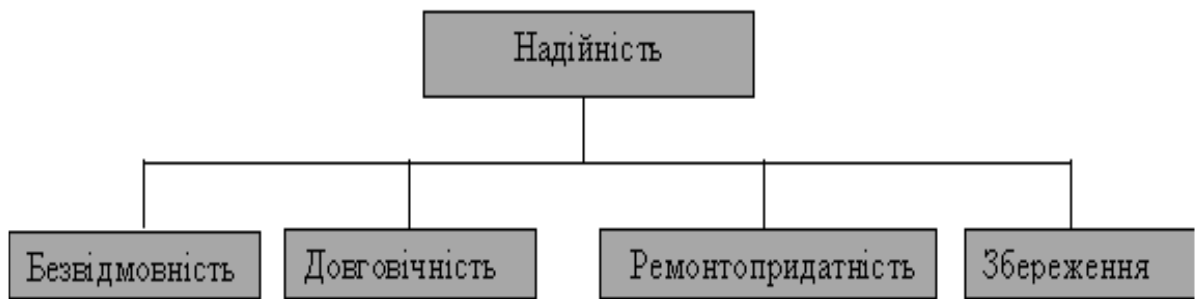


Рис. 1.1.1

Для конкретних об'єктів та умов їх експлуатації ці властивості можуть мати різну відносну значимість. Розглянемо ці визначення:

Безвідмовністю називають властивість об'єкта безперервно зберігати працездатний стан за перебіг визначеного часу або якогось наробітку. Під наробітком тут розуміють тривалість або об'єм праці об'єкту в годинах, кілометрах пробігу, тонах вантажу та інше.

Довговічністю називають властивість об'єкту зберігати працездатність до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту.

Загальним для безвідмовності і довговічності є те, що вони містять вимоги збереження працездатності стану за перебіг визначеного часу або наробітку.

Розрізняються вони тим, що безвідмовність вимагає неперервного збереження працездатності, а довговічність – збереження працездатності за перебіг тривалого часу, включаючи перерви для технічного обслуговування.

Ремонтопридатність – це властивість об'єкту, яка полягає в пристосованості до попередження і відновлення працездатного стану шляхом проведення технічного обслуговування та ремонтів.

Збереженням називають властивість об'єкта зберігати значення показників безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності під час і після збереження і (або) транспортування. Збереження – одна з властивостей, які складають надійність. Розрізняють збереження об'єкту до вводу в експлуатацію і збереження об'єкту під час експлуатації (при перервах в роботі).

Розглянемо визначення станів, в яких може знаходитись технічний об'єкт:

Стан – сукупність кількісних значень параметрів, які описують об'єкт, і якісних ознак об'єкту. Номенклатура цих параметрів і ознак, а також межі допустимих їх змін встановлюються документацією на об'єкт. С точки зору надійності розрізняють справний та несправний стан, працездатний і непрацездатний стан, а також граничний стан.

Працездатним станом (працездатністю) називається стан об'єкта, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність

виконувати задані функції, відповідають вимогам, встановленим нормативно-технічною і (або) конструкторською документацією.

Непрацездатним станом (непрацездатністю) називають стан об'єкта, при якому значення хоча б одного параметра, що характеризує здатність виконувати задані функції, не відповідає вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Працездатність і непрацездатність в загальному випадку можуть бути повними або частковими. Повністю працездатний об'єкт забезпечує у певних умовах максимальну ефективність його застосування, ефективність застосування в тих самих умовах частково працездатного об'єкту менше максимально можливої, але значення його показників ще знаходяться в межах, встановлених для такого функціонування, яке вважається нормальним. Частково непрацездатних об'єкт може функціонувати, але рівень ефективності при цьому нижче допустимого. Повністю непрацездатних об'єкт використовувати за призначенням неможливо. Поняття часткової працездатності та часткової непрацездатності використовують головним чином до “складних” систем, для яких характерна можливість знаходження в декількох станах. Ці стани різняться рівнями ефективності функціонування системи.

Працездатність і непрацездатність деяких об'єктів можуть бути лише повними.

У визначення якості довговічності використовують поняття граничного стану. *Граничним* називають стан об'єкту, при якому його подальше використання за призначенням неприпустимо або недоцільно.

Критерій (ознака або сукупність ознак) граничного стану встановлюється нормативно-технічною або конструкторською документацією.

Збереження відображає можливість переходу об'єкту, як з працездатного в непрацездатний стан, так і зі справного в несправний стан.

Справним станом (справністю) називають стан об'єкту при якому він відповідає усім вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Несправним станом (несправністю) називають стан об'єкта, при якому він не відповідає хоча б одній з вимог нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Таким чином, несправний стан є більш “вузьким” по відношенню до непрацездатного стану, так як порушення працездатності завжди означає порушення справності, але не любе порушення справності є порушенням працездатності об'єкта.

Несправність може виникнути завдяки виходу за допуски як основних, так і допоміжних параметрів, які характеризують, наприклад, товарний вигляд об'єкту або зручність його експлуатації.

За тих же причин справний стан об'єкту є більш “вузьким” по відношенню до його працездатного стану, так як справність означає і працездатність, а працездатність не завжди означає справність об'єкту.

Ремонтопридатність відображає можливість переходу об'єкту від непрацездатного (несправного) стану в працездатний стан (справний). Причому, якщо перехід зі справного стану в несправний супроводжується подією “ушкодження”, а перехід з працездатного стану в непрацездатний стан – подією “відмова”, то зворотні переходи супроводжуються подіями “ремонт” та “відновлення”.

Під *ушкодженням* розуміють подію, яка міститься в порушенні справного стану об'єкту при збереженні його працездатного стану.

Подія, яка міститься в порушенні працездатного стану об'єкту, називається *відмовою*. Критерій відмови (ознака або сукупність ознак непрацездатного стану об'єкту) встановлюють в нормативно-технічній і (або) конструкторській документації.

Як витікає з визначення, під відмовою слід розуміти не лише повну втрату працездатності, але й її погіршення внаслідок зміни значення параметрів.

Більш докладну і велику класифікацію відмов ми розглянемо в наступних лекціях.

Відновлення можна визначити як подію, яка міститься в відновленні справності і працездатності або тільки працездатності у випадку виникнення ушкодження або відмови об'єкту.

Не слід плутати поняття відмови і несправності об'єкта, так як перше означає подію, а друге – стан.

Не відновлювальний об'єкт – об'єкт, працездатність якого у випадку виникнення відмови не підлягає відновленню в умовах, що розглядаються.

При аналізі надійності, особливо при виборі показників надійності об'єкту, вагоме значення має рішення, яке повинно бути прийняте у випадку відмови об'єкту. Якщо в ситуації, яка розглядається, відновлення працездатності даного об'єкту при його відмові за якихось причин визнається недоцільним або нездійсненим (наприклад, із-за неможливості перерви функції, яка виконується), то такий об'єкт в даній ситуації є не відновлюваним. Таким чином, один і той самий об'єкт в залежності від особливостей або етапів експлуатації може вважатися відновлювальним або не відновлювальним.

Наприклад, апаратура метеосупутника на етапі збереження відноситься до відновлювальної, а під час польоту до космосу – до не відновлювальної. Більш того, навіть один і той самий об'єкт можливо віднести до того чи іншого типу в залежності від призначення: ЕОМ, яка використовується для неоперативних обчислень, є об'єктом відновлювальним, так як у випадку відмови люба операція може бути повтореною, а та ж сама ЕОМ, якщо вона управляє складним

технологічним процесом у металургії або хімії, є не відновлювальним об'єктом, так як відмова або збій приводить до непоправних наслідків.

Показник надійності – технічна характеристика, яка кількісним чином визначає одну або декілька якостей, що складають надійність об'єкту.

Показник надійності кількісно характеризує в якому ступені даному об'єкту або даній групі об'єктів належать певні якості, що обумовлюють надійність. Показник надійності може мати розмірність або не мати її.

Наробіток – тривалість або об'єм роботи об'єкта.

Об'єкт може працювати безперервно або з перервами. В залежності від цього розрізняють наступні види об'єктів:

об'єкт безперервної дії – об'єкт, який перестає функціонувати за цільовим призначенням лише у випадку виникнення відмови або планових ремонтів та профілактичного обслуговування;

об'єкт періодичної дії – об'єкт, який виконує свої функції в окремі, періодично повторювані проміжки часу;

об'єкт разової дії – об'єкт, який в силу специфіки застосування або умов праці використовується за цільовим призначенням лише один раз;

черговий об'єкт – об'єкт, час подання замовлення на використання якого є випадковим.

З точки зору тривалості експлуатації існує поняття технічний ресурс, строк служби.

Технічний ресурс – наробіток об'єкту від початку його експлуатації до досягнення граничного стану або капітального ремонту, або від початку експлуатації після ремонту до наступного ремонту або настання граничного стану.

Строк служби – календарна тривалість експлуатації об'єкту від його початку до відновлення після капітального ремонту або до настання граничного стану.

Таким чином, розглянуті основні поняття теорії надійності, дані визначення основних параметрів, які характеризують надійність об'єкту, що дозволить вивчити курс теорії надійності ТЗ в обсязі, що необхідний для отримання фахової спеціальності.

1.1.3. Класифікація властивостей показників надійності ТЗ.

Кожен існуючий предмет має своє призначення, а отже ступінь його придатності можливо оцінити за допомогою різних показників. Найбільш загальними характеристиками предмету є його надійність і ефективність.

Кожен об'єкт характеризується сукупністю якостей, які відображають його придатність для задоволення певних потреб людини. Ця сукупність властивостей складає саме широке поняття ступеня такої придатності – *якість об'єкта*. Більш вузьким поняттям ступеня здатності об'єкта для задоволення потреб людини є ефективність.

Під *ефективністю* розуміють ступінь відповідності об'єкта цільовому призначенню.

Якість і ефективність є інтегральними поняттями, що характеризують сукупність окремих властивостей об'єкта. Окремі властивості об'єкта характеризуються деякими числовими величинами, які називаються показниками або параметрами.

Під *показниками надійності* розуміють кількісну міру одного або декількох властивостей, які складають надійність об'єкту.

В надійності розрізняють наступні типи показників (рис. 1.1.2):

1. *Одиничні показники надійності* – показники, які відносяться до однієї з властивостей, що складають надійність об'єкту.

2. *Комплексні показники надійності* – показники, що відносяться до декількох властивостей, які складають надійність об'єкту.

Всі показники об'єкта повинні задовольняти наступним основним вимогам:

- узгодженість з поняттям властивості, яка відображається;
- нормованість;
- можливість завдання числом;
- можливість розрахунку при проектуванні;
- можливість перевірки при експлуатації;
- достатня універсальність.

Показники надійності

Одиничні				Комплексні
Безвідмовності	Ремонтопридатності	Довговічності	Збереження	
Імовірність відмов;	Імовірність відновлення працездатності	Середній ресурс	Середній строк збереження	Коефіцієнт готовності
Імовірність безвідмовної роботи;	Імовірність не відновлення працездатності	Середній строк служби	Гамма – відсотковий строк збереження	Коефіцієнт простою
Щільність імовірності відмов;	Щільність імовірності відновлення працездатності	Гамма – відсотковий ресурс		Коефіцієнт оперативної готовності
Інтенсивність відмов;	Інтенсивність відновлення працездатності	Гамма – відсотковий строк служби		Коефіцієнт технічного використання
Середній час наробітку на відмову.	Середній час відновлення працездатності	Призначений ресурс		Коефіцієнт справної дії
		Призначений строк служби		

Рис. 1.1.2. Класифікація показників надійності об'єктів

У відповідності з перерахованими вимогами, формулювання вихідних визначень показників надійності припускає завдання найменування, кількісної міри і символічного відображення кожного показника, вказівки способів їх теоретичного розрахунку і експериментальної перевірки. Ці визначення залежать від причин і характеру зміни розглянутих вище станів об'єктів, тобто від природи подій “відмова” і “відновлення працездатності”.

Практика показує, що відмова і відновлення працездатності об'єктів є випадковими подіями. *Випадковість відмов об'єктів обумовлена:*

- випадковим характером впливу зовнішніх негативних факторів і наявністю випадкових дефектів елементної бази;
- випадковим характером протікання фізико-хімічних процесів, що приводять до відмов об'єктів;
- термофлюктуаційною природою міцності конструкційних матеріалів тощо.

Відновлення працездатності об'єктів є випадковим через:

- випадковість відмов різних типів елементів, час заміни яких різний;
- випадковість часу пошуку елемента, який відмовив, в складі об'єкту;
- випадковість часу доставки запасного елемента для заміни того, який відмовив;
- випадковість часу заміни однотипних елементів спеціалістами різної кваліфікації та інше.

Основною характеристикою будь-якої випадкової події є імовірність або ступінь об'єктивної можливості цієї події. Кількісною (приблизною, статистичною) мірою ймовірності є частота появи випадкової події в серії досліджень. При умові незалежності подій ця частота дорівнює відношенню числа сприятливих випадків, в яких подія відбулася, до числа всіх досліджень. При нескінченному збільшенні числа досліджень частота прагне до ймовірності випадкової події. Таким чином, для визначення основних показників надійності необхідний апарат теорії ймовірностей, а всі визначення треба ділити на словесні, статистичні і імовірнісні (при нескінченному збільшенні числа дослідів). При умові ергодичності вказаних вище випадкових процесів ці показники можуть бути обраховані за множиною зразків, що відмовили, або за множиною відмов одного зразка ТЗ.

Надійність є складною властивістю ТЗ, яка в залежності від призначення виробу(системи) й умов його застосування складається зі сполучення якостей: безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності і збереження.

Для конкретних виробів і умов їх експлуатації ці якості мають різне відносне значення.

Комплексне рішення проблем надійності сприяє підвищенню ефективності застосування технічних засобів.

1.2. ОДИНИЧНІ ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТЗ

1.2.1. Показники безвідмовності і ремонтпридатності ТЗ.

Розглянемо показники безвідмовності для не відновлюваних і відновлюваних об'єктів. До показників безвідмовності не відновлюваних елементів відносяться:

- імовірність відмов;
- імовірність безвідмовної роботи;
- щільність імовірності відмов;
- інтенсивність відмов;
- середній час наробітку на відмову.

Як бачимо, перші два з них є протилежними подіями одного і того самого процесу і їх словесне визначення можна сформулювати наступним чином: *імовірність безвідмовної роботи* – імовірність того, що об'єкт не відмовить в перебігу деякого часу або наробітку; *імовірність відмов* – імовірність того, що об'єкт в перебігу деякого часу або деякого наробітку відмовить.

Розглянемо статичне визначення цих показників. Для цього запропонуємо наступне:

нехай на випробування поставлено N простих однотипних не відновлюваних об'єктів. Випробування проводиться до відмови всіх N об'єктів (рис.1.2.2).

Із-за випадковості відмов під час випробувань випадковими будуть наступні величини:

- час безвідмовної роботи i -го об'єкту τ_{oi} ;
- число об'єктів $n_o(t)$, що відмовили до моменту часу t ;
- число об'єктів $N_o(t) = N - n_o(t)$, що не відмовили до моменту часу t ;
- число об'єктів $\Delta n_o(t, t + \Delta t)$, що відмовили на інтервалі часу t до $t + \Delta t$.

Так як всі перераховані випадкові величини обумовлені одною і тою ж самою випадковою подією – відмовою об'єктів, то і числові характеристики повинні бути зв'язані між собою.

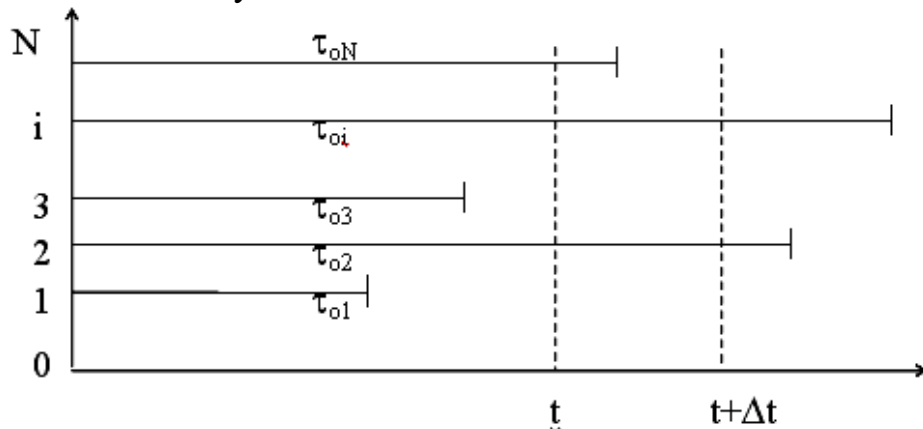


Рис. 1.2.2.

Характеристикою випадкової величини τ_{oi} може служити або $P(t) = P[\tau_{oi} > t]$ – імовірність того, що об'єкт не відмовить до моменту часу t (імовірність безвідмовної роботи об'єкту), або $F(t) = F[\tau_{oi} \leq t]$ –

імовірність того, що об'єкт відмовить до моменту часу t (імовірність відмови об'єкту).

Статистичні формули для визначення вказаних характеристик можна представити у вигляді:

$$P(t) = \frac{N_0(t)}{N} = \frac{N - n_0(t)}{N} = 1 - \frac{n_0(t)}{N} \quad (1.2.1)$$

$$F(t) = \frac{n_0(t)}{N} = 1 - P(t), \quad (1.2.2)$$

$$P(t)_{t=0} = 1 \quad F(t)_{t=0} = 0 \quad F(t)_{t=\infty} = 1 \quad P(t)_{t=\infty} = 0$$

Ймовірнісне подання отриманих величин отримаємо при граничному переході від статистичних величин

$$P(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \hat{P}(t) \quad F(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \hat{F}(t) \quad (1.2.3)$$

Аналіз виразів (1.2.1) і (1.2.2) показує, що функція $F(t)$ є монотонною, неубуваючою, позитивною функцією, яка змінюється від 0 (на момент початку випробувань об'єктів, що відмовили, не було) до 1 (при більшому t всі об'єкти відмовляють), а $P(t)$ - монотонна, не зростаюча, позитивна функція, що змінюється від 1 до 0.

Щільність ймовірності відмов

Щільністю будь-якої функції називають межу відношення приросту самої функції до приросту аргументу при прагненні аргументу до 0 або рівна похідній цієї функції. Тому якщо взяти відношення числа об'єктів, які відмовили на інтервалі часу від t до $t + \Delta t$ до загального числа об'єктів $\Delta n_0(t, t + \Delta t)/N$, то воно буде дорівнювати приросту ймовірності відмов об'єкта на інтервалі від t до $t + \Delta t$. Поділивши цей приріст на інтервал часу Δt , отримаємо щільність функції ймовірності відмови $F(t)$ або статистичне визначення щільності ймовірності відмови об'єкту

$$\frac{\Delta n_0(t, t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{\Delta F(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = f(t) \quad (1.2.4)$$

$$f(t) = \frac{\Delta F(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{\frac{n_0(t + \Delta t)}{N} - \frac{n_0(t)}{N}}{\Delta t} = \frac{\Delta n_0(t, t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t}$$

тобто $f(t)$ – відношення числа відмов в інтервалі часу $[t, t + \Delta t]$ до добутку числа справних об'єктів в початковий момент часу $t = 0$ на тривалість інтервалу Δt .

У ймовірнісній формі:

$$f(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{\Delta F(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = F'(t) \quad (1.2.5)$$

враховуючи

$$F(t) = 1 - P(t) \quad (1.2.6)$$

$$f(t) = (1 - P(t))' = -P'(t) \quad (1.2.7)$$

тобто, щільність ймовірності відмов об'єктів дорівнює похідній ймовірності відмов або похідній безвідмовної роботи, що взята зі знаком мінус.

Якщо, проінтегрувати (1.2.5) при початкових умовах $P(0) = 1$ і $F(0) = 0$, отримаємо:

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau + C = \int_0^t f(\tau) d\tau.$$

так як $C = 0$ (за умовою).

З урахуванням (7)

$$P(t) = -\int_0^t f(\tau) d\tau + C = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_t^\infty f(\tau) d\tau.$$

так як $C = 1$ (за умовою).

Отже $\int_t^\infty f(\tau) d\tau = 1$, так як

$$F(t) + P(t) = 1, \Rightarrow \int_t^\infty f(\tau) d\tau + \int_t^\infty f(\tau) d\tau = 1,$$

Тобто $f(t)$ – замкнена, (така, що не розходиться) позитивна функція, площа під якою дорівнює одиниці.

Так як функція $f(\tau)$ дорівнює похідній від функції $F(t)$, то вона досягає максимуму в точках перегину та прагне до нуля для її горизонтальних асимптот.

Функції $F(t)$ і $f(t)$ є найбільш повними характеристиками випадкової події – відмови об'єкту. Тому функцію $f(t)$ називають диференціальним законом, $F(t)$ – інтегральним законом розподілення наробітку об'єкта або відмови. Недоліком цих функцій є те, що вони не відображають наглядно динаміку зміни безвідмовності об'єкту з плином часу. На питання, як

змінюється щільність імовірності відмови об'єкту з плином часу, дає відповідь такий показник безвідмовності об'єкту, як інтенсивність відмов.

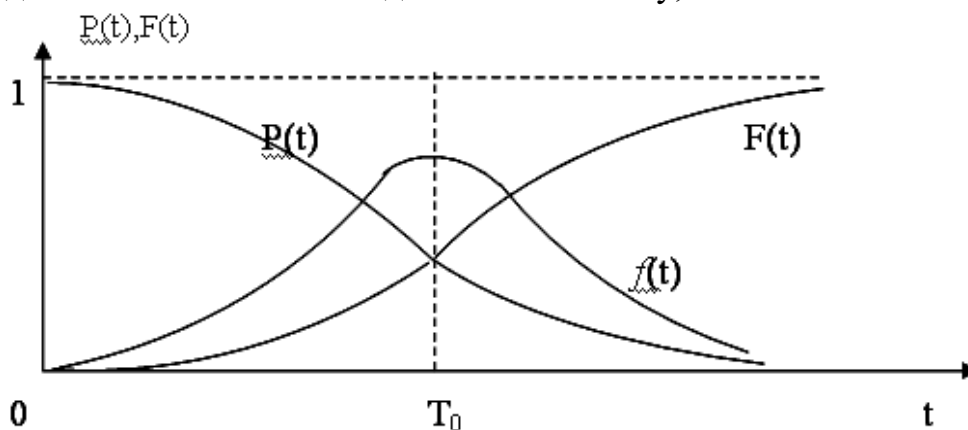


Рис. 1.2.3

Інтенсивність відмов

Щоб зрозуміти інтенсивність відмов необхідно кожен раз наново ставити розглянутий вище експеримент, але тільки для об'єктів різного “віку”, тобто. в умовах постановки наведеного вище експерименту треба на кожен момент часу t виключити із розглядання об'єкти, що відмовили і рахувати, що експеримент почався заново. Тоді щільність імовірності відмов при умові, що з експерименту виключаються об'єкти, що відмовили, повинна обчислюватися за формулою, аналогічною

$$f(t) = \frac{\Delta n_0(t, t + \Delta t)}{N \Delta t}, \text{ але замість } N \text{ треба брати } N_0(t) = N - n_0(t).$$

Статистичне визначення такої щільності, що має назву інтенсивності відмов, має вигляд

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n_0(t, t + \Delta t)}{[N - n_0(t)] \Delta t} = \frac{\frac{n_0(t, t + \Delta t)}{N \Delta t}}{\frac{[N - n_0(t)] \Delta t}{N \Delta t}} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (1.2.8)$$

Поділивши на $N \cdot \Delta t$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{-P'(t)}{P(t)}; \quad (1.2.9)$$

Таким чином інтенсивність відмов – це умовна щільність імовірності відмови об'єкту до моменту часу t при умові, що для цього моменту відмови виробу не відбувся.

Найбільш характерний вид цієї функції для любых об'єктів наведений на рис.1.2.4.

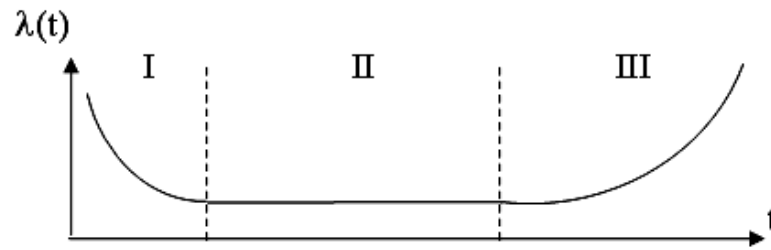


Рис. 1.2.4

За характером зміни $\lambda(t)$ весь етап експлуатування поділяють на три періоди:

- 1- період приробітку, коли інтенсивність відмов знижується за рахунок виходу зі строю дефектних елементів об'єктів;
- 2- період нормальної експлуатації з приблизно постійним рівнем інтенсивності відмов об'єктів;
- 3- період старіння і масового виходу елементів об'єктів зі строю.

Таким чином, для різних періодів експлуатації ТЗ слід приймати і різні розподілення наробітку до його відмови.

Якщо взяти інтеграл від виразу $\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{-P'(t)}{P(t)}$, то отримаємо

$$\int_0^t \lambda(\tau) d\tau = \int_0^t -\frac{P'(\tau)}{P(\tau)} d\tau = -\ln P(t)$$

Звідки

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} \quad (1.2.10)$$

Вираз (1.2.10) в теорії надійності є основним, так як встановлює зв'язок всіх показників безвідмовності з інтенсивністю відмов об'єктів, яка найчастіше є вихідною при інженерних розрахунках показників надійності на етапах проектування і виробництва ТЗ.

Так, наприклад: $f(t) = -P'(t) = \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$.

На практиці досить часто використовується ще один показник безвідмовності – це середній наробіток об'єкту до відмови.

Середній наробіток об'єкту до відмови

Під середнім наробітком об'єктів до відмови розуміють математичне очікування наробітку до першої їх відмови.

Статистичним визначенням τ_{oi} безвідмовної роботи N об'єктів є

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{oi}}{N}.$$

Імовірнісне визначення часу цієї величини має вид

$$T_0 = \lim_{N \rightarrow \infty} T_0 = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t (-P'(t)) dt =$$

після інтегрування по частинам отримаємо $\int_0^{\infty} P(t) dt$.

Тобто, середній наробіток об'єктів до відмови дорівнює площі під кривою $P(t)$ (див. рис.1.2.5).

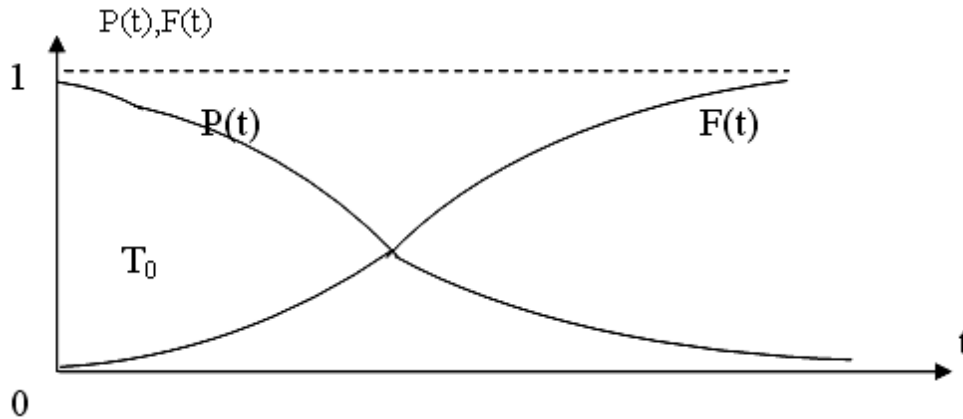


Рис.1.2.5

Отримані вище вирази дозволяють скласти систему формул зв'язку показників безвідмовності.

Таблиця формул зв'язку між показниками безвідмовності має вигляд

	$F(t)$	$P(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$	T_0
$F(t)$		$1 - F(t)$	$F'(t)$	$\frac{F'(t)}{1 - F(t)}$	$\int_0^{\infty} (1 - F(t)) dt$
$P(t)$	$1 - P(t)$		$-P'(t)$	$-\frac{P'(t)}{P(t)}$	$\int_0^{\infty} P(t) dt$
$f(t)$	$\int_0^t f(\tau) d\tau$	$1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau$		$-\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(\tau) d\tau}$	$\int_0^{\infty} t f(t) dt$
$\lambda(t)$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$	$e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$	$\lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$		$\int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} dt$

Знання цих формул є основою для отримання навичок розрахунку і аналізу показників надійності електронних засобів, вміння прийняття обґрунтованих рішень на управління ефективністю та готовністю ТЗ.

Ми розглянули основні показники надійності, які відносяться до не відновлюваних об'єктів. Також з'ясували що ці показники відносяться до групи показників безвідмовності.

Розглянемо показники ремонтпридатності.

Показники ремонтпридатності відносяться до одиничних показників надійності відновлюваних об'єктів. Ці показники визначають аналогічно показникам безвідмовності не відновлюваних об'єктів, вважаючи випадковою подією відновлення їх працездатності.

1). *Імовірність відновлення працездатності $V(t)$* – це імовірність того, що працездатність об'єкта буде відновлена за час t .

Статистичне і імовірнісне визначення цього показника можна отримати з прикладу аналогічно розглянутому вище для показників безвідмовності.

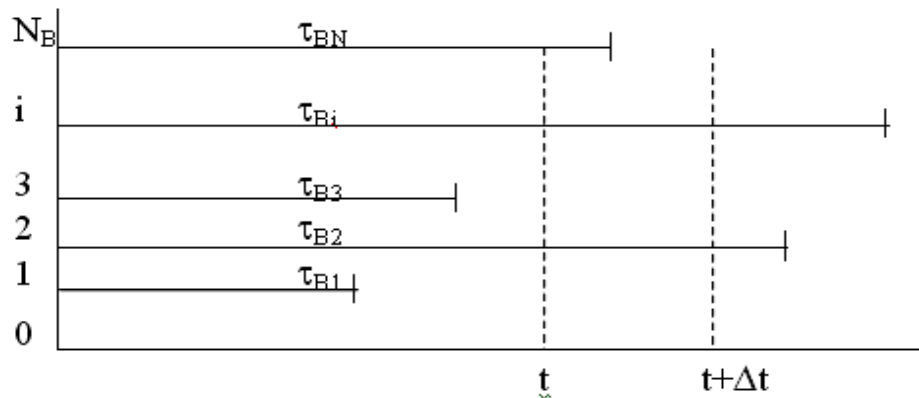


Рис. 1.2.6

Нехай на відновлення поставлено N об'єктів. Через випадковість відновлення випадковими будуть наступні величини:

τ_{Bi} – час відновлення працездатності i -го об'єкту;

$n_B(t)$ – число відновлень працездатності об'єктів за інтервал часу $0 \dots t$;

$N_B(t) = N - n_B(t)$ – число не відновлень працездатності об'єктів за той самий інтервал часу;

$\Delta n_B(t, t + \Delta t)$ – число відновлень працездатності об'єктів за інтервал часу від t до $t + \Delta t$;

Тоді аналогічно для як для випадку безвідмовності

$$\bar{V}(t) = \frac{\bar{n}_B(t)}{N}, \quad V(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\bar{n}_B(t)}{N}.$$

2). *Імовірність не відновлення працездатності об'єкту $G(t)$* – імовірність того, що працездатність об'єкту не буде відновлена за час t .

Формула для її розрахунку буде мати наступний вигляд:

$$G(t) = \frac{N_B(t)}{N}, \quad G(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_B(t)}{N}.$$

3). *Щільність імовірності відновлення працездатності* $v(t)$ – це границя відношення приросту імовірності відновлення об'єкту в інтервалі часу від t до $t + \Delta t$ до величини цього інтервалу при $\Delta t \rightarrow 0$.

$$v(t) = \frac{\Delta h_B(t, t + \Delta t)}{N \Delta t}; \quad v(t) = \frac{dV(t)}{dt} = V'(t).$$

4). *Інтенсивність відновлення працездатності* $\mu(t)$ – це умовна щільність імовірності відновлення працездатності об'єкту, яка визначається для моменту часу, що розглядається, при умові, що до цього моменту працездатність об'єкту не буде відновлена.

$$\mu(t) = \frac{\Delta n_B(t, t + \Delta t)}{[N - n_B(t, t + \Delta t)] \cdot \Delta t}; \quad \mu(t) = \frac{v(t)}{G(t)}.$$

5). *Середній час відновлення працездатності* T_B – математичне очікування часу відновлення працездатності об'єкту.

$$T_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{Bi}; \quad T_B = \int_0^{\infty} t v(t) dt$$

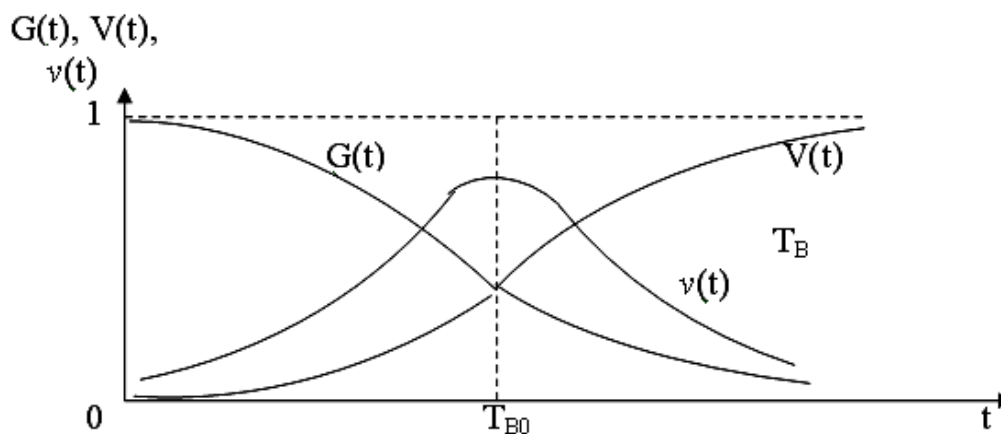


Рис. 1.2.7

Таким чином, ми отримали основні формули для оцінки одиничних показників надійності з точки зору безвідмовності і ремонтпридатності об'єкту, що оцінюється. Виявилось, що всі формули для оцінки різних показників безвідмовності і ремонтпридатності взаємопов'язані (відповідно за групами).

1.2.2. Показники довговічності та збереження ТЗ

До показників довговічності і збереження об'єктів відносять усереднені характеристики випадкових величин:

строк служби – час за перебіг якого об'єкт досягає граничного стану;

ресурс – наробіток, під час якого об'єкт досягає граничного стану;

строки збереження – час збереження і (або) транспортування, за перебіг якого відповідні показники досягають встановлених нормативно-технічною документацією.

У відповідності з цим розрізняють наступні показники:

а) довговічності

середній строк служби або середній ресурс – математичне очікування строку служби або ресурсу T_p :

$$\bar{T}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{pi}; \quad T_p = \int_0^{\infty} t_p f(t_p) dt_p,$$

де τ_{pi} – календарна тривалість експлуатації або наробіток, за перебіг якого об'єкт досягає граничного стану;

гамма-відсотковий строк служби або гамма-відсотковий ресурс - календарна тривалість експлуатації або наробіток, за перебіг якого об'єкт не досягає граничного стану з заданою імовірністю гамма-відсотків ($T_{\gamma p}$):

$$1 - F(T_{\gamma p}) = P(T_{\gamma p}) = \frac{\gamma}{100}$$

$$T_{\gamma p} = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\gamma}{100}, \quad \gamma = 1 - \int_0^{T_{\gamma p}} f(T_{\gamma p}) dt_p$$

де $F(T_{\gamma p})$ - функція розподілення строку служби.

б) збереження

- середній строк збереження – математичне очікування строку збереження T_z .

$$\bar{T}_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{zi}; \quad T_z = \int_0^{\infty} t_z f(t_z) dt_z$$

- гамма-відсотковий строк збереження – строк збереження, за перебіг якого об'єкт не досягає несправного стану з заданою імовірністю гамма відсотків $T_{\gamma z}$;

$$T_{\gamma 3} = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\gamma}{100} ;$$

Формули аналогічні наведеним вище для групи показників довговічності.

Тут в наведених формулах:

τ_{pi} – календарна тривалість експлуатації (збереження) або наробіток, за перебіг якого i -ий об'єкт досягає граничного (встановленого) стану;

t_p – безперервне значення цієї тривалості або наробітку;

$f(t_p)$ – щільність розподілення випадкової величини t_p .

На практиці іноді зустрічається поняття «призначений ресурс», під яким розуміється сумарний наробіток, при досягненні якого експлуатація об'єкту повинна бути зупиненою незалежно від його стану.

Усі показники довговічності, збереження, ремонтпридатності і безвідмовності є частиною загальної характеристики об'єкта, його надійності.

1.2.3. Закони розподілення наробітку ТЗ до відмов.

На різних періодах експлуатації ТЗ діють різні закони наробітку об'єкту до відмови, тобто відповідні функції щільності імовірності відмов $f(t)$. Дія різних законів розподілу обумовлена різною природою випадкових величин – відмов і відновлень працездатності ТЗ.

Так, для нормального періоду експлуатації за основу беруть експоненційний закон розподілу. Для періоду початку старіння ТЗ, коли інтенсивність відмов починає різко зростати, за основу беруть нормальний закон розподілу наробітку об'єкту до відмови. Для періоду приробки ТЗ, завершення якого характеризується зменшенням інтенсивності відмов з плином часу, за основу беруть закон Вейбулла–Гнеденко тощо.

Таблиця законів розподілу наробітку об'єкту до відмови та відновлення працездатності ТЗ

Найменування	$P(t), G(t)$	$f(t), v(t)$	$\lambda(t), \mu(t)$	T_0, T_B	σ_0^2, σ_B^2
Експоненціальний закон	$e^{-t/\sigma}$	$\frac{1}{\sigma} e^{-t/\sigma}$	$\frac{1}{\sigma}$	σ	σ^2
Нормальний закон	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_t^\infty e^{-\frac{(\tau-T)^2}{2\sigma^2}} d\tau$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{\exp\left(-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}\right)}{\int_t^\infty \exp\left(-\frac{(\tau-T)^2}{2\sigma^2}\right) d\tau}$	T	σ^2
Закон Ерланга	$\left(1 + \frac{t}{\sigma}\right) e^{-t/\sigma}$	$\frac{1}{\sigma^2} e^{-t/\sigma}$	$\frac{t}{\sigma(\sigma+t)}$	$1+\sigma$	$0,35\sigma^2$
Закон Релея	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2}$	$1,25\sigma$	$0,43\sigma^2$
Закон Пуассона	$\sum_{k=0}^n \frac{(\sigma \cdot t)^k}{k!} e^{-\sigma \cdot t}$	$\frac{(\sigma \cdot t)^n}{n!} \cdot e^{-\sigma \cdot t}$	$\frac{(\sigma \cdot t)^n}{P(t) \cdot n!} \cdot e^{-\sigma \cdot t}$	$\frac{n+1}{\sigma}$	$\frac{n+1}{\sigma^2}$
Закон Вейбулла-Гнеденко	$e^{-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^n}$	$\frac{n}{\sigma} \left(\frac{t}{\sigma}\right)^{n-1} e^{-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^n}$	$\frac{n}{\sigma} \left(\frac{t}{\sigma}\right)^{n-1}$	$\sigma \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right)$	$\sigma^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{n}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{n}\right) \right]$

Таким чином, розглянуті показники безвідмовності, ремонтпридатності, довговічності та збереження ТЗ дозволяють розрахувати надійність об'єктів.

1.3. КОМПЛЕКСНІ ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТЗ

Розглянуті одиничні показники дозволяють кількісно оцінити лише окремі властивості надійності. На практиці виявляється необхідним оцінювати і порівнювати об'єкти за декількома властивостями одночасно. Для цього вводяться комплексні показники надійності.

В наш час широко використовуються комплексні показники, які враховують лише дві властивості надійності – безвідмовність і ремонтпридатність.

Такими показниками є коефіцієнти:

1)готовності; 2)оперативної готовності; 3)технічного використання.

1.3.1. Коефіцієнти готовності і простою ТЗ. Їх оцінка за графом стану ТЗ.

Згідно ДСТ 27.002-83, *коефіцієнт готовності* – це імовірність того, що об'єкт опиниться в працездатному стані в довільний момент часу, крім

плануємих періодів, за перебіг яких, використання об'єкту за призначенням не передбачається.

Знайдемо аналітичний вираз для імовірності застати об'єкт працездатним в довільний момент часу t .

Розглянемо випадок, коли об'єкт безперервної дії в процесі експлуатації в кожен момент часу може знаходитись в працездатному або непрацездатному стані.

Позначимо через $P(t)$ – імовірність працездатного стану об'єкту в момент часу t , а через $F(t)$ – імовірність непрацездатного стану в момент часу t . Ймовірно, що $P(t) + F(t) = 1$

Знайдемо імовірність $P(t + \Delta t)$ працездатного стану об'єкту в деякий довільний момент часу $t + \Delta t$. При цьому будемо вважати, що потоки відмов і відновлень є найпростішими, тобто наробіток між відмовами і часом відновлення розподілені за експоненціальним законом з параметрами λ_0 і μ_0 .

Тут нам доречно згадати з математики, що таке потік, і що таке закон розподілення, і що таке найпростіший потік.

Потоком випадкових подій називається розподіл цих подій за часом або ж послідовна поява подій на інтервалі часу $[0, t]$.

Найпростіший потік – це потік задовольняючий трьома умовами: стаціонарності, відсутності післядії і ординарності.

Стаціонарність означає, що для будь-якої групи з кінцевого числа проміжків часу, які не перетинаються, імовірність настання певного числа подій протягом кожного з них залежить лише від цих чисел і від тривалості проміжків часу, але не змінюється від зсуву всіх відрізків часу на одну і ту ж величину.

Відсутність післядії означає, що імовірність настання k -подій за перебіг проміжку часу $t, t + \Delta t$, не залежить від того, скільки разів і як з'являлись події раніше.

Ординарність – виражає собою вимогу практичної неможливості появи двох або декількох подій за малий проміжок часу Δt .

Закон розподілу – розподілення ймовірностей появи тієї чи іншої події за часовою віссю.

Найбільш часто в теорії надійності для опису процесу безвідмовності і відновлення використовується **найпростіший експоненціальний закон розподілу**:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t}; \quad f(t) = \lambda_0 e^{-\lambda_0 t}; \quad T_0 = 1 / \lambda_0;$$

$$V(t) = 1 - e^{-\mu_0 t}; \quad v(t) = \mu_0 e^{-\mu_0 t}; \quad T_B = 1 / \mu_0.$$

Отже, повертаючись до задачі, яка розглядається, нам необхідно знайти імовірність працездатного стану об'єкту в довільний момент часу $t + \Delta t$.

Так як на процес розвитку відмов об'єкта буде здійснювати вплив і випадковість виникнення відмов, і випадковість відновлення, то складна подія відмова об'єкта на момент часу $t + \Delta t$ визначиться наступними висловлюваннями:

- в момент t об'єкт був працездатним, а за час Δt виникла відмова $F(t + \Delta t) = P(t) \cdot F(\Delta t)$;
- в момент t об'єкт був непрацездатним і за час Δt відмова не була відновлена $F(t + \Delta t) = F(t) \cdot G(\Delta t)$.

Аналогічне висловлювання можна сформулювати і для складної події – не відмова об'єкту на момент часу $t + \Delta t$.

Імовірності цих складних подій можна записати наступним співвідношенням:

$$\begin{aligned} F(t + \Delta t) &= P(t) \cdot F(\Delta t) + F(t) \cdot G(\Delta t); \\ P(t + \Delta t) &= P(t) \cdot P(\Delta t) + F(t) \cdot V(\Delta t). \end{aligned} \quad (1.3.1)$$

Так як в системі Ерланга потік відмов є найпростішим (стаціонарний, без післядії, ординарний), а час відновлення працездатності об'єкту підкорюється експоненціальному закону розподілу, то у відповідності з висловлюваннями для $f(t)$ і $P(t)$ при експоненціальному розподілу систему рівнянь запишемо у вигляді

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda_0 t}; \quad P(t) = e^{-\lambda_0 t}; \quad (1.3.2)$$

$$\begin{aligned} F(t + \Delta t) &= P(t)(1 - e^{-\lambda_0 \Delta t}) + F(t)e^{-\mu_0 \Delta t}; \\ P(t + \Delta t) &= P(t)e^{-\lambda_0 \Delta t} + F(t)(1 - e^{-\mu_0 \Delta t}) \end{aligned}$$

Якщо функцію $e^{-\lambda_0 \Delta t}$ розкласти в ряд, то при малому Δt отримаємо

$$e^{-\lambda_0 \Delta t} = 1 - \lambda_0 \Delta t, \quad e^{-\mu_0 \Delta t} = 1 - \mu_0 \Delta t, \quad (1.3.3)$$

При малому Δt можна обмежитися першими двома членами розкладу експоненти в ряд.

Проведемо перетворення з (1.3.2) та з урахуванням (1.3.1).

$$\begin{cases} F(t + \Delta t) = P(t) - P(t)e^{-\lambda_0 \Delta t} + P(t)e^{-\mu_0 \Delta t}; \\ P(t + \Delta t) = P(t)e^{-\lambda_0 \Delta t} + F(t) - F(t)e^{-\mu_0 \Delta t}. \end{cases} \quad (1.3.4)$$

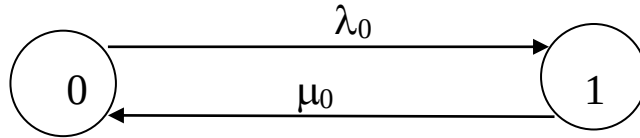
$$\begin{cases} F(t + \Delta t) = P(t) - P(t)(1 - \lambda_0 \Delta t) + F(t)(1 - \mu_0 \Delta t) \\ P(t + \Delta t) = P(t)(1 - \lambda_0 \Delta t) + F(t) - F(t)(1 - \mu_0 \Delta t). \end{cases} \quad (1.3.5)$$

$$\begin{cases} F(t + \Delta t) = P(t) - P(t) + P(t)\lambda_0\Delta t + F(t) - F(t)\mu_0\Delta t \\ P(t + \Delta t) = P(t) - P(t)\lambda_0\Delta t + F(t) - F(t) + F(t)\mu_0\Delta t \end{cases} \quad (1.3.6)$$

$$\begin{cases} F(t + \Delta t) - F(t) = P(t)\lambda_0\Delta t - F(t)\mu_0\Delta t \\ P(t + \Delta t) - P(t) = -P(t)\lambda_0\Delta t + F(t)\mu_0\Delta t \end{cases} \quad (1.3.7)$$

$$\begin{cases} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = P(t)\lambda_0 - F(t)\mu_0 \\ \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} = -P(t)\lambda_0 + F(t)\mu_0 \end{cases} \quad (1.3.8)$$

$$\begin{cases} F'(t) = \lambda_0 P(t) - \mu_0 F(t) \\ P'(t) = -\lambda_0 P(t) + \mu_0 F(t) \end{cases} \quad (1.3.9)$$



Систему диференціальних рівнянь (1.3.9) легко уявити в вигляді графу станів, де кружками 0 та 1 позначені працездатний і непрацездатний стани об'єкта, а стрілками – інтенсивності відповідних переходів в області цих станів. Враховуючі нормуючу умову $P(t) + F(t) = 1$, рівняння (1.3.9) перепишемо у вигляді системи не однорідних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} F'(t) = \lambda_0 - (\lambda_0 + \mu_0)F(t) \\ P'(t) = \mu_0 - (\lambda_0 + \mu_0)P(t) \end{cases} \quad (1.3.10)$$

Рішення цих рівнянь при початкових умовах $P(0)=1$, $F(0)=0$ має вигляд:

$$F(t) = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0} - \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0} e^{-(\lambda_0 + \mu_0)t} \quad (1.3.11)$$

$$P(t) = \frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} + \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0} e^{-(\lambda_0 + \mu_0)t}$$

Графіки функцій (1.3.11) наведені на рис. 1.3.2.

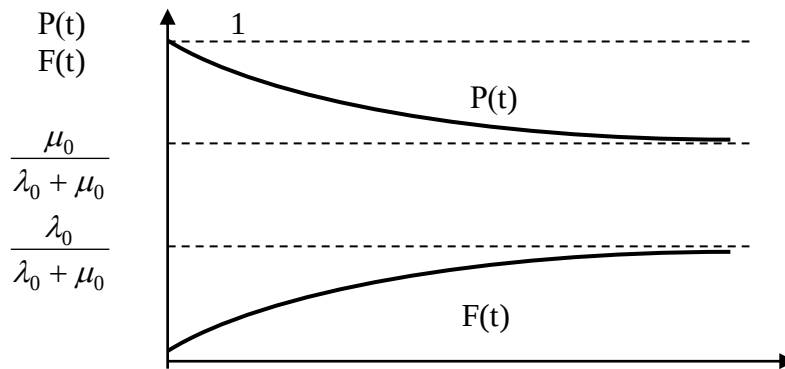


Рис. 1.3.2

З графіків видно, що для простого об'єкту, який відновлюється на нормальному етапі експлуатації значення імовірності працездатного стану $P(t)$ падає, а значення імовірності непрацездатного стану $F(t)$ росте з плином часу, в сумі завжди залишаючись рівними одиниці. Ці імовірності прагнуть до деяких сталих, або фінальних значень, які на практиці прийнято називати коефіцієнтом готовності K_g та коефіцієнтом простою K_n відповідно.

Згідно ДСТ *коефіцієнтом готовності* називають імовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, за перебіг яких використання об'єкту за призначенням не передбачається.

Коефіцієнтом простою називають імовірність того, що об'єкт виявиться в непрацездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, за перебіг яких використання об'єкту за призначенням не передбачається.

Якщо врахувати те, що при експоненціальному законі розподілу ймовірності відмов і відновлення відповідно дорівнюють:

$$\lambda_0 = 1/T_0; \quad \mu_0 = 1/T_B;$$

то

$$K_g = T_0 / (T_0 + T_B); \quad K_n = T_B / (T_0 + T_B)$$

Вочевидь, що $K_g + K_n = 1$.

Якщо необхідно визначити K_g і K_n об'єкта, який має число станів несхоже з 2, то при складанні системи диференціальних рівнянь слід користуватися наступними мнемонічними правилами:

складається стільки диференціальних рівнянь, скільки станів відображено на графі (рис.3.1.1);

в лівій частині кожного рівняння записується похідна імовірності стану, що розглядається, для кожного складається диференціальне рівняння;

права частина рівняння дорівнює сумі добутків ймовірностей станів, з яких об'єкт переходить в той, що розглядається, на інтенсивність цього переходу, що взята зі знаком мінус, якщо об'єкт входить, і плюс, якщо об'єкт виходить зі стану, який розглядається;

одно з рівнянь системи заміняють нормуючою умовою – сума ймовірностей всіх можливих станів об'єкту дорівнює одиниці (об'єкт обов'язково повинен знаходитися в одному з станів, які розглядаються);

повне рішення отриманої системи диференціальних рівнянь знаходять як суму загального рішення системи однорідних диференціальних рівнянь і окремого рішення системи неоднорідних рівнянь складених для t , коли перехідні процеси закінчились і похідні ймовірностей станів дорівнюють нулю, а самі ймовірності дорівнюють своїм фінальним значенням.

Показники готовності, у відповідності з їх визначенням знаходять як суму фінальних (що встановились при $t \rightarrow \infty$) ймовірностей тих станів, які згідно нормативно-технічної документації прийнято рахувати працездатними.

Якщо проаналізувати математичне співвідношення для підвищення готовності системи поруч з підвищенням її надійності шляхом підвищення безвідмовності в роботі, слід проводити заходи, що сприяють швидкому відновленню після виникнення відмов.

З урахуванням словесного визначення коефіцієнтом готовності і простою, а також виразу для статистичного визначення середнього наробітку на відмову

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{0i}}{N},$$

де τ_{0i} - час безвідмовної роботи i -го об'єкту; N – число об'єктів, і отриманих виразів для T_0 і T_B їх ймовірнісне і статистичне визначення мають вигляд:

$$K_r = \frac{\mu_0}{\lambda_0 + \mu_0} = \frac{T_0}{T_0 + T_B}; \quad K_r = \frac{\tau_0}{\tau_0 + \tau_B} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{0i}}{\sum_{i=1}^N \tau_{0i} + \sum_{i=1}^N \tau_{Bi}};$$

$$K_n = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_0} = \frac{T_B}{T_0 + T_B}; \quad K_n = \frac{\tau_B}{\tau_0 + \tau_B} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{Bi}}{\sum_{i=1}^N \tau_{0i} + \sum_{i=1}^N \tau_{Bi}}; \quad (1.3.12)$$

Із отриманого виразу (1.3.12) видно, що показники готовності, які розглядаються фізично можна трактувати, як долю часу перебування об'єкту в працездатному або не працездатному стані відповідно до загального часу експлуатації об'єкта, крім плануємих періодів технічного обслуговування і ремонту.

1.3.2. Визначення та фізичне значення коефіцієнтів оперативної готовності, технічного використання та справної дії.

Для характеристики ступеню впливу часу технічного обслуговування і середньої долі часу безвідмовної роботи в загальному часі експлуатації об'єкту за аналогією з наведеними нами визначеннями показників готовності простого відновлюваного об'єкту ДСТ 27.002.-83 вводиться *коефіцієнт технічного використання* – відношення математичного очікування часу перебування об'єкту в працездатному стані за деякий період експлуатації до суми математичних очікувань часу перебування об'єкту в працездатному стані, часу простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням і часом ремонтів за цей же період експлуатації.

Зі словесного визначення витікають статистичне

$$K_{\text{TB}} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{0i}}{\sum_{i=1}^N \tau_{0i} + \sum_{i=1}^N \tau_{Bi} + \sum_{i=1}^N \tau_{TOi}};$$

і ймовірнісне визначення коефіцієнта технічного використання

$$K_{\text{TB}} = \lim_{N \rightarrow \infty} K_{\text{TB}} = \frac{T_0}{T_0 + T_B + T_{T0}}; \dots\dots\dots$$

де τ_{0i} – випадкова величина часу наробітку до відмови;

τ_{Bi} – випадкова величина відновлення;

τ_{TOi} – випадкова величина часу технічного обслуговування(ТО).

Для оцінки готовності системи часто використовується коефіцієнт справної дії (K_{cd}), під яким розуміють відношення сумарного часу перебування системи в справному стані за перебіг визначеного періоду експлуатації до тривалості цього періоду

$$K_{cd} = \frac{t_{cnp}}{t_{cnp} + t_{неспр}}$$

де t_{cnp} - сумарний час перебування системи в справному працездатному стані за перебіг часу t_k (календарного часу);

$t_{неспр}$ - сумарний час перебування системи в несправному працездатному стані за той же період;

$$t_k = t_{cnp} + t_{несnp}.$$

Коефіцієнт справної дії подібний до коефіцієнту готовності. Відмінність його від K_r складається в тому, що він враховує простій не лише з причини відмов техніки, але й з інших причин (за рахунок помилок операторів, кваліфікації технічного персоналу, організаційним причинам тощо).

В зв'язку з обліком всіх втрат часу, а не лише втрат, що пов'язані з несправним станом техніки, цей критерій є оперативно-технічним. За величиною він завжди менше K_r .

В якості показника готовності чергового об'єкту на нормальному етапі експлуатації ДСТ 27.002.-83 вводиться *коефіцієнт оперативної готовності* – ймовірність того, що об'єкт, який знаходиться в режимі очікування, виявиться працездатним в довільний момент часу i , починаючи з цього моменту, буде працювати безвідмовно за перебіг заданого інтервалу часу. У відповідності з цим визначенням коефіцієнт оперативної готовності дорівнює добутку коефіцієнта готовності на ймовірність безвідмовної роботи об'єкта за перебіг заданого інтервалу часу

$$K_{oz}(t) = K_z \cdot P(t).$$

Звідси статистичне визначення цього показника має вигляд

$$K_{oz}(t) = K_r \cdot P(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{0i}}{\sum_{i=1}^N \tau_{0i} + \sum_{i=1}^N \tau_{Bi}} \cdot \frac{N_0(t)}{N}$$

В системі можуть відмовити окремі елементи. В результаті цього може знизитись якість функціонування і відповідно зменшиться вихідний ефект, наприклад, виконання поставленої задачі за перебіг заданого інтервалу часу. Системи, які в процесі експлуатації можуть частково втрачати працездатність, доцільно характеризувати альфа-відсотковим коефіцієнтом готовності $K_\alpha(t)$.

Альфа-відсотковий коефіцієнтом готовності – це ймовірність того, що система в довільний момент часу буде знаходитись в стані, що забезпечує можливість її роботи на рівні якості функціонування не нижче $\alpha_i[\%]$.

Коефіцієнт готовності має велике практичне значення при плануванні роботи системи, оскільки з його допомогою можна оцінити ймовірність знаходження апаратури в несправному стані, яка включена в довільний момент часу.

Слід вказати на ту особливість, що K_r не враховує простій апаратури при ТО. Тому він використовується для оцінки систем, які працюють не

безперервно, а за графіком (за сеансами). ТО такої системи може виконуватись в інтервалі між використанням.

Цього не можна зробити в системах, які працюють безперервно. В загальному випадку система може знаходитись в різних станах: роботи, відновлення після відмови, ТО, очікування використання тощо.

Тому для оцінки цих станів, крім K_2 існують наступні показники: K_n , K_{mv} , K_{cd} та інші.

Розглянуті комплексні показники надійності найбільш повно характеризують готовність ТЗ. Вони залежать від властивостей безвідмовності і ремонтпридатності технічних засобів і технічної підготовки обслуговуючого персоналу, умов впливу факторів експлуатації, зовнішнього середовища тощо.

Для усвідомленого, творчого, оперативного забезпечення потрібних значень цих показників під час обслуговування і використання ТЗ необхідно знати механізм впливу на елементи електронних засобів різних факторів експлуатації, шляхи і методи підвищення надійності засобів на всіх етапах їх проектування, виготовлення і експлуатації.

Висновок

Комплексні показники надійності є основними характеристиками відновлюваних об'єктів ТЗ, так як враховують безвідмовність і відновлюваність виробів.

1.4. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТЗ

1.4.1. Вплив об'єктивних та суб'єктивних факторів на кількісні значення показників надійності ТЗ

В процесі виробництва і експлуатації на ТЗ діють багато різних факторів, що впливають на її надійність. Їх вплив на складові надійності і їх показники різні.

Всі фактори можна поділити на дві групи:

- об'єктивні фактори;
- суб'єктивні фактори.

До групи *об'єктивних факторів* відносять експлуатаційні, кліматичні і біологічні.

До групи *суб'єктивних факторів* відносяться помилки людей при розробці, виробництві і експлуатації.

До факторів, які визначають надійність ТЗ на етапах розробки і виробництва, відносяться:

- вибір схемних рішень;
- вибір елементів і режим їх роботи;
- вибір конструктивних рішень;
- вибір і дотримання технології виробництва;
- автоматизація виробництва;

- тренування елементів і апаратури;
- контроль якості тощо.

Всі перераховані фактори мають значний вплив на надійність ТЗ, що поступає до експлуатації.

В подальшому зупинимось більш докладно на об'єктивних і деяких суб'єктивних факторах, що впливають на надійності ТЗ в процесі її експлуатації, так як на їх долю припадає більше 30% від всіх відмов. До них відносяться:

- час експлуатації;
- електричні режими;
- температура середовища;
- вологість і атмосферні опади;
- знижений тиск;
- сонячна і інші види радіації;
- різного роду домішки в повітрі;
- механічні навантаження (перевантаження, удари і вібрації);
- біологічні фактори (грибки, цвіль, комахи і гризуни);
- діяльність обслуговуючого персоналу (кваліфікація, проведення профілактичних заходів, організація експлуатації, наявність інструкцій з експлуатації даного типу апаратури тощо).

Час експлуатації. Час експлуатації є одним з основних факторів, що визначають надійність апаратури на всіх етапах.

На рис.1.4.1 наведено залежність інтенсивності відмов від часу експлуатації апаратури. Технологічні і конструктивні недоліки частіше за все виявляються в перший період експлуатації – період припрацювання, коли інтенсивність відмов в багато разів більше, ніж у нормальний період експлуатації.

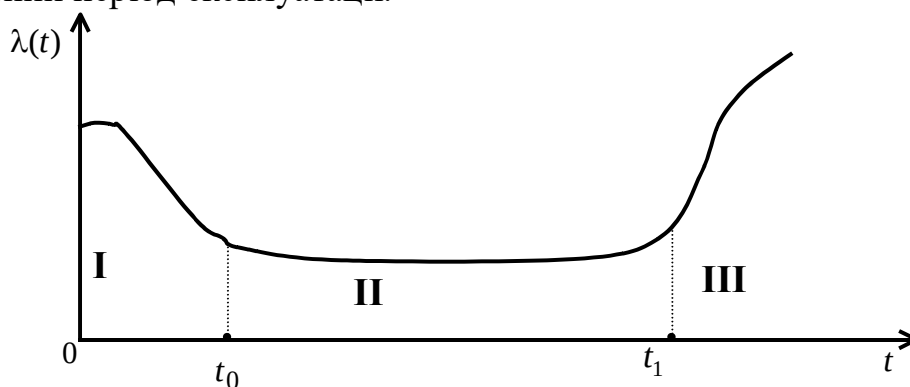


Рис.1.4.1. Залежність інтенсивності відмов ТЗ від часу експлуатації

Так, наприклад, для електронних ламп вона в 2-5 разів вища. Вихід з ладу конденсаторів в більшості випадків виникає з причини пробоя діелектрика, в результаті чого до 70% всіх конденсаторів, що вийшли з

ладу, доводиться на цей період експлуатації.

Таким чином, в період припрацювання виявляються багато явних та скритих дефектів апаратури в цілому і її елементів. В цей період здійснюється вихідний контроль ТЗ на виробництві, де вона виготовляється.

Тривалість цього періоду для різної апаратури може коливатися від декількох десятків до сотень годин (від 1% до 15% від тривалості періоду нормальної експлуатації). Найбільш важливу апаратуру прийнято піддавати попередньому тренуванню за перебіг визначеного часу з тим, щоб ще до експлуатації у споживача вона виробила час припрацювання, і ненадійні елементи та вузли були б своєчасно замінені. Це призводить до витрати визначеного ресурсу апаратури, але зменшує кількість відмов, що доводяться на етап використання за призначенням. Як вже відмічалось, для періоду нормальної експлуатації справедливий експоненціальний закон надійності.

Після достатньо тривалої експлуатації апаратури настає останній, третій період, що характеризується значним зростанням інтенсивності відмов по причині старіння і зносу елементів. Цей період для ТЗ настає після декількох сотень або тисяч годин роботи. Зростання інтенсивності відмов пояснюється необоротними змінами параметрів і характеристик елементів.

Процеси старіння йдуть безперервно, але можуть прискорюватись під впливом різних факторів (тепло, волога, світло, тиск та інше).

Причиною старіння є складні фізико-хімічні процеси, що відбуваються в елементах апаратури за весь час її експлуатації. До них відносяться:

- структурні зміни у діелектриках та провідниках;
- окислювання поверхонь провідників;
- хімічні перетворення у з'єднувальних матеріалах;
- порушення електричної та механічної міцності матеріалів діелектрика та елементів конструкції;
- порушення герметизації внаслідок появи тріщин і наскрізних каналів;
- підвищення водопроникності матеріалів тощо.

Електричні режими. Зміна електричних режимів роботи радіотехнічних елементів має вагомий вплив на стабільність і довговічність їх характеристик та параметрів і, отже, на довговічність і надійність всієї системи або об'єкту.

Всі елементи характеризуються допустимими навантаженнями за потужністю розсіювання, струмом, напругою тощо. Отже, робота елементів при паралельно допустимих навантаженнях скорочує їх термін служби і не гарантує надійність роботи. Зменшення фактичних навантажень збільшує надійність і, відповідно, тривалість роботи ТЗ.

Про розмір реального навантаження роблять висновок за статистичними даними експлуатації і значеннями режимів роботи елементів. Для оцінки режиму роботи використовують *коефіцієнти навантаження за потужністю і за напругою*.

Коефіцієнти навантаження за потужністю

$$K_{nP} = P_p / P_n, \quad (1.4.1)$$

де P_p – робоче значення потужності розсіювання;

P_n – номінальне значення потужності розсіювання.

Коефіцієнт навантаження за потужністю використовують для оцінки режимів роботи резисторів і ламп. В останньому випадку вираз (1) прийме наступний вигляд:

$$K_{np} = \frac{P_a + P_n + P_c}{P_{n.p.} + P_{n.a}}, \quad (1.4.2)$$

де P_a, P_c, P_n – робоче значення потужності, що розсіюється анодом, сітками і ниткою розжарення;

$P_{n.p.}$ – номінальне значення потужності розжарювання;

$P_{n.a}$ – номінальне значення потужності в колі аноду.

Коефіцієнт навантаження за напругою:

$$K_{nU} = U_p / U_n, \quad (1.4.3)$$

де U_p – робоче значення напруги;

U_n – номінальне значення напруги.

Коефіцієнт навантаження за напругою використовують для оцінки режиму роботи різних конденсаторів, ізоляторів тощо.

Вплив електричних навантажень головним чином зводиться до погіршення температурного режиму і появи перенапруження, що може викликати пробій ізоляції.

Як той, так і інший фактори призводять до зниження надійності, появи передчасних відмов. Електричні режими також впливають на залежність надійності від числа вмикань, оскільки сприяють виникненню перенапруги при ввімкненнях.

Елементи, що працюють в ТЗ, повинні мати відповідний запас електричної міцності, що визначається прийнятим значенням коефіцієнта навантаження.

Температура навколишнього середовища.

ТЗ експлуатують в різних температурних умовах. Температурний вплив тим більший, чим більша швидкість і частота змін температури. Найбільш важкими є польові умови роботи апаратури, робота ТЗ в

космічних апаратах, ракетах, літаках. У табл. 1.4.1. наведені сезонні і добові коливання температури для різних кліматичних областей.

Таблиця 1.4.1

Найменування області	Сезонні коливання температури, °С	Добові коливання температури, °С
Пустеля	(-10) – (+50)	40
Помірний пояс	(-20) – (+40)	25
Арктична зона	(-50) – (+35)	20

Температура навколишнього середовища істотно впливає на температуру усередині апаратури і температуру окремих елементів. Так, в апаратурі, яка знаходиться під прямим впливом сонячних променів, при темному забарвленню поверхні можливо підвищення температури на 35⁰ С і більше. Оскільки температура елемента визначається особистим нагріванням і температурою середовища, то підвищення температури середовища призведе також до підвищення температури елемента. Отже, фактичне значення коефіцієнта навантаження виявиться вище розрахункового. Цей фактор особливо важливе значення набуває для супутників Землі і космічних апаратів, у яких сторона, яка обернена до Сонця, дуже інтенсивно нагріта, а тіньова сторона – холодна.

Досить важливим фактором, що впливає на надійність, є швидкість і циклічність змін температури в апаратурі. Ці фактори призводять до появи механічних знакозмінних зусиль і, як наслідок, до послаблення механічних кріплень, появи втомленісних тріщин, відпрівання тощо.

Так, для авіаційних ТЗ різниця температур може досягати 80⁰С, з швидкістю до 50⁰ С за хвилину, а для бортового обладнання ракет і того більше.

При низьких температурах пластмаси втрачають міцність, гумові вироби стають тендітними і розтріскуються, метали робляться ламкими. В тріщини ізоляції, що утворилися, попадає волога, знижуючи її електричну міцність. При низьких температурах легко руйнуються з'єднання пластмас з металами, спаї металів зі склом, руйнується пайка, регулювання зазорів, падає ємність електричних конденсаторів тощо.

Підвищена температура сприяє прискоренню розпаду органічних ізоляційних матеріалів, перегріву і виходу з ладу напівпровідникових приладів, прискореному старінню ламп. Слід враховувати, що невагомість в космосі може призвести до погіршення дії системи примусового охолодження і до перегріву ТЗ. Високі температури погіршують властивості різного роду заливок, обмоток, механічні властивості більшості полімерів, що призводить до деформування деталей і виходу їх з ладу або до появи необоротних змін параметрів.

Періодичні зміни низьких і високих температур особливо швидко призводять до руйнування різного роду обмоток.

Вплив температури на інтенсивність відмов ТЗ прийнято оцінювати *температурним коефіцієнтом інтенсивності відмов*:

$$K_t = \left(\frac{t_p}{t_i} \right)^\alpha,$$

де t_p – робоча температура елемента;

t_n – номінальна температура елемента;

α – показник ступеню, що визначається типом елемента.

ТЗ, встановлена на космічних апаратах, піддається впливу теплових потоків випромінювання Сонця, Землі, планет, відбитого від Землі випромінювання, а також нагріву за рахунок потоків мікрометеорів і заряджених часток. Величина температури поверхні у великому ступені залежить від стану поверхонь і якості покриття ТЗ, що знаходиться на зовнішній поверхні.

Вологість і атмосферні опади.

Вологість є одним з найбільш впливових факторів. Вологість навколишнього повітря прийнято оцінювати відносною вологістю, що являє собою вимірюване у відсотках відношення вологи, що фактично міститься у повітрі, до максимально можливого її утримуванню при даній температурі.

1.4.2. Засоби підвищення показників надійності при проектуванні, виробництві та експлуатації ТЗ

Вимоги до надійності ТЗ обумовлені задачами, які вирішуються цим озброєнням і засобами нападу імовірного противника. Розвиток засобів нападу дозволили створити такі засоби озброєння, які забезпечили б високу надійність і ефективність їх виявлення.

В теперішній час надійність засобів виявлення і протидії повинна складати $K_T \geq 0,999$.

Виходячи з формули для розрахунку K_T такі високі вимоги до K_T можна забезпечити підвищенням середнього часу безвідмовної роботи (зменшення інтенсивності відмов).

В наш час стає загальновизнаним, що не можна досягти покращення надійності за допомогою окремих розрізнених заходів і методів. Необхідні чіткі програми, які включають взаємопов'язані заходи на всіх етапах проектування, виготовлення і експлуатації ТЗ.

В програмі найчастіше виділяються наступні групи заходів по забезпеченню надійності:

1. При проектуванні:

- а) вивчення умов використання об'єктів;
- б) облік кваліфікації операторів і виконавців робіт з технічного обслуговування;
- в) аналіз комплектуючих елементів;

г) створення конструкторської документації для етапів виробництва, випробувань, експлуатації;

д) розробка рекомендації зі схем і конструктивним методам підвищення надійності та інше.

2. При виробництві:

а) контроль за відповідністю параметрів виробів вимогам робочої документації;

б) забезпечення вхідного контролю ТЗ;

в) проведення заходів зі статистичного регулювання якості продукції;

г) внесення змін в технологічний процес виготовлення об'єктів;

д) забезпечення контролю виробничих процесів;

е) проведення приймального контролю;

е) організація випробувань на безвідмовну роботу.

3. При експлуатації: заходи по вдосконаленню системи забезпечення експлуатування (заходи з технічного обслуговування, технологія огляду і пошуку несправностей, організація аварійних та профілактичних робіт тощо). Крім того, передбачаються заходи по вдосконаленню збору і обробки даних про відмови, організації зв'язку з проектувальниками і виготовлювачами об'єктів.

Найбільш відповідальним етапом підвищення надійності ТЗ є етап проектування. Саме на цьому етапі повинні бути повністю враховані майбутні умови серійного виробництва, експлуатації ТЗ і закладені показники їх надійності, які вимагаються.

Всю сукупність заходів з підвищення надійності ТЗ на етапах їх проектування і виробництва, як за правило, поділяють на технологічні, пов'язані з покращенням технології і виробництва, і конструктивні, пов'язані з вдосконаленням конструкції або структури об'єкта.

На практиці наведені приклади заходів з підвищення надійності можуть переплітатися. Але частіше за все можна виділити наступні *технологічні заходи*: вдосконалення технології конструювання і виробництва, стандартизація і уніфікація деталей і вузлів, інтеграція елементів, синтез конструкційних матеріалів і елементів об'єкта з заданими фізико-хімічними властивостями, використання нових прогресивних принципів функціонування системи тощо.

В основі удосконалення технології як проектування так і виробництва лежать стандартизація і уніфікація елементів ТЗ. Вони в значній мірі визначають і її експлуатаційну технологічність, яка безпосередньо визначає показники ремонтпридатності і готовності, а в деяких випадках і показники безвідмовності, довговічності і збереження ТЗ. Тому стандартизація апаратури та її вузлів є невід'ємним елементом прогресу сучасної техніки, заставою її якості і надійності.

Розвиток стандартизації визначається розвитком таких областей техніки як мікроелектроніка, фізика твердого тіла, термодинаміка, сплави і полімери.

Однак, поруч з перерахованими заходами не втрачають своєї актуальності і традиційні *конструктивні методи* підвищення надійності ТЗ, основані на використанні різних видів резервування.

Резервування – метод підвищення надійності ТЗ за допомогою введення додаткових елементів і функціональних можливостей понад мінімально необхідних для нормального виконання об'єктом своїх функцій.

Існують різні методи резервування. Перерахуємо і дамо визначення основним з них:

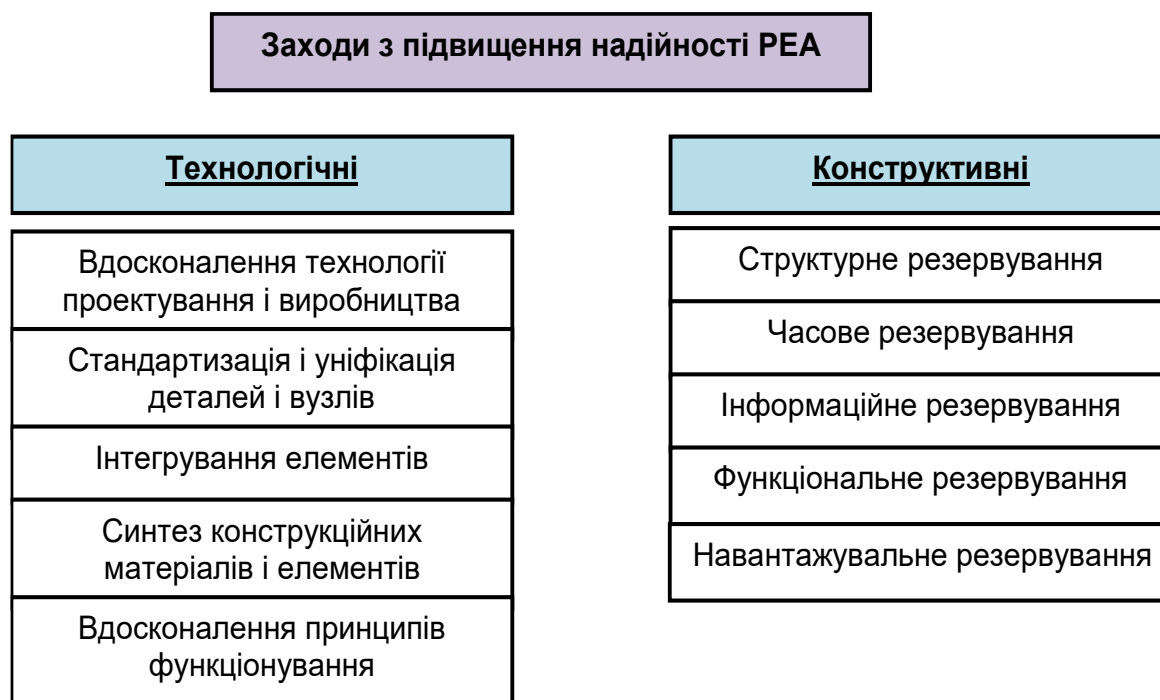


Рис. 1.4.2

Структурне резервування – це метод підвищення надійності об'єкту, що передбачає використання надлишкових елементів, які входять в фізичну структуру об'єкта;

Часове резервування – метод резервування, що передбачає використання надлишкового часу функціонування об'єкту понад мінімального для вирішення конкретних задач використання за призначенням, технічного обслуговування і ремонту;

Навантажене резервування – метод підвищення надійності об'єкту, що передбачає використання властивості елементів об'єкту нормально функціонувати при надлишкових навантаженнях понад номінальних, які обрані конструктором;

Інформаційне резервування – метод підвищення надійності, що передбачає використання надлишкової інформації про стан об'єкту і його елементів понад мінімально необхідної для вирішення поставленої задачі;

Функціональне резервування – метод підвищення надійності об'єкту, що передбачає використання властивості елементів виконувати додаткові

функції понад основних, які визначені нормативно-технічною документацією.

Комплексне використання різних видів резервування, теоретичне обґрунтування оптимального їх співвідношення в складі ТЗ дозволяє забезпечити необхідні показники ефективності ТЗ для будь-яких умов використання.

1.4.3. Схеми з'єднання елементів для розрахунку показників надійності ТЗ

Відомо, що кожен об'єкт ТЗ включає у свій склад різне число, як правило, різнонадійних елементів.

Для визначення показників надійності структура об'єкту зображується у вигляді спеціальної логічної схеми, яка характеризує стан об'єкту (працездатний або непрацездатний) в залежності від стану окремих елементів.

На логічних схемах звичайно використовують три способи з'єднання елементів:

Послідовне ("основне") з'єднання – відповідає випадку, коли при відмові одного з елементів відмовляє вся система. Наробіток до відмови такої системи рівний наробітку до відмови того елемента, у якого вона виявилась мінімальною:

$$T_c = \min (T_j), \quad j = 1, 2, \dots n;$$

де n – число елементів системи.

Паралельне навантажене з'єднання – відповідає випадку, коли система зберігає працездатність, коли працездатний хоча б один з k елементів, включених в роботу; наробіток до відмови такої системи рівний максимальному із значень наробітку до відмови елементів:

$$T_c = \max (T_j), \quad j = 1, 2, \dots k.$$

Паралельне ненавантажене з'єднання – відповідає випадку, коли при відмові елементу вмикається в роботу черговий резервний елемент i , таким чином; наробіток до відмови системи рівний сумі наробітку до відмови елементів:

$$T_c = \sum_{j=1}^k T_j.$$

Після складання логічної схеми знаходять і уточнюють значення показників надійності системи. Розглянемо зміст кожної з цих операцій.

Складання логічної схеми для розрахунку надійності ТЗ

Ця робота проводиться в три етапи.

Перший етап складається з опису роботи системи. Розглядається, як функціонує система за перебіг заданого часу, які блоки включені, у чому

складається робота кожного блоку і які блоки включені, з чого складається робота кожного блоку тощо. На цьому етапі визначається зміст терміну “безвідмовна робота системи”. В результаті дослідження різних сторін роботи системи складається перелік якостей працездатності системи.

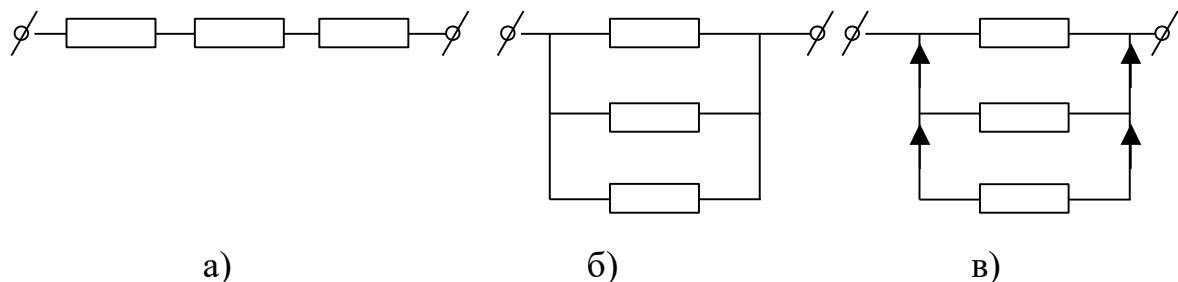


Рис. 1.4.3. Структурні логічні схеми з'єднання елементів системи:
а) – послідовне; б) – паралельне навантажене; в) – паралельне ненавантажене

На другому етапі здійснюється класифікація відмов елементів і системи. Перераховуються і описуються можливі відмови всіх елементів окремо і системи в цілому. При цьому формулюється визначення відмов елементів системи. оцінюється вплив відмов кожного з елементів на працездатність системи.

Під час третього (основного) етапу складається структурна (логічна) модель роботи системи. Для цього розглядається поведінка системи при відмові кожного з елементів, які її складають. Часто при відмові одного з елементів відмовляє вся система, але так буває не завжди. Можливі випадки, коли система продовжує працювати при визначеній комбінації працездатних і непрацездатних елементів. Тому в загальному випадку виділяються підсистеми (блоки), в яких при відмові хоча б одного елемента відмовляє весь блок.

Розглянемо розрахункові формули для розрахунку надійності ТЗ у випадку подання їх різними системами з'єднання.

Так при послідовному логічному з'єднанні імовірність безвідмовної роботи системи дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи елементів.

Імовірність відмови системи має наступний вигляд:

$$P_c(t) = \prod_{j=1} P_j(t), \quad (1.4.4)$$

де $P_j(t)$ – імовірність відмови j -го елемента.

Тому інтенсивність відмов системи з n елементів:

$$\Lambda = \sum_{j=1}^n \lambda_j, \quad (1.4.5)$$

(передбачається, що інтенсивність відмов елементів постійна, $\lambda_j = \text{const}$).

Відповідно середній наробіток системи до відмови:

$$T_{0c} = 1 / \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 / \sum_{j=1}^n \frac{1}{T_{0j}}.$$

де T_{0j} – середній наробіток до відмови j -го елемента.

Для паралельного навантаженого логічного з'єднання імовірність відмови системи дорівнює добутку ймовірностей відмов елементів. Імовірність відмови системи в цьому випадку має наступний вигляд:

$$F_c(t) = \prod_{j=1}^k F_j(t), \quad (1.4.6)$$

де $F_j(t)$ – імовірність відмови j -го елемента

Оскільки $F_c(t) = 1 - P_c(t)$, отримуємо:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - F_j(t)), \quad (1.4.7)$$

В даному випадку ми розглянемо розрахунок показників надійності при навантаженому резервуванні, при якому основні і резервні елементи знаходяться в однакових робочих умовах.

При паралельному ненавантаженому логічному з'єднанні функція надійності ділянки логічної схеми, яка складається з k елементів, розраховується за рекурентною формулою

$$P_{kc} = P \cdot 1(t) + \int_0^t P_k(t - \tau) f_{(k-1)P}(\tau) d\tau, \quad (1.4.8)$$

де $P_k(t - \tau)$ – імовірність того, що в момент τ відбулася відмова основного елемента і включився в роботу k -й резервний елемент;

$f_{(k-1)P}$ – щільність розподілу наробітку до відмови $k-1$ -го резервного елемента.

При розгляданні складної логічної схеми для розрахунку показників надійності, як правило, використовують формулу повної імовірності. При цьому передбачається, що гіпотези $H_1, H_2, \dots, H_n$ – несумісні передбачувані події, що утворюють повну групу. Разом з однією з цих подій може виникнути подія, яка розглядається: X – безвідмовна робота системи за тривалість заданого наробітку $(0, t_i)$. Імовірність появи події X дорівнює сумі добутків ймовірностей кожної гіпотези $P(H_j)$ на умовну імовірність $P(X|P_j)$ події при цій гіпотезі:

$$P(X) = \sum_{j=1}^n P(H_j) P(X|H_j). \quad (1.4.9)$$

1.5. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЗ ШЛЯХОМ РЕЗЕРВУВАННЯ

На етапі конструювання і виробництва для підвищення надійності ТЗ в більшості випадків використовують різні способи дублювання і резервування ТЗ.

Не дивлячись на те, що це призводить до подорожчання апаратури, збільшення її масогабаритних показників, інколи це є єдиним способом підвищення надійності.

1.5.1. Постійне резервування елементів ТЗ.

Як відомо, надійність елементів, з яких складається об'єкт, не завжди задовольняє тим вимогам, які висуваються до нього виходячи із умов надійності об'єкту.

Задача підвищення надійності полягає в тому, щоб знайти шляхи, як із порівняно малонадійних елементів побудувати об'єкт ТЗ з високою надійністю.

Серед методів підвищення надійності, що передбачаються при проектуванні ТЗ, особливе місце посідає *резервування*, так як воно незалежно від всіх інших методів найбільш повно дозволяє вирішити задачу отримання заданої надійності ТЗ при відносно малонадійних елементах.

Необхідно лише пам'ятати, що резервування пов'язано зі збільшенням ваги, габаритів, вартості апаратури і споживаної потужності.

Одним з перших і добре розроблених теоретично, а тому і найбільш поширеним на даний час методом, що використовується для підвищення надійності ТЗ є *метод структурного резервування*. Цей метод заснований на підключенні до основних елементів об'єкта деякої кількості додаткових елементів, їх кількість і показники надійності обумовлюються різними методами резервування (див. табл.1.5.1), що відрізняються математичними співвідношеннями і величиною основних показників надійності резервованих об'єктів ТЗ.

Перед тим, як розглянути класифікацію методів структурного резервування, дамо визначення основного елементу та резервного.

Основний елемент – елемент основної фізичної структури об'єкту мінімально необхідної для нормального виконання об'єктом своїх задач.

Резервний елемент – елемент, що призначений для забезпечення працездатності об'єкта у випадку відмови основного елемента.

Всі види показників надійності резервованих систем не мають відмін від показників нерезервованих. Додатково резервовані об'єкти характеризують наступні три показники:

- *Кратність резервування* – відношення числа усіх елементів до числа основних

$$\eta_P = \frac{N_P}{N_0}$$

- *Ефективність резервування* – відношення ймовірності безвідмовної роботи резервованого об'єкта до ймовірності безвідмовної роботи основних елементів за один і той же період експлуатації

$$\theta_P = \frac{P_P(t)}{P_0(t)}$$

- *Виграш у надійності за рахунок резервування* – відношення ймовірності відмови об'єкта без резервованих елементів до ймовірності відмови резервованого об'єкта за один і той же період експлуатації

$$\xi_P = \frac{F_0(t)}{F_P(t)}$$

Розглянемо постійне резервування, резервування заміщенням та ковзне резервування, мажоритарне та деякі інші види резервування.

Постійне резервування – це таке резервування, при якому резервні елементи беруть участь у функціонуванні об'єкта на рівні з основними.

Головна перевага постійного резервування полягає у його простоті, так як не потрібно ніяких комутуючих пристроїв.

Недолік – має місце зміна вихідних параметрів при відмові в групі хоча б одного елементу. Відмова одного або декількох елементів змінює електричний режим роботи елементів, що залишилися у працездатному стані в бік збільшення навантаження, що зменшує їх надійність.

При постійному резервуванні розрізняють три способи з'єднання елементів послідовне, паралельне, змішане(рис.1.5.1).

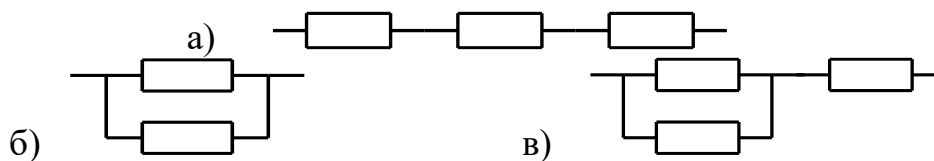


Рис.1.5.1. Постійне резервування: а) послідовне; б) паралельне; в) змішане.

Послідовний спосіб застосовується тоді, коли переважають відмови типу «коротке замикання».

Паралельний спосіб застосовується тоді, коли переважають відмови типу «обрив».

Змішаний спосіб застосовується тоді, коли обидва види відмов рівно ймовірні.

Паралельне постійне резервування може бути загальним і роздільним(рис.1.5.2).

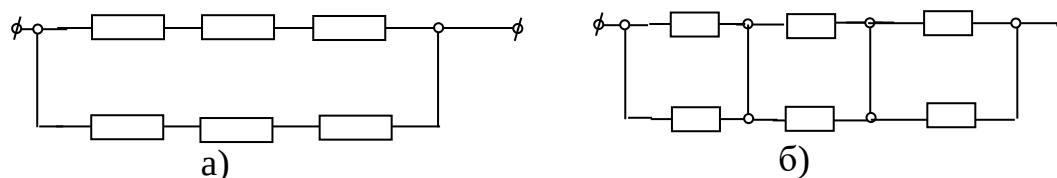


Рис.1.5.2. Паралельне постійне резервування: а– загальне; б– роздільне.

Розглянемо, як визначити показники безвідмовності об'єкта із загальним багатократним резервом без відновлення відмовивших елементів. Знайдемо їх, як ймовірність складної події:

відмова об'єкта (подія F_c) настане тоді, коли відмовить хоча б один основний елемент (подія F_1), і відмовить хоча б один елемент першої резервної групи (подія F_2), і відмовить хоча б один елемент j -ї резервної групи (подія F_j). Тобто складна подія дорівнює добутку елементарних подій

$$F_c = \prod_{j=1}^m F_j$$

Табл.1.5.1

Ознака класифікації	Метод резервування	Схемне зображення
1. За способом включення резервних елементів	Послідовне	
	Паралельне	
	Змішане	
2. За ступенем обхвату резервом	Загальне	
	Роздільне	
	Змішане	
3. За ступенем фіксації резервних елементів	Постійне	
	Ковзне	Динамічне резервування
	Заміщенням	
4. За ступенем відновлення елементів, що відмовили	Не відновлювані	
	Відновлювані	
5. За рівнем надійності резервних елементів	Навантажене	Резервний елемент, знаходиться у тому ж режимі, що і основний
	Облегшене	Резервний елемент знаходиться у менш навантаженому режимі, ніж основний
	ненавантажене	Резервний елемент майже не несе навантажень
6. За кратністю резервування	Однократне	
	Багатократне	

Відповідно імовірність відмови резервованого об'єкту дорівнює добутку ймовірностей відмов основної і резервованих груп елементів

$$F_c(t) = \prod_{j=1}^m (1 - P_j(t))$$

Якщо подати ймовірність безвідмовної роботи j -ї групи, математичним співвідношенням, виходячи із формулювання події безвідмовності, то отримаємо

$$P_j(t) = \prod_{i=1}^n P_{ji}(t)$$

Тоді у відповідності з теоремою про повну ймовірність можливо отримати співвідношення для визначення ймовірності безвідмовної роботи

$$P_c = 1 - \prod_{j=1}^m \left(1 - \prod_{i=1}^n P_{ji}(t) \right)$$

Кратність такого резервування буде дорівнювати :

$$\eta_P = \frac{m \cdot N}{N} = m$$

В загальному випадку вирази для інших показників надійності такого об'єкту також можливо отримати. Якщо всі елементи об'єкту рівнонадійні, то ймовірність безвідмовної роботи системи буде визначатись формулою

$$P_c(t) = 1 - (1 - P^n(t))^m$$

Для експоненціального закону надійності елементів знаходимо

$$P_c(t) = 1 - [1 - e^{-N\lambda_0 t}]^m$$

Середнє напрацювання до відмови знаходиться чисельним інтегруванням

$$T_{0c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \frac{1}{N \cdot \lambda_0} \cdot \sum_{j=1}^m \frac{1}{j}$$

Обмежуючись першими двома членами розкладу в ряд експоненти, отримаємо імовірність безвідмовної роботи у вигляді

$$P_c(t) = 1 - (N\lambda_0 t)^m$$

Виходячи з визначення ефективності резервування вираз для цієї характеристики набуває вигляду :

$$\theta_P = \frac{P_P(t)}{P_0(t)} = \frac{1 - (N\lambda_0 t)^m}{1 - N\lambda_0 t}$$

Виграш у надійності за рахунок резервування:

$$\xi_P = \frac{F_0(t)}{F_P(t)} = \frac{N\lambda_0 t}{(N\lambda_0 t)^m}$$

Аналіз отриманих виразів показує, що з плином часу виграш в надійності постійного резервування зменшується, навіть при незмінній інтенсивності відмов.

Розглянемо, як визначити показники безвідмовності об'єкта із **роздільним багатократним постійним резервом без відновлення елементів**, що відмовили.

Для цього будемо користуватись умовою: об'єкт відмовить, якщо відмовить хоча б один з n основних елементів і відмовить m його резервних елементів.

Тобто по аналогії з попередніми виразами отримаємо вираз безвідмовної роботи:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n (1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_{ij}(t)))$$

Кратність такого резервування визначається як :

$$\eta_P = \frac{m \cdot N}{N} = m$$

Для рівно надійних елементів ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи визначається наступним співвідношенням:

$$P_c(t) = (1 - (1 - P(t))^m)^n$$

Для рівно надійних елементів, у випадку експоненціального закону розподілу надійності, обмежуючись двома членами розкладу експоненти, отримаємо :

$$P_c(t) = (1 - (\lambda_0 t)^m)^n$$

Ефективність резервування :

$$\theta_P = (1 - (\lambda_0 t)^m)^n / (1 - n\lambda_0 t)$$

Виграш у надійності за рахунок резервування :

$$\xi_P = \frac{n\lambda_0 t}{1 - (1 - (n\lambda_0 t)^m)^n}$$

Виграш у надійності і ефективність роздільного не відновлюваного постійного резервування з плином часу зменшується, але з меншою швидкістю, ніж при загальному резервуванні.

Середній час безвідмовної роботи такого об'єкта також визначається чисельним інтегруванням за формулою:

$$T_{oc} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt.$$

Показники надійності об'єкта із змішаним не відновлюваним постійним резервом можуть бути визначені за формулами отриманими нами вище шляхом послідовного виділення частин з різними видами резервування.

Деякі методи таких розрахунків були вже розглянуті при розгляді схем з'єднання елементів і розрахунку надійності. А деякі методи таких розрахунків будуть розглянуті в подальшому.

Розглянемо, як визначаються основні показники надійності у випадку, коли елементи мають два типи відмов "обрив" і "коротке замикання"(КЗ) при різних способах резервування.

Розглянемо елементи, які мають два типи повних відмов: відмови типу "обрив" і відмови типу "коротке замикання."

При послідовному включенні робочого і резервного елементів відмова у схемі буде тоді, коли відбудеться відмова типу "КЗ" в обох із елементів або тоді, коли відбудеться відмова типу "обрив" в одному з них.

При паралельному включенні основного і резервного елементів відмова в схемі буде тоді, коли відбудеться відмова типу "обрив" в обох елементах, або тоді коли відбудеться відмова типу "КЗ" в одному з них.

Для об'єктів з послідовним резервуванням m -го – елемента, ймовірність відсутності відмов типу "обрив" і "КЗ" знаходимо з виразів:

$$P_{обр} = \prod_{i=1}^m P_{iобр}, \quad P_{КЗ} = 1 - \prod_{i=1}^m F_{iКЗ}$$

де $P_{iобр}$ – ймовірність відсутності обриву в i -му елементі; $F_{iКЗ}$ – ймовірність "КЗ" i -му об'єкті.

Враховуючи, що

$$P = P_{обр} \cdot P_{КЗ} = \prod_{i=1}^m P_{iобр} \cdot (1 - \prod_{i=1}^m F_{iКЗ}),$$

у випадку коли

$$P_{1обр} = P_{2обр} = \dots = P_{mобр} \quad \text{і} \quad F_{1кз} = F_{2кз} = \dots = F_{iобр} ,$$

отримаємо

$$P = P_{обр}^m \cdot (1 - F_{кз}^m)$$

Для об'єктів з паралельним постійним резервуванням для безвідмовної роботи необхідно, щоб не було ні одного “КЗ” і хоча би один елемент не мав “обриву”. У випадку паралельного включення елементів

$$P = \prod_{i=1}^m P_{iкз} \cdot (1 - \prod_{i=1}^m F_{iобр})$$

У випадку

$$P_{1кз} = P_{2кз} = \dots = P_{mкз} ; \quad F_{1обр} = F_{2обр} = \dots = F_{mобр} ;$$

$$P = P_{кз}^m \cdot (1 - F_{обр}^m)$$

Розглянуті методи резервування дозволяють значно підвищити показники надійності ТЗ, але при цьому збільшують габарити апаратури і збільшується її вартість. Крім того, постійне резервування має такі недоліки, як зміна режимів роботи, енергетичні втрати тощо.

1.5.2. Характеристики надійності ТЗ динамічному резервуванні.

Із класифікації методів структурного резервування відомо, що за способом підключення резервних елементів резервування буває постійним та динамічним.

До динамічного відносяться резервування заміщенням і ковзне резервування.

Резервуванням заміщенням називається таке резервування при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного елемента.

Заміщення може відбуватись автоматичного (за допомогою автоматичних перемикаючих пристроїв) або вручну.

Наявність перемикачів ускладнює схему і знижує її надійність через можливість появи відмов в самих перемикачах. Але недоліки, що властиві схемах постійного резервування (а саме зміна вихідних параметрів при відмові одного елемента в групі, зміна режимів роботи залишившихся в роботі елементів в сторону збільшення навантаження) не мають місця при такому резервуванні.

Розрізняють три види умов роботи резервних елементів до моменту їх підключення у схему.

Навантажений резерв – резервний елемент знаходиться у такому ж режимі, що і основний елемент.

Облегшений – резервний елемент знаходиться в менш навантаженому режимі, чим основний (наприклад – резервний елемент з пониженим або частково включеними напругами джерел живлення);

Ненавантажений резерв – резервний елемент майже не несе навантаження, тобто практично резервні елементи починають втрачати свій ресурс тільки від моменту включення їх у роботу.

В залежності від того резервуються всі пристрої в цілому або його ділянки розрізняють загальне і роздільне резервування заміщенням (див. Рис.1.5.3)

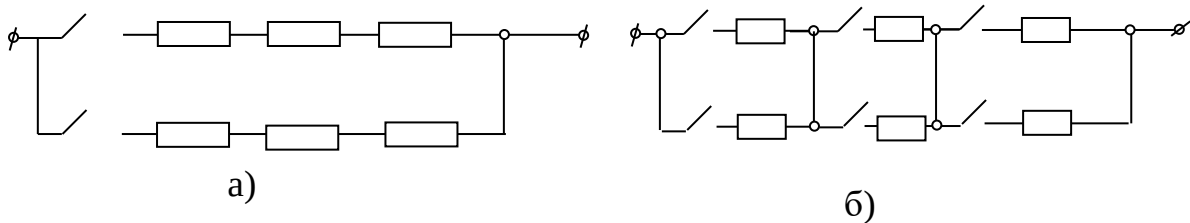


Рис. 1.5.3. Загальне (а) та роздільне (б) резервування заміщенням

Загальне резервування – це таке резервування, коли резервується об'єкт у цілому.

Роздільне резервування – це таке резервування, коли резервуються окремі елементи об'єкта або його групи.

Навантажене резервування найбільше використовують для постійного способу резервування.

Ненавантажене і облегшене найбільше використовують для випадку динамічного резервування.

Розглянемо ненавантажене резервування, так як саме такий спосіб найбільш широко зустрічається при резервуванні заміщенням.

Ненавантажений резерв має резервні елементи, які майже не несуть навантажень. Ресурс роботи ненавантаженого резерву починає витрачатись тільки з моменту його включення. Закон розподілення часу безвідмовної роботи резервних елементів такий же як і у аналогічних типів елементів у режим зберігання. Час переходу резервних елементів у робочий стан – найбільший.

Перевага резервування заміщенням: по-перше воно здатне в більшому ступені зберігати ресурс роботи резервованих елементів (облегшений і ненавантажений резерви), по-друге не змінюються режими роботи об'єкту (елементів) при відмовах.

До недоліків необхідно віднести: необхідність комутуючого пристрою для підключення резерву, додаткового часу на переключення резерву і вихід його на режим (облегшений і ненавантажений резерви).

Включення резервних елементів може здійснюватись вручну або автоматично.

Розглянемо, як визначається ймовірність безвідмовної роботи системи, що має ненавантажене загальне резервування заміщенням (див. рис. 1.5.3а).

Для цього припустимо, що відмови комутуючого пристрою і ланцюгів незалежні і час виходу в режим резервних елементів є величиною досить малою.

В цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи системи буде визначатись за співвідношенням:

$$P_c = P_{рез} \cdot P_k$$

$P_{рез}$ – ймовірність безвідмовної роботи ланцюгів резервування;

P_k – ймовірність безвідмовної роботи комутуючого пристрою.

Крім того, припустимо також, що час виходу резервних елементів на режим нормальної роботи буде дорівнювати нулю, а комутуючі пристрої є у всіх ланцюгах і вони рівнонадійні.

Тоді скориставшись виразом для випадку загального резервування можна записати

$$P_{с.заг} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{ki} \prod_{j=1}^n P_j)$$

Для випадку роздільного резервування (див. Рис. 1.5.3б) вираз для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи буде мати вигляд

$$P_{с.розд} = \prod_{j=1}^n P_j = \prod_{j=1}^n (1 - \prod_{i=1}^m (1 - (1 - P_{kij} \cdot P_{ij}))),$$

де

$$P_j = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{kij} \cdot P_{ij}).$$

Для випадку рівнонадійних елементів отримані вище формули значно спрощуються:

$$P_{с.заг} = 1 - (1 - P_k \cdot P^n)^m$$

$$P_{с.розд} = (1 - (1 - P_k \cdot P)^m)^n$$

Порівнюючи два способи резервування (загальне і роздільне) неважко прийти до висновку, що при роздільному резервуванні знадобиться велика кількість комутуючих пристроїв. В той же час, роздільне резервування дозволяє отримати суттєві переваги у підвищенні безвідмовності в порівнянні із загальним резервуванням зміщенням, дозволяє застосовувати більш гнучкі і економічні схеми резервування з використанням пристроїв

для аналізу відмов і вибору резерву.

Внаслідок цього виникають вимоги до надійності комутуючих пристроїв, так як низька надійність може негативно вплинути на надійність всього об'єкту. Зрозуміло, що роздільне резервування буде тільки тоді виправданим, коли надійність резервного елемента, що буде досягатися таким чином, буде не нижче надійності об'єкта із загальним резервуванням, тобто

$$P_{с.розд} > P_{с.заг}$$

Надійність ТЗ при ковзному резервуванні.

Ковзне резервування – резервування, при якому група основних елементів об'єкта резервується одним або декількома резервними елементами, кожний з яких може замінити будь-який відмовивши основний елемент у даній групі (рис.1.5.4).

Для здійснення такого резервування необхідно мати пристрій, який автоматично знаходить несправний елемент і підключає замість його резервний.

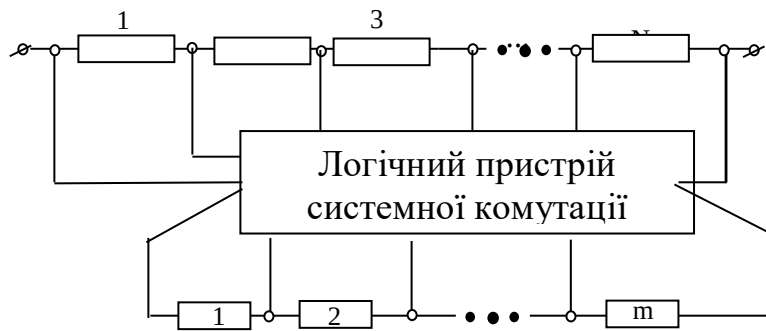


Рис.1.5.4. Ковзне резервування

Перевага такого резервування є те що у апаратурі, яка містить декілька груп однакових блоків, використовуючи ковзне резервування не має необхідності мати в такій же кількості резервні блоки.

Необхідно відмітити ще одну важливу особливість резервування заміщенням – можливість відновлення вийшовшого з ладу резерву в той час, поки об'єкт працює з іншими резервними елементами. Це дозволяє суттєво підвищити ймовірність безвідмовної роботи, так як напрацювання на відмову завжди більше середнього часу відновлення. Відповідно, елемент, що вийшов зі строю буде відновлений (якщо він є таким, що відновлюється) раніше, чим відбудеться чергова відмова у об'єкті, тобто в даному випадку буде мати місце безперервне поповнення резервних елементів.

При ковзному резервуванні кількість основних і резервних блоків може бути довільним, в тому числі і дробовим.

Умовою безвідмовності таких об'єктів є вимога, щоб число відмовивших елементів не перевищувало число резервних елементів.

Відмова об'єкту відбудеться тоді, коли виникає відмова в $m+1$ і більше елементах.

ЙБР таких об'єктів можна визначити, використовуючи формулу повної ймовірності, яка є наслідком теорії складання і множення ймовірностей.

Повна ЙБР об'єкту може бути визначена як сума ймовірностей сприятливих несумісних подій:

$$P_{N+m} = \sum_{i=1}^m P(E_i), \quad \text{де}$$

N – кількість основних елементів;

m - кількість резервних елементів

E_i – стан об'єкту, при якому число відмовивши елементів i ;

$P(E_i)$ – ймовірність $i^{\text{го}}$ стану об'єкту.

Якщо основні і резервні елементи рівнонадійні, а перемикаючі пристрої – ідеальні, то ймовірність гіпотез безвідмовної роботи визначається співвідношенням

$$P(E_i) = C_{N+m}^i P^{N+m-i} (1-P)^i$$

де P - ЙБР одного елемента.

Відповідно ЙБР об'єкту в цілому при навантаженому резервуванні дорівнює

$$P_{N+m} = \sum_{i=1}^m C_{N+m}^i P^{N+m-i} \cdot (1-P)^i, \quad \text{де}$$

$$C_{N+m}^i = \frac{(N+m)!}{(N+m-i)! i!}$$

Якщо $N=2$, а $m=1$, то

$$P_{2+1} = P^3 + 3P^2(1-P)$$

Недоліком ковзного резервування є те, що його застосування можливо тільки при однотипності елементів. Але таке резервування також дозволяє при відносно невеликих затратах і незначному рівні збільшення ваги і габаритів підвищити надійність об'єктів.

Застосування динамічного резервування є більш ефективним у порівнянні з постійним, так як дозволяє підвищити надійність об'єктів при менших затратах.

Застосування резервування дозволяє значно підвищити надійність ТЗ. Але не потрібно забувати, що цей шлях підвищення надійності є достатньо

не ефективним з точки зору економіки, так як вимагає значного збільшення витрат на утворення пристроїв і систем ТЗ.

1.5.3. Мажоритарне й комбіноване резервування. Організація резерву на рівні комп'ютера й КС

Приватним випадком резервування із дробовою кратністю є **мажоритарне резервування**, часто використовуване в пристроях дискретної дії (рис. 1.5.5). При мажоритарнім резервуванні замість одного елемента (каналу) включається три ідентичні елементи, виходи, яких подаються на мажоритарний орган M (елемент голосування). Якщо всі елементи цієї резервної групи справні, то на вхід M надходять три однакові сигнали й такий же сигнал надходить у зовнішній ланцюг з виходу M .

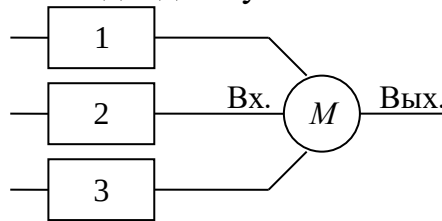


Рис. 1.5.5. Мажоритарне резервування (вибір по більшості)

Якщо один із трьох резервних елементів відмовив, то на вхід M надходять два однакові сигнали (дійсних) і один сигнал неправильний. На виході M буде сигнал, що збігається з більшістю сигналів на його вході, тобто мажоритарний орган, здійснює операцію голосування або вибору по більшості. Таким чином, умовою безвідмовної роботи групи при мажоритарному резервуванні є безвідмовна робота будь-яких двох елементів із трьох і мажоритарного органа протягом заданого часу.

Комбінований резерв – на рис. 1.5.6 представлена резервована група, що поєднує переваги навантаженого резерву (безперервність роботи) і ненавантаженого резерву (забезпечення великого виграшу в надійності). У цьому випадку два елементи утворюють дублюючу групу (навантажений резерв), а третій перебуває в ненавантаженому резерві. Такий резерв називають комбінованим.

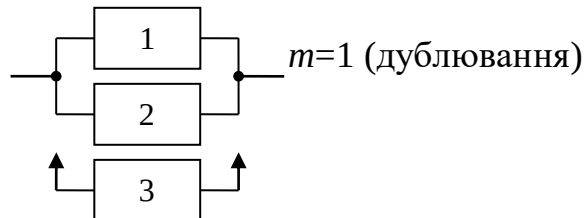


Рис. 1.5.6. Комбінований резерв

У пристроях відповідального призначення можуть бути використані всі види структурного резервування (рис. 1.5.7).

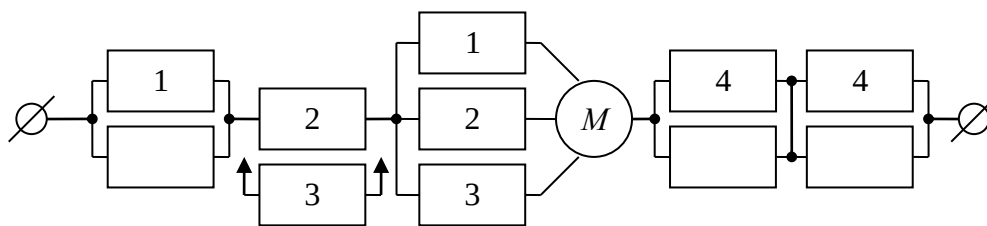


Рис. 1.5.7. Розрахунково-логічна схема структурного резервування підсистеми складної ТС

Теоретично введенням надмірності в структуру системи й вибором оптимальних режимів можна створити яку завгодно надійну КС. Але не завжди це практично здійсненне. Аналізуючи всі види резервування, слід зробити практичний висновок: забезпечити високу надійність КС шляхом загального навантаженого резерву не є можливим з економічних міркувань. Найбільший ефект дає поелементне резервування.

Порівнюючи між собою види резервування з навантаженим і ненавантаженим резервом, можна помітити, що за інших рівних умов система з ненавантаженим резервом надійніше системи з навантаженим резервом.

Організація резерву на рівні комп'ютера й КС

Резервування на рівні комп'ютера. В апаратурі універсальних комп'ютерів резервування зустрічається на різних рівнях. **На рівні комп'ютера резервування полягає в наявності великої кількості однотипних машин, що необхідно для розв'язку ухвалених завдань. У цьому випадку надійність системи оцінюється як для систем з ковзним резервуванням.** У випадку універсальних комп'ютерів доцільно використовувати продуктивність усіх наявних процесорів. Тоді властивість системи зручніше характеризувати через ефективну продуктивність системи.

$$P_{ef} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot K_i$$

де P_i – продуктивність (число завдань виконуваних машиною в одиницю часу) i -ої машини;

n – число машин у системі;

K_i – коефіцієнт готовності i -ої машини.

Якщо окремі системи комп'ютера, об'єднані через адаптери між каналами для периферійних пристроїв, через загальне поле пам'яті або іншим способом, утворюють багатомашинну (багатопроесорну) КС, то ефективна продуктивність такої системи

$$P_{ef.c} = \sum_{j=1}^m P_j \cdot P_j ,$$

де m – кількість станів системи;

P_j – імовірність того, що система перебуває j -м стані;

P_j – продуктивність системи в j -м стані.

Імовірність P_j визначають методом Марківських ланцюгів. Оскільки конфігурація таких систем може бути всілякою, для оцінки ймовірності збереження зв'язності системи слід застосовувати методи розрахунків надійності систем зі складною структурою, наприклад метод мінімальних шляхів і перетинів.

Резервування на рівні пристроїв. На більш низьких рівнях ієрархії структури в універсальних комп'ютерах резервування зустрічається на рівні периферійних пристроїв (ПП). Для розв'язку завдань потрібно деяке мінімальне число ПП.

Резервування на рівні кодів – у комп'ютерах для підвищення надійності ОЗП й ПЗП застосовуються коди з виявленням і виправленням помилок. Застосування цих кодів дає можливість виправляти певне число помилок у каналах передачі або відновлювати інформацію у випадку відмови деяких гнізд в ОЗП й ПЗП або доріжок (тобто підсилювачів запису-зчитування) у накопичувачах на магнітних дисках. Надійність таких пристроїв оцінюється як надійність резервованих систем з ковзним резервом.

Резервування в спеціалізованих й керуючих комп'ютерах. У спеціалізованих, а особливо в керуючих машинах резервування застосовується значно ширше у зв'язку з високими вимогами до надійності таких систем.

З метою підвищення надійності частина машин може працювати в режимі навантаженого резерву, частина в режимі ненавантаженого. Однак резервування на рівні комп'ютера не саме економічне. Для підвищення надійності при обмеженні маси, вартості й габаритних розмірів КС використовується резервування окремих пристроїв машин застосуванням декількох навантажених або ненавантажених резервів. Для підвищення надійності самих відповідальних вузлів застосовується логіка з переплетеннями (подається у вигляді надлишкової логічної схеми, де помилки в одному шарі коректуються в цьому ж або наступному шарі логічних елементів).

Усі розглянуті методи резервування в КС відносяться до пасивного резервування, тому що не передбачають реконфігурації системи. Способи резервування, що передбачають автоматичну реконфігурацію системи використовуються в відмовостійких комп'ютерних системах (ВКС). В ВКС використовуються засоби виявлення, локалізації відмови й засобу реконфігурації.

Відмови в ВКС виявляється за допомогою засобів контролю, а локалізуються за допомогою засобів діагностики й усуваються автоматичної реконфігурацією системи. Реконфігурація полягає в перебудові структури обчислювальних засобів таким чином, щоб її частини, що відмовили, були усунуті від участі в роботі.

Контрольні питання

1. Охарактеризуйте основні закони розподілення випадкових величин, які використовуються для оцінки показників надійності ТЗ.
2. Охарактеризуйте зв'язки між показниками безвідмовності.
3. Охарактеризуйте зв'язки між показниками ремонтпридатності.
4. Дайте визначення, поясніть фізичний зміст статистичного та ймовірного визначення показників безвідмовності.
5. Дайте визначення, поясніть фізичний зміст статистичного та ймовірного визначення показників ремонтпридатності.
6. Дайте визначення, поясніть фізичний зміст статистичного та ймовірного визначення показників довговічності та зберігаємості.
7. Дайте визначення, поясніть фізичний зміст статистичного та ймовірного визначення комплексних показників надійності.
8. Охарактеризувати основні заходи підвищення надійності при проектуванні, виробництві та експлуатації.
9. Охарактеризувати основні схеми з'єднання елементів ТЗ.
10. Виведіть формулу для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи при загальному постійному резервуванні.
11. Виведіть формулу для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи при роздільному постійному резервуванні.
12. Як здійснюється оцінка ймовірності безвідмовної роботи при роздільному динамічному резервуванні ТЗ.
13. Як здійснюється оцінка ймовірності безвідмовної роботи при роздільному динамічному резервуванні ТЗ.
14. Особливості ковзного, мажоритарного и комбінованого резервування ТЗ.

Глава 2

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТЗ

2.1. МЕТОДИКА ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ТЗ НА РІЗНИХ ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

На етапі розробки технічних об'єктів (озброєння) виникає задача обґрунтованого задання вимог до показників надійності ТЗ. Правильне задання вимог дозволяє створити високонадійну техніку і забезпечити її високу ефективність при практичному використанні.

2.1.1. Обґрунтування вимог до надійності ТЗ.

В наш час велике різноманіття методів і засобів дослідження і забезпечення надійності при проектуванні дозволяє успішно розв'язувати проблему надійності, використовуючи найкращим чином матеріально – технічні ресурси, що є в наявності. Дослідження і розробка заходів щодо забезпечення надійності проводяться на всіх стадіях життєвого циклу, найбільш важливі технічні рішення закладаються в процесі проектно-конструкторської роботи. Основу у забезпеченні надійності елементів складає правильність обґрунтування системи. Ця робота проводиться на етапі написання ТЗ на систему і розробці технічних пропозицій.

Перед тим, як розглядати питання обґрунтування вимог з надійності ТЗ розглянемо принципи вибору показників надійності системи, за якими задаються вимоги.

Вибір показників надійності є конкретною задачею, рішення якої суттєвим чином залежить від характеру технічного об'єкту, його призначення і загальних вимог до процесу і результатів його функціонування.

Показники надійності в залежності від рівня об'єкта, що розглядається зручно поділяти на оперативні і технічні. Оперативними показниками надійності зручно характеризувати системи – це показники, що характеризують якість функціонування системи з точки зору споживача.

Технічні показники мають своєрідний “технічний характер: вони необхідні для використання в подальших розрахунках або статистичних оцінках. Ці показники призначаються для підсистем (елементів)”. Наприклад, якщо дубльовану систему зручно характеризувати коефіцієнтом готовності (оперативний показник), то кожен з резервних елементів зручніше характеризувати технічними показниками – розподіленням напрацювання до відмови і часом відновлення (або їх основними параметрами, наприклад математичними очікуваннями), оскільки саме вони дозволяють розрахувати показники надійності системи в цілому з урахуванням експлуатації і технічного обслуговування.

Як зазначалось вище вибір виду показників залежить в основному від загального призначення системи, але на нього може впливати також і ступінь важливості або відповідальності функцій, що виконуються системою.

При виборі показників надійності ТЗ необхідно враховувати деякі прості та очевидні рекомендації.

1. Загальна кількість показників має бути за можливістю мінімальною;
2. необхідно уникати складних комплексних показників, що отримуються у вигляді деяких згорток критеріїв (наприклад, зважуванням з різними “ вагами ”);
3. вибранні показники надійності повинні мати простий фізичний зміст;
4. вибранні показники надійності мають допускати можливість статистичної (дослідної) оцінки при проведенні спеціальних випробувань або за результатами експлуатації;
5. вибранні показники надійності мають допускати можливість проведення підтвердження (перевірки) оцінок на етапі проектування (аналітичних розрахунків або імітаційного моделювання).

Після того, як ми розглянули порядок вибору показників надійності за якими можна задавати вимоги; розглянемо метод обґрунтування вимог.

Обґрунтування вимог за надійністю і задання їх числових значень може бути здійснено наступними методами:

1. *експертне задання (директивне) вимог*, що засновується тільки на загальній інженерній інтуїції, практичному досвіді і кваліфікації. Такий метод використовується у випадку цілком нових типів систем, ефект від функціонування яких ще недостатньо відомий.
2. *задання вимог за прототипом* (“від досягнутого”) заснований на аналізі статистичної інформації з надійності, що є в наявності вже існуючих технічних об’єктів, близьких до розглядаємого за призначенням, структурою або елементною базою. Вимоги за надійністю у цьому випадку задаються з урахуванням можливого зростання надійності елементної бази, масштабу розглядаємої системи у порівнянні із прототипом, умов функціонування тощо. такий прогноз також в значній мірі спирається на експертні оцінки, але підтверджується конкретними фактичними даними.
3. *задання оптимального рівня надійності*. Такий метод застосовується лише тоді, коли:
 - вихідний ефект від функціонування системи співвимірний в тих же (звичайно у вартісних) одиницях, що і витрати на її створення;
 - достовірно відомо вихідні дані про надійність системної бази;
 - повністю визначені принципи побудови як структури, так і процесів функціонування (можливість резервування,

використання різної елементної бази, режим використання, регламент технічного обслуговування тощо)

У цьому випадку задання вимог зводиться до максимізації цільової функції вигляду:

$$F_k(R) = E_k(R) - C_k(R)$$

де R - показник надійності системи, що залежить від вибраного варіанта структури S_k і від надійності елементів, що входять до складу системи і того типу, тобто

$$R = R(S_k, r_i), \quad k = 1, 2, \dots, m; \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

де в свою чергу m - число рекомендованих варіантів структури, а n - число різних комплектуючих елементів;

$E_k(R)$ - вихідний ефект від функціонування k -го варіант системи у вартісному виразі при рівні надійності R ;

$C_k(R)$ - витрати на забезпечення рівня надійності R , для k -го варіанти системи.

Для будь – якого фіксованого варіанта системи k рішення знаходиться звичайним способом із умови:

$$\frac{\partial E_k(R)}{\partial R} = \frac{\partial C_k(R)}{\partial R},$$

Після чого вибирається варіант, для якого досягається найбільше абсолютне значення оптимальних рішень $E_k(R)$ тобто

$$E_k(R) = \max.$$

Висновок: використання будь – якого з вказаних способів можливе при наявності відповідних умов на практиці. Але найбільш точним звичайно є третій, що заснований на суворому рішенні оптимізаційної задачі.

2.1.2. Вимоги до надійності пристроїв ТЗ і способи отримання їх числових значень.

Для визначення вимог до надійності пристроїв ТЗ передбачається, що вимоги на систему ТЗ в цілому задані.

Існує декілька методів визначення вимог до надійності пристроїв ТЗ. Це методи: 1) рівномірного розподілу; 2) пропорційного розподілу; 3) розподіл вимог з урахуванням відносної уразливості елементів; 4) оптимального розподілу.

1. Метод рівномірного розподілу.

Припустимо, що система складається із n послідовно з'єднаних елементів, що мають однакову надійність.

Нехай P^* - потребуєма ймовірність безвідмовної роботи системи, а P_i - елемента системи:

$$P^* = \prod_{i=1}^n P_i \quad \text{або} \quad P_i = (P^*)^{1/n}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Таким чином можуть бути розподілені такі показники надійності як: ЙБР, середнє напрацювання до відмови T_0 , коефіцієнти готовності та оперативної готовності K_G, K_{OG}).

Інтенсивність відмов, що задається для i -го елемента системи буде дорівнювати:

$$\lambda_i = \frac{\lambda_c}{n} \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

де λ_c - задана інтенсивність відмов системи.

Недоліком цього методу є те, що рівень надійності елементів системи встановлюється без урахування їх властивостей, наслідків їх відмов і ступеня складності досягнення надійності.

2. Метод пропорційного розподілення

$$R = \sqrt[n]{R^*},$$

Якщо k_i - число елементів в i - й підсистемі ($i=1, 2, 3, \dots, n$), то де

$$a_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^n k_i}$$

В цьому випадку

$$\lambda_{mpc} = \lambda_{mpc} \sum_{i=1}^n a_i$$

$$\lambda_{mpi} = a_i \lambda_{mpc}$$

Такий метод більш ефективний у порівнянні з розглянутим вище, але потребує знання числа елементів.

3. Метод розподілення вимог за надійністю з урахуванням відносної уразливості елементів.

Припускається: що елементи системи з'єднані послідовно і мають постійну інтенсивність відмов, що відмова довільного елемента системи викликає відмову усієї системи і що задане напрацювання елементів дорівнює заданому напрацюванню системи.

Задачу розподілення вимог у цьому випадку розв'язують у два етапи:

1. визначають інтенсивність відмов основних елементів λ_i на основі досвіду або за довідниковими даними;
2. задають вагові множники α_i для кожного елемента системи у відповідності з інтенсивностями відмов визначеними на першому етапі:

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Таким чином α_i показує відносну уразливість i -го елемента.

$$\text{Тоді } \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$$

Далі визначають потребуємі інтенсивності відмов елементів за допомогою співвідношення:

$$\lambda_i^* = \alpha_i \lambda_c, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Таким методом як правило розподіляються інтенсивності відмов, а використовуючи припущення про експоненціальний закон розподілу часу напрацювання до відмови легко отримати значення інших показників.

4. Метод оптимального розподілу.

Суть цього методу полягає у тому, що якщо при задані вимог з надійності на систему в цілому (R) відомі структура системи (S) і методи підвищення надійності підсистем, тобто функції $R_i(C_i)$, де C_i - витрати, що йдуть на забезпечення надійності підсистеми, то можна знайти оптимальне розподілення вимог за надійністю для двох випадків:

а) максимум показника надійності системи при обмеженнях на сумарний ресурс C^0

$$\max\{R(S, R_i(C_i)) / \sum_{1 \leq i \leq N} C_i < C^0\} C = (C_1, C_2, \dots, C_N),$$

б) мінімум витрат на систему при досягненні заданого показника надійності R^0

$$\min\{C(S, R_i(C_i)) / R \geq R_{nomp}\}$$

Обидві ці задачі розв'язуються звичайним способом дискретного програмування, як задачі на умовну оптимізацію.

2.1.3. Методика оцінки надійності пристроїв ТЗ і систем. Методика розрахунку надійності.

Методика розрахунку надійності включає в себе звичайно наступні моменти:

- а) визначення типів елементів і їх інтенсивностей відмов;
- б) вибір метода розрахунку з послідовним підбором таблиць, графіків або поправочних коефіцієнтів;
- в) визначення електричних навантажень і вплив зовнішнього середовища на кожний елемент;
- г) визначення за відповідною таблицею або графіком інтенсивності відмов кожного елемента;
- д) додавання всіх інтенсивностей відмов для визначення інтенсивності відмов цього виробу;
- е) за даними інтенсивностей відмов виробу та іншими даними визначаються необхідні показники надійності виробу.

Розрахунок надійності виробу доцільно проводити в наступному порядку:

1. Формулюється поняття відмови.
2. Складається схема розрахунку надійності.
3. Вибирається метод розрахунку надійності.
4. Складається таблиця розрахунку інтенсивності відмов.
5. Розраховуються кількісні показники надійності.
6. Дані розрахунків зводяться в підсумкові таблиці або наводяться у вигляді графіків.

Всі методи розрахунку показників надійності складних електронних засобів на етапі проектування і виробництва технічних систем (озброєння) поділяють на *орієнтований, попередній і кінцевий*.

Метою орієнтованого розрахунку, що проводиться на етапі ескізного проектування технічних систем (озброєння) є розподілення вимог до показників надійності елементів за даною структурною схемою і вимог до показників надійності всього об'єкта.

Правила орієнтовного розрахунку зводяться до наступних:

- а) структурна схема надійності об'єкта ділиться на паралельно-послідовні ділянки;
- б) надійність об'єкта розподіляється за окремими його ділянками: з урахуванням наявності даних для використання одного з чотирьох методів розподілення вимог до надійності;
- в) розподілення вимог здійснюється методом рівномірного розподілу.

Попередній розрахунок показників надійності ТЗ здійснюється на етапі розробки принципів схем ТЗ. Метою такого розрахунку є визначення показників надійності ТЗ за показниками надійності елементів і перевірка їх відповідності заданим технічним умовам без урахування дії факторів експлуатації.

Вихідними даними у цих розрахунках є інтенсивності відмов комплектуючих елементів ТЗ, що визначається за фізико-хімічними властивостями конструкційних матеріалів або їх аналогів, які оцінюються

за статистичними даними спеціальних випробувань або експлуатації на приблизно адекватних зразках ТЗ. Основні правила розрахунку показників надійності ТЗ, що проектуються зводяться до наступного:

а) розраховують інтенсивності відмов нерезервованих груп елементів за правилами.

Порядок попереднього розрахунку надійності.

1. Всі елементи об'єкта розбиваються на групи з приблизно однаковими інтенсивностями відмов.

2. В кожній групі підраховується число елементів N_i .

3. За довідковими даними визначають інтенсивність відмов кожного типу елементів λ_i .

4. Підраховують групову інтенсивність відмов

$$\lambda_{ep} = N_i \lambda_i$$

5. Розраховують сумарну інтенсивність відмов об'єкта

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_{ep} = \sum_{i=1}^n N_i \lambda_i$$

З урахуванням умов експлуатації

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_{ep} \prod_{j=1}^m K_{\lambda_j}$$

6. Визначають T_0 об'єкта, як

$$T_o = \frac{1}{\lambda}$$

7. Розраховують ЙБР для різних значень часу

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

8. Будують графіки залежності $P(t)$.

б) розраховують показники надійності різних елементів і об'єкта в цілому за формулами для розрахунку показників надійності резервованих груп.

На цьому етапі проектування розрахунок показників надійності ТЗ також не є точним, так як, по-перше не враховується дія факторів експлуатації і старіння елементів, а по-друге, самі розрахункові формули є наближеними, справедливими тільки для малих інтервалів часу експлуатації. Основною задачею цих розрахунків є постійна перевірка ступеня задовільнення вимогам до показників надійності ТЗ при відповідному обґрунтуванні принципів і структурних схем його пристроїв.

Вказані недоліки розрахунків показників надійності усуваються у результаті проведення кінцевого розрахунку показників надійності ТЗ.

Порядок проведення розрахунків при кінцевому методі.

1. Всі елементи об'єкта розбиваються на групи з приблизно однаковими інтенсивності відмов.

2. В кожній групі підраховується кількість елементів N_i .

3. а) Розраховується коефіцієнт навантаження елементів K_H .

б) За довідковими даними визначають реальну інтенсивність відмов $\lambda_i = f(K_H, t^0 C)$ або за приблизною формулою: $\lambda_i(K_H, t^0 C) = \lambda_i K_{Hi} e^{0,01(t_i^0 - 20)}$

Такі розрахунки здійснюються під час полігонних досліджень ТЗ, проектуванні системи її обслуговування, розробки технічної і експлуатаційної документації, на місці її експлуатації тощо.

Метою таких розрахунків є прогнозування реальних показників надійності ТЗ у конкретних умовах експлуатації, обґрунтування об'єму запасного майна, структури і оснащення ремонтних органів, систем технічного обслуговування.

Конкретних приклад і алгоритм кінцевого розрахунку показників надійності ТЗ розглянемо на практичному занятті.

Розглянуті методи обґрунтування і розподілення вимог дозволяють зробити висновок, що найбільш ефективними є методи оптимального обґрунтування вимог.

2.2. НАДІЙНІСТЬ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.

2.2.1. Надійність програмного забезпечення АСУ ТЗ.

Однією з основних частин АСУ ТП є програмне забезпечення (ПЗ), що являє собою сукупність взаємопов'язаних і автономних програм, описів, інструкцій програміста і користувача, тестів і т.п. Якість роботи всієї АСУ ТП істотно залежить від якості ПЗ, під яким умовно розуміють сукупність таких різномірних властивостей як коректність, швидкодія, вартість, і, особливо, надійність.

Надійність ПЗ - є властивість програмного забезпечення своєчасно виконувати в заздалегідь зазначених умовах експлуатації вперед встановлені функції. У самому загальному випадку основну функцію ПЗ АСУ ТП можна розглядати як своєчасне отримання певного результату або рішення у при переробці вхідної інформації x з безлічі X . Рішення про виконання або невиконання функцій ПЗ змушений приймати користувач і, в меншій мірі розробник програми чи програміст. Таким чином, надійність - це властивість програм забезпечувати «розумні» на думку користувача і програміста рішення при переробці вхідної інформації x з

умовної множини X і нормальному функціонуванні КОМ (комплекса обчислювальних машин).

Надійність встановлюється за результатами роботи ПЗ, тобто при динамічній перевірці всіх програм на безлічі вхідної інформації. Некоректне ПЗ завідомо ненадійно, однак і коректне ПЗ може бути ненадійним.

Розглянуте визначення надійності ПЗ базується на понятті *відмови програми*, під якою розуміється подія, що полягає у появі «нерозумного» результату при нормальній роботі АСУ.

Відмови ПЗ діляться на випадкові і не випадкові.

Невипадкові відмови ПЗ обумовлені дією так званих комп'ютерних вірусів.

Випадкові відмови ПЗ спостерігаються у випадкові моменти часу роботи КОМ або процесора. За своїми наслідками ці відмови класифікуються на *випадкові збої програм і стійкі відмови ПЗ*.

Під збоєм ПЗ розуміють випадкову подію, що полягає у появі «нерозумного» результату і зникаючу при наступних прогонах (запусках) програм.

Збій ПЗ - це самоусуваюча відмова програми, що виникає при деяких, можливо випадкових, станах КОМ та інформації, що спостерігається користувачем у випадкові моменти часу і зникне без втручання програміста.

Стійкі відмови ПЗ спостерігається у випадковий момент процесорного часу у формі «нерозумного» результату при нормальному функціонуванні КОМ.

Причиною відмови ПЗ служить деяка систематична помилка програми, після усунення якої програмістом дана відмова зникає, тобто має місце відновлення ПЗ.

Розрізняють помилки первинного та вторинного типу.

Помилки первинного типу пов'язані з неточностями в текстах програм і виникають при підготовці носіїв та документації ПЗ, при записах кодів на алгоритмічних мовах і трансляції програм на машинну мову. А також через неточності алгоритмів і при невірних або некоректних постановках розв'язуваних на КОМ обчислювальних завдань.

Помилки вторинного типу багато в чому є наслідком первинних помилок програм. До них відносять помилки:

- обчислювальні (невірна індексація і підрахунок часових параметрів, розбіжність результату ручного і машинного розрахунку, поява нестійких операцій тощо);
- логічні (пропуск логічних умов, невірні крайові умови тощо)
- сполучення інтерфейсів (міжмодульних, програмно-технічних, інформаційних).

Помилки первинного та вторинного типів породжуються на етапах розробки специфікацій на ПЗ; проектування ПЗ; реалізації програм.

Усунення помилок або відновлення програм здійснюється

програмістом на етапі налагодження ПЗ, який закінчується здачею готових програм в експлуатацію. Однак, як показує досвід дослідження надійності складного ПЗ, близько половини помилок програм не виявляється на стадії налагодження і здачі ПЗ в експлуатацію. Ці помилки (переважно вторинні) проявляють себе в процесі експлуатації ПЗ у випадкові моменти часу t і приводять до відмов програм.

Відмови ПЗ при його експлуатації мають ряд відмінностей від відмов технічних елементів:

- відмова ПЗ не приведе до руйнування або пошкодження програмного елемента. Відмови ПЗ не пов'язані з фізичним зносом елементу (зокрема носія програм).
- відмова ПЗ не корельована з процесорним і, тим більше, астрономічним часом (з процесорним часом або числом прогонів ПЗ користувачем).
- при тривалій експлуатації ПЗ всі його помилки можуть бути усунені і програми стають абсолютно надійними. Якщо позначити через $N(t)$ число не виявлених помилок ПЗ в довільний момент процесорного часу t , то формально має місце співвідношення $\lim N(t) = 0$, справедливе за умови, що в процесі відновлення програм до них не вносяться нові помилки. Досвід створення та експлуатації ПЗ реального часу показує, що при усуненні одних помилок вносяться інші. Тому, при тривалій експлуатації ПЗ, загальне число помилок може залишатися постійним або навіть зростати. Для опису надійності ПЗ використовують такі ж функціональні та числові характеристики, як і при дослідженні надійності технічних елементів.

Основні показники надійності ПЗ:

1. Функція ненадійності або відмови ПЗ:

$Q(t)$ - ймовірність того, що відмова ПЗ з'явиться до моменту часу t ;

2. Функція надійності ПЗ:

$P(t)$ - ймовірність того, що відмова ПЗ з'явиться після моменту часу t ;

3. Інтенсивність відмов ПЗ: $\lambda(t)$

4. Середнє напрацювання на відмову ПЗ: T_0

Програмне забезпечення АСУ ТП складається з великої кількості програм, підпрограм і модулів, що знаходяться під управлінням операційної системи реального часу або програми-диспетчера. Виконання кожної з цих програм здійснюється послідовно в часі на одному і тому ж процесорі. Якщо ці програми мають взаємні інформаційні зв'язки або призначені для отримання одного результату (обчислення однієї функції), то в надійністному відношенні такий програмний комплекс являє собою просту систему без надмірності і ймовірність його безвідмовної роботи дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи кожної i -ої програми:

$$P(t) = \prod_{i=1}^m p_i(t),$$

де m - загальна кількість програм.

Надійність такого ПЗ визначається надійністю відмов самої «ненадійної» програми, яка має найбільше значення λ_i , $i = 1, 2, \dots, m$.

Для підвищення надійності нерезервованого ПО слід в першу чергу поліпшити характеристики самих «ненадійних» програм (більш жорстке динамічне тестування «ненадійних» програм, розширюючи при цьому набір тестових завдань). Якщо тестування не зменшує інтенсивність прояви помилок, то переписують «ненадійну» програму, прагнучи посилити її структурованість шляхом збільшення числа готових і добре вивчених програмних модулів і стандартних підпрограм і застосування апробованих міжмодульних інтерфейсів. Зниженню інтенсивності λ сприяє і перехід на іншу вищу мову програмування.

Інший шлях підвищення надійності ПЗ пов'язане з резервуванням та введенням в програмну систему деякої надмірності.

Стосовно ПЗ АСУ ТП розрізняють три види резервування:

1. тимчасове;
2. інформаційне;
3. програмне.

Тимчасове резервування ПЗ полягає в багаторазовому прогоні одних і тих же «ненадійних» програм і порівнянні результатів розрахунку. Таке навантажене резервування дозволяє усувати вплив випадкових збоїв і виявляти випадкові помилки, які потребують відновлення програм.

Інформаційне резервування ПЗ засновано на дубльованих вихідних і проміжних даних. Ці дані можуть проходити додаткову обробку, наприклад, усереднення, до введення в ПЗ, де вони обробляються один раз; або оброблятися однією і тією ж програмою двічі, тобто інформаційне резервування підкріплюється тимчасовим.

Програмне резервування передбачає наявність двох або більше різних програм для отримання одного й того ж результату або реалізації однієї функції. Тут можливо навантажене і ненавантажене резервування.

Резервування програмного забезпечення розподілених АСУ ТП часто супроводжується апаратним резервуванням. При відмові ПЗ будь-якої локальної технологічної станції або при виході з ладу технічних засобів цієї станції, операційна система АСУ передає виконання відповідальних функцій іншій станції.

2.2.2. Моделі надійності програм

Аналітичні моделі надійності дають можливість досліджувати закономірності прояву помилок у програмі, а також прогнозувати надійність при розробці й експлуатації.

Моделі надійності програм будуються на припущенні про те, що прояв помилки є випадковою подією й тому має імовірнісний характер. Такі моделі призначені для оцінки показників надійності програм і програмних комплексів у процесі тестування. Вони дають можливість

прийняти обґрунтований розв'язок про час проектування відлагоджувальних робіт.

При побудові моделей використовуються наступні характеристики надійності програм.

Функція надійності $P(t)$, визначається як імовірність того, що помилки програми не проявляються на інтервалі часу від 0 до t , тобто час її безвідмовної роботи буде більше.

Функція надійності $Q(t)$ – імовірність того, що протягом часу t відбудеться відмова програми як результат прояву дії помилки в програмі. У такий спосіб:

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

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – умовна щільність імовірності часу від виникнення відмови програми за умови, що до моменту t відмови не було.

$$\lambda(t) = - \frac{dP(t)}{dt} \bigg/ P(t) = \left| \frac{dQ(t)}{dt} \right| \bigg/ P(t)$$

Основними типами застосовуваних моделей надійності програм є моделі, засновані на припущенні про дискретну зміну характеристик надійності програм, і моделі з експонентним характером зміни числа помилок залежно від часу тестування й функціонування програми.

Прогнозування надійності програм у ході експлуатації здійснюється на основі математичних моделей надійності, запропонованих Літлвудом, Желинським-Морандою, Шуманом, Шик-Вольвертоном. Існує модель надійності програм з частотою появи помилок, що дискретно-знижується (інтенсивністю) та з дискретним збільшенням часу наробки на відмову, експоненціальна. Крім того, створені моделі надійності для прогнозування надійності програм на ранніх етапах їх розробки. Розглянемо деякі з них.

Аналіз надійності функціонування великих закордонних і російських програмних комплексів показує, **що надійність ПЗ значно нижче надійності апаратних засобів**. Тому неврахована надійність ПЗ веде до значного її завищення при оцінці надійності великих апаратно-програмних комплексів.

Розроблені методи аналізу надійності технічних засобів не можна автоматично переносити й використовувати для оцінки надійності ПЗ, *потрібні спеціальні моделі аналізу надійності ПЗ*.

Модель надійності з інтенсивністю, що дискретно-знижується

У цій моделі передбачається, що інтенсивність виявлення помилок описується кусочно-постійною функцією, пропорційної числу неперекритих помилок, тобто передбачається що інтенсивність відмов $\lambda(t)$ постійна до виявлення й виправлення помилки, після чого вона знову стає константою, але з іншим, меншим значенням. При цьому передбачається,

що між $\lambda(t)$ і числом помилок, що залишилися в програмі, існує пряма залежність:

$$\lambda(t) = K(M-i) = \lambda_i,$$

де M – невідоме первісне число помилок;
 i – число виявлених помилок, що залежать від часу t ;
 K – деяка константа.

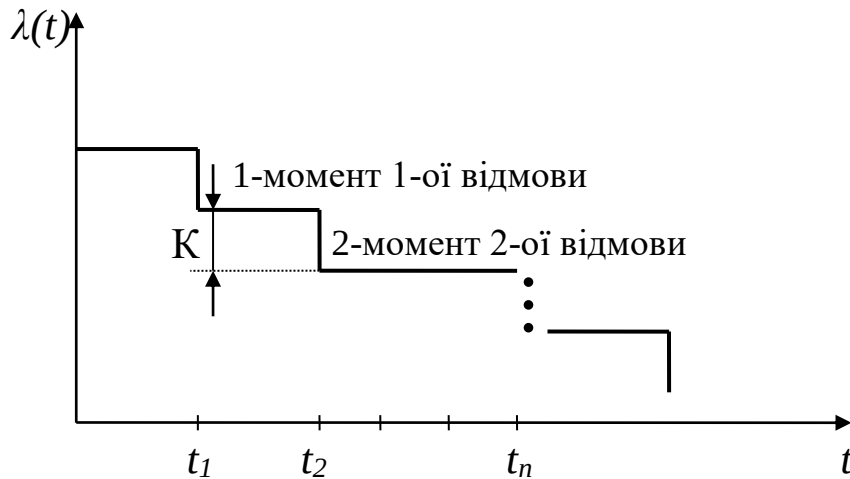


Рис. 2.2.1. Залежність інтенсивності відмов програм від час робот (модель надійності з інтенсивністю появи помилок, що дискретно-знижується)

На рис. 2.2.1 наведена залежність $\lambda(t)$ від часу для деякої ділянки експлуатації програми:

1 – момент першої відмови;

2 – момент другої відмови.

З графіка видно, $\lambda(t_1, t_2, \dots, t_n)$, при $t = t_1 + t_2 + \dots + t_n$ убуває монотонно.

Щільність розподілу часу виявлення i -ої помилки задається співвідношенням:

$$f(t_i) = \lambda_i \cdot e^{-\lambda_i \cdot t_i}$$

Значення невідомих параметрів K и M може бути оцінене на підставі послідовності спостереження інтервалів між моментами виявлення помилок по методу максимальної правдоподібності.

Модель надійності програм з дискретним збільшенням часу наробітку на відмову.

Вона побудована на припущенні про те, що усунення помилки в програмі приводить до збільшення часу наробітку на ту саму випадкову величину.

Модель Джелінського-Моранди.

Ця модель заснована на наступних припущеннях:

1. Час до наступного відмови розподілений експоненційно;
2. Інтенсивність відмов програми пропорційна кількості помилок, що залишилися в програмі.

Згідно із цими допущеннями ЙБР програм як функція часу t_i дорівнює:

$$P(t_i) = e^{-\lambda_i \cdot t_i}$$

$$\lambda_i = C_D(N - (i - 1)), \quad (2.2.1)$$

де i – число виявлених помилок;

C_D – коефіцієнт пропорційності, $C_D \approx 0,02$ (визначається за методом максимуму правдоподібності);

N – первісне число помилок програми. У виразі (2.2.1) відлік часу починається від моменту останньої $(i-1)$ -ої відмови програми.

Модель Шумана.

Дана модель відрізняється від моделі Джелінського-Моранди тільки тим, що періоди часу налагодження й експлуатації програм розглядаються окремо.

Модель Шіку-Вольвертона.

Основою цієї моделі є припущення про те, що інтенсивність помилок програми пропорційна не тільки кількості помилок, що залишилися в програмі, але й часу витраченому на налагодження.

Експонентна модель надійності програм.

Модель заснована на припущенні про експонентний характер зміни в часі числа помилок у програмі.

У цій моделі прогнозується надійність програми на основі даних, отриманих під час тестування. У моделі вводиться сумарний час функціонування τ , який відлічується від моменту початку тестування програми (з усуненням виявлених помилок) до кінця контрольного моменту, коли проводиться оцінка надійності.

Передбачається, що всі помилки в програмі незалежні й проявляються у випадкові моменти часу з постійною середньою інтенсивністю в плинні всього часу виконання програми. Основна відмінність даної моделі від попередніх полягає в тому, що інтенсивність відмов передбачається безперервною функцією. Це спрощує математичний опис моделі.

Нехай M – число помилок, наявних у програмі перед тестуванням (M розглядається як деяка константа);

$m(\tau)$ – кінцеве число виправлених помилок;

$m_0(\tau)$ – число помилок, що залишилися.

Тоді:

$$m_0(\tau) = M - m(\tau), \quad (2.2.2)$$

Передбачається, що інтенсивність відмов пропорційна числу помилок, що залишилися, $m_0(\tau)$, тобто:

$$\lambda(\tau) = C \cdot m_0(\tau). \quad (2.2.3)$$

C – коефіцієнт пропорційності враховуючий реальну швидкість комп'ютера й число команд у програмі.

Вважаємо (додаткове припущення), що в процесі корегування нові помилки не породжуються, тобто що інтенсивність виправлення помилок dm/dt буде дорівнює інтенсивності їх виявлення, тобто:

$$dm/dt = \lambda(\tau) \quad (2.2.4)$$

Вирішуючи спільно два вищевказані рівняння (2.2.3) і (2.2.4) одержуємо:

$$dm/dt + C \cdot m = C \cdot M \quad (2.2.5)$$

Перед початком роботи комп'ютера ($t = 0$) жодна помилка виправлена не була ($\tau = 0$), тому розв'язкою є:

$$m = M \cdot [1 - \exp(-C \cdot \tau)], \quad (2.2.6)$$

де m – число виправлених помилок у перебіг часу τ .

Середній час наробітку на відмову в перебіг часу τ після тестування характеризують надійність програми:

$$t_{cp} = 1/\lambda(\tau)$$

Отже:

$$t_{cp} = (1/C \cdot M) \cdot \exp(C \cdot \tau) \quad (2.2.7)$$

Середній час наробітку на відмову збільшується за мірою виявлення й виправлення помилок.

Розглянута модель може застосовуватися для визначення часу випробувань програм з метою досягнення заданого рівня надійності, а також для оцінки числа помилок, що залишилися в програмі.

Модель надійності великих програмних комплексів.

Для прогнозу надійності великих програмних комплексів може бути використана марківська модель. Надійність усього програмного комплексу визначається як функція надійності її складових частин. Подібна оцінка значно полегшується, якщо програма будується за модульним принципом.

Надійність програмного комплексу буде залежати від послідовності виконуваних модулів і надійності кожного із цих модулів.

Прогнозування надійності на ранніх етапах їх розробок.

У цей час найбільш відпрацьовані способи прогнозування очікуваного числа помилок у програмах.

Оцінка очікуваного числа помилок Y у програмі виражається через лінійну залежність:

$$Y = \sum_{j=1}^r a_j \cdot Z_j,$$

де r – число існуючих параметрів;

a_j – коефіцієнт, що залежить від типу програм (керуючі, введення-виводу, обчислювальні, службові);

Z_j – j -параметр програми.

У якості параметрів Z_j обрані величини:

Z_1 – складність умовних операторів;

Z_2 – загальне число розгалужень;

Z_3 – загальне число зв'язків із прикладними програмами;

Z_4 – загальне число зв'язків із системними програмами;

Z_5 – число операцій введення-виводу;

Z_6 – число обчислювальних операторів;

Z_7 – число операторів обробки даних;

Z_8 – число коментарів.

Якщо число очікуваних у програмі помилок оцінене, то інтенсивність відмов програми оцінюється за виразом:

$$\lambda_{np} = \bar{\gamma} \cdot Y / t_{piu}, \quad (2.2.8)$$

де t_{piu} – середній час однократного проходження програми;

$\bar{\gamma}$ – усереднене по всіх помилках значення γ – умовної ймовірності того, що помилка в програмі проявляється при проходженні програми.

Рекомендується оцінювати γ експериментально (статистично), визначаючи інтенсивність відмови й кількість помилок для декількох програм. Тоді:

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{t_{piu} \cdot \lambda_i}{Y_i}$$

λ_i , Y_i , t_{piu} – відповідно інтенсивність відмов, кількість помилок і час розв'язку для i -ої програми;

n – кількість випробуваних програм.

Інтуїтивна модель.

Ця модель використовується при експериментальній оцінці числа помилок у програмі.

Згідно із цією моделлю число помилок у програмі оцінюється як:

$$Y = Y_1 \cdot Y_2 / Y_{12},$$

де Y_1, Y_2 – число помилок, виявлених першим і другим програмістами, відлагоджуючих незалежно один від іншого первісний текст програми, а Y_{12} – число помилок, виявлених як першим, так і другим програмістами.

Очевидно, що первісний текст програми повинен бути розроблений при цьому третім програмістом, щоб поставити відлагоджуємий текст програмістів у рівні умови.

Для прогнозування надійності ПО, зокрема для прогнозування кількості не виявлених помилок на етапі тестування існує інтуїтивна модель.

Нехай одна група тестування виявляє N_1 , а інша N_2 помилок, N_{12} – кількість помилок, виявлених обома групами. Позначимо через N загальна кількість помилок ПО. Якщо ввести поняття ефективності тестування груп як відносини кількості виявлених помилок до їхнього загального числа, то ефективності тестування груп відповідно $E_1 = N_1 / N$, $E_2 = N_2 / N$;

Передбачається, що ефективність тестування кожної групи однакова як на всій безлічі простору помилок ПО, так і на будь-якій його підмножині. У цьому випадку слушне співвідношення:

$$E_1 = N_1 / N = N_{12} / N;$$

Підстановка N_2 приводить до виразу виду:

$$N = N_{12} / E_1 \cdot E_2,$$

де $E_1 = N_{12} / N_2$; $E_2 = N_{12} / N_1$;

Приклад. Нехай групи тестування виявили відповідно 20 і 25 помилок, з них 5-помилки виявлені обома групами. У цьому випадку $E_1 = 0,2$; $E_2 = 0,25$.

Загальна кількість помилок $N = 100$, а кількість помилок, що залишилися в не виявленими – 60.

Відмови ПЗ при його експлуатації мають, як багато спільного, так і ряд відмінностей від відмов технічних елементів

2.3. МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТЗ.

В тих випадках коли неможливо отримати аналітичне рішення задачі

з надійності ТЗ, в якості методу досліджень застосовується машинне моделювання. Моделювання отримало поштовх в своєму розвитку в зв'язку з постійним зростанням вимог до технічного рівня і надійності ТЗ.

Моделювання являє собою процес дослідження моделюємого об'єкту, що базуються на подібності моделі і об'єкту і включає побудову моделі, її дослідження і перенос отриманих відомостей на моделюємий об'єкт.

Під моделлю розуміють об'єкт, явище, процес, систему, експериментальну установку, математичні вирази, що знаходяться у відповідності до об'єкту, що моделюється. Від простоти і точності моделі залежить адекватність моделі, тобто ступінь відповідності моделі реальному явищу, для опису якого будувалася модель.

2.3.1. Місце і значення моделювання при оцінці надійності ТЗ.

В теорії надійності моделювання займає одне з провідних місць. Це обумовлено тим, що як правило, відомості про надійність виробу в даний момент часу не завжди мають ту цінність, яку мають, наприклад, відомості про прогнозовані відмови і показники надійності. А отримати дану інформацію неможливо іншим шляхом окрім моделювання.

В науковій літературі існує велика кількість підходів до класифікації моделей і методів моделювання. Розглянемо один з них (рис.2.3.1).

Розрізняють матеріальне (предметне) та ідеальне моделювання.

В першому випадку в якості моделі передбачається використовувати деякий матеріальний предмет. За природою аналогій матеріальне моделювання спирається на фізичне (макетування, що забезпечує аналогію фізичного природи аналога і моделі) і аналогове (забезпечує схожість процесів, що протікають в оригіналі і моделі).

Ідеальне моделювання будується на розумовій ідеалізованій аналогії реального об'єкта і його моделі, а за способом відображення реального об'єкта (або за глибиною формалізації) поділяється на знакове і інтуїтивне моделювання.

За способом подання знакових моделей розрізняють: математичне, графічне та логічне моделювання. Математичне моделювання грає визначальну роль серед інших форм знакового моделювання. Однак, досить складно відділити логічне і графічне моделювання від математичного через їх тісне переплетення (наприклад в формі логічно-математичної моделі тощо).

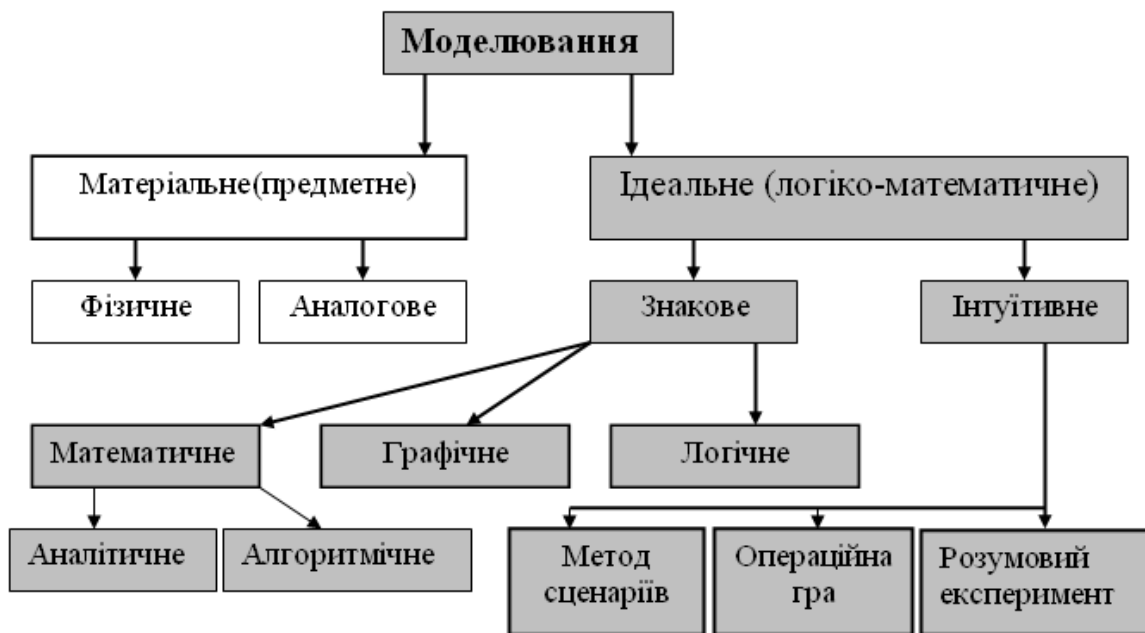


Рис.2.3.1.

За можливістю обчислення різних показників, відношень тощо, методи математичного моделювання діляться на аналітичне і алгоритмічне моделювання. Аналітичне моделювання має на увазі використання математичної моделі реального об'єкту в формі алгебраїчних, диференціальних, інтегральних та інших рівнянь, що зв'язують вихідні змінні з вхідними, які доповнені системою обмежень. При цьому мається на увазі наявність однозначної обчислювальної процедури отримання точного рішення рівняння. При алгоритмічному підході використовується математична модель, що не допускає точного рішення і примушує звертатися до різних рекурсивних методів, ітераційних процедур пошуку наближеного рішення.

Інтуїтивне моделювання проводиться на рівні описання. При цьому методи не встановлюють чіткі кількісні співвідношення між моделюємим явищем, обмежуються лише аналізом якісно узагальнених понять, що відбивають загальні тенденції розвитку явищ, напрямки зміни властивостей досліджуваних об'єктів тощо.

За способом формування суджень розрізняють наступні форми інтуїтивного моделювання: *метод сценаріїв; операційні ігри; розумовий (уявний) експеримент тощо*.

Основною формою моделювання надійності ТЗ є математичне моделювання з елементами імітації.

Зазвичай імітація проводиться на ЕОМ. При цьому прагнуть до найбільш точного врахування всіх існуючих факторів, що впливають на надійність ТЗ.

Практично імітаційне моделювання синтезує всі методи відображені на малюнку.

Моделювання в техніці досить складний процес. Складний цей процес і при моделюванні і при вирішенні задач надійності. Дати рекомендації по моделюванню на всі випадки життя в готовому вигляді неможливо. Однак існують певні пророблені на практиці принципи моделювання, дотримуючись яких здійснюють побудову відповідних моделей:

- принцип інформаційної достатності;
- принцип параметризації;
- принцип агрегування;
- принцип здійсненності;
- принцип раціонального використання факторного простору;
- принцип великої кількості моделей.

При повній відсутності інформації про досліджувану систему побудова її моделі неможлива. При наявності повної інформації про систему її моделювання немає сенсу. Існує деякий критичний рівень апріорних відомостей про досліджувану систему, при досягненні якого в принципі можна отримати адекватну модель системи. Даний рівень визначається наявністю інформації про елементи системи і про суттєві зв'язки між ними, які формують визначальні властивості системи. При відсутності даних відомостей моделювання не приведе до отримання нової інформації про систему.

Принцип параметризації полягає в можливості використання в моделі системи параметрів, які характеризують деякі пристрої, виключаючи моделювання процесів функціонування даних пристроїв. Згідно цього принципу, підсистеми в моделі замінюють відповідним параметром, а не описують процес їх функціонування.

Принцип агрегування - полягає в поданні складної системи в вигляді деяких стандартних математичних схем. В більшості випадків складну систему можливо структурно подавати у вигляді системи, що складається із декількох агрегатів(підсистем), для яких можливо використати деякі стандартні математичні схеми.

Принцип здійсненності - створювана модель повинна забезпечувати досягнення поставленої мети дослідження з імовірністю, що суттєво відрізняється від нуля і за кінцевий час.

Принцип раціонального використання факторного простору полягає в тому, що в просторі керуємих змінних, крапки, які відображають умови експерименту, слідує обирати у відповідності з визначеним оптимальним планом експерименту.

Принцип великої кількості моделей полягає в виборі оптимальної моделі з великої кількості вже існуючих. Будь-яка модель реальної системи враховує не всі фактори, що діють в системі. Модель, як засіб відображення реального явища, начебто підсилює дію одних факторів, послаблюючи дію інших. Тому важливо правильно і гнучко організувати загальну системну модель в множині моделей.

При вирішенні задач оцінки надійності найбільш часто використовують імітаційні моделі на основі математичного принципу моделювання.

Основною перевагою використання моделювання в порівнянні з натурними експериментами є:

- можливість дослідження і прогнозування наслідків змін систем без надмірних витрат і небезпеки пов'язаної з дійсним здійсненням змін;
- можливість дослідження і імітації функціонування системи в будь-яких можливих умовах;
- можливість ознайомлення обслуговуючого персоналу з ситуаціями або з системами, що не можуть ще існувати в реальних умовах;
- можливість перевірки і кількісної оцінки нових ідей та підходів;
- можливість прискорення або сповільнення реального часу дослідження;
- можливість використання швидкодіючих ЕОМ з урахуванням великої кількості факторів, що впливають на систему і отримання більш точних і імовірних оцінок.

Таким чином, основним видом моделювання в теорії надійності ТЗ слід вважати математичне моделювання.

2.3.2. Рішення задач надійності на основі математичного моделювання.

На основі математичного моделювання в теорії надійності вирішуються різні задачі. Найбільш поширеними є задачі по прогнозуванню технічного стану ТЗ і показників надійності на будь-який момент часу.

В більшості випадків моделювання процесів надійності проводиться з урахуванням і імітацією випадкових факторів. Такий метод часто називають методом статистичного моделювання або методом Монте-Карло. При статистичному моделюванні реалізація моделюючого алгоритму є в певному сенсі імітацією елементарних явищ, якими є відмови елементів, що складають процес, який досліджується.

Основою таких моделюючих алгоритмів є використання різних законів розподілу і датчиків випадкових чисел, що мають рівномірний розподіл на інтервалі $[0,1]$.

Більш докладно закони розподілу були розглянуто раніше.

До складу математичного забезпечення сучасних ЕОМ входять спеціальні програми імітації псевдо випадкових чисел.

При вирішенні задач надійності часто приходить моделювати розподіл випадкових величин. В цьому випадку вже маються певні напрацювання і знаючи закон розподілу та його параметри можна легко отримати значення напрацювання або відмов відповідної функції розподілу або щільностей розподілу з врахуванням випадковості(використовуючи датчик випадкових чисел) і на любий

момент часу. Наприклад

- для експоненціального (показникового) закону розподілу:

$$f(t) = \lambda_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t}; \quad F(t) = 1 - e^{-\lambda_0 \cdot t};$$

з параметрами

$$m_t = 1/\lambda_0; \quad D_t = 1/\lambda_0^2;$$

Алгоритм обчислення випадкового числа чи значення величини часу напрацювання на відмову буде мати вигляд:

$$\tau = \frac{\ln(\xi)}{\lambda_0}$$

де ξ - випадкове число взятє із датчика випадкових чисел з рівномірним розподілом $[0,1]$.

- для нормального закону розподілу:

$$f(t) = e^{(t-m_t)^2 / 2 \cdot \sigma_t^2} / \sigma_t \cdot \sqrt{2 \cdot \pi};$$

$$F(t) = (1 / \sigma_t \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}) \cdot \int_{-\infty}^t e^{(t-m_t)^2 / 2 \cdot \sigma_t^2} dt.$$

з параметрами m_t, σ_t ,

$$\tau = m_t + \sigma_t \left[\sum_{i=1}^{12} \xi_i - 6 \right]$$

- для гама розподілу:

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

$$F(t) = (\sigma^\lambda / \Gamma(\lambda)) \cdot \int_0^t t^{\lambda-1} \cdot e^{-t \cdot \sigma} dt,$$

з параметрами

$$m_t = \lambda / \sigma, \quad D_t = \lambda / \sigma^2,$$

$$\tau = (-1/\sigma) \cdot \sum_{i=1}^{\lambda} \ln \xi_i$$

- для розподілу Єрланга:

$$f(t) = ((\sigma \cdot t)^{m-1} \cdot e^{-t \cdot \sigma}) / ((m-1)! \cdot \sigma)$$

$$F(t) = 1 - e^{-t \cdot \sigma} \cdot [\sum_{k=0}^{m-1} (\sigma \cdot t)^k / k!]$$

з параметрами

$$m_t = m / \sigma, \quad D_t = m / \sigma^2,$$

$$\tau = 1 / \sigma \cdot \ln[\sum_{i=1}^m \xi_i]$$

- для розподілу Вейбулла-Гнеденко:

$$f(t) = \frac{\lambda}{\sigma} \cdot \left(\frac{t}{\sigma}\right)^{\lambda-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^{\lambda}}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^{\lambda}}$$

з параметрами

$$m_t = \sigma \cdot \Gamma \cdot \left[\frac{1}{\lambda} + 1\right], \quad D_t = \sigma^2 \left\{ \Gamma \cdot \left(\frac{2}{\lambda} + 1\right) - \left(\Gamma \cdot \left(\frac{1}{\lambda} + 1\right)\right)^2 \right\};$$

$$\tau = \sigma \cdot \left[-\ln \xi_i\right]^{\frac{1}{\lambda}}.$$

В літературі відомі і інші математичні співвідношення для інших законів розподілу.

Враховуючи те, що основною побудови моделі надійності є випадкові процеси, а це означає, що однією реалізацією процесу не можливо об'єктивно характеризувати об'єкт, що вивчається. Тому величини, що знаходяться при дослідженні процесу виникнення відмов методом Монте-Карло, зазвичай визначають, як середнє значення по даним великої кількості реалізацій процесу.

Якщо кількість реалізацій N , що використовуються для оцінки початкових величин досить велике, то в силу закону великих чисел отримані оцінки мають статистичну стійкість і з достатньою для практики

точністю можуть бути прийняті в якості наближених значень шуканих величин.

В цьому випадку чимала роль відводиться фіксації і обробці результатів моделювання.

Так, для складних систем і великої кількості реалізацій відтворених при моделюванні, об'єм інформації про стан системи може бути настільки значним, що запам'ятовування в пам'яті машини, обробка і подальший аналіз стає майже неможливим, або, в крайньому випадку, занадто складним. Тому необхідно таким чином організувати зберігання і обробку інформації про результати моделювання, щоб оцінки для шуканих величин формувались поступово по ходу моделювання без спеціального запам'ятовування всієї інформації про стани системи. При моделюванні процесів зміни надійності в якості оцінки для шуканих величин використовуються середні значення дисперсії та інших імовірнісних характеристик відповідних випадкових величин, що отримані при багаторазовому моделюванні. Кількість реалізацій такого моделювання залежить від того, які вимоги висуваються до точності моделювання.

Зазвичай число реалізацій вибирають $N_0 = 50 \dots 100$.

Якщо дане N_0 не задовільняє вимогам то його обчислюють виходячи із необхідної точності ε за співвідношенням

$$N_0 = t_{\alpha}^2 \cdot \sigma^2 / \varepsilon^2;$$

де σ^2 - дисперсія результатів обчислення

t_{α}^2 - параметр, який отримують із закону нормального розподілу випадкових величин і заданої величини достовірності α .

Існують і інші алгоритми моделювання надійності, які основані на складних математичних теоріях системи масового обслуговування, динамічного програмування та інших, але їх розглядати не будемо через складність їх математичного апарату.

Таким чином, використання математичного моделювання дає можливість проводити оцінку надійності, не витрачаючись на довготривалі дослідження.

Моделювання в цілому досить важливий апарат для отримання нових результатів в галузі розвитку питань підвищення надійності ТЗ.

2.4. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВУЗЛІВ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ (ІС, МКП, МКК, ПЛІС)

**Методика оцінки інтенсивності відмов функціональних вузлів
інтегральних схем**

2.4.1. Введення

Проблема прогнозування надійності радіоелектронної апаратури (ТЗ) актуальна практично для всіх сучасних технічних систем. Враховуючи, що ТЗ містить у собі електронні компоненти, встає завдання розробки методик, що дозволяють оцінювати інтенсивності відмов (ІВ) цих компонентів. Нерідко технічні вимоги по надійності, пропоновані в технічних завданнях (ТЗ) на розробку ТЗ, входять у суперечність із вимогами, які пропонуються до ваги і габаритів ТЗ, що не дозволяє виконати вимоги ТЗ за рахунок, наприклад, дублювання.

Для ряду видів ТЗ підвищені вимоги по надійності пред'являються до контролюючих пристроїв, розміщених в одному кристалі з основними функціональними вузлами апаратури. Наприклад, до схеми додавання по модулю 2, що забезпечує контроль роботи, основного й дублюючого вузлів яких-небудь блоків апаратури. Підвищені вимоги по надійності можуть пред'являти також до областей пам'яті, у яких зберігається інформація, необхідна для виконання алгоритму роботи апаратури.

Запропонована методика дозволяє оцінити ІВ різних функціональних областей мікросхем. У мікросхемах пам'яті: оперативних запам'ятовувальних пристроях (ОЗП), постійних запам'ятовувальних пристроях (ПЗП), репрограмуємих запам'ятовувальних пристроях (РПЗП), *це інтенсивності відмов накопичувачів, дешифраторів і схем керування. У схемах мікроконтролерів і мікропроцесорів* методика дозволяє визначити *ІВ областей пам'яті, арифметичного логічного пристрою, аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів* тощо. У програмувальних логічних інтегральних схемах (ПЛІС), ІВ основних функціональних вузлів, з яких складається ПЛІС: конфігуруємий логічний блок, блок входу/виходу, області пам'яті, JTAG тощо. Методика також дозволяє визначити *ІВ одного виводу мікросхеми, однієї комірки пам'яті, а, у деяких випадках, і ІВ окремих транзисторів.*

2.4.2. Призначення й область застосування методики

Методика призначена для оцінки експлуатаційної ІВ λ_E різних функціональних вузлів мікросхем: *мікропроцесорів, мікроконтролерів, мікросхем пам'яті, програмувальних логічних інтегральних схемах.* Зокрема, усередині кристалів областей ЗП, а також ІВ комірок накопичувачів ЗП мікросхем закордонного виробництва, у тому числі мікропроцесорів, ПЛІС. На жаль, відсутність інформації про ІВ корпусів не дозволяє застосувати методику для вітчизняних мікросхем.

ІВ, визначені за даною методикою, є вихідними даними для розрахунків надійнісних характеристик при проведенні інженерних досліджень апаратури.

Методика містить алгоритм розрахунків ІВ, алгоритм перевірки отриманих результатів розрахунків, приклади розрахунків ІВ

функціональних вузлів мікропроцесора, схем пам'яті, програмувальних логічних схем.

2.4.3. Допущення методики

Методика заснована на наступних допущеннях [13]:

- відмови елементів незалежні;
- ІВ мікросхеми постійна.

Додатково до цих допущень буде показана можливість поділу ІВ мікросхем на ІВ корпусу й інтенсивність відмов кристала.

2.4.4. Вихідні дані

1. Функціональне призначення мікросхеми: мікропроцесор, мікроконтролер, пам'ять, ПЛІС тощо.
2. Технологія виготовлення мікросхеми: біполярна, КМОН.
3. Значення інтенсивності відмов мікросхеми.
4. Блок-схема мікросхеми.
5. Тип і обсяг накопичувачів схем пам'яті.
6. Кількість виводів корпусу.

2.4.5. Зміст методики

2.4.5.1. За відомими значенням ІВ мікросхеми визначаються ІВ корпусу й кристала.

2.4.5.2. За знайденим значенням ІВ кристала, для мікросхеми пам'яті, виходячи з її типу й технології виготовлення, розраховуються ІВ накопичувача, схем дешифраторів, схем керування. Розрахунки засновані на стандартній побудові електричних схем, що обслуговують накопичувач.

2.4.5.3. Для мікропроцесора або мікроконтролера, використовуючи результати розрахунків, отримані в попередньому пункті, визначаються ІВ областей пам'яті. Різниця між ІВ кристала й знайденими значеннями ІВ областей пам'яті складе значення ІВ частини мікросхеми, що залишилася.

2.4.5.4. За відомими значенням ІВ кристалів для сімейства ПЛІС, їх функціональному складу й кількості однотипних вузлів, складається система лінійних рівнянь. Кожне з рівнянь системи складається для одного типоміналу із сімейства ПЛІС. Права частина кожного з рівнянь системи являє собою суму добутків значень ІВ функціональних вузлів певного типу на їхню кількість. Ліва частина кожного з рівнянь системи – значення ІВ кристала конкретного типоміналу ПЛІС із сімейства.

Максимальна кількість рівнянь у системі дорівнює кількості ПЛІС у сімействі.

Розв'язок системи рівнянь дозволяє одержати значення ІВ функціональних вузлів ПЛІС.

2.4.5.5. На основі результатів розрахунків, отриманих у попередніх пунктах, можуть бути знайдені значення ІВ окремої комірки пам'яті, виводу мікросхеми або транзистора конкретного вузла блок-схеми, якщо відома схема електрична принципова вузла.

2.4.5.6. Перевірка результатів розрахунків для мікросхеми пам'яті проводиться порівнянням значення ІВ для іншої мікросхеми пам'яті, отриманим стандартним методом, зі значенням ІВ цієї мікросхеми розрахованим з використанням даних отриманих у п.2.4.5.2 цього розділу.

2.4.5.7. Перевірка результатів розрахунків для ПЛІС проводиться розрахунками ІВ кристала одного з типоміналів розглянутого сімейства ПЛІС, який не входив у систему рівнянь. Розрахунки проводяться з використанням значень ІВ функціональних вузлів, отриманих у п.2.4.5.4 цього розділу, і порівнянням отриманого значення ІВ ПЛІС зі значенням ІВ, розрахованим з використанням стандартних методів.

2.4.6. Аналіз моделі прогнозування інтенсивності відмов мікросхем з погляду можливості поділу інтенсивності відмов мікросхеми на суму інтенсивностей відмов кристала й корпусу.

ІВ кристала, корпусу й зовнішніх виводів мікросхеми визначаються з математичної моделі прогнозування ІВ закордонних інтегральних схем для кожного типоміналу ІС.

Проаналізуємо доданки математичної моделі [14] для розрахунків експлуатаційної ІВ λ_E цифрових і аналогових інтегральних схем закордонного виробництва:

$$\lambda_E = (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) \pi_Q \pi_L, \quad (2.4.1)$$

де: C_1 - складова ІВ ІС, що залежить від ступеня інтеграції;

π_T - коефіцієнт, що враховує перегрів кристала щодо навколишнього середовища;

C_2 - складова ІВ ІС, що залежить від типу корпусу;

π_E - коефіцієнт, що враховує жорсткість умов експлуатації ТЗ (групу експлуатації апаратури);

π_Q - коефіцієнт, що враховує рівень якості виготовлення ЕРВ;

π_L - коефіцієнт, що враховує опрацьованість технологічного процесу виготовлення ЕРВ;

Цей вираз є слушним для мікросхем, виготовлених як по біполярній, так і по МОН технології, і містить у собі цифрові й аналогові схеми, програмувальні логічні матриці й ПЛІС, мікросхеми пам'яті, мікропроцесори.

Математична модель прогнозованої ІВ інтегральних мікросхем, за першоджерело якої взятий стандарт міністерства оборони США [14], являє собою суму двох доданків. Перший доданок характеризує відмови, обумовлені ступенем інтеграції кристала й електричним режимом роботи мікросхеми (коефіцієнти C_1 , π_T), другий доданок характеризує відмови, пов'язані з типом корпусу, кількістю виводів корпусу й умовами експлуатації (коефіцієнти C_2 , π_E).

Такий поділ пояснюється можливістю випуску однієї й тієї ж мікросхеми в різних типах корпусів, що суттєво різняться своєю надійністю

(стійкістю до вібрацій, герметичністю, гігроскопічністю тощо). Позначимо перший доданок як ІВ обумовлену кристалом ($\lambda_{кр}$), а другий - корпусом ($\lambda_{корп}$).

З (2.4.1) одержимо:

$$\lambda_{кр} = C_1 \cdot \pi_T \cdot \pi_Q \cdot \pi_L, \quad \lambda_{корп} = C_2 \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_L \quad (2.4.2)$$

Тоді ІВ одного виводу мікросхеми дорівнює:

$$\lambda_{1Вив} = \lambda_{корп} / N_{Вив} = C_2 \pi_E \pi_Q \pi_L / N_{Вив},$$

де $N_{Вив}$ - кількість виводів у корпусі інтегральної схеми.

Знайдемо відношення ІВ корпусу до експлуатаційної ІВ мікросхеми:

$$\lambda_{корп} / \lambda_E = C_2 \pi_E \pi_Q \pi_L / (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) \pi_Q \pi_L = C_2 \pi_E / (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) \quad (2.4.3)$$

Проаналізуємо цей вираз з погляду впливу на нього типу корпусу, кількості виводів, перегріву кристала за рахунок потужності, що розсіюється в кристалі, жорсткості умов експлуатації.

2.4.6.1. Вплив жорсткості умов експлуатації

Розділивши чисельник і знаменник виразу (2.4.3) на коефіцієнт π_E одержимо:

$$\lambda_{корп} / \lambda_E = C_2 / (C_1 \pi_T / \pi_E + C_2) \quad (2.4.4)$$

Аналіз виразу (2.4.4) показує, що процентне співвідношення ІВ корпусу й експлуатаційної ІВ мікросхем залежить від групи експлуатації: чим жорсткіші умови експлуатації апаратури (більше значення коефіцієнта π_E), тим більша частка відмов припадає на відмови корпусу (знаменник у рівнянні 2.4.4 зменшується) і відношення $\lambda_{корп} / \lambda_E$ прагне до 1.

2.4.6.2. Вплив типу корпусу й кількості виводів корпусу

Розділивши чисельник і знаменник виразу (2.4.3) на коефіцієнт C_2 одержимо:

$$\lambda_{корп} / \lambda_E = \pi_E / (C_1 \pi_T / C_2 + \pi_E) \quad (2.4.5)$$

Аналіз виразу (2.4.5) показує, що процентне співвідношення ІВ корпусу й експлуатаційної ІВ мікросхем залежить від співвідношення коефіцієнтів C_1 і C_2 , тобто від співвідношення ступеня інтеграції мікросхеми й параметрів корпусу: чим більше кількість елементів у мікросхемі (більше коефіцієнт C_1), тим менша частка відмов припадає на відмови корпусу (відношення $\lambda_{корп} / \lambda_E$ прагне до нуля) і чим більше кількість виводів у корпусі, тем більшої ваги набувають відмови корпусу (відношення $\lambda_{корп} / \lambda_E$ буде прагне до 1).

2.4.6.3. Вплив потужності, що розсіюється в кристалі

З виразу (2.4.3) видно, що зі збільшенням π_T (коефіцієнт, що

відбиває перегрів кристала за рахунок потужності, що розсіюється в кристалі), значення знаменника рівняння збільшується, і, отже, частка відмов, що доводиться на корпус зменшується й відмови кристала набувають більшу відносну вагу.

Висновок:

Аналіз зміни значення відносини $\lambda_{\text{корп}}/\lambda_E$ (рівняння 2.4.3) залежно від типу корпусу, кількості виводів, перегріву кристала за рахунок потужності, що розсіюється в кристалі, і жорсткості умов експлуатації показав, що перший доданок у рівнянні (2.4.1) характеризує експлуатаційну ІВ кристалу, другий – експлуатаційну ІВ корпусу й рівняння (2.4.2) можуть бути використані для оцінки експлуатаційної ІВ безпосередньо напівпровідникового кристалу, корпусу й ІВ виводів корпусу. Значення експлуатаційної ІВ кристала може бути використана як вихідний матеріал для оцінки ІВ функціональних вузлів мікросхем.

2.4.7. Розрахунки інтенсивності відмов комірки пам'яті запам'ятовувальних пристроїв, що входять до складу мікросхем пам'яті, мікропроцесорів і мікроконтролерів.

Для визначення ІВ інформації, що доводиться на біт, напівпровідникових ЗП, розглянемо їхній склад. До складу напівпровідникового ЗП будь-якого типу входять [16], [17]:

- 1) Накопичувач
- 2) Схема об'ємного зчитування:
 - адресна частина (рядкові й стовбчикові дешифратори)
 - числова частина (підсилювачі запису й зчитування)
 - блок місцевого керування - здійснює координацію роботи всіх вузлів у режимах зберігання, запису, регенерації (динамічні ЗП) і стирання інформації (РПЗП).

2.4.7.1. Оцінка кількості транзисторів у різних областях ЗП.

Розглянемо кожен складову ІВ ЗП. Загальне значення ІВ ЗП для мікросхем різного типу з різним обсягом накопичувача можна визначити, використовуючи [15]. ІВ корпусу й кристала розраховуються відповідно до розділу 2.4.5 даної методики.

На жаль, у технічних матеріалах на закордонні мікросхеми пам'яті відсутня загальна кількість елементів, що входять у мікросхему, а приводиться тільки інформаційна ємність накопичувача. Враховуючи той факт, що кожний тип ЗП містить стандартні блоки, оцінимо кількість елементів, що входять у мікросхему пам'яті, виходячи з обсягу накопичувача. Для цього розглянемо схемотехніку побудови кожного блоку ЗП.

2.4.7.1.1. Накопичувач ОЗП

В [16] наведені електричні принципові схеми запам'ятовувальних

гнізд ОЗП, виконаних по ТТЛШ, ЕЗЛ, МОН і КМОН технологіям. У таблиці 2.4.1 наведена кількість транзисторів, з яких будується одна комірка пам'яті (1 біт інформації ОЗП).

Таблиця 2.4.1.

Кількість транзисторів в одній комірці пам'яті ЗП

Тип ОЗП	Технологія виготовлення				
		ТТЛШ	ЕЗЛ	МОН	КМОН
Статичний	Кількість елементів	8	6	6	4,5,6
Динамічний		-	-	1	1

2.4.7.1.2. Накопичувачі ПЗП й ППЗП

У біполярних ПЗП й ППЗП запам'ятовувальний елемент накопичувача реалізується на основі діодних і транзисторних структур [18]. Вони виконуються у вигляді емітерних повторювачів на п-р-п і р-п-р транзисторах, переходах колектор-база, емітер-база, діодах Шоттки. У якості запам'ятовувального елемента в схемах, що виготовляються по МОН і КМОН технологіям, використовуються р і п-канальні транзистори. Запам'ятовувальний елемент складається з 1 транзистора або діода. Загальна кількість транзисторів у накопичувачі ПЗП або ППЗП дорівнює інформаційної ємності ЗП ВІС.

2.4.7.1.3. Накопичувач РПЗП

Інформація, записана в РПЗП, зберігається від декількох до десятків років. Тому РПЗП часто називають енергонезалежною пам'яттю. В основі механізму запам'ятовування й зберігання інформації лежать процеси накопичення заряду при запису, збереженні його при зчитуванні й при вимиканні електроживлення в спеціальних МОН транзисторах. Запам'ятовувальні елементи РПЗП будуються, як правило, на двох транзисторах.

Таким чином, кількість транзисторів у накопичувачі РПЗП дорівнює інформаційної ємності РПЗП помноженої на 2.

2.4.7.1.4. Адресна частина

Адресна частина ЗП будується на основі дешифраторів (декодерів). Вони дозволяють визначити N-Розрядне вхідне двійкове число шляхом одержання одиничного значення двійкової змінної на одному з виходів пристрою. Для побудови інтегральних схем прийнято використовувати лінійні дешифратори або комбінацію лінійних і прямокутних дешифраторів. Лінійний дешифратор має N входів і 2N логічних схем "І". Знайдемо кількість транзисторів необхідних для побудови таких дешифраторів у КМОН базисі (як найбільш часто використовуваним для створення ВІС). У таблиці 2.4.2 наведена кількість транзисторів необхідних для побудови дешифраторів на різну кількість входів.

Таблиця 2.4.2.

Кількість транзисторів, необхідних для побудови дешифраторів

Кіл-ть Входів N	Адресні інвертори		Схеми "Г"		Сумарна кількість транзисторів у дешифраторі $2*N*2^N+2*N$
	Кіл-ть Інверторів N	Кіл-ть Транзисторів $2*N$	Кіл-ть схем $2N$	Кіл-ть Транзисторів $2*N*2^N$	
1	2	3	4	5	6
2	2	4	4	$4*4=16$	$16+4=20$
1	2	3	4	5	6
3	3	6	8	$6*8=48$	$48+6=54$
4	4	8	16	$8*16=128$	$128+8=136$
5	5	10	32	$10*32=320$	$320+10=330$
6	6	12	64	$64*12=768$	$768+12=780$
7	7	14	128	$128*14=1792$	$1792+14=1806$
8	8	16	256	$256*16=4096$	$4096+16=4112$
9	9	18	512	$512*18=9216$	$9216+18=9234$
10	10	20	1024	$1024*20=20480$	$20480+20=20500$

Для лінійних дешифраторів розрядність дешифрованого числа не перевищує 8-10. Тому при збільшенні кількості слів у ЗП більш 1К використовують модульний принцип побудови ЗП.

2.4.7.1.5. Числова частина

(підсилювачі запису й зчитування)

Ці схеми призначені для перетворення рівнів зчитуваних сигналів у рівні вихідних сигналів логічних елементів конкретного типу й збільшення навантажувальної здатності. Як правило, вони виконуються за схемою з відкритим колектором (біполярні) або із трьома станами (КМОН). Кожна з вихідних схем може складатися з декількох (двох або трьох) інверторів. Максимальна кількість транзисторів у цих схемах при максимальній розрядності мікропроцесора 32 становить не більш 200.

2.4.7.1.6. Блок місцевого керування

У блок місцевого керування, залежно від типу ЗП, можуть входити рядкові й стовбчикові буферні регістри, адресні мультиплексори, блоки керування регенерацією в динамічних ЗП, схеми стирання інформації.

2.4.7.1.7. Оцінка кількості транзисторів у різних областях ЗП

Кількісне співвідношення транзисторів ОЗП, що входять у накопичувач, дешифратор і блок місцевого керування приблизно рівно: 100:10:1 [17], що становить 89%, 10% і 1% відповідно. Кількість

транзисторів у гнізді накопичувача ОЗП, ПЗП, НПЗП, РПЗП наведена в таблиці 1. Користуючись даними цієї таблиці, процентними співвідношеннями елементів, що входять у різні області ОЗП, а також припускаючи, що кількість елементів у дешифраторі й блоці місцевого керування для того самого обсягу накопичувача різних типів ЗП залишається приблизно постійним, можна оцінити співвідношення транзисторів, що входять у накопичувач, дешифратор і блок місцевого керування різних типів ЗП. У таблиці 2.4.3 наведені результати такої оцінки.

Таблиця 2.4.3

Кількісне співвідношення транзисторів у різних функціональних областях ЗП

Тип ЗП	Кількісне співвідношення транзисторів функціональних областей ЗП (%)		
	Накопичувач	Дешифратор	Блок місцевого управління
ОЗП	89	10	1
ПЗП, НПЗП	60,7	35,7	3,6
РПЗП	75	22,7	2,3

Таким чином, знаючи обсяг накопичувача й ІВ кристала ЗП, можна знайти ІВ накопичувача, адресної частини, числової частини, блоку місцевого керування, а також ІВ комірки пам'яті й транзисторів, що входять до складу схем об'єкта.

2.4.8. Розрахунки інтенсивності відмов функціональних вузлів мікропроцесорів і мікроконтролерів

У розділі наведений алгоритм розрахунків ІВ функціональних вузлів мікросхем мікропроцесорів і мікроконтролерів. Методика застосовна для мікропроцесорів і мікроконтролерів з розрядністю не більш 32 біт.

2.4.8.1. Вихідні дані для розрахунків інтенсивності відмов

Нижче наведені вихідні дані, необхідні для розрахунків ІВ мікропроцесорів, мікроконтролерів і частин їх електричних схем. Під частиною електричної схеми будемо розуміти як функціонально закінчені вузли мікропроцесора (мікроконтролера), а саме, різні види пам'ятей (**ОЗП, ПЗП, НПЗП, РПЗП, АЦП, ЦАП** тощо), так і окремі вентиля або навіть транзистори.

Вихідні дані

- розрядність мікропроцесора або мікроконтролера;
- технологія виготовлення мікросхеми;
- вид і організація усередині кристальних ЗП;
- інформаційна ємність ЗП;
- споживана потужність;

- тепловий опір кристал – корпус або кристал – навколишнє середовище;
- тип корпусу мікросхеми;
- кількість виводів корпусу;
- група експлуатації апаратури;
- підвищена робоча температура навколишнього середовища.
- рівень якості виготовлення.

2.4.8.2. Алгоритм розрахунків інтенсивності відмов мікропроцесора (мікроконтролера) і функціональних вузлів мікропроцесора (мікроконтролера)

1. Визначити експлуатаційну ІВ мікропроцесора або мікроконтролера (λ_E мп), використовуючи вихідні дані за допомогою однієї із програм автоматизованого розрахунків: “АСРН”, “Асоника-К” або за допомогою стандарту “Military Handbook 217F”.

Примітка: далі всі розрахунки й коментарі будуть приводитися з погляду застосування АСРН, тому що методології використання й зміст програм, “Асоника- К” і стандарту “Military Handbook 217F” мають багато загального.

2. Визначити значення ІВ ЗП, що входять до складу мікропроцесора (λ_E озп, λ_E пзп, ппзп, λ_E рпзп), припускаючи, що кожне ЗП являє собою окрему мікросхему у своєму корпусі.

$$\lambda_E \text{ озп} = \lambda_{\text{озп}} + \lambda_{\text{корп}},$$

$$\lambda_E \text{ пзп, ппзп} = \lambda_{\text{пзп, ппзп}} + \lambda_{\text{корп}},$$

$$\lambda_E \text{ рпзп} = \lambda_{\text{рпзп}} + \lambda_{\text{корп}},$$

де λ_E – експлуатаційні значення ІВ різних типів ЗП, $\lambda_{\text{корп}}$ – ІВ корпусів для кожного типу ЗП: $\lambda_{\text{озп}}$, $\lambda_{\text{пзп, ппзп}}$, $\lambda_{\text{рпзп}}$ – ІВ ОЗП, ПЗП, НПЗП, РПЗП без обліку корпусу, відповідно.

Пошук вихідних даних для розрахунків експлуатаційних значень ІВ різних типів ЗП проводиться за технічною інформацією (Data Sheet) і каталогам інтегральних схем. У зазначеній літературі необхідно знайти ЗП, тип яких (ОЗП, ПЗП, НПЗП, РПЗП), обсяг накопичувача, організація й технологія виготовлення збігаються або близькі до ЗП входних до складу мікропроцесора (мікроконтролера). Знайдені технічні характеристики мікросхем пам'яті використовуються в АСРН для розрахунків експлуатаційної ІВ мікросхем ЗП. Потужність, споживана ЗП, вибирається виходячи з електричного режиму роботи мікропроцесора (мікроконтролера).

3. Визначити значення ІВ усередині кристальних областей мікропроцесора (мікроконтролера), ЗП й АЛП без обліку корпусу: $\lambda_{\text{жр мп}}$, $\lambda_{\text{озп}}$, $\lambda_{\text{пзп, ппзп}}$, $\lambda_{\text{рпзп}}$, $\lambda_{\text{алп}}$

ІВ усередині кристалічних областей мікропроцесора, ОЗП, ПЗП, ППЗП, РПЗП визначаються зі співвідношення:

$$\lambda_{кр} = C_1 \pi_t \pi_Q \pi_L.$$

ІВ АЛП й частини кристала без схем пам'яті визначається з виразу:

$$\lambda_{АЛП} = \lambda_{кр\text{ мп}} - \lambda_{ОЗП} - \lambda_{ПЗП,ППЗП} - \lambda_{РПЗП}$$

Значення ІВ інших функціонально закінчених частин мікропроцесора (мікроконтролера) визначають аналогічним образом.

4. Визначити ІВ накопичувачів усередині кристалічних ЗП: $\lambda_{н\text{ озп}}$, $\lambda_{н\text{ пзп,ппзп}}$, $\lambda_{н\text{ рпзп}}$.

На підставі даних таблиці 2.4.3 можна виразити процентне співвідношення кількості транзисторів у різних функціональних областях ЗП, припускаючи, що загальна кількість транзисторів у ЗП рівно 100%. У таблиці 2.4.4 наведене це процентне співвідношення транзисторів, що входять в усередині кристалічні ЗП різних типів.

На підставі процентного співвідношення кількості транзисторів, що входять у різні функціональні області ЗП й знайденого значення ІВ усередині кристалічної частини ЗП, визначаються ІВ функціональних вузлів.

Таблиця 2.4.4.

Процентне співвідношення транзисторів

Тип ЗП	Кількісне співвідношення транзисторів функціональних областей ЗП (%)		
	Накопичувач	Дешифратор	Блок місцевого управління
ОЗП	89	10	1
ПЗП, НПЗП	60,7	35,7	3,6
РПЗП	75	22,7	2,3

Тоді:

$$\lambda_{н\text{ озп}} = 0,89 * \lambda_{\text{озп}} ;$$

$$\lambda_{н\text{ пзп,ппзп}} = 0,607 * \lambda_{\text{пзп,ппзп}} ;$$

$$\lambda_{н\text{ рпзп}} = 0,75 * \lambda_{\text{рпзп}},$$

де: $\lambda_{н\text{ озп}}$, $\lambda_{н\text{ пзп,ппзп}}$, $\lambda_{н\text{ рпзп}}$ – ІВ накопичувачів ОЗП, ПЗП, НПЗП, РПЗП відповідно.

2.4.8.3. Розрахунки інтенсивності відмов функціональних вузлів ЗП: дешифраторів, адресної частини, схем керування.

Використовуючи дані про співвідношення кількості транзисторів у кожній частині ЗП (таблиця 2.4.4), можна знайти інтенсивності

відмов дешифраторів, адресної частини й схем керування ЗП. Знаючи кількість транзисторів у кожній частині ЗП можна знайти інтенсивність відмов групи або окремих транзисторів ЗП.

2.4.9. Розрахунки інтенсивності відмов функціонально закінчених вузлів мікросхем пам'яті

У розділі наведений алгоритм розрахунків ІВ функціонально закінчених вузлів мікросхем запам'ятовувальних пристроїв. Методика застосовна для мікросхем пам'яті наведених в АСРН.

2.4.9.1. Вихідні дані для розрахунків інтенсивності відмов

Нижче наведені вихідні дані, необхідні для розрахунків ІВ функціонально закінчених вузлів мікросхем пам'яті. Під функціонально закінченими вузлами мікросхем пам'яті будемо розуміти накопичувач, адресну частину, схему керування. Методика дозволяє розраховувати також ІВ частин функціональних вузлів, окремих вентилів, транзисторів.

Вихідні дані

- тип пам'яті: ОЗП, ПЗП, НПЗП, РПЗП;
- інформаційна ємність ЗП;
- організація ОЗП;
- технологія виготовлення;
- споживана потужність;
- тип корпусу мікросхеми;
- кількість виводів корпусу;
- тепловий опір кристал – корпус або кристал – навколишнє середовище;
- група експлуатації апаратури;
- підвищена робоча температура навколишнього середовища;
- рівень якості виготовлення.

2.4.9.2. Алгоритм розрахунків інтенсивності відмов схем пам'яті й функціонально закінчених вузлів схем пам'яті

1. Визначити експлуатаційну ІВ мікросхеми пам'яті (λ_E п), використовуючи вихідні дані за допомогою однієї із програм автоматизованого розрахунків: “АСРН”, “Асоника- К” або за допомогою стандарту “Military Handbook 217F”.

2. Визначити значення ІВ кристала ЗП без корпусу $\lambda_{кр}$ ЗП.

$$\lambda_{кр \text{ ЗП}} = C_1 \pi_T \pi_Q \pi_L.$$

3. Розрахунки ІВ накопичувача усередині кристалічних ЗП й ІВ функціональних вузлів проводити відповідно до розділу 2.4.8.2.

2.4.10. Розрахунки інтенсивності відмов функціонально закінчених вузлів програмувальних логічних інтегральних схем і базових матричних кристалів

Кожне сімейство ПЛІС складається з набору типоміналів мікросхем однакової архітектури. Архітектура кристала побудована на основі використання однакових функціональних вузлів декількох типів. Мікросхеми різних типоміналів усередині сімейства відрізняються один від іншого типом корпусу й кількістю функціональних вузлів кожного типу: конфігуруємий логічний блок, блок входу/виходу, пам'ять, JTAG і таке інше.

Слід зазначити, що крім конфігуруємих логічних блоків і блоків входу/виходу кожна ПЛІС містить матрицю ключів, що формують зв'язки між елементами ПЛІС. Враховуючи той факт, що названі області розподілені рівномірно по кристалу, крім блоків вхід/вихід, які розміщені по периферії, можна вважати, що матриця ключів є частиною конфігуруємих логічних блоків і блоків входу/виходу.

Для розрахунків значень інтенсивностей відмов функціональних вузлів необхідно скласти систему лінійних рівнянь. Система рівнянь складається для кожного сімейства ПЛІС.

Кожне з рівнянь системи являє собою рівність, у лівій частині якої записується значення ІВ кристала для конкретного типоміналу мікросхеми з обраного сімейства. Права частина являє собою суму добутків кількості функціональних вузлів n -ої категорії і на ІВ цих вузлів λ_{ni} .

Нижче наведений загальний вигляд такої системи рівнянь.

$$\lambda_{ea} = a_1\lambda_1 + a_2\lambda_2 + \dots + a_n\lambda_n$$

$$\lambda_{eb} = b_1\lambda_1 + b_2\lambda_2 + \dots + b_n\lambda_n$$

.....

$$\lambda_{ek} = k_1\lambda_1 + k_2\lambda_2 + \dots + k_n\lambda_n$$

де

$\lambda_{ea}, \lambda_{eb}, \dots, \lambda_{ek}$ — експлуатаційні ІВ мікросхем сімейства ПЛІС (мікросхем $a, b, \dots, k$, відповідно),

$a_1, a_2, \dots, a_n$ — кількість функціональних вузлів 1, 2, ... n категорії в мікросхемі a , відповідно,

$b_1, b_2, \dots, b_n$ — кількість функціональних вузлів категорії 1, 2, ... n , у мікросхемі b , відповідно,

$k_1, k_2, \dots, k_n$ — кількість функціональних вузлів категорії 1, 2, ... n , у мікросхемі k , відповідно,

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ — ІВ функціональних вузлів категорії 1, 2, ... n , відповідно.

Значення експлуатаційних ІВ мікросхем λ_{ea} , λ_{eb} , ... λ_{ek} розраховуються по АСРН, кількість і тип функціональних вузлів наведені в технічній документації на ПЛІС (Data Sheet або у вітчизняній періодиці).

Значення ІВ функціональних вузлів сімейства ПЛІС λ_1 , λ_2 , ..., λ_n визначають із розв'язку системи рівнянь.

2.4.11. Перевірка результатів розрахунків

Перевірка результатів розрахунків для мікросхеми пам'яті проводиться шляхом розрахунків ІВ кристала іншої мікросхеми пам'яті за допомогою отриманого значення ІВ комірки пам'яті й порівнянням отриманого значення ІВ кристала зі значенням ІВ, розрахованим з використанням стандартних методів (АСРН, Асоника тощо).

Перевірка результатів розрахунків для ПЛІС проводиться розрахунками ІВ кристала ПЛІС іншого типоміналу із цього ж сімейства за допомогою знайдених значень ІВ функціональних вузлів ПЛІС і порівнянням отриманого значення ІВ ПЛІС зі значенням ІВ, розрахованим з використанням стандартних методів (АСРН, Асоника, тощо).

2.4.12. Приклад розрахунків інтенсивностей відмов функціональних вузлів ПЛІС і перевірка результатів розрахунків

2.4.12.1. Розрахунки ІВ функціональних вузлів і виводів корпусів ПЛІС

Розрахунки ІВ проведений на прикладі ПЛІС сімейства Spartan, розробленого фірмою Xilinx [21].

Сімейство **Spartan** складається з 5 типоміналів ПЛІС, до складу яких входять матриця конфігуруємих логічних блоків, блоки входу/виходу, логіка граничного сканування (JTAG).

ПЛІС, що входять у сімейство Spartan, відрізняються кількістю логічних вентилів, кількістю конфігуруємих логічних блоків, кількістю блоків входу/виходу, типами корпусів і кількістю виводів корпусів.

Нижче наведений розрахунки ІВ конфігуруємих логічних блоків, блоків входу/виходу, JTAG для ПЛІС XCS05XL, XCS10XL, XCS20XL.

Для перевірки отриманих результатів розраховується експлуатаційна ІВ ПЛІС XCS30XL. Експлуатаційна ІВ ПЛІС XCS30XL розраховується з використанням значень ІВ функціональних вузлів ПЛІС XCS05XL, XCS10XL, XCS20XL. Отримане значення ІВ ПЛІС XCS30XL порівнюється зі значенням ІВ, розрахованим із застосуванням АСРН. Також для перевірки отриманих результатів порівнюють значення ІВ одного виводу для різних корпусів ПЛІС.

2.4.12.1.1. Розрахунки інтенсивностей відмов функціональних

вузлів ПЛІС XCS05XL, XCS10XL, XCS20XL

Відповідно до вище викладеного алгоритму розрахунків для розрахунків ІВ функціональних вузлів ПЛІС необхідно:

- скласти перелік і значення вихідних даних для ПЛІС XCS05XL, XCS10XL, XCS20XL, XCS30XL;
- розрахувати експлуатаційні ІВ ПЛІС XCS05XL, XCS10XL, XCS20XL, XCS30XL (розрахунки проводяться по [21] з використанням вихідних даних);
- розрахувати ІВ корпусу й кристала для кожної ПЛІС;
- скласти систему лінійних рівнянь для кристалів ПЛІС XCS05XL, XCS10XL, XCS20XL;
- знайти розв'язок системи лінійних рівнянь (невідомими в системі рівнянь є ІВ функціональних вузлів: конфігуруємих логічних блоків, блоків входу виходу, логіки граничного сканування);
- розрахувати ІВ кристала XCS30XL (розрахунки проводяться з використанням значень ІВ функціональних вузлів, отриманих у попередньому пункті);
- зрівняти значення ІВ кристала ПЛІС XCS30XL, отримане в попередньому пункті, зі значенням ІВ кристала, отриманим за допомогою АСРН;
- розрахувати ІВ одного виводу корпусу для різних ПЛІС;
- зрівняти значення ІВ виводу для різних корпусів;
- сформулювати висновок про справедливність проведених розрахунків;
- при одержанні задовільного збігу інтенсивностей відмов (від 10% до 20%) припинити розрахунки;
- при великій розбіжності результатів розрахунків провести корекцію вхідних даних.

Відповідно до [21] вихідними даними для розрахунків експлуатаційної ІВ ПЛІС є: технологія виготовлення, кількість вентилів, споживана потужність, температура перегріву кристала щодо навколишнього середовища, тип корпусу, кількість виводів корпусу, тепловий опір кристал-корпус, рівень якості виготовлення, група експлуатації апаратури, у якій застосовується ПЛІС.

Усі вихідні дані, крім споживаної потужності, температури перегріву кристала й групи експлуатації апаратури, наведені в [21]. Споживана потужність може бути знайдена або в технічній літературі, або розрахунками, або виміром на платі. Температура перегріву кристала щодо навколишнього середовища визначається як добуток споживаної потужності й теплового опору кристал-корпус. Група експлуатації апаратури наведена в технічних умовах на апаратуру .

Вихідні дані для розрахунків експлуатаційної інтенсивності відмов ПЛІС XCS05XL, XCS10XL, XCS20XL, XCS30XL наведено в таблиці 2.4.5.

Таблиця 2.4.5.

Вхідні данні

Вхідні данні	Типономінал ПЛІС			
	XCS05XL	XCS10XL	XCS20XL	XCS30XL
Технологія виготовлення	КМОН			
Максимальна кількість логічних вентилів	5000	10000	20000	30000
Кількість конфігуруємих логіч. блоків, Нклб	100	196	400	576
Кількість використовуємих входів/виходів, Nвх/вих	77	112	160	192
Тип корпусу	VQFP	TQFP	PQFP	PQFP
Кількість виводів корпусу	100	144	208	240
Тепловий опір кристал – корпус, °C/Вт	9	5,3	4,3	2,8
Рівень якості виготовлення	Комерційний			
Група експлуатації апаратури	1.1			

Для визначення температури перегріву кристала щодо температури навколишнього середовища необхідно знайти споживану потужність для кожної мікросхеми.

У більшості КМОН інтегральних схемах майже вся потужність, що розсіюється, є динамічною й визначається зарядом і розрядом внутрішніх і зовнішніх навантажувальних ємностей. Кожний вивід у мікросхемі розсіює потужність відповідно до своєї ємності, яка постійна для кожного типу виводу, а частота, при якій перемикається кожний вивід, може відрізнятися від тактової частоти роботи мікросхеми. Загальна динамічна потужність являє собою суму потужностей, що розсіюються на кожному виводі. У такий спосіб для розрахунків потужності потрібно знати кількість елементів, використовуваних у ПЛІС. В [21] для сімейства Spartan наведені значення струму споживання блоків вхід/вихід (12мА) при навантаженні 50 пФ, напрузі живлення 3,3 і максимальній частоті роботи ПЛІС 80МГц. Припускаючи, що споживана потужність ПЛІС визначається кількістю блоків, що перемикаються, вхід/вихід (як найбільш потужних споживачів енергії), і у зв'язку з відсутністю експериментальних даних по потужності споживання, оцінимо потужність споживану кожною ПЛІС, враховуючи, що одночасно перемикається 50% блоків вхід/вихід при деякій фіксованій частоті (при розрахунках частота була обрана в 5 раз нижче максимальної).

У таблиці 2.4.6 наведені значення потужності, споживаної ПЛІС і температури перегріву кристалів щодо корпусу мікросхеми.

Таблиця 2.4.6.

Потужність, що споживається ПЛІС

	XCS05XL	XCS10XL	XCS20XL	XCS30XL
Споживаєма потужність, Вт	0,5	0,73	1,04	1,25
Температура перегріву кристалу, °С	4,5	3,9	4,5	3,5

Розрахуємо значення коефіцієнтів у рівнянні (1):

$$\lambda_E = (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) \pi_Q \pi_L$$

Коефіцієнти π_T , C_2 , π_E , π_Q , π_L розраховуються по АСРН. Коефіцієнти C_1 знаходимо з використанням апроксимації значень коефіцієнта C_1 , наведених в АСРН для ПЛІС різного ступеня інтеграції.

Значення коефіцієнта C_1 для ПЛІС [15] наведено в таблиці 2.4.7.

Таблиця 2.4.7.

Значення коефіцієнта C_1

Кількість вентилів у ПЛІС	Значення коефіцієнту C_1
До 500	0,00085
Від 501 до 1000	0,0017
Від 2001 до 5000	0,0034
Від 5001 до 20000	0,0068

Тоді для максимальної кількості вентилів ПЛІС XCS05XL, XCS10XL, XCS20XL, XCS30XL одержимо значення коефіцієнта C_1 , **0,0034, 0,0048, 0,0068, 0,0078** відповідно.

Значення коефіцієнтів π_T , C_2 , π_E , π_Q , π_L , значення ІВ кристалів і корпусів, а також експлуатаційні значення ІВ мікросхем XCS05XL, XCS10XL, XCS20XL, XCS30XL наведено в таблиці 2.4.8.

Таблиця 2.4.8.

Експлуатаційні значення ІВ ПЛІС

Позначення та найменування коефіцієнтів	Значення коефіцієнтів			
	XCS05XL	XCS10XL	XCS20XL	XCS30XL
π_T	0,231	0,225	0,231	0,222
C_2	0,04	0,06	0,089	0,104
π_E	0,5			
π_Q	10			
π_L	1,0			
Інтенсивність відмов кристалу, $\lambda_{кр} = C_1 \pi_T \pi_Q \pi_L \cdot 10^6$ 1/год.	0,0007854	0,0011	0,00157	0,0018
Інтенсивність відмов корпусу, $\lambda_{корп} = C_2 \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_L \cdot 10^6$ 1/год.	0,2	0,3	0,445	0,52
Експлуатаційна інтенсивність відмов ПЛІС, $\lambda_E \cdot 10^6$ 1/год.	0,2007854	0,3011	0,44657	0,5218

Знайдемо значення ІВ конфігуруємих логічних блоків $\lambda_{\text{клб}}$, блоків вхід/вихід $\lambda_{\text{вх/вих}}$ і логіки граничного сканування λ_{JTAG} для ПЛІС XCS05XL, XCS10XL, XCS20XL. Для цього складемо систему лінійних рівнянь:

$$\lambda_{\text{крXCS05XL}} = \lambda_{\text{клб}} * N_{\text{клб XCS05XL}} + \lambda_{\text{вх/вих}} * N_{\text{вх/вих XCS05XL}} + \lambda_{\text{JTAG}}$$

$$\lambda_{\text{крXCS10XL}} = \lambda_{\text{клб}} * N_{\text{клб XCS10XL}} + \lambda_{\text{вх/вих}} * N_{\text{вх/вих XCS10XL}} + \lambda_{\text{JTAG}}$$

$$\lambda_{\text{крXCS20XL}} = \lambda_{\text{клб}} * N_{\text{клб XCS20XL}} + \lambda_{\text{вх/вих}} * N_{\text{вх/вих XCS20XL}} + \lambda_{\text{JTAG}},$$

де: $\lambda_{\text{крXCS05XL}}$, $N_{\text{клбXCS05XL}}$, $N_{\text{вх/вихXCS05XL}}$ - ІВ кристала, кількість конфігуруємих логічних блоків, кількість блоків вхід/вихід для ПЛІС XCS05XL, відповідно;

$\lambda_{\text{крXCS10XL}}$, $N_{\text{клбXCS10XL}}$, $N_{\text{вх/вихXCS10XL}}$ - ІВ кристала, кількість конфігуруємих логічних блоків, кількість блоків вхід/вихід для ПЛІС XCS10XL, відповідно;

$\lambda_{\text{крXCS20XL}}$, $N_{\text{клбXCS20XL}}$, $N_{\text{вх/вихXCS20XL}}$ - ІВ кристала, кількість конфігуруємих логічних блоків, кількість блоків вхід/вихід для ПЛІС XCS20XL, відповідно.

Підставивши в систему рівнянь значення ІВ кристалів, кількість конфігуруємих логічних блоків і блоків вхід/вихід, одержимо:

$$0,0007854 \cdot 10^{-6} = 100 \cdot \lambda_{\text{клб}} + 77 \cdot \lambda_{\text{вх/вих}} + \lambda_{\text{JTAG}}$$

$$0,0011 \cdot 10^{-6} = 196 \cdot \lambda_{\text{клб}} + 112 \cdot \lambda_{\text{вх/вих}} + \lambda_{\text{JTAG}}$$

$$0,00157 \cdot 10^{-6} = 400 \cdot \lambda_{\text{клб}} + 160 \cdot \lambda_{\text{вх/вих}} + \lambda_{\text{JTAG}}$$

Система трьох лінійних рівнянь із трьома невідомими має єдиний розв'язок:

$$\lambda_{\text{клб}} = 5,16 \cdot 10^{-13} \text{ 1/Год.}; \quad \lambda_{\text{вх/вих}} = 7,58 \cdot 10^{-12} \text{ 1/Год.};$$

$$\lambda_{\text{JTAG}} = 1,498 \cdot 10^{-10} \text{ 1/Год.}$$

2.4.12.1.2. Перевірка результатів розрахунків

Для перевірки отриманого розв'язку розрахуємо ІВ кристала ПЛІС XCS30XL $\lambda_{\text{кр XCS30XL}}$, використовуючи знайдені значення $\lambda_{\text{клб}}$, $\lambda_{\text{вх/вих}}$, λ_{JTAG} .

За аналогією з рівняннями системи $\lambda_{\text{кр XCS30XL}}$ дорівнює:

$$\lambda_{\text{крXCS30XL}} = \lambda_{\text{клб}} * N_{\text{клбXCS30XL}} + \lambda_{\text{вх/вих}} * N_{\text{вх/вихXCS30XL}} + \lambda_{\text{JTAG}} = 576 \cdot 5,16 \cdot 10^{-13} + 192 \cdot 7,58 \cdot 10^{-12} + 1,498 \cdot 10^{-10} = 0,0019 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Год.}$$

Значення ІВ кристала, отримане з використанням АСРН дорівнює (таблиця 2.4.9): $0,0018 \cdot 10^{-6}$. Процентне співвідношення цих значень становить: $(\lambda_{\text{крXCS30XL}} - \lambda_{\text{крXCS30XL}}) \cdot 100\% / \lambda_{\text{кр XCS30XL}} \approx 5\%$.

ІВ одного виводу, отримані розподілом ІВ на кількість виводів у

корпусах для ПЛІС XCS05XL, XCS10XL, XCS20XL, XCS20XL, дорівнюють $0,002 \cdot 10^{-6}$, $0,00208 \cdot 10^{-6}$, $0,0021 \cdot 10^{-6}$, $0,0021 \cdot 10^{-6}$, відповідно, тобто відрізняються не більше ніж на 5%.

Відмінність у значеннях ІВ складає близько 5% визначається, імовірно, прийнятими при розрахунках приблизними величинами потужностей розсіювання, і, як наслідок, неточними значеннями коефіцієнтів π_t , а також наявністю неврахованих елементів ПЛІС, інформація про яких у документації відсутня.

У додатку наведена блок – схема розрахунків і перевірки інтенсивностей відмов функціональних областей ПЛІС.

2.4.13. Висновки

1. Запропонована методика оцінки ІВ функціональних вузлів інтегральних схем.

2. Вона дозволяє розраховувати:

а) для схем пам'яті - ІВ накопичувачів запам'ятовувальних пристроїв, комірок пам'яті, дешифраторів, схем керування;

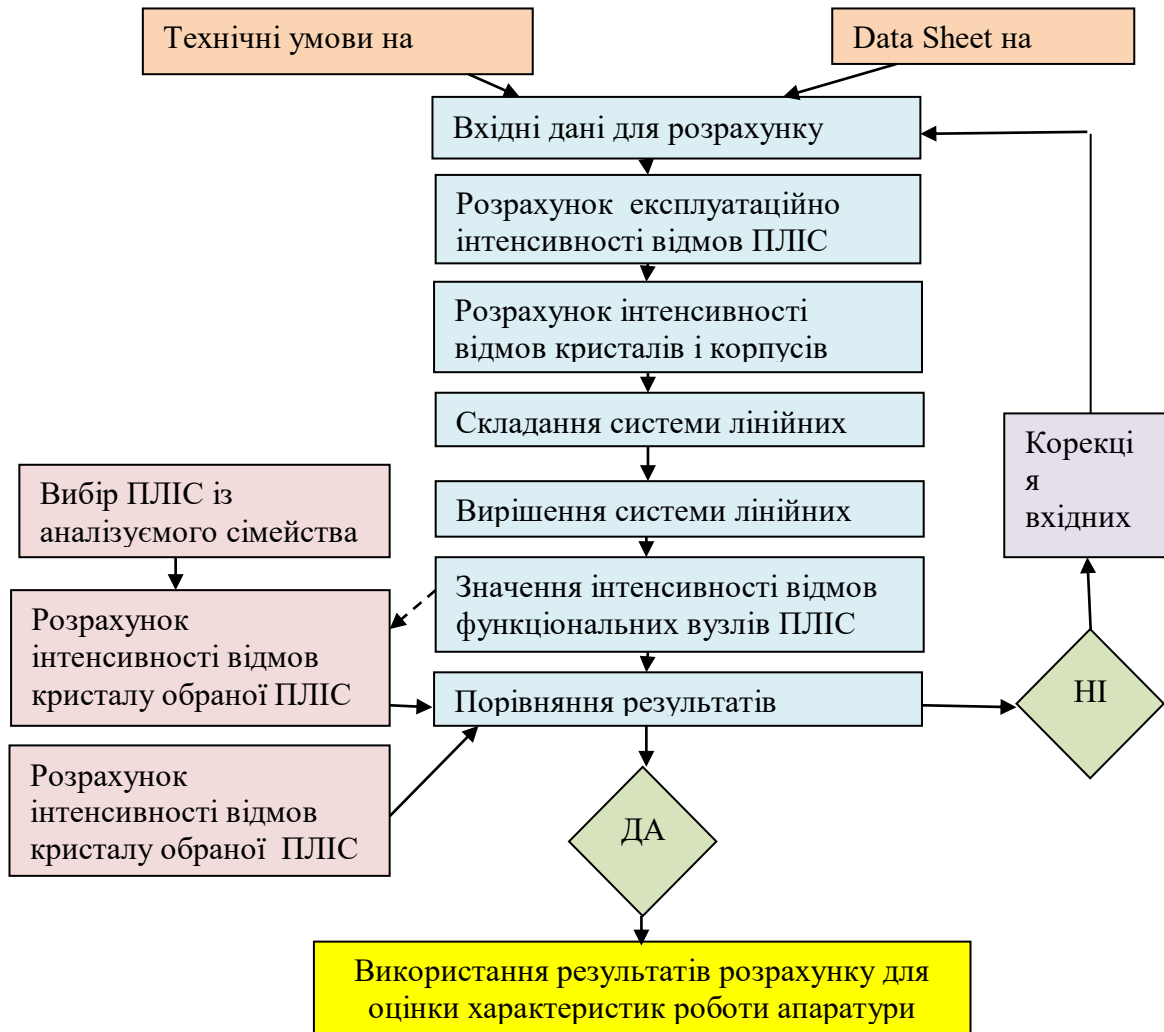
б) для мікропроцесорів і мікроконтролерів – ІВ запам'ятовувальних пристроїв, регістрів, АЦП, ЦАП і побудованих на їхній основі функціональних блоків;

в) для програмувальних логічних інтегральних схем – ІВ блоків, що входять до них, різного функціонального призначення - конфігуруємих логічних блоків, блоків входу/виходу, комірок пам'яті, ЛТАГ і побудованих на їхній основі функціональних блоків.

3. Запропонована методика перевірки розрахованих значень ІВ функціональних вузлів.

4. Застосування методики перевірки, розрахованих значень ІВ функціональних вузлів інтегральних схем, показало адекватність запропонованого підходу для оцінки ІВ.

Додаток
Блок-схема розрахунку інтенсивності відмов функціональних вузлів ПЛІС



Контрольні питання

1. Які принципи моделювання ви знаєте.
2. Що є основною перевагою використання моделювання в порівнянні з натурними експериментами.
3. На які види діляться відмови програмного забезпечення.
4. Які основні показники надійності програмного забезпечення ви знаєте.
5. Які види резервування програмного забезпечення ви знаєте.
6. Які моделі надійності програмного забезпечення ви знаєте.
7. Класифікація і сутність методів моделювання надійності ТЗ.
8. Як визначається надійність функціональних вузлів інтегральних схем
9. Методика оцінки надійності технічних засобів на різних етапах життєвого циклу
10. Які методи визначення вимог до надійності пристроїв ТЗ ви знаєте.
11. Сутність такого методу визначення вимог до надійності пристроїв ТЗ, як метод рівномірного розподілу.
12. Сутність такого методу визначення вимог до надійності пристроїв ТЗ, як метод пропорційного розподілення.
13. Сутність такого методу визначення вимог до надійності пристроїв ТЗ, як метод розподілення вимог до надійності з урахуванням відносної уразливості елементів.
14. Сутність такого методу визначення вимог до надійності пристроїв ТЗ, як метод оптимального розподілу.
15. Порядок попереднього розрахунку надійності.
16. Порядок проведення розрахунків при кінцевому методі розрахунку надійності.

Глава 3

ПРИНЦИПИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЗ. ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЗ

3.1. ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ЗМІСТ ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТЗ

Вступ

Організація процесу експлуатації є основним завданням інженерно-технічного складу, що обслуговує складну ТЗ. Тому об'єктивно необхідним є розгляд цих питань при вивченні курсу теорії надійності ТЗ.

3.1.1. Характеристика головних принципів і етапів експлуатації ТЗ.

Рівень готовності і ефективність використання ТЗ залежать від успішності освоєння цих систем, принципів організації їх експлуатації і якості виконання обслуговування. Перед персоналом, що обслуговує ТЗ, стоїть важлива і важка задача – організувати експлуатацію техніки таким чином, щоб в протязі всього строку служби забезпечити їх збереження та справний стан, постійну готовність до використання за призначенням і високу експлуатаційну надійність. Все це умови досягнення високої ступені готовності технічних засобів. Вказані задачі можуть бути успішно вирішені тільки при суворому науковому підході до проблеми експлуатації, її теоретичному обґрунтуванню.

Сформулюємо визначення поняття експлуатації.

Експлуатація – це сукупність робіт та організаційних заходів, що проводяться обслуговуючим персоналом і направлених на підготовку ТЗ до використання, використання її за призначенням з заданою ефективністю, а також на підтримку ТЗ в постійній технічній справності. Підтримка ТЗ в постійній технічній справності досягається в результаті правильної організації її збереження, своєчасного та якісного технічного обслуговування та ремонту.

Процес експлуатації складається з ряду етапів:

Етап експлуатації – це визначена, закінчена за цільовим призначенням частина процесу експлуатації, що характеризується виконанням встановленої сукупності робіт та заходів, передбачених експлуатаційною документацією. Склад, послідовність та тривалість етапів експлуатації залежать від типу, призначення і характеру ТЗ і для кожної конкретної системи визначаються експлуатаційною документацією.

В загальному випадку усталений *процес експлуатації ТЗ* складається із наступних *основних етапів*:

- підготовка до використання;
- використання за призначенням;
- технічне обслуговування;
- ремонт;
- контроль за технічним станом;
- зберігання;

транспортування;
зберігання в заданій готовності.

Зміст кожного з вказаних етапів розглянемо нижче.

Характеристика головних принципів та етапів експлуатації.

На даному етапі нам необхідно вияснити деякі об'єктивні поняття теорії експлуатації.

Так *система експлуатації* – це комплекс норм та положень, що визначають принципи взаємозв'язку частин, закладів та служб, здійснюючих і забезпечуючих експлуатацію, а також організацію і порядок проведення робіт на різних етапах експлуатації в заданих умовах, з ціллю забезпечення показників якості експлуатації і ЕТХ, передбачених в нормативній документації.

Процес експлуатації проходить в деяких умовах.

Умови експлуатації – це сукупність факторів, діючих на ТЗ при експлуатації. До умов експлуатації відносяться кліматичні умови, механічні та електричні навантаження, електромагнітні випромінення, кваліфікація обслуговуючого персоналу, забезпеченість матеріалами тощо.

Порядок організації експлуатації стаціонарної ТЗ у військах(на великих промислових об'єктах) зводиться до наступного. Після розробки і виготовлення нової ТЗ здійснюється ввід її в експлуатацію, потім на протязі деякого часу вона знаходиться в випробувальній експлуатації. Після закінчення періоду експлуатації починається військова(промислова) експлуатація.

Введення в експлуатацію – сукупність підготовчих робіт контролю і прийняття експлуатуючою організацією виробу, що потрапив після виготовлення або ремонту у відповідності з встановленими вимогами і закріплення цього виробу за підрозділом і посадовою особою.

В процесі введення в експлуатацію стаціонарної ТЗ *вирішуються наступні основні задачі:*

1. Побудова технічних споруд для розміщення радіотехнічної і допоміжної апаратури. Вона здійснюється в залежності з діючими нормами і правилами за типовими чи індивідуальними проектами. Основні роботи в цей період контролюються представниками замовника.

2. Прийом споруд під монтаж і монтаж забезпечуючого обладнання (технічних систем, електрообладнання тощо).

3. Доставка радіотехнічної апаратури на місце монтажу, організація її зберігання протягом деякого часу, підготовка до монтажу і монтаж.

4. Регулювання і налаштування окремих блоків, систем і пристроїв. В результаті проведення цих робіт добиваються повної відповідності її параметрів і характеристик вимогам експлуатаційної документації.

5. Стиковка ТЗ зі суміжними системами (лініями зв'язку і управління, ЕОМ, засобами відображення інформації тощо).

6. Автономні перевірки ТЗ, які здійснюються як правило, з допомогою штатних вбудованих імітаторів і дають можливість перевірити якість

функціонування апаратури і ступінь відповідності її параметрів і характеристик значенням обумовленим її експлуатаційною документацією.

7. Комплексні перевірки ТЗ, в ході яких визначається відповідність виконаних робіт проекту і затвердженим нормам, перевіряється якість виконаних робіт, здійснюються контрольні вимірювання, які дозволяють встановити ступінь відповідності її основних параметрів і технічних характеристик значенням обумовленим її експлуатаційною документацією.

8. Перевірка роботи апаратури при літакових випробуваннях і обслуговування реальних об'єктів, які буде обслуговувати дана ТЗ.

Весь період введення ТЗ в експлуатацію використовується для навчання обслуговуючого персоналу, що буде експлуатувати дану ТЗ, здачі екзамену по знанням посадових обов'язків, правил експлуатації, правил і мір безпеки і отримання допуску до самостійної роботи. Період введення в експлуатацію закінчується вилученням всіх недоліків, виявлених в процесі комплексних перевірок і літакових облетів, і переданням ТЗ в дослідну експлуатацію.

Дослідна експлуатація являється початковим періодом процесу експлуатації, на якому здійснюється комплексна перевірка готовності ТЗ до здачі у військову(промислову) експлуатацію. В цей період наряду з використанням ТЗ за призначенням здійснюються перевірка та уточнення тактико-технічних і експлуатаційних характеристик в реальних умовах експлуатації і доведення числових величин цих характеристик до значень, встановлених технічними умовами або іншими експлуатаційними документами. В процесі експлуатації здійснюється також доопрацювання і уточнення системи експлуатації. Після виконання всіх задач експлуатації, ТЗ подається для здачі у військову (промислову) експлуатацію.

Експлуатація – це основний період експлуатації ТЗ. В цей період єдиною метою експлуатації являється використання ТЗ за її прямим призначенням. Тривалість етапу визначається встановленим строком служби ТЗ, який залежить від якості системи і в першу чергу від її надійності, умов експлуатації, кваліфікації обслуговуючого персоналу, якості робіт і заходів, які проводяться в цей період для надійної підтримки готовності апаратури на заданому рівні, і від інших факторів.

Так як нами було помічено вище, що період експлуатація являється основним, розглянемо зміст цього періоду.

Як зазначалось вище головною метою військової(промислової) експлуатації являється використання ТЗ за її прямим призначенням. Якщо б апаратура володіла абсолютною надійністю, то в період експлуатації необхідно було б проводити тільки підготовку ТЗ до використання її за призначенням. Але в цей період в апаратурі виникають несправності, здійснюється вихід параметрів елементів і пристроїв за межі допуску тощо. Тому для рішення головної задачі військової експлуатації із заданою ефективністю проводиться ряд робіт и заходів, направлених на забезпечення потрібної надійності, готовності і зберігаємості ТЗ. Складові

етапи військової експлуатації, що приведені на рис.3.1.1, розділяються на дві групи робіт і заходів.

В період військової(промислової) експлуатації проводиться також комплекс організаційних заходів з метою забезпечення потрібного рівня надійності і готовності ТЗ, а також з даною ефективністю використання їх за призначенням. Перш ніж приступити безпосередньо до експлуатації ТЗ проводиться її перевірка і підготовка до цього етапу.

Перевірка ТЗ – це сукупність робіт, які проводиться о/п (обслуговуючим персоналом), розрахунків з метою виявлення дійсного технічного стану апаратури. В результаті перевірки встановлюється працездатна апаратури чи ні. Якщо ні, намічаються заходи по відновленню працездатності, які виконуються в процесі підготовки апаратури до використання.

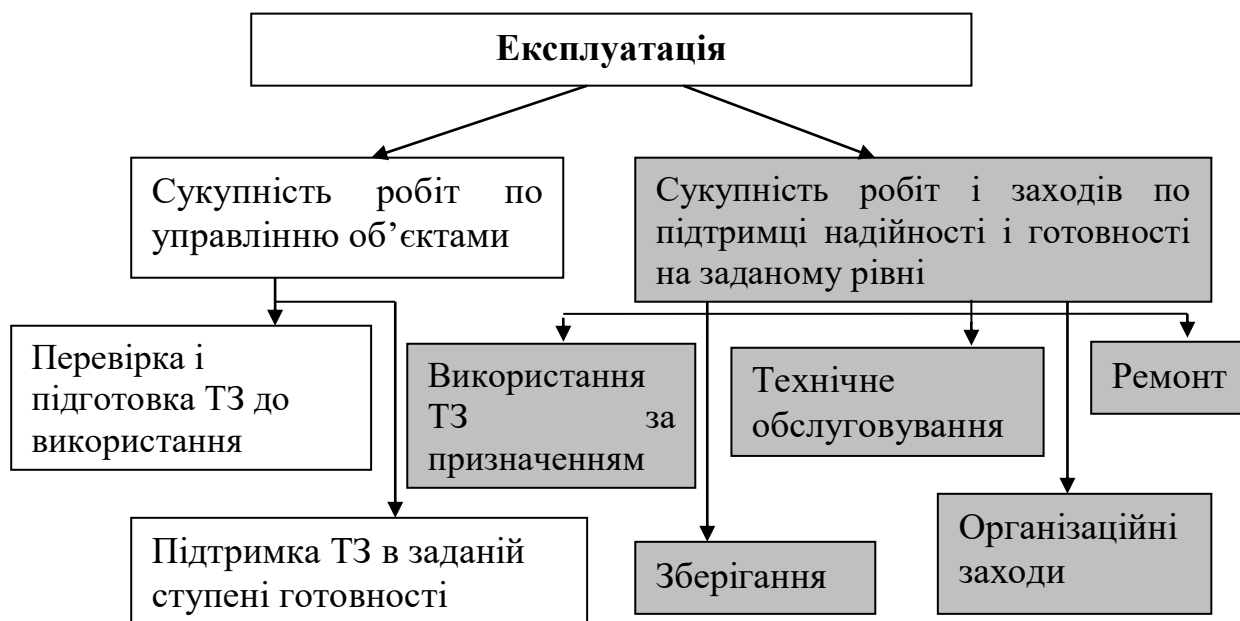


Рис.3.1.1 Зміст експлуатації.

Підготовка ТЗ до використання за призначенням – це сукупність робіт, що проводяться о/п по встановленню і введенню в апаратуру технологічних даних, даних цілевказівки та інших вихідних даних, необхідних для входу до системи зв'язку з об'єктом і виконання плану і програм його обслуговування.

Одним з можливих видів робіт, що проводяться на етапі підготовки ТЗ до використання за призначенням можна зазначити наступне: (див. рис.3.1.2)

Етап підготовки може мати характерні особливості при експлуатації ТЗ, які в період експлуатації знаходяться в режимі чергування, займаючи послідовно ряд ступенів готовності. Кожна ступінь готовності в системі „людина-машина” характеризується визначеним станом техніки і

обслуговуючого персоналу. Ці стани (ступені готовності) визначаються експлуатаційною документацією і є головною складовою частиною військової експлуатації – забезпечення робіт з обслуговування визначених об'єктів.

Після перевірки і підготовки ТЗ починається етап безпосередньо практичного використання ТЗ за призначенням.

Використання ТЗ за призначенням – це сукупність робіт, що виконуються персоналом з обслуговування об'єктів. Об'єм робіт та їх зміст для конкретної ТЗ встановлюється експлуатаційною документацією. До таких робіт відносяться: пошук об'єкту в просторі і вихід з ним на зв'язок, вимірювання параметрів пересування об'єкта (координат, швидкості); прийом з борта об'єкта телеметричної інформації (наукової, службової та ін.); передача на борт об'єкту програм та команд управління і контроль їх проходження і виконання; звірка часу і частоти наземних і бортових еталонів; реєстрація приймаючої інформації, її попередня обробка і передача по лініям зв'язку в центр кінцевої обробки тощо.

Іншої складовою частиною процесу експлуатації є підтримка надійності і готовності ТЗ на заданому рівні, які досягають в результаті якісного і своєчасного технічного обслуговування ТЗ, правильної організації її збереження, а також проведенням ряду організаційних заходів.

Технічне обслуговування (ТО) – це комплекс робіт, які проводяться обслуговуючим персоналом з метою підтримки справності або працездатності системи при підготовці і використанні її за призначенням, а також при збереженні і транспортуванні. Головною метою ТО є підтримка ТЗ в справному стані і готовності її до використання за призначенням з заданою ефективністю.

Ремонт – це комплекс робіт, які проводяться обслуговуючим персоналом або ремонтними органами для підтримки або відновлення працездатності. В залежності від об'єму і змісту виконуваних робіт ремонт може бути поточний (малий), середній і капітальний. Поточний ремонт виконується зразу після виявлення несправності і, як правило, силами штатних розрахунків(чергових змін). В результаті поточного ремонту відновлюється працездатність ТЗ.

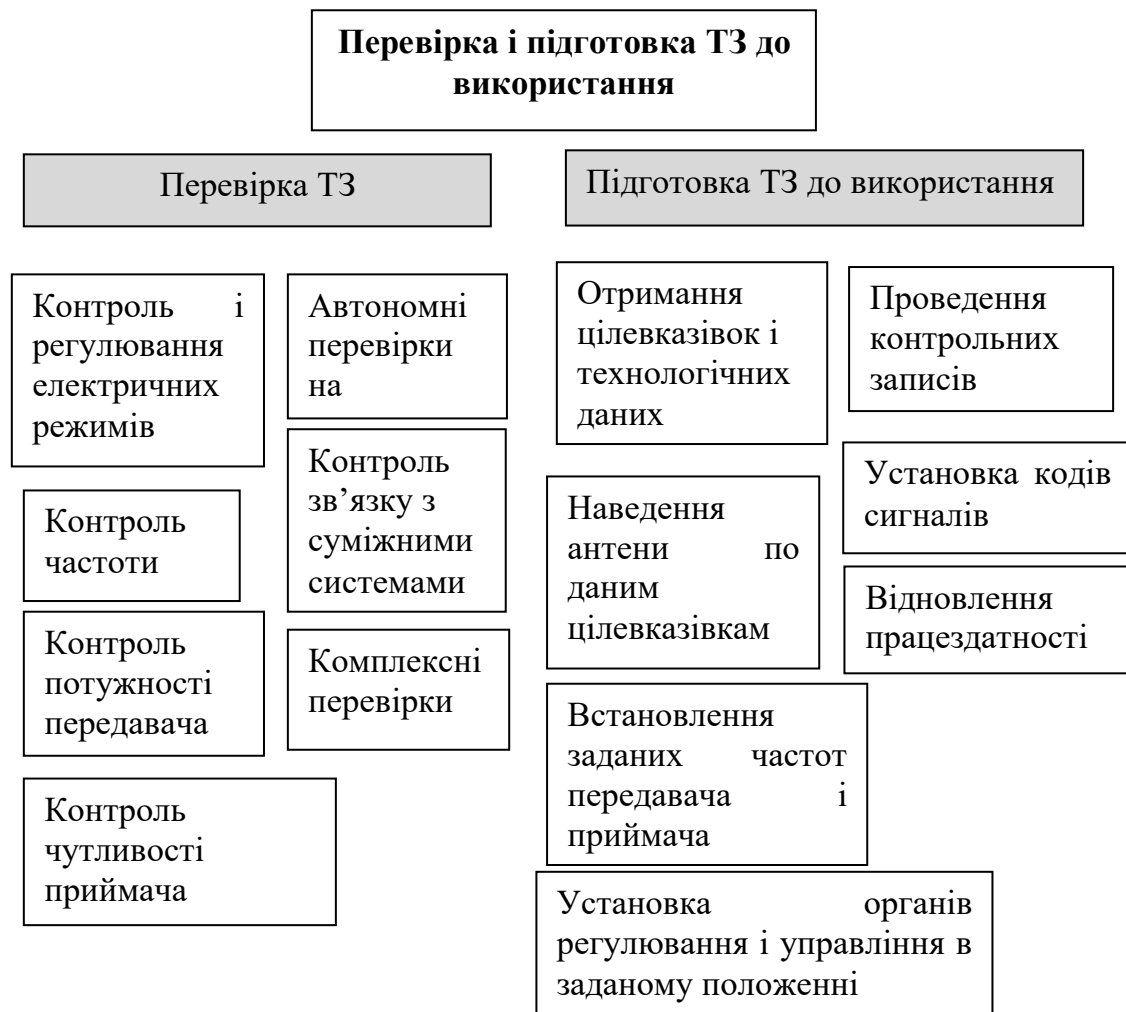


Рис.3.1.2 Зміст робіт з перевірки і підготовки ТЗ до використання.

Середній чи капітальний ремонт характеризується великими працезатратами, тяжкістю робіт і їх тривалістю. Ці види ремонту виконують ремонтні органи або підприємства - виробники апаратури. Після виконання середнього (капітального) ремонту здійснюється подовження технічного ресурсу ТЗ.

Під збереженням ТЗ розуміють утримання її в технічно справному стані на протязі встановленого строку до використання за призначенням або в проміжки часу, не зв'язаного з підготовкою і використанням систем. При зберіганні ТЗ може знаходитись на складах, в робочих приміщеннях технічних об'єктів тощо.

В процесі зберігання повинні бути визначені і створені найбільш сприятливі умови зберігання техніки, при яких забезпечуються збереження її працездатності (надійності), стабільність характеристик і параметрів.

3.1.2. Керівні документи, які визначають порядок зберігання і експлуатації ТЗ.

Підтримка ТЗ в готовності до використання і правильна її експлуатація залежать від чітких знань і безпосереднього виконання вимог експлуатаційної документації обслуговуючим персоналом.

Експлуатаційні документи призначені для використання їх обслуговуючим персоналом при експлуатації з метою вивчення пристрою, його технічних можливостей, принципу дії, правил експлуатації, технічного обслуговування, транспортування і зберігання, а також врахування технічного стану і статистичні дані про відмови апаратури.

Експлуатаційні документи поділяються на дві групи:

- експлуатаційні конструкторські документи;
- експлуатаційні документи експлуатаційних організацій.

Документи першої групи визначають технічні правила експлуатації ТЗ. Вони являють собою частину основного комплексу робочої конструкторської документації, яка зазвичай складається з:

- креслення деталей;
- монтажні креслення;
- відомості посилюючих документів;
- відомості супутніх виробів;
- технічних умов;
- паспорта чи формуляра.

Експлуатаційні конструкторські документи розробляються проектуючими організаціями і їх копії надаються експлуатаційним організаціям разом з апаратурою.

ЕКД оформляють на апаратуру серійного або масового виробництва, а також на апаратуру дослідної серії.

В комплект ЕКД входять:

- технічний опис (ТО);
- інструкція з експлуатації (ІЕ);
- інструкція з технічного обслуговування;
- інструкція з монтажу, пуску, регулювання, і обкатці на місці використання (ІМ);
- формуляр;
- паспорт;
- етикетка;
- відомість ЗІП;
- відомість ЕКД;
- керівництво з експлуатації;
- інші документи.

Інколи декілька документів об'єднуються в один для зручності використання.

До другої групи відносяться документи, які визначають правила використання ТЗ, обумовлені специфікою умов її використання,

організацією експлуатації, а також документи, які враховують напрацювання та несправності.

До них відносяться:

- „Апаратний журнал”;
- Журнал розрахунку роботи ТЗ;
- Журнал ТО і ремонту ТЗ;
- Журнал виявлених технічних несправностей;
- Картка несправностей.

Розглянемо зміст основних ЕКД:

Технічний опис призначено для вивчення пристрою і принципів дії ТЗ і її складових частин.

Інструкція з експлуатації призначена для викладення свідчень необхідних для правильної експлуатації, використання, транспортування, зберігання ТЗ, підтримки її в постійній готовності і дії на весь період експлуатації, починаючи з моменту відправки ТЗ з підприємства.

В „Інструкції з ТО” викладається порядок і правила технічного обслуговування для різних умов експлуатації ТЗ.

Інструкція з монтажу, пуску, регулювання і обкатці ТЗ на місті її використання зберігає відомості необхідні для технічно правильного проведення монтажу, пуску, регулювання і обкатці, а також для монтажу апаратури.

Формуляр – є документом, що підтверджує гарантовані підприємством - виробником основні параметри і характеристики ТЗ, а також відображає її технічний стан на будь якому відрізку часу експлуатації.

Паспорт – документ що доводить гарантовані виготовлювачем основні параметри и характеристику ТЗ.

Етикетка – призначена для викладення в ній основних показників і свідчень про ТЗ або її частинах.

Таким чином, головною метою експлуатаційних і конструкторських документів є організація процесу експлуатації ТЗ.

Розробка та значення рекламаций в процесі експлуатації ТЗ.

На етапі дослідної та військової (промислової) експлуатації обслуговуючим персоналом можуть бути виявлені конструкторські недоробки, які приводять до зниження надійності ТЗ.

В такому випадку експлуатаційною організацією складається документ з повним технічним описом виявленого дефекту чи конструкторської недоробки, яка називається рекламациєю. Надсилається рекламация на адресу виробника і головного замовника. На основі рекламаций на підприємство-виробник накладаються економічні штрафні санкції.

В цілому процес написання рекламаций являється важливим засобом руху технічного процесу, втілення в технологію і конструкторські рішення нових досягнень науки і техніки та підвищення надійності ТЗ.

3.1.3. Види та порядок проведення ремонту ТЗ

У процесі експлуатації та багатократного застосування ТЗ неминуче виникають її випадкові відмови і поступово за мірою використання ресурсу знижується надійність і погіршується якість роботи. Ці обставини викликають необхідність проведення ремонту ТЗ.

У загальному випадку ремонт може бути плановим і неплановим.

Плановий ремонт – це ремонт, що передбачений у нормативній документації і здійснюється у плановому порядку. Основою для планування строків ремонту є ресурс або строк служби до того або іншого виду ремонту і міжремонтні ресурси або міжремонтні строки служби.

Неплановий ремонт – це такий вид ремонту, виконання якого обговорено у нормативній документації, але здійснюється він у неплановому порядку.

В залежності від задач ремонту, обсягу ремонтних робіт і технології їх проведення розрізняють три види ремонту: *поточний, середній та капітальний*.

1. *Поточний ремонт* – це неплановий ремонт, що здійснюється у процесі експлуатації для гарантованого забезпечення працездатності ТЗ і полягає у заміні, відновленні її окремих частин та їх регулюванні. Сутністю поточного ремонту є пошук елементу, вузла або пристрою, що відмовив, його заміна або ремонт з послідуною перевіркою працездатності відремонтованого пристрою і ТЗ в цілому. Заміна елементів, що відмовили, справними здійснюється з комплекту ЗІП. При поточному ремонті використовуються штатні контрольно-вимірювальні прилади і інструменти. Поточний ремонт, як правило здійснюється обслуговуючим персоналом, хоча в окремих випадках можуть залучатись спеціалісти військових (промислових) ремонтних органів. Поточний ремонт, як правило здійснюється на місці експлуатації і тому є військовим (промисловим) ремонтом.

2. *Середній та капітальний ремонти* – планові. Основною їх задачею є усунення всіх несправностей, що накопичились і відновлення ресурсу техніки, яка ремонтується для того, щоб забезпечити потребуємий рівень її надійності і готовності до чергового планового ремонту. Для вирішення цієї задачі при планових ремонтах не тільки усуваються несправності, але і приймаються заходи щодо відвернення потенційно можливих відмов у послідуний міжремонтний період.

З цією метою здійснюється заміна або ремонт у відповідності з розробленою технологією зношених та відпрацювавших строк служби або ресурс елементів, приведення всіх тактико-технічних і експлуатаційно-технічних характеристик та параметрів до вимог, що визначаються експлуатаційною та ремонтною документацією.

Середній ремонт ТЗ полягає у ретельній перевірці технічного стану всіх її складових частин, усуненні технічних несправностей, заміні

зношених і відпрацювавших свій ресурс або строк служби елементів або деталей. Ремонт закінчується комплексною перевіркою ТЗ з приведенням до обговорених у експлуатаційній документації норм всіх тактико-технічних і експлуатаційно-технічних характеристик та параметрів. При середньому ремонті може проводитись капітальний ремонт окремих складових частин системи.

Середній ремонт виконується більшою частиною на місці встановлення апаратури силами і засобами військових (промислових) ремонтних органів. У окремих випадках середній ремонт може виконуватись на спеціалізованих ремонтних підприємствах.

Капітальний ремонт – це ремонт, що здійснюється для відновлення справності і повного (або близького до повного) відновлення ресурсу ТЗ з заміною або відновленням будь яких її частин, включаючи і базові їх регулювання. При капітальному ремонті здійснюється повна розборка апаратури, перевірка та дефектація всіх без виключення елементів, ремонт елементів, деталей та вузлів, заміна елементів, що відпрацювали свій ресурс, збірка, монтаж та налагодження апаратури, її комплексні дослідження за спеціальною програмою. У процесі капітального ремонту всі характеристики апаратури приводять у відповідність до норм та вимог, що встановлені нормативно-технічною документацією. При капітальному ремонті може здійснюватися часткова модернізація апаратури.

Капітальний ремонт виконується в основному на ремонтних підприємствах. В особливих випадках, коли демонтаж апаратури неможливий або недоцільний, ремонт може виконуватись за місцем експлуатації апаратури. В результаті капітального ремонту відновлюються всі показники апаратури, що характерні для серійних зразків основного виробництва. Але необхідно мати на увазі, що капітальний ремонт пов'язаний з великими економічними витратами і тому його проведення доцільне лише тоді, коли вартість ремонту менша вартості виготовлення нового зразку.

Значення системи планових ремонтів полягає в тому, що вона забезпечує високу надійність техніки і плановий початок у вирішенні багаточисельних задач організації ремонту.

3.1.4. Керівні документи з організації і проведення ремонту ТЗ.

Ремонтні документи призначені для використання персоналом ремонтного органу при підготовці ремонтного виробництва, ремонті та контролю ТЗ після ремонту. Вони визначають технічні правила ремонту, а також вимоги, що висувуються до ТЗ після ремонту.

Ремонтні документи є робочими конструкторськими документами і розробляються організаціями розробниками ТЗ у випадках, коли передбачається технічно можливе і економічно доцільне відновлення технічних параметрів і характеристик, що знімаються при експлуатації і тих, що визначають можливість використання ТЗ за прямим призначенням.

Ремонтні документи розробляються, як правило, для систем серійного і масового виробництва на кожен вид ремонту: поточний, середній та капітальний.

В залежності від призначення ремонтні документи поділяються на наступні види:

- керівництва з ремонту;
- технічні умови на ремонт;
- норми витрат запасних частин;
- норми витрат матеріалів;
- відомість ремонтних документів;
- каталоги деталей і збірних одиниць;
- креслення, ремонтні схеми;
- інші документи.

Перші п'ять видів документів є обов'язковими для середнього та капітального ремонтів ТЗ установчої серії і масового виробництва.

Для забезпечення технічно грамотного ремонту у комплект документів для забезпечення ремонту ТЗ крім ремонтних документів входять:

- експлуатаційні конструкторські документи;
- комплект робочої документації для середнього та капітального ремонтів;
- конструкторські документи на нестандартне спеціальне обладнання, спеціальні стенди, припасування та інструмент;
- навчально-технічні плакати.

Розглянемо зміст цих ремонтних документів.

Керівництво з ремонту поділяється на *загальне керівництво з ремонту* і *просто керівництво з ремонту*.

Загальне керівництво з ремонту є ремонтним документом вимоги якого розповсюджуються на всі ТЗ певного класу, підкласу або групи (РЛС, РТЗ тощо). Загальне керівництво складається окремо для середнього та капітального ремонтів у випадках коли загальні вказівки з організації і технології ремонту, а також загальні технічні вимоги щодо ремонту ТЗ даного класу доцільно викласти в окремому документі, виключивши ці відомості із керівництва з ремонту ТЗ конкретного напрямку.

Керівництво з поточного (середнього) ремонту та керівництво з капітального ремонту розробляється для ТЗ конкретного найменування.

Технічні умови (ТУ) на практиці також поділяють на *загальні технічні умови* і *просто технічні умови*.

Загальні технічні умови є загальним ремонтним документом вимоги якого розповсюджуються на всі вироби даного класу.

В загальних ТУ приведені загальні технічні вимоги, показники, норми, яким повинна задовольняти вся відремонтована ТЗ даного класу.

Технічні умови є документом вимоги якого розповсюджуються на всі вироби конкретного найменування.

Ремонтний документ *«Норми витрат запасних частин»* складається у вигляді відомості, що містить норми витрат матеріалів на один ремонт.

Відомість документів для ремонту встановлює комплект конструкторських документів, що необхідні для виконання ремонту ТЗ.

Каталог деталей і збірних одиниць призначений для складання заявок на запасні частини, що необхідні при експлуатації та ремонті ТЗ.

Ремонтні креслення і схеми розробляються тоді, коли ремонт заміною на основі взаємозамінності зношених або несправних складових частин новими справними технічно неможливий або недоцільний.

В залежності від характеру ТЗ і видів її ремонту можуть складатись і інші документи.

В цілому всі ремонтні документи є основою у здійсненні грамотного ремонту ТЗ і підготовки її до застосування за призначенням з заданою надійністю ефективністю.

3.2. СИСТЕМА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТЗ

Вступ

Діагностування відмов є однією із важливіших і найвідповідальніших задач, що вирішуються системою діагностики і контролю. Саме від добре організованої роботи цієї системи залежить швидке відновлення ТЗ і функціонування її з заданою ефективністю.

3.2.1. Місце і значення технічної діагностики у забезпеченні надійності систем.

У випадку відмови об'єкта ТЗ необхідно вжити заходи до відновлення її працездатності, що не можливо без знання причини і місця відмови. Розв'язання задачі пошуку несправностей і встановлення причин їх виникнення здійснює система технічного діагностування або діагностичний контроль. Необхідність у здійсненні діагностичного контролю виникає тоді, коли при контролі працездатності або у процесі застосування ТЗ виникає відмова або виявляється, що система не задовольняє заданим вимогам.

Система технічної діагностики являє собою сукупність технічних засобів діагностування та об'єкта діагностування.

Розрізняють системи тестового діагностування [характерна особливість – можливість подачі на об'єкт діагностування спеціально організованих (тестових) діянь від засобів діагностування] і функціонального діагностування [на об'єкт діагностування поступають тільки робочі діяння].

Під тестом розуміють поєднання певного стимулюючого сигналу, що подається на певні входи апаратури і реакціями, що йому відповідають на визначених виходах

За допомогою систем тестового діагностування вирішують задачі перевірки справності і працездатності об'єкта, а також пошуку несправностей (всіх або тільки тих, що порушують працездатність). Ці системи працюють як правило у тому випадку, коли об'єкт не застосовують за прямим призначенням. Використання систем тестового діагностування при об'єкті, що працює можливо, але при цьому тестові діяння можуть бути тільки такими, які не заважають нормальному функціонуванню об'єкта.

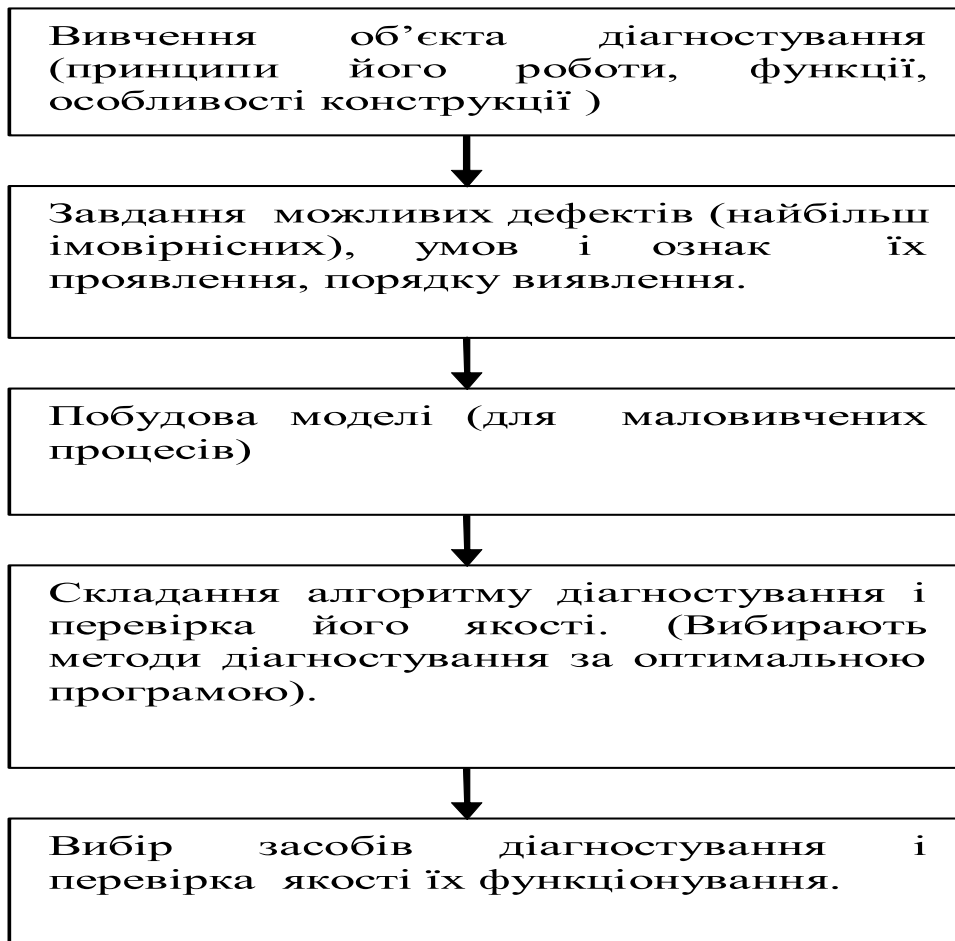
Системи функціонального діагностування використовують для перевірки функціонування об'єкта і пошуку несправностей, що порушують нормальне функціонування. Ці системи працюють при застосуванні об'єкта за призначенням. В протилежному випадку необхідна імітація умов функціонування об'єкта (а саме імітація робочих діянь).

Процес діагностування може складатись із окремих частин, що характеризуються тестовим або робочим діянням, що подається на об'єкт і складом контрольних точок, у яких знімаються відгуки об'єкта на це діяння. Ці частини процесу називають елементарними перевітками об'єкта. У результаті елементарної перевітки отримують значення відгуку об'єкта, тобто сукупність або послідовність діагностичних значень параметрів у контрольних точках. Відповідно формальний опис процесу діагностування, тобто алгоритм технічного діагностування являє собою безумовну або умовну послідовність елементарних перевірок з правилами аналізу їх результатів.

При побудові системи діагностики як правило дотримуються наступного алгоритму:

Розроблюється система технічного діагностування, здійснюється як правило на етапі проектування виробу.

Таким чином, основою системи діагностики є метод діагностування і засоби, що дозволяють реалізувати цей метод.



1. Оптимальні діагностичні програми і методи пошуку відмов.

Як правило відмови у сучасній ТЗ знаходяться з точністю до окремого блока, який замінюється на справний блок, після чого продовжується пошук несправностей у блоці, що відмовив і здійснюється його ремонт.

Така процедура пошуку відмов викликана необхідністю підвищення готовності ТЗ до застосування.

У випадку невисоких вимог до готовності ТЗ пошук несправностей може проводитись з точністю до більш-менших конструктивних елементів плати, окремого елемента.

Нині розроблені і застосовуються ряд методів пошуку відмов і несправностей, які засновані переважно на аналізі фізичних процесів, що протікають в апаратурі (рідше на аналізі статистичних даних про відмови).

Оптимізувати процес діагностування можливо за різними критеріями (тривалості, загальній кількості перевірок, вартості реалізації).

Для більшості складних ТЗ військового призначення першорядне значення має підтримка їх у стані, готовому до негайного застосування за призначенням.

У цьому випадку основним критерієм оптимізації є тривалість діагностичного процесу.

Тому у подальшому будемо розглядати і вважати процес пошуку несправного елемента оптимальним, якщо його тривалість мінімальна.

Зауважимо, що оптимальний діагностичний процес передбачає негайне використання оптимальної інформації. Крім того, у цьому процесі зміст послідуєчого етапу залежить від результатів, отриманих на попередньому етапі пошуку.

Для отримання мінімальної тривалості діагностичного процесу необхідно на першому ж етапі прямувати до збільшення швидкості зменшення невизначеності, що рівносильно швидкості отримання інформації.

Під швидкістю отримання інформації на тому чи іншому етапі випробувань будемо розуміти відношення:

$$W_j = \frac{L_j}{t_j}$$

Де W_j - швидкість отримання інформації на j -му етапі випробувань;

L_j - кількість інформації отриманої на j -му етапі випробувань;

t_j - тривалість j -го етапі випробувань.

Таким чином на першому етапі досліджень добиваються виконання рівності

$$W_{1\max} = \left(\frac{L_1}{t_1} \right) \max$$

Враховуючи результати першого етапу, визначають другий етап пошуку. Із усіх можливих варіантів випробувань(перевірок) при ситуації, що створилась вибирається той, який знову забезпечує максимальне значення швидкості отримання інформації.

$$W_{2\max} = \left(\frac{L_2}{t_2} \right)$$

Далі вибирають третій етап пошуку, четвертий тощо, керуючись одним і тим же принципом, отриманням інформації з максимальною швидкістю на кожному етапі процесу діагностування.

Оптимальний діагностичний процес в такому випадку характеризується рядом

$$W_{1\max}, W_{2\max}, \dots, W_{i\max}, \dots, W_{n\max}$$

Де n- число етапів (випробувань, діагностування) до виявлення елемента, що відмовив.

Цей ряд визначає принцип максимальної швидкості отримання інформації(принцип МШОІ).

Розглянемо деякі випадки використання цього принципу для побудови оптимального діагностичного процесу.

При цьому зауважимо, що в залежності від типу системи(характеру взаємозв'язку між елементами, можливого способу їх перевірки), а також від кваліфікації обслуговуючого персоналу і досвіду експлуатації оптимальна програма пошуку може відбуватись по-різному.

На основі використання принципу МШОІ використовується цілий ряд методів побудови оптимальних програм. Необхідно мати на увазі, що кожний метод дозволяє отримати оптимальну програму пошуку тільки у конкретній ситуації.

Методи пошуку відмов.

Зауважимо, що при поелементних перевірках пошук несправностей ведеться шляхом перевірки елементів системи по одному в певній наперед встановленій послідовності. (Під елементом можна розуміти комірку, блок тощо.).

При виявленні несправного елемента пошук припиняється, здійснюється заміна елементів, а потім комплексна перевірка працездатності всієї системи.

При групових перевірках вся система розбивається на окремі групи елементів – пристрої, блоки, вузли тощо.

Частіше всього таке розбиття обумовлюється самою конструкцією системи. Пошук несправності починається з вимірювання одного або декількох параметрів – так виявляється група елементів, в якій міститься несправність. Далі шляхом послідовного ділення цієї групи на підгрупи область несправної частини звужується до тих пір, поки не буде виявлено несправний елемент.

Основна задача, яка вирішується при розробці програми пошуку відмов, зводиться до визначення з якої контрольної точки необхідно почати перевірку груп і які повинні бути зроблені у послідовному після аналізу результатів контролю, щоб отримати мінімальний час пошуку.

В практиці експлуатації при вирішенні цієї задачі використовується ряд методів, що дозволяють оптимізувати процес пошуку несправностей при поелементних і групових перевірках.

Розглянемо основні з них.

1. Метод невпорядкованого пошуку(метод випадкових проб).

Якщо система, що досліджується являє собою ланцюг N- послідовно з'єднаних елементів і час дослідження кожного елемента однаковий $\tau_{\text{досл}} \approx \tau_{\text{досл}}(\tau_{\text{вих}})$, то максимальна кількість проб, що необхідно здійснити для відшукування відмовившого елемента $M_{\text{max}}=N-1$, а мінімальна кількість проб $M_{\text{min}}=1$.

При цьому (M_{cp}) кількість проб буде дорівнювати:

$$M_{\text{cp}} = \frac{M_{\text{max}} + M_{\text{min}}}{2} = \frac{N - 1 + 1}{2} = \frac{N}{2}$$

Середній час, що затрачається на відшукування несправного елемента дорівнює:

$$\tau_{\text{cp}} = M_{\text{cp}} \cdot \tau_{\text{досл}} = \frac{N \cdot \tau_{\text{досл}}}{2}$$

Так, наприклад, якщо пошук відмовившого елемента здійснюється в межах об'єкта з $N=10 - 12$, то у гіршому випадку доведеться здійснити $M_{\text{max}} = 9-11$ досліджень, а у середньому $M_{\text{cp}} = 5-6$.

Звідси випливає, що немає необхідності займатися оптимізацією процесу пошуку несправності, якщо цей пошук проводиться у рамках об'єкта, що містить невелику кількість елементів.

У тому випадку, коли пошук здійснюється у складній системі ($N=100$ і більше) метод почергових спроб непридатний, так як середній час виявлення несправного елемента різко зростає, пропорційно числу послідовно ввімкнених елементів.

2.Метод послідовних по елементних перевірок.

Метод передбачає, що час перевірки кожного елемента відомий і він є різним, тобто $\tau_{1\text{досл}} \neq \tau_{2\text{досл}} \neq \dots \neq \tau_{n\text{досл}}$, елементи не рівно надійні $F_i \neq F_j$.

Враховується, також, неоднаковий час заміни або ремонту i -того елемента τ_{ip} у випадку його відмови. У цьому випадку оптимальну послідовність пошуку несправного елемента визначають у відповідності з нерівністю:

$$\frac{P_i \cdot \tau_i}{F_i} \leq \frac{P_j \cdot \tau_j}{F_j}, \quad (i, j=1, 2, \dots, N),$$

де $\tau_i = \tau_{\text{досл}i} + \tau_{ip}$ - час перевірки і заміни(ремонту) елемента i , j - го типу;

P_i і F_i – ймовірності безвідмовної роботи і відмови елемента i -го типу за час роботи системи, що пройшов з моменту попередньої відмови.

Фізичний зміст наведеної нерівності заключається у тому, що на початку необхідно перевіряти найменш надійні елементи, що мають мінімальний час перевірки й заміни.

2. Метод середньої точки.

Як і у попередньому випадку припустимо, що система, що досліджується складається із N послідовно з'єднаних, рівнонадійних елементів і час дослідження кожного елементу ($\tau_{\text{досл}}$) однаковий.

$$\tau_{\text{досл}i} = \tau_{\text{досл}j},$$

$$F_i = F_j$$

В цьому випадку метод послідовних наближень може бути оптимізований за мінімумом числа досліджень.

Якщо серед N елементів є у системі один несправний, то для його виявлення всю систему ділять на дві частини, так, що в одній частині міститься m елементів, а у іншій $(N-m)$. Відмовивший елемент з ймовірністю $P_1 = \frac{m}{N}$ може виявитись серед m елементів з ймовірністю

$$P_2 = \frac{N-m}{N} \text{ - серед } (N-m).$$

Середнє число елементів m_{cp} , серед яких може виявитись відмовивший елемент після однієї перевірки, дорівнює:

$$m_{cp} = mp_1 + (N-m)p_2.$$

Перетворюючи останній вираз отримуємо (підставимо значення

$$P_1 = \frac{m}{N} \quad \text{і} \quad P_2 = \frac{N-m}{N}).$$

$$m_{cp} = \frac{m^2 + (N-m)^2}{N}$$

Мінімальна кількість елементів, серед яких може виявитись відмовивший елемент, визначається з рівняння:

$$\frac{dm_{cp}}{dm} = 0; m_{cp} = \frac{m^2 + N^2 - 2m \cdot N + m^2}{N} = \frac{2m^2 - 2m \cdot N + N^2}{N} = \frac{2m^2}{N} - 2m + N;$$

$$\frac{dm_{cp}}{dm} = \frac{4 \cdot m}{N} - 2 = 0 \Rightarrow m_{\min} = \frac{N}{2}$$

Таким чином найбільш оптимальним порядком досліджень системи при сформульованих умовах є послідовне ділення ланцюга елементів системи на дві рівні частини.

Такий двійковий вибір отримав назву *середньої точки*.

Кількість необхідних досліджень(M) за методом середньої точки визначається із співвідношення

$$N = 2^M \Rightarrow M = \frac{\lg N}{\lg 2}$$

4.Метод “половинної” ймовірності.

Метод передбачає, що N послідовно з'єднаних елементів системи мають різну апіорну (додослідну) ймовірність відмови, тобто

$$F_i \neq F_j (i, j = 1, 2, 3, \dots, N)$$

Крім того допускається рівність часу досліджень елементів:

$$\tau_{1\text{досл}} \neq \tau_{2\text{досл}} \neq \dots \neq \tau_{N\text{досл}}$$

У цьому випадку оптимальна програма послідовності пошуку відмовившого елементу може бути визначена наступним чином.

Попередньо необхідно визначити умовну ймовірність того, що відмовив i -й елемент при умові, що у системі відбулася відмова лише одного елемента.

Для цього необхідно розглянути можливі стани системи.

Позначимо: подія A - відмова системи; $H_1, H_2, \dots, H_N$ - гіпотези, що відмовив i -й елемент.

Так, якщо подія A відбувається з однією із несумісних подій $H_1, H_2, \dots, H_N$, які складаються у тому, що відмовив один(i -й) елемент системи, а усі інші справні.

Ймовірність гіпотез визначається за формулою

$$P(H_i) = F_i \prod_{j=1}^N P_j, \quad (3.2.1.)$$

де P_j і F_i - ймовірність безвідмовної роботи j -го і відмова i -го елементів на відрізку часу роботи системи, що пройшов з моменту попередньої відмови.

Враховуючи, що відмова системи відбувається одночасно за однією з гіпотез, на основі теореми повної ймовірності відмови системи.

$$P(A) = \sum_{i=1}^N P(H_i)P(A/H_i)$$

Коли відмова вже відбулася, тобто подія A стала достовірною, з'являється можливість визначити апостеріорну ймовірність - ймовірність того, що відмова відбулася внаслідок здійснення саме H гіпотези, використовуючи формулу Байєса:

$$P(H_i / A) = \frac{P(H_i)P(A/H_i)}{\sum_{i=1}^N P(H_i)P(A/H_i)}$$

Враховуючи, що $\sum_{i=1}^N P(A/H_i) = 1$ і формулу (3.2.1) отримуємо

$$P(H_i / A) = \frac{P(H_i)}{\sum_{i=1}^N P(H_i)} = \frac{F_i \prod_{j=1, i \neq j}^N P_j}{\sum_{i=1}^N F_i \prod_{j=1, i \neq j}^N P_j} \quad (3.2.2)$$

Позначимо умовну ймовірність $P(H_i / A)$ через F_i^* і після нескладних перетворень формула (3.2.2) набуває зручного для розрахунків вигляду:

$$F_i^* = \frac{F_i / p_i}{\sum_{i=1}^N F_i / p_i}$$

Відповідно, визначивши умовну ймовірність відмови i -го елемента, що призводить до відмови системи, оптимальний алгоритм його пошуку виглядає наступним чином:

1. Для всіх елементів системи визначаються значення умовних ймовірностей F_i^* .

2. Перше дослідження проводиться у точці, яка ділить пополам суму умовних ймовірностей (з дискретністю до величини F_i^* одного елемента).

3. Послідуючі досліді здійснювати аналогічно першому, тобто сума умовних ймовірностей елементів, що залишились під підозрою - ділиться.

3.2.2. Апаратні засоби діагностування цифрових і мікропроцесорних пристроїв

Сьогодні важко надати перевагу апаратним або програмним засобам діагностування Ц і МПП. Найкращий результат дає їх комбінація, оскільки програмні засоби діагностування мають відпрацьовуватись за допомогою апаратних засобів.

Класифікація апаратних засобів контролю діагностування

Апаратні засоби діагностування Ц і МПП поділяють на зовнішні і вбудовані. Зовнішні засоби конструктивно від'єднані від ОД, а вбудовані входять до його складу.

До зовнішніх апаратних засобів контролю і діагностики Ц і МПП належать: контрольно-вимірювальні прилади, пульти, стенди; аналізатори і тестери; контрольно-діагностичні комплекси і системи.

Контрольно-вимірювальні прилади, пульти і стенди. Їх використовують для ремонтів, сервісного обслуговування, вхідного і вихідного контролю при ручному способі та слабо вираженій автоматизації цих процесів.

Аналізатори і тестери. Застосовують для параметричного, функційного, тестового або комбінованого контролю і діагностування ІС, у тому числі ВІС і НВІС, а також змонтованих на їх базі вузлів, пристроїв, що розміщують на друкованих платах. За допомогою більшості цих засобів процес контролю автоматизують, а самі вони можуть бути як універсальні, так і спеціалізовані. Керування їхньою роботою здійснює вмонтована в них мікро-ЕОМ.

Контрольно-діагностичні комплекси і системи. Їх використовують для здійснення всіх чи окремих видів контролю і діагностування ІС різного ступеня інтеграції, змонтованих друкованих плат, цифрових пристроїв і систем. Процес контролю і діагностування за допомогою цих засобів частково або повністю автоматизований. У структурі комплексу чи системи є одна або кілька ЕОМ.

Види контролю і діагностування

Критерії класифікації апаратури контролю і діагностування: функційне призначення, види контролю і діагностування, ступінь автоматизації процесу контролю і діагностування, етапи контролю і діагностування, конструктивне виконання засобів контролю і діагностування.

Функційне призначення. Характеризує засоби контролю і діагностування за спеціалізацією. Засоби контролю та діагностування обчислювальних пристроїв і систем за функційним призначенням можна поділити на апаратуру для контролю і діагностування інтегральних схем малого і середнього ступенів інтеграції, друкованих плат та мікропроцесорів, мікропроцесорних пристроїв, комп'ютерних систем.

Види контролю і діагностування. За цим критерієм засоби поділяють на апаратуру параметричного, функційного, тестового контролю і діагностування.

Ступінь автоматизації процесу контролю і діагностування. визначає продуктивність і технічні можливості засобів. Ступінь автоматизації має градацію.

Апаратура з ручним керуванням. Їх використовують як контрольно-вимірювальні прилади та прості стенди на різних етапах життєвого циклу обчислювальних пристроїв. Це зумовлено простотою користування і порівняно низькими вартісними витратами. Але вона мало продуктивна.

Автоматизовані засоби (системи) контролю і діагностування. вони мають значно більшу продуктивність. Використовуючи такі системи вручну, можна проводити контактування ОД із системою, початкове завантаження системи і деякі інші операції. Контроль або діагностування проводять у діалоговому режимі.

Засоби автоматичного контролю і діагностування. Вони найефективніші. Увесь процес контролю чи діагностування проходить автоматично після задання початкових умов.

Етапи контролю і діагностування. тісно пов'язані з етапами життєвого циклу обчислювальних пристроїв і систем, зокрема етапами проектування, виробництва і експлуатації.

Етап проектування. За допомогою лабораторних досліджень перевіряють правильність синтезованих цифрових структур, а також налагодження і коригування технологічного процесу виготовлення пристроїв.

Етап виробництва. Його починають з відбракування непридатних комірок кристала. До складу такої апаратури входить зондова установка для перевірки фрагментів структури кристала. За допомогою апаратури вхідного контролю проводять відбір ІС різних ступенів інтеграції за критеріями надійності, електричної і функційної сталості параметрів.

Етап експлуатації. Під час діагностування, сервісного обслуговування і ремонтів обчислювальних пристроїв і систем за допомогою апаратних засобів проводять контроль ІС, змонтованих друкованих плат і вузлів, а також пристроїв у цілому з метою пошуку дефективних компонентів і заміни їх справними. Також при цьому широко використовують програмні засоби.

Конструктивне використання засобів контролю і діагностування. Залежить воно від експлуатаційного призначення засобів.

Прилади з ручним керуванням. Інколи для пошуку дефектних компонентів обчислювальних пристроїв достатньо простих приладів з

ручним керуванням. Найчастіше під час ручного пошуку несправностей використовують логічний пробник, логічний пульсатор, струмовий зонд.

Логічний пробник. Призначений для реєстрації логічних станів та імпульсів у логічних схемах. Він потребує інтерпретації напруг. При підключенні до схеми світлодіоди цього приладу показують наявність Н-рівня, L-рівня або імпульсів. Деякі логічні пробники можуть працювати як з ТТЛ-, так і з МОН-схемами і виявляти імпульси різних типів. Щоб почати роботу з приладом, його підключають до відповідного джерела живлення. У процесі реєстрації логічних рівнів чи імпульсів видаються відповідні звукові сигнали.

Логічний пульсатор. Генерує прямокутні сигнали. Натиском кнопки на корпусі приладу в контрольну точку схеми подають один цикл прямокутного сигналу(Н- чи L-рівень). Він може змінити один рівень контрольної точки на інший. Головна складність цього способу в тому, що треба досконально знати схему, яку діагностують.

Струмовий зонд. Прилад належить до безконтактних методів вимірювання імпульсних струмів. Чутливий елемент зонда – трансформаторний перетворювач. Прилад дає змогу простежити шлях струму від генератора імпульсів до дефектного елемента. Сприймаюча катушка струмового зонду завдяки електромагнітній індукції виявляє змінний струм імпульсного сигналу, коли він переключається з одного рівня в інший, однак зовсім не реагує на постійний струм.

Автоматизовані засоби контролю і діагностування. Вони забезпечують якісно новий рівень контролю і діагностування обчислювальних пристроїв. Серед них найчастіше використовують логічний і сигнатурний аналізатори.

Логічний аналізатор. За його допомогою проводять логічний аналіз стану ОД(ОК) у часових проміжках. Він автоматизує етапи реєстрації та відображення інформації про реальні процеси в ОД. Цей прилад скорочує час налагодження МПП у 10-20 разів. Його застосовують на різних етапах життєвого циклу пристроїв, у тому числі на етапах проектування, виробництва і експлуатації. Він може реєструвати послідовності логічних сигналів одночасно і синхронно в багатьох контрольних точках протягом тривалих інтервалів часу в однократному і періодичних режимах. Також реєструє послідовності станів у зв'язку з однократними подіями, стани в контрольних точках в інтервалі часу, що перемежовується з обраним або до, або після обраного, асинхронні події. Крім того, оперативно відображає зареєстровану інформацію в різних режимах і форматах. Режими відображення діагностичної інформації в часі не залежать від режимів реєстрації. Індикація зареєстрованої інформації може тривати як завгодно довго. Робочі операції, що виконує користувач логічного аналізатора під час контролю чи діагностування, переважно

автоматизовані. Суть операцій в тому, щоб відображати відповідні реакції, перетворювати, вимірювати, порівнювати, шукати і приймати рішення.

Під час діагностування МПП прилади підключають насамперед до шин адреси, даних, керування. Для виявлення місця прояву несправності підбирають контрольні точки синхронізації та запуску. Логічний аналізатор складається з декількох елементів.

Запам'ятовуючий пристрій (ЗП). Призначений для приймання і зберігання діагностичної інформації з ОД. Його ємність залежить від кількості вхідних каналів аналізатора.

Пристрій перетворення діагностичної інформації (ППІ). Побудований на базі мікропроцесорного контролера (мікроЕОМ) або в більш ранніх розробках у вигляді автомата з жорсткою логікою.

Пристрій виведення (ПВив). Це — дисплей для відображення діагностичної інформації після її обробки пристроєм керування.

Пульт керування (ПК). Призначений для задання оператори режимів роботи аналізатора.

Пристрій аналізатора інформації (ПАІ). Генерує сигнали керування логічного аналізатора при збіганні кодів на виході пристрою введення з кодами, що встановлює оператор.

Основними характеристиками логічних аналізаторів є кількість вхідних каналів, глибина ЗП (біт/канал) та максимальна частота реєстрації сигналів діагностичної інформації.

За функційним призначенням логічні аналізатори поділяють на: 1) аналізатори логічних часових послідовностей (АЛЧП), що використовують синхронну реєстрацію сигналів; 2) аналізатори логічних станів (АЛС) із синхронною реєстрацією.

Сигнатурний аналізатор. Принцип його роботи багато в чому збігається з методами контролю за допомогою логічного аналізатора. Це, зокрема, вибір контрольних точок ОД, складання тестових впливів, аналіз відповідних реакцій та ін. Проте він має і певні відмінності. Сигнатурний аналізатор використовують тоді, коли істотно зростає довжина тестових послідовностей, особливо для пристроїв з компонентами підвищеного ступеня інтеграції. Це вимагає враховувати надійність обладнання для генерації тестів. Тому щоб знизити надлишковість цієї апаратури, використовують компактну форму представлення послідовностей для її аналізу після проходження через пристрій, що контролюють чи діагностують.

Стискання відповідних реакцій реалізують на регістрах зсуву зі зворотними зв'язками. Принцип роботи сигнатурного аналізатора полягає в тому, що відповідні реакції з ОД перекодовуються в ньому на короткі коди (сигнатури). Їх порівнюють з еталонами, які отримують або шляхом розрахунків, або з тими, що знімають із заздалегідь справного ОД. Подачу тестів здійснюють зі спеціального генератора

або програмними методами. Необхідно дотримуватись, щоб інтервал часу подачі на ОД сигналів тестових впливів дорівнював часу аналізу.

3.2.3. Програмні засоби діагностування ПК

1. Класифікація діагностичних програм:

1) POST (Power-On Self Test – само тестування комп'ютера при вмиканні живлення). Програма виконується під час кожного вмикання комп'ютера.

2) Діагностичні програми фірм-виробників. „IBM”, „ Compaq”, „ Hewlett-Packard”, „Dell”, „Genrad” та інші випускають для своїх систем спеціалізоване діагностичне програмне забезпечення, яке складається з наборів тестів для контролю працездатності компонентів комп'ютера.

3) Діагностичні програми обладнання комп'ютерів і комп'ютерних систем фірм-виробників. Такі фірми розробляють діагностичні програми для контролю і діагностування певного пристрою.

4) Діагностичні програми операційних систем (ОС). Операційні системи Windows 9x і Windows NT розробляють з кількома діагностичними програмами для перевірки різних компонентів комп'ютера.

5) Діагностичні програми загального призначення. Забезпечують належне тестування будь-яких IBM- сумісних комп'ютерів.

А). Сутність і особливості діагностичних програм

Самоперевірка при вмиканні комп'ютера (**POST**). Ця процедура є послідовністю підпрограм, яка зберігається на материнській платі в ROM BIOS. Вони призначені для діагностування основних компонентів системи відразу після її включення. Під час цієї процедури завантаження операційної системи затримується.

При включенні комп'ютера автоматично тестується Центральний процесор, ПЗП (програмований запам'ятовуючий пристрій), допоміжні елементи материнської плати, оперативної пам'яті і периферійних пристроїв. Ці тести виконуються дуже швидко і не так високоякісно, як діагностичні програми виробників. Виявивши несправність компонента, видається попередження або повідомлення про помилку чи несправність.

Б). Особливості процедури програми POST

Процедура POST передбачає такі способи ідентифікації несправностей, як звукові сигнали; повідомлення, що виводяться на екран монітора; шістнадцяткові коди помилок, які подаються в порт введення-виведення.

За серйозної несправності завантаження системи зупиняється і з'являється повідомлення про несправність, за яким визначають її причину. Такі несправності називають фатальними помилками.

- Звукові коди помилок, що видає процедура POST.

Якщо процедура POST виявляє несправності, то комп'ютер подає характерні звукові сигнали, за якими визначають несправний пристрій або компонент (під час вмикання справного комп'ютера чути один короткий звуковий сигнал). Видається серія довгих чи коротких звукових сигналів або їх комбінація. Це залежить від фірми-розробника BIOS та її версії. Звукові коди несправностей IBM- сумісних комп'ютерів наведені в таблицях 3.2. 1 – 3.2.4.

Таблиця 3.2.1

IBM POST

№ п/п	Звуковий сигнал	Місце виконання несправності
1	1 короткий	Система справна. Процедура POST завершена
2	2 коротких	Є несправність, код помилки виведений на екран
3	Немає сигналу	Несправний блок живлення або системна плата
4	Неперервний сигнал	
5	Короткі сигнали, що повторюються	
6	1 довгий, 1 короткий	Системна плата
7	1 довгий, 2 коротких	Адаптер дисплея (MDA, CGA)
8	1 довгий, 3 коротких	Плата клавіатури 3270

Таблиця 3.2.2

Звукові сигнали процедури POST AMI BIOS

№ п/п	Звуковий сигнал	Фатальна помилка
1	1 короткий	Помилка регенерації динамічного ОЗП
2	2 коротких	Помилка схеми контролю парності
3	39 коротких	Несправність у перших 64 Кбайт ОЗП
4	4 коротких	Несправність системного таймера
5	5 коротких	Помилка процесора
6	6 коротких	Помилка у схемі керування лінією A20 у контролері клавіатури
7	7 коротких	Помилка переключення у віртуальний режим
8	8 коротких	Помилка зчитування-запису відеопам'яті
9	9 коротких	Помилка контрольної суми ROM BIOS
10	10 коротких	Помилка зчитування-запису CMOS (Complimentary Metal Oxide Semiconductor – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник (КМОП))-пам'яті
11	11 коротких	Помилка кеш-пам'яті
12	Звуковий сигнал	Не фатальна помилка
13	1 довгий, 3 коротких	Помилка в основній або розширеній пам'яті
14	1 довгий, 8 коротких	Не виконується тест на відповідний сигнал дисплея

Таблиця 3.2.3

**Критичні помилки, які визначають під час виконання процедури
POST Phoenix BIOS**

№ п/п	Звуковий код	Код порту 80h	Пояснення
1	Немає	0h	Виконується тестування регістрів CPU (Central Processor Unit – центральний процесор)
2	1-1-3	02h	Помилка зчитування або запису в CMOS-пам'ять
3	1-1-4	03h	Неправильна контрольна сума системної BIOS
4	1-2-1	04h	Несправність програмованого таймера інтервалів

Таблиця 3.2.4

**Некритичні помилки, які визначають під час виконання
процедури POST Phoenix BIOS**

№ п/п	Звуковий код	Код порту 80h	Пояснення
1	4-2-1	34h	Перевіряється переривання синхроімпульсів таймера або виявлена несправність
2	4-2-2	35h	Перевіряється відключення або виявлена несправність
3	4-2-3	36h	Несправність схеми керування лінією A20
4	4-2-4	37h	Непередбачене переривання в захищеному режимі
5	4-3-1	38h	Виконується перевірка ОЗП або виявлена несправність за адресою, що перевищує FFFFh
6	4-3-3	3A	Перевіряється канал 2 таймера або виявлена несправність
7	4-3-4	3Bh	Перевіряються години поточного часу або виявлена несправність
8	4-4-1	3Ch	Перевіряються послідовні порти або виявлена несправність
9	4-4-2	3Dh	Перевіряються паралельні порти або виявлена несправність
10	4-4-3	3Eh	Перевіряється співпроцесор або виявлена несправність
11	Low*1 – 1 – 2	41h	Помилка вибору системної плати
12	Low*1 – 1 – 2	42h	Несправність розширеної CMOS-пам'яті

За появи критичних помилок система зупиняє роботу і подальше виконання операцій стає неможливим. Наслідки некритичних помилок менш серйозні.

- Повідомлення про помилки, що видає на екран процедура POST. Процедура POST у комп'ютерах XT, PS/2 і IBM- сумісних комп'ютерах відображає на екрані хід тестування оперативної пам'яті. Останнє виведене число вказує на кількість пам'яті, що успішно пройшла перевірку. Наприклад, у сучасних комп'ютерах з'являється повідомлення: 32768 KB OK. У справному комп'ютері це число повинно збігатися з кількістю встановленої в ньому пам'яті.

Якщо під час тестування процедура POST виявила несправність, то на екран дисплея виводиться відповідне повідомлення, наприклад 1790-Disk 0 Error. Далі, скориставшись керівництвом з експлуатації, з'ясовують, яка несправність відповідає цьому кодові.

- Коди помилок, що видає процедура POST у порти введення-виведення. На початку виконання кожного тесту за адресою спеціального порту введення-виведення POST видає коди, що прочитуються тільки за допомогою спеціальної плати адаптера, яку встановлюють у роз'єм розширення. Раніше (90-ті роки) такі плати розробляли для тестування материнських плат. Тепер окремі фірми випускають їх для сервісного обслуговування.

Під час виконання процедури POST на вбудованому індикаторі POST-плати, встановленої в роз'єм розширення, швидко змінюються двозначні шістнадцяткові числа. Якщо числа не змінюються, то на індикаторі відображається код тесту, під час якого відбувся збій. Це дещо локалізує місце прояву несправності.

Засоби діагностування інтерфейсів, портів, адаптерів і периферійного обладнання

Загальна характеристика інтерфейсів введення-виведення

У сучасних комп'ютерах як засоби комунікації використовують послідовні і паралельні порти. Це – інтерфейси введення-виведення.

Послідовні порти. До них підключають двонапрямлені пристрої, що передають інформацію в комп'ютер і приймають її з нього. Серед них – модеми, миша, сканери та інше.

Паралельні порти. Їх використовують для підключення принтерів, які працюють в однонапрямленому режимі, мережних адаптерів, дисководів для жорстких та гнучких дисків та CD-ROM.

Послідовні та паралельні порти тестують програмним і апаратно-програмним способом. Програмне тестування проводять за допомогою спеціальних програм, апаратно-програмне – за допомогою роз'ємів-заглушок, що підключають до портів.

Тестування послідовних портів. Цю процедуру здійснюють за допомогою MICROSOFT DIAGNOSTICS (MSD) і тесту із замиканням петлі. Крім того, проконтролювати роботу послідовних портів можна у Windows 95/98.

MICROSOFT DIAGNOSTICS. Ця діагностична програма належить до програмних засобів тестування і входить до складу MS DOS 6.x, Microsoft Windows і Windows 9x. На компакт-диску з Windows 95 вона міститься в каталозі \ other\ msd, а на компакт-диску Windows 98 – у каталозі \ tools\ oldmsdos. При інсталяції операційної системи програма автоматично не встановлюється. Її треба запустити безпосередньо з компакт-диску або скопіювати з нього заздалегідь на жорсткий диск.

Щоб запустити MSD, переходять у каталог (він може вказуватись у змінній PATH), в якому розташований файл MSD.EXE. В командному рядку DOS вводять MSD і натискають ENTER. На екрані з'являється меню. Для послідовних портів обирають опцію COM PORTS. У цьому випадку з'являється інформація про мікросхему UART, що встановлена в послідовному порту комп'ютера, та про доступні порти. Якщо один з портів не реагує на тест, то він не потрапляє у звіт програми. Також MSD видає інформацію щодо портів, які в цей момент використовують. Багато програм типу MSD працюють краще в середовищі DOS, тому їх рекомендують запускати повторно в цьому самому режимі.

Windows 95/98. У цій операційній системі також відображається інформація про те, чи працюють порти. Щоб перевірити і проконтролювати їх роботу, треба клацнути правою кнопкою миші на піктограмі „ Мій комп'ютер ” („My Computer”) і в меню, що з'явилося, обрати пункт „Властивості” („Properties”). Далі у діалоговому вікні обирають вкладку „Пристрої” („Device Manager”). На екрані відобразиться список підключених до комп'ютера пристроїв. Якщо пристрій функціонує неправильно, то поряд з назвою з'явиться знак оклику в жовтому колі. Далі розкривають список портів і двічі клацають на потрібному. Windows 95/98 покаже, чи працює цей порт або назве пристрій, з яким він конфліктує.

Засоби діагностування периферійних пристроїв ПК

Під периферійними пристроями часто розуміють сукупність периферійної апаратури (пристрої введення і виведення інформації – клавіатура, монітор, принтер) та їх блоків керування, оскільки в деяких випадках вони є одним цілим з логічної і конструктивної точки зору. Блок керування периферійним апаратом виконує функцію перетворення інформації і керування конкретними його механізмами. Сукупність уніфікованих технічних і програмних засобів та правил спрягання процесорного блока з периферійною апаратурою називають інтерфейсом введення – виведення.

Заключна частина.

Розглянуті методи пошуку відмов при складанні оптимальних планів пошуку місця відмови дозволяють значно скоротити час визначення несправності ТЗ. Але використання цих методів передбачає також високі знання принципів роботи ТЗ і її особливостей.

3.3. ЗМІСТ І ОРГАНІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТЗ

3.3.1. Зміст, види, принципи організації технічного обслуговування ТЗ.

Організація надійної експлуатації ТЗ не можлива без якісного забезпечення її технічним обслуговуванням. Саме при рішенні задач ТО об'єктивно можливе тривале використання ТЗ за призначенням і забезпечення заданої ефективності застосування.

Технічне обслуговування (ТО)- являє собою комплекс робіт, що спрямовані на підтримку справності або тільки працездатності ТЗ при підготовці і використанні за призначенням, при зберіганні і транспортуванні.

Технічне обслуговування включає в себе:

- комплекс профілактичних робіт, що спрямовані на запобігання відмов (заміну елементів, змащувальні і кріпильні роботи тощо);
- роботи пов'язані з контролем технічного стану, метою яких є перевірка відповідності параметрів, що характеризують працездатний стан ТЗ вимогам нормативно-технічної документації (формуляру, паспорту тощо);
- регулювальні і настроювальні роботи, що призначені для доведення параметрів ТЗ (блоків, вузлів, тощо) до значень встановлених нормативно-технічною документацією;
- поточний ремонт, що спрямований на відновлення працездатності або справності ТЗ шляхом усунення відмов та пошкоджень.

Системою технічного обслуговування (СТО) і ремонту – називається сукупність взаємопов'язаних засобів, документації з технічного обслуговування, ремонту і виконавців, які необхідні для підтримання і відновлення якості виробів, що входять у цю систему.

До ТО висуваються наступні вимоги:

- підтримка готовності апаратури на необхідному рівні;
- простота організації і планування;
- мінімальні часові і економічні витрати.

В залежності від умов експлуатації, конструктивних особливостей апаратури і характеру відмов при організації ТО можуть бути використані

чотири **принципи**: календарний, напрацювання, змішаний (комбінований) і обслуговування за технічним станом.

1. *Календарний принцип* полягає у тому, що ТО призначається і проводиться по закінченню визначеного календарного строку (день, тиждень, місяць, квартал тощо) незалежно від інтенсивності використання ТЗ і її напрацювання. Цей принцип застосовується для техніки, відмови якої визначаються головним чином процесами старіння матеріалів і володіючої наступними характерними станами: тривалий період зберігання, епізодичне використання, коли процес експлуатації складається з циклів, що чергуються при застосуванні за призначенням, зберігання;

При календарному принципі розрізняють щоденні, щотижневі, щомісячні, щоквартальні, піврічні (сезонні) і річні ТО. Об'єм і зміст робіт для кожного виду ТО визначається експлуатаційною документацією (інструкцією з ТО, інструкцією з експлуатації тощо).

Календарний принцип організації ТО знаходить широке застосування. Так як він дозволяє чітко централізовано планувати ТО на тривалий період з урахуванням обставин, що складаються з управління об'єктами.

2. *Принцип напрацювання* передбачає призначення строків проведення ТО при досягненні апаратурою певного напрацювання. При цьому напрацювання може визначатись у годинах роботи, кількостях включень, циклах тощо.

Принцип напрацювання (його інколи називають регламентним) може бути використаним для організації ТО у тих випадках, коли відмови мають зносний характер, апаратура працює в тяжких умовах, що значно відрізняються від нормальних, або тривалий час без перерв (системи неперервного використання). До електромеханічних і механічних пристроїв (електродвигуни, обертові механізми антени тощо) у яких характер зносу явно виражений, то для призначення строків, як правило, застосовується принцип напрацювання.

3. *Змішаний (комбінований) принцип* організації застосовується для техніки, у якої відмови обумовлені як процесами зносу так і процесами старіння.

4. *ТО за технічним станом* проводиться для високонадійних систем і полягає у проведенні робіт з ТО після прийняття рішення про технічний стан ТЗ. Це найбільш перспективний і вигідний принцип організації ТО.

3.3.2. Основні показники ефективності технічного обслуговування ТЗ.

Показники якості ТО – це кількісні характеристики ефективності міроприємств і робіт, що виконуються при проведенні того чи іншого виду ТО. Вони дозволяють оцінювати рівень підготовки і якості організації робіт обслуговуючого персоналу.

Для оцінки якості ТО використовуються ймовірнісні, часові і вартісні показники.

Розглянемо основні з них.

1. Ймовірність виконання ТО у заданий час – це ймовірність того, що дійсна тривалість даного ТО не перевищить задану тривалість ТО. Аналітично це можна подати як функцію розподілення часу ТО:

$$P_{TO}(t) = P\{t_{TO} \leq t\}.$$

Якщо відома щільність розподілу часу ТО $f_{TO}(t)$, то

$$P_{TO}(t) = \int_0^t f_{TO}(\tau) d\tau.$$

При показниковому законі розподілу

$$f_{TO}(t) = \beta e^{-\beta t},$$

де $\beta = 1/T_{TO \text{ сер}}$ ($T_{TO \text{ сер}}$ - середній час виконання даного ТО).
Тоді

$$P_{TO}(t) = 1 - e^{-\beta t}.$$

2. Середній час виконання ТО даного виду:

$$T_{TO \text{ сер}}^{\wedge} = n^{-1} \sum_{i=1}^n t_{TOi},$$

Являє собою відношення сумарного часу тривалості ТО даного виду до кількості ТО,

де t_{TOi} – тривалість даного ТО на i -му РТЗ;
 n – кількість однотипних РТЗ.

3. Середня тривалість ТО

$$T_{1TO} = \sum_{i=1}^{n_{оп}} t_{опi},$$

де $t_{опi}$ – середня тривалість i -ї операції ТО даного виду;

$n_{оп}$ - кількість операцій ТО, проведених за період експлуатації, що розглядається;

$$t_{опi} = \frac{\sum_{j=1}^n t_j}{n}.$$

– тривалість i -ї операції ТО даного виду;

n – кількість ТО даного виду (кількість комплектів, на яких проводилось ТО даного виду).

4. Середня сумарна тривалість ТО

$$T_{TO\Sigma} = N_{TO}(t) \cdot T_{1TO},$$

де $N_{TO}(t) = \frac{t}{T_p}$ – кількість ТО за час t ;

t – поточний час експлуатації;

T_p – період проведення ТО.

Питома сумарна тривалість ТО визначається як відношення середньої сумарної тривалості ТО до напрацювання РТЗ за один і той же період експлуатації:

$$\gamma_{TO} = \frac{T_{TO\Sigma}}{T_H}.$$

5. Періодичність ТО

При експлуатації безперервно працюючої ТЗ розрізняють відмови поступові і раптові. Розглянемо випадок коли поява раптових відмов являє собою найпростіший потік випадкових подій і характеризується постійною інтенсивністю відмов, тобто $\lambda = const$.

Тому раптові відмови прогнозувати і профілакувати не є можливим, їх усувають негайно за мірою виникнення.

Більш благоприємними є поступові відмови. Поступові відмови з'являються в результаті поступової зміни параметрів апаратури і елементів, що дозволяє своєчасно запобігати їх за допомогою профілактичних міроприємств.

Будемо вважати, що отримання інформації про стан параметрів ТЗ (про появу поступових відмов) здійснюється при виконанні ТО, яке проводять періодично.

При цьому виникає задача вибору величини періоду виконання ТО.

При скороченні цього періоду підвищується надійність за рахунок своєчасного проведення контрольно-регулювальних робіт, але при цьому одночасно збільшується тривалість ТО.

Є певне оптимальне значення періоду виконання ТО, при якому забезпечується краще співвідношення між надійністю апаратури і тривалістю ТО.

У якості основного критерія ТО для оцінки експлуатаційних властивостей доцільно прийняти коефіцієнт технічного використання $K_{ТВ}$, або K_{III} – коефіцієнт примусового простою

$$K_{III} = \frac{T_{\Sigma III}}{t}. \quad (3.3.1)$$

Розглянемо методику визначення оптимального періоду проведення ТО ($T_{p \text{ опт}}$), при якому коефіцієнт $K_{ТВ}$ буде найбільшим (K_{III} – найменшим).

Припущення які приймаються для вирішення поставленої задачі:

- а) нехтують відмовами апаратури контролю;
- б) апаратура контролю забезпечує абсолютну достовірність перевірки.

Середній сумарний час примусового простою апаратури безперервної дії за час t визначається як

$$T_{\Sigma \text{ пп.}} = T_{\text{ТО}\Sigma} + T_{\text{в}\Sigma} + T_{\text{оч}\Sigma}, \quad (3.3.2)$$

де $T_{\text{ТО}\Sigma}$ – середня сумарна тривалість ТО на ТЗ за час t ;

$T_{\text{в}\Sigma}$ - середній сумарний час відновлення ТЗ за час t ;

$T_{\text{оч}\Sigma}$ - середній сумарний час знаходження апаратури у несправному стані протягом часу t між ТО;

Виразимо складові виразу (3.3.2):

- 1) Сумарна тривалість ТО за час t визначається виразом

$$T_{\text{ТО}\Sigma} = N_{\text{ТО}}(t)T_{\text{ІТО}} = \frac{t_p}{T_p} \sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} t_{\text{оп}i}, \quad (3.3.3)$$

де $N_{\text{ТО}}(t)$ – кількість ТО за час t , округлене до цілого числа;

$T_{\text{ІТО}}$ - середня тривалість ТО;

$t_{\text{оп}i}$ - середня тривалість i -ї операції ТО даного виду;

T_p - період ТО.

- 2) Сумарний час відновлення апаратури за час t

$$T_{\text{в}\Sigma} = \sum_{i=1}^n t_{\text{в}i} = n T_{\text{в}},$$

де $t_{\text{в}i}$ - середній час усунення i -ї несправності;

n – число несправностей в ТЗ за час t ;

$T_{\text{в}}$ - середній час відновлення апаратури.

Середнє число несправностей в ТЗ за час роботи, що враховується визначимо із виразів

$$T_0 = t/n,$$

звідки

$$n = t/T_0 = \lambda t,$$

де λ - інтенсивність відмов.

Відповідно

$$T_{\text{в}\Sigma} = \lambda t T_{\text{в}}. \quad (3.3.4)$$

- 3) Середній час знаходження ТЗ в несправному стані $T_{\text{оч}}$ протягом між ТО може бути знайдено шляхом інтегрування

$$T_{\text{оч}} = \int_0^t f(\tau)(T_p - \tau) d\tau, \quad (3.3.5)$$

де T_P – періодичність ТО;

$f(\tau)$ – щільність (частота) ймовірності появи поступових відмов апаратури;

τ - момент виникнення несправності у ТЗ, це випадкова величина, що знаходиться в межах $0 \leq \tau \leq T_P$.

Здійснюючи інтегрування і враховуючи, що при періодичному усуванні поступових відмов шляхом регулювання і заміни елементів моменти появи відмов являють собою найпростіший потік випадкових подій, отримаємо

$$T_{оч\Sigma} = T_P - \frac{1}{\lambda_{ПВ}} (1 - e^{-\lambda_{ПВ} T_P}) ,$$

де $\lambda_{ПВ}$ – інтенсивність поступових відмов.

Середній сумарний час знаходження ТЗ у несправному стані протягом часу роботи t визначиться як

$$T_{оч\Sigma} = N_{ТО}(t) T_{оч} , \quad (3.3.6)$$

де $N_{ТО}(t) = t / T_P$ – число ТО за час t .

Використовуючи вираз (3.3.3), (3.3.4), (3.3.6) запишемо коефіцієнт примусового простою:

$$K_{III} = \frac{T_{III\Sigma}}{t} = \frac{T_{ТО\Sigma} + T_{Б\Sigma} + T_{оч\Sigma}}{t} = \frac{N_{ТО}(t) T_{1ТО} + \lambda_{ПВ} T_B t + N_{ТО}(t) (T_P - \frac{1}{\lambda_{ПВ}} (e^{1-\lambda_{ПВ} T_P}))}{t} . \quad (3.3.7)$$

Розділивши чисельник і знаменник (3.3.7) на $N_{ТО}(t) = \frac{t}{T_P}$,

$$K_{nn} = \frac{T_{1ТО} + \lambda_{ПВ} T_B T_P + T_P - \frac{1}{\lambda_{ПВ}} (e^{1-\lambda_{ПВ} T_P})}{T_P} . \quad (3.3.8)$$

Для визначення оптимального періоду $T_{Ропт}$ і здійснимо диференціювання (3.3.7) за періодом T_P і прирівняємо до нуля першу похідну :

$$\frac{dK_{III}}{dT_P} = -\frac{T_{1ТО}}{T_P^2} + \frac{1}{\lambda_{ПВ} \cdot T_P^2} = -\frac{\lambda_{ПВ} \cdot e^{-\lambda_{ПВ} T_P} \cdot T_P + e^{-\lambda_{ПВ} T_P}}{\lambda_{ПВ} \cdot T_P^2} = 0 . \quad (3.3.9)$$

Враховуючи, що величина $\lambda_{пв} T_P \ll 1$, здійснимо розкладання функції $e^{-\lambda_{пв} T_P}$ у ступінний ряд і обмежимося першими трьома членами, тобто:

$$e^{-\lambda_{пв} T_P} = 1 - \lambda_{пв} T_P + \frac{(\lambda_{пв} T_P)^2}{2}.$$

Тоді оптимальний період проведення ТО, при якому забезпечується максимальний коефіцієнт технічного використання (мінімальний коефіцієнт вимушеного простою) системи буде визначатись наступним виразом:

$$T_{P_{opt}} = \sqrt{\frac{2T_{1TO}}{\lambda_{пв}}} = \sqrt{2T_{1TO}T_{пв}}, \quad (3.3.10)$$

де T_{1TO} – тривалість одного ТО;

$\lambda_{пв} = \frac{1}{T_{пв}}$ – інтенсивність поступових відмов ТЗ, що виявляються за

допомогою КВА під час виконання ТО.

Під поступовою відмовою тут розуміють вихід параметра системи (елемента) за межі встановлених допусків, що викликає за собою регульовальні або ремонтні роботи.

Формулу (3.3.10) можна використовувати для визначення оптимальної тривалості різних робіт з ТО на безперервно працюючій апаратурі (регламентних роботах, контролю функціонування тощо).

Так як

$$T_{то\Sigma} = \frac{t}{T_P} T_{1TO},$$

тоді звідси

$$T_{то\Sigma} = \frac{t}{\sqrt{2T_{1TO}T_{пв}}} \sum_{i=1}^{n_{on}} t_{oni} = \frac{t}{\sqrt{2 \sum_{i=1}^{n_{on}} t_{oni} T_{TO}}} \sum_{i=1}^{n_{on}} t_{oni} = t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{on}} t_{oni}}{2T_{пв}}}. \quad (3.3.11)$$

Відповідно

$$T_{то\Sigma_{opt}} = t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{on}} t_{oni}}{2T_{пв}}}. \quad (3.3.12)$$

6. Сумарна трудоємність ТО – це сумарні працезатрати на проведення технічних обслуговувань РТЗ за певний період експлуатації. Трудоємність вимірюється в людино-годинах

$$\Theta_{mo\Sigma} = \sum_{i=1}^n v_{TOi} ,$$

де v_{TOi} – рацевитрати на проведення i -го ТО;

n – кількість ТО за розглядаємий період експлуатації.

Середня сумарна трудоємність ТО – це математичне очікування сумарних рацевитрат на проведення ТО за певний період експлуатації:

$$\Theta_{мосер.} = M[\Theta_{TO\Sigma}] .$$

Питома сумарна трудоємність ТО

$$\gamma_{\Theta} = \frac{\Theta_{ТОсер.}}{M[T_p]} ,$$

де $M[T_p]$ - математичне очікування сумарного напрацювання за період, що розглядається при експлуатації.

7. Сумарна вартість ТО за певний період експлуатації

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n C_i ,$$

де C_i - вартість проведення i -го ТО;

n – кількість ТО за розглядаємий період експлуатації.

За аналогією з показниками трудоємності ТО вводяться такі показники, як середня сумарна вартість і питома сумарна вартість ТО.

Для оцінки якості ТО поряд з розглянутими показниками використовують також ряд коефіцієнтів:

8. Коефіцієнт ефективності профілактики

$$K_{en} = \frac{n_{\Pi}}{(n_{\Pi} + n_H)} ,$$

де n_{Π} – кількість попереджених відмов під час профілактики (ТО) за певний визначений період експлуатації;

n_H – кількість непереджених відмов за той же період експлуатації.

9. Ефективність ТО

Під ефективністю ТО розуміють відношення напрацювання на відмову апаратури на якій проводиться профілактика $T_{0проф.}$ до напрацювання на відмову апаратури на якій не здійснюється профілактика $T_{0непроф}$ за один і той же період експлуатації

$$W = \frac{T_{0\text{проф}}}{T_{0\text{непроф}}} .$$

Через коефіцієнт профілактики ефективність ТО можна визначити наступним чином.

Якщо рахувати, що потоки відмов як у апаратурі, що профілакується, так і у непрофілакуємій апаратурі найпростіші, то можна записати, що

$$W = \frac{T_{0\text{проф}}}{T_{0\text{непроф}}} = \frac{t \cdot n_{\text{П}}}{t \cdot n_{\text{НП}}} = \frac{n_{\text{П}}}{n_{\text{НП}}} .$$

Інакше

$$W = \frac{n_{\text{Н}} + n_{\text{П}}}{n_{\text{Н}}} = 1 + \frac{n_{\text{П}}}{n_{\text{Н}}} .$$

Звідси

$$W = \frac{1}{1 - K_{\text{ен}}} .$$

Висновок

Розглянуті показники технічного обслуговування дозволяють різнобічно оцінити ефективність ТО, що застосовується з метою підвищення надійності ТЗ при експлуатації.

Технічне обслуговування, як комплекс міроприємств і робіт спрямовано на підвищення надійності і довговічності, подовження ресурсу ТЗ і відповідно економії фінансових витрат на досягнення мети для якої використовується ТЗ.

3.4. КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЗ

Вступ

Для підтримки ТЗ в процесі експлуатації у працездатному стані проводиться комплекс заходів, що називаються технічним обслуговуванням. Ці заходи, як відомо, включають: контроль технічного стану, профілактичне обслуговування, ремонт і зберігання. Для того, щоб розставити акценти значимості і важливості кожного із приведених заходів звернемося до прикладу з області медицини. Кожен, хто хоч раз хворів знає, що успіх лікування в першу чергу залежить від того на скільки правильно буде поставлений діагноз захворювання.

Аналогічно ролі лікаря, діагностика грає одну з основних ролей в системі технічного обслуговування. Саме своєчасне визначення технічного стану об'єкту дозволяє забезпечити виконання всіх робіт спрямованих на забезпечення і підтримання надійності ТЗ в процесі експлуатації.

Отже предметом вивчення є технічний контроль або просто контроль ТЗ.

3.4.1. Задача контролю технічного стану ТЗ .

Сформулюємо визначення контролю і об'єкту контролю(ОК).

Контроль – це перевірка відповідності об'єкта встановленим технічним вимогам.

Об'єкт контролю – це безпосередньо продукція, що підлягає контролю, або процеси її створення, застосування, транспортування, зберігання, технічного обслуговування і ремонту, а також відповідна технічна документація. В даному випадку – це ТЗ.

Виходячи із приведених вище міркувань і визначень впливає, що *задача визначення виду технічного стану ОК і є основною задачею процесу технічного контролю*. Але необхідно відмітити, що крім вказаної основної задачі, *технічний контроль* в залежності від своєї реалізації і призначення *може також розв'язувати* і інші не менш важливі задачі, а саме:

- пошук місця відмови;
- прогнозування відхилень заданих параметрів від їх номінального значення і визначення періодів послідуєчого контролю;

- регулювання заданих параметрів;
- визначення імовірнісних оцінок параметрів, що контролюються.

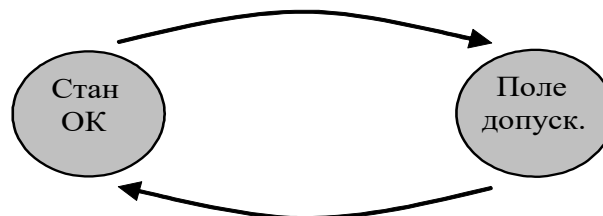
У процесі контролю можуть також розв'язуватись *додаткові задачі*:

- визначення номенклатури запасних елементів, що потребуються;
- проведення тренажу і контролю підготовки особового складу з метою підвищення їх кваліфікації і інші.

Отже – система контролю є інструментом який дозволяє оцінити стан ОК.

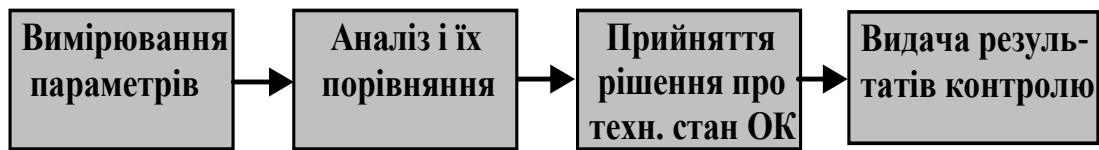
В чому ж полягає процес такої оцінки?

В загальному випадку довільний ОК характеризується сукупністю параметрів, що визначають його технічний стан. Тому процесом контролю називають процес встановлення відповідності між станом об'єкта, що визначається рядом параметрів та заранні заданими допусками на ці параметри.



Розглянемо як досягають встановлення цієї відповідності. Встановлення цієї відповідності досягається шляхом сприйняття сигналів про значення параметрів, що контролюються або вимірюванням

параметрів, їх аналізом, аналізом їх значень і співставлення з допусками на ці параметри, прийняттям рішення за результатами порівняння і видачею міркувань про результати контролю.



Крім цих операцій процес контролю включає також ряд операцій з метою підготовки ТЗ до контролю і виведення її із цього стану.

Виходячи із задач контролю і реалізації процесу контролю, контроль, що реалізований на діючих ТЗ може класифікуватись за різними ознаками.

3.4.2. Види контролю і їх зміст.

У найбільш загальному випадку контроль може бути руйнуючим та не руйнуючим.

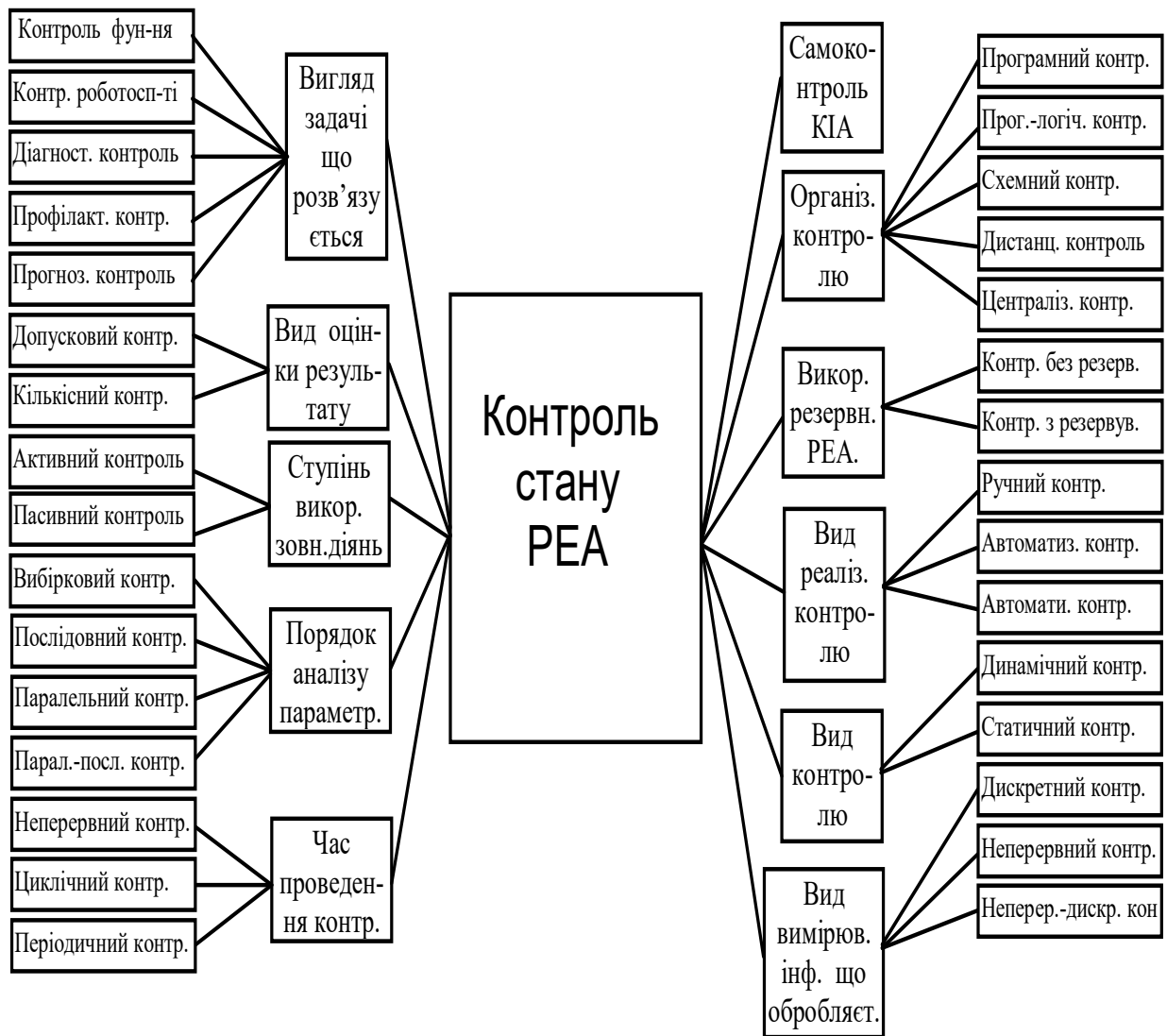
Класифікація видів контролю.

Руйнуючим контролем називається такий контроль, при якому може бути порушена придатність об'єкта до застосування.

Не руйнуючим—називають контроль, при якому не може бути порушена придатність об'єкта до застосування.

За видом задач, що вирішуються:

- *контроль функціонування*— контроль виконання об'єктом частини або всіх властивих йому функцій без їх кількісної оцінки;
- *контроль працездатності*—допусковий або кількісний контроль параметрів, що визначають робочий стан;
- *діагностичний контроль*—контроль, що здійснюється з метою визначення місця відмови ОК;
- *профілактичний контроль* – контроль, що здійснюється з метою виявлення або заміни елементів ОК, параметри яких близькі до гранично допустимих значень;



• *прогнозуючий контроль* – контроль, що здійснюється з метою передбачення технічного стану ОК або його окремих вузлів у майбутньому.

За видом оцінки результату:

• *допусковий контроль* – контроль з оцінкою результату за принципом: „придатний-непридатний” і „менше-норма-більше”;

• *кількісний контроль* – контроль з реєстрацією абсолютних або відносних величин параметрів або їх відхилення від номіналу.

За видом використання зовнішніх діянь:

• *пасивний контроль* – контроль без зовнішньої дії на ОК;

• *активний контроль* – контроль, при якому стан об'єкту виявляють за реакціями на стимули, що вводяться в об'єкт від спеціальних генераторів.

За порядком аналізу параметрів :

- *вибірковий контроль* – контроль окремих пристроїв, вузлів, параметрів за бажанням оператора;

- *послідовний контроль* – контроль, при якому здійснюють почергове приймання вимірювальної інформації по одному каналу від багатьох джерел об'єкту;

- *паралельний контроль* – контроль, при якому здійснюють прийом і обробку вимірювальної інформації за декількома каналами одночасно;

- *паралельно-послідовний контроль*.

За часом проведення:

- *неперервний контроль*, при якому здійснюють вимірювання параметрів об'єкту у процесі його роботи;

- *циклічний*, при якому аналіз кожного параметру об'єкту здійснюють через певний інтервал часу у процесі роботи об'єкту;

- *періодичний* при якому аналіз кожного параметру об'єкту здійснюють через певний інтервал часу протягом заданого строку експлуатації об'єкту.

За видом вимірювальної інформації, що обробляється:

- *дискретний контроль* – контроль параметрів об'єкту з квантуванням за часом і рівнем;

- *неперервний контроль* – контроль неперервного значення параметру;

- *неперервно-дискретний контроль* – контроль з квантуванням за часом.

За видом контролю:

- *динамічний контроль* – контроль стану об'єкта за його перехідними характеристиками у часовій й частотній областях значень характеристик;

- *статичний контроль* – контроль стану об'єкта за значенням окремих параметрів у заданий час роботи об'єкта.

За видом реалізації контролю:

- *ручний*;

- *автоматизований контроль* (з частковою участю людини);

- *автоматичний контроль*.

За організацією контролю:

- *програмний*, оснований на використанні спеціальної програми для рішення контрольних задач, тестів;

- *програмно-логічний контроль*, оснований на використанні надлишкової вимірювальної інформації і проміжних результатів її обробки за спеціальною програмою;

- *схемний контроль*, що здійснюється за допомогою обладнання вбудованого в ОК ;

- *дистанційний контроль*, що здійснюється на відстані;

- *централізований контроль*, що здійснюється за програмою із загального пульта управління деякою сукупністю розосереджених ОК.

Необхідно відмітити, що безпосередньому контролю ОК передують самоконтроль апаратури контролю, в ході якого перевіряється правильність роботи засобів контролю.

Методи контролю в загальному випадку поділяються на прямі і непрямі.

Прямі методи здійснюють досягнення мети контролю безпосередніми вимірюваннями декількох характеристик об'єкта. В основі непрямих методів закладено наперед встановлений зв'язок вимірюваних величин з показниками, що шукають.

Непрямі методи у ряді випадків виявляються єдино можливими. Вони дозволяють здійснити дистанційний контроль. У зв'язку із значним ростом складності об'єктів контролю, кількості функцій, що вони виконують, номенклатури матеріалів, що використовуються непрямі методи, є найбільш перспективними. Але ці методи є ефективними у випадку, якщо вони задовольняють наступним вимогам:

- *не руйнуюча дія операцій контролю*, що забезпечують досягнення мети контролю без розкриття і пошкодження об'єкта, що дозволяють продовжити експлуатацію або дослідження після проведення контролю.

- *достовірність контролю*, що визначається як достатньо мале відхилення вимірювальної величини від її дійсного значення при заданому рівні довірчої ймовірності;

- *економічність контролю*, що визначається необхідними витратами ресурсів;

- *довільний стан об'єкту контролю*;

- *можливість використання для контролю стандартних вимірювальних засобів і систем*;

- *забезпечення метрологічної єдності контрольних операцій і математичного апарату обробки результатів вимірювань на різних етапах виробництва і експлуатації об'єкту*.

У процесі експлуатації існують наступні методи контролю:

- *зовнішній огляд*;

- *перевірка працеспроможності за зовнішніми ознаками*;

- *контроль і дослідження ТЗ за допомогою КВА*.

Зовнішній огляд полягає у всебічній, візуальній перевірці стану ТЗ: на відсутність бруду, пошкодження покриття, справність перемикачів, індикації, кнопок, запобіжників тощо. Він може здійснюватись неозброєним оком або за допомогою оптичних приладів. Не дивлячись на суб'єктивність оцінки і велику трудоемність, цей спосіб поки залишається одним із важливіших способів контролю стану ТЗ.

Перевірку працеспроможності ТЗ за зовнішніми ознаками здійснюють візуально, на слух, шляхом спостережень за показами приладів і т.п. Така перевірка забезпечує отримання інформації про

наявність і відсутність внутрішніх пошкоджень ТЗ і явних ознак її ненормальної роботи.

При третьому методі за допомогою КВА здійснюють контроль, який дозволяє отримати кількісні оцінки параметрів, що контролюються. Він є найбільш ефективним, але разом з тим складним і дорогим.

Приведена нами класифікація видів контролю не дає нам права стверджувати, що реальні системи контролю об'єктів, що існують відносяться тільки до одного з класів.

На практиці система контролю—це складне обладнання, що базується на різних варіантах побудови виходячи із ефективного рішення задач з оцінки технічного стану ТЗ.

Значне ускладнення ТЗ і збільшення обсягу задач контролю обумовило широку розробку і застосування автоматизованих систем контролю з використанням спеціальних обчислювачів або ЕОМ для управління процесом контролю, а також обробки вимірювальної і діагностичної інформації.

3.4.3. Показники ефективності контролю ТЗ.

Основними показниками якості процесу контролю є: час контролю ($T_{\kappa \text{ сер}}$), повнота (глибина) контролю (Π_{κ}), глибина пошуку відмов ($\Gamma_{\text{пв}}$), глибина прогнозування ($\Gamma_{\text{пр}}$), достовірність результатів контролю (D).

- час контролю – це час, що витрачається на контроль заданої сукупності параметрів у реальних умовах експлуатації. Цей час є випадковою величиною, яка характеризується розподіленням часу контролю $f_{\kappa}(t)$. На практиці у якості часового показника, що характеризує процес контролю, використовують математичне очікування або середній час контролю:

$$T_{\kappa \text{ сер}} = \int_0^{\infty} t_{\kappa} f_{\kappa}(t) dt_{\kappa}$$

За статистичними даними, що отримані у процесі експлуатації, середній час контролю може бути визначено із співвідношення:

$$\hat{T}_{\kappa \text{ сер}} = m^{-1} \sum_{i=1}^m T_{ki}$$

де T_{ki} - час, що затрачається на контроль і-тої ТЗ (і-й контроль);

m - кількість однотипних ТЗ (контролів).

- повнота (глибина) контролю – характеризує ступінь охопту апаратури, що перевіряється контролем. Він може бути визначений, як відношення числа параметрів, що контролюються N_k до загального числа параметрів N_0 , що визначають працездатність ТЗ:

$$\Pi_{\kappa} = \frac{N_k}{N_0}$$

- глибина пошуку відмов – характеризується коефіцієнтом глибини пошуку відмов і визначається як відношення числа параметрів, що використовуються для визначення місця відмов до загального числа параметрів.

$$\Gamma_{nv} = \frac{N_{nv}}{N}$$

де N_{nv} - кількість параметрів, що використовуються для визначення місця відмов.

Працездатність ТЗ характеризується декількома параметрами, за допомогою яких можна оцінити можливість виконання заданих функцій системою загалом. В цьому випадку під контролем знаходиться не велика кількість параметрів. При пошуку місця відмови і його причини необхідна детальна інформація про стан окремих елементів і вузлів. У цьому випадку необхідно контролювати велику кількість параметрів, відповідно, коефіцієнт пошуку відмов буде мати величину, більшу ніж коефіцієнт глибини контролю.

- глибина прогнозу – характеризується коефіцієнтом глибини прогнозування відмов

$$\Gamma_{np} = \frac{N_{np}}{N_0}$$

де N_{np} - кількість параметрів, що використовуються для прогнозування стану ТЗ.

- достовірність – характеристика процесу контролю, яка відображає ступінь довіри до рішень про стан ТЗ, що прийняті за результатами контролю. Невизначеність результатів контролю обумовлена похибкою вимірювань. Ці похибки можуть привести до появи помилок двох видів при прийнятті рішень про стан ТЗ за результатами контролю:

- похибка першого виду – дійсно справна ТЗ приймається за несправну(α);

- похибка другого виду – несправна ТЗ приймається за справну(β);

В якості показника достовірності D приймемо відношення імовірності істинного стану ТЗ (P_i) до ймовірності стану, що прийнятий за результатами контролю (P_k) з урахуванням ймовірності появи помилок першого і другого виду:

$$D = \frac{P_i}{P_k}$$

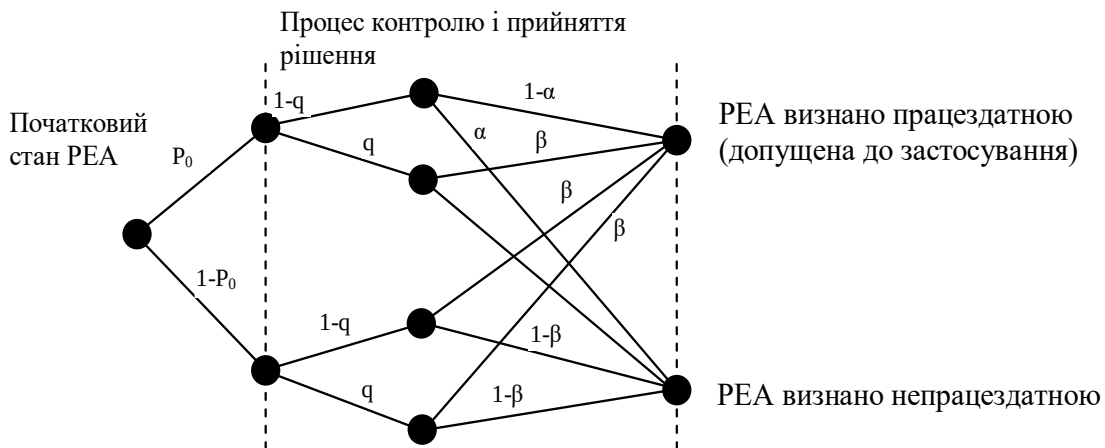
Припустимо, що перед контролем ТЗ здійснюється контроль контрольно-вимірювальної апаратури (КВА) для визначення її справності і придатності до вимірювань. Тоді достовірність результатів контролю буде визначатись надійністю об'єкта контролю ТЗ і похибками КВА.

Для визначення показника достовірності побудуємо граф, що характеризує стан ТЗ і процес прийняття рішення.

Будемо вважати, що всі вказані ймовірності незалежні.

Із логічних міркувань і приведеного графу випливає, що ймовірність того, що ТЗ дійсно є справною і дорівнює

$$P_i = P_0(1-q)(1-\alpha)$$



На графі прийнято наступні позначення:

P_0 – ймовірність справного стану ТЗ перед початком контролю;

q – ймовірність відмови ТЗ в процесі контролю;

α – ймовірність прийняття справної ТЗ за несправну;

β – ймовірність прийняття несправної ТЗ за справну.

Ймовірність того, що ТЗ буде визнано справною за результатами контролю дорівнює сумі ймовірностей позитивних результатів при прийнятті рішення з урахуванням можливих станів ТЗ і помилок першого та другого виду:

$$P_k = P_0[(1-q)(1-\alpha) + q\beta] + (1-P_0)[(1-q)\beta + q\beta]$$

Після перетворення отримаємо

$$P_k = (1-q)[P_0(1-\alpha) + (1-P_0)\beta] + q\beta$$

Тоді згідно з визначенням показник достовірності визначається

$$D = \frac{P_i}{P_k} = \frac{P_0(1-q)(1-\alpha)}{(1-q)[P_0(1-\alpha) + (1-P_0)\beta] + q\beta}$$

У тих випадках, коли час контролю малий і перевірки здійснюються у режимі функціонування ТЗ, ймовірність відмови ТЗ у процесі контролю незначна і практично може бути прийнята рівною нулю ($q=0$). Тоді достовірність контролю буде визначатись наступним співвідношенням:

$$D = \frac{P_0(1-\alpha)}{P_0(1-\alpha) + (1-P_0)\beta}$$

Достовірність результату контролю при інших рівних умовах може бути підвищена за рахунок проведення багатократних перевірок.

Якщо проводиться m циклів контролю при яких у k випадках виносяться міркування про справний стан ТЗ, то при $q=0$ отримаємо

$$D = \frac{P_0 C_m^k (1-\alpha)^k \alpha^{m-k}}{P_0 C_m^k (1-\alpha)^k \alpha^{m-k} + (1-P_0) C_m^k \beta^k (1-\beta)^{m-k}}$$

де

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

Крім вищеперелікованих показників контролю можуть використовуватись і інші. Наприклад, ступінь автоматизації контролю

$$A = \frac{T_k - T_{po}}{T_k},$$

де T_k - середній час контролю; T_{po} - середній час, необхідний для виконання ручних операцій при контролі.

Раціональний вибір значень перерахованих показників дозволяє забезпечити задану ефективність функціонування системи контролю і ТЗ в цілому.

На практиці найбільш часто використовуються наступні автоматичні види контролю:

- контроль функціонування;
- контроль працездатності;
- діагностичний контроль;

- *прогнозуючий контроль*;

При контролі функціонування ТЗ перевіряється стан ТЗ з застосуванням точної контрольно – вимірною апаратури шляхом реалізації на ЕОМ алгоритмів ФК.

Контроль працездатності проводиться при підготовці ТЗ до застосування, при ТО і ремонті, періодично в процесі зберігання і транспортування, а також при проведенні технічних оглядів. Основна задача, що вирішується при контролі працездатності, зводиться до визначення технічної справності ТЗ в цілому і ступені її готовності до застосування.

Діагностичний контроль ТЗ здійснюється для відшукування несправностей і встановлення причини їх виникнення. Необхідність у здійсненні діагностичного контролю виникає тоді, коли при контролі працездатності або в процесі застосування ТЗ виникає відмова або виявляється, що система не задовольняє заданим вимогам.

Однією з важливіших задач, що вирішуються при проведенні діагностичного контролю є вибір стратегії (програми) пошуку несправностей, при якій забезпечується мінімальний час виявлення несправного елементу.

Прогнозуючий контроль застосовується для складних ТЗ, що викликають відповідальні задачі.

Його сутність полягає у тому, що на основі сукупності вимірювань в даний момент часу(або на деякому інтервалі $t+\Delta t$) передбачається стан об'єкта або окремих його вузлів у майбутньому.

Необхідно відмітити, що комплексна побудова і використання автоматизованих систем контролю (АСК) дозволяє значно підвищити ефективність процесу експлуатування ТЗ.

Заклучна частина

Контроль технічного стану ТЗ є основою системи технічного обслуговування виходячи з теоретичних задач, що вирішуються їм і практичних результатів експлуатації.

3.5. ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЗ

3.5.1. Методи прогнозування надійності ТЗ.

Прогнозування відмов, є одним зі способів підвищення надійності ТЗ в процесі її експлуатації. Обумовлено це тим, що для складних РТЗ, що виконують відповідальні задачі велике значення має не тільки знання її поточного стану, але і знання того, як воно буде змінюватись в майбутньому, для того, щоб можливо було завчасно прийняти заходи по запобіганню відмов. Такими заходами можуть бути своєчасне переключення на резерв, своєчасна заміна елементів, перехід на нові режими роботи тощо. Таким чином, вирішується головна задача етапу

експлуатації – забезпечення заданого рівня надійності і готовності РТЗ.

Подібні задачі вирішують за допомогою прогнозуючого контролю, сутність якого полягає в тому, що на підставі сукупності вимірів у даний момент часу (чи на деякому інтервалі $t+T_1$) передвіщається стан об'єкта або окремих його вузлів у майбутньому (на інтервалі T_2 ($T_2 > T_1$)).

Таке прогнозування ґрунтується на використанні визначених взаємозв'язків між вимірюваними параметрами і станом об'єкта.

Прогнозування зв'язане з контролем деякої сукупності прогнозуємих параметрів $1, 2, \dots, k$, які визначають стан РТЗ. Ці параметри можна представити різним чином: їх значеннями в момент часу t , законами розподілу, комплексними показниками тощо.

У залежності від наявної інформації і способу реалізації розрізняють три основних методи прогнозування:

- аналітичний – заснований на використанні детермінованих закономірностей;
- статистичний – заснований на використанні достатньої кількості статистичної інформації;
- апаратний – заснований на використанні безпосередньо самої апаратури і статистики зміни параметрів.

3.5.2. Аналітичні методи прогнозування технічного стану ТЗ.

Зміну стану більшості технічних систем можна розглядати, як процес, що характеризується вимірами деякої множини параметрів. У зв'язку з цим вимір ступеня працездатності доцільно визначати сукупністю такого числа параметрів, контроль яких дозволяє досить повно представити зміну стану системи, що діагностується. Тоді стан зручно характеризувати вектором у двовірному просторі, де координатами простору служать k параметрів системи s , $s=1, 2, 3, \dots, k$.

Положення вектору стану в просторі при цьому буде визначати деякий ступінь працездатності РТЗ. У період експлуатації ступінь працездатності систем змінюється, внаслідок чого кінцева точка (кінець вектору ξ) у просторі станів переміщується, і її місцезнаходження визначається значеннями k -параметрів. При діагностиці і прогнозуванні доцільно виділити області, що відповідають визначеним ступеням працездатності, і визначити межу припустимого рівня працездатності.

Таким чином, виникає задача, що полягає в попередньому періодичному контролі параметрів $\xi_s(t)$, що є функціями часу, визначенні в моменти t_i+T_1 , контролю функції стану $Q[\xi(t)] = Q[\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_k(t)]$ і розрахунку значень функції стану $Q(\xi)$ в області значень часу $T_2 > T_1$. Сама функція стану $Q(\xi)$ може бути як багатомірною, так і одновірною в залежності від того по якій кількості параметрів оцінюється стан РТЗ.

Чим далі буде розташований вектор стану від гіперповерхні припустимих значень ступеня працездатності $Q(\xi)$, тим вище ступінь

працездатності системи що проходить діагностування. І, отже, чим менше різниця $/ \xi - \xi^* /$, тим нижче рівень працездатності.

Використання методів аналітичного прогнозування передбачає у визначеній мірі регулярність виміру компонентів процесу в часі. При цьому під алгоритмом прогнозування регулярних процесів мається на увазі така система обчислювальних операцій, яка суворо визначається ситуацією, що склалася.

Методом, що досить широко використовується для прогнозування регулярних процесів, є градієнтний метод. У цьому випадку екстраполюється функція працездатності $Q[\xi(t)]$ в градієнтному напрямку, тобто в напрямку вектору градієнта функції працездатності. Як відомо, вектор градієнта визначає напрямок найбільшої зміни функції. Тому в даному випадку цей метод є оптимальним у тому сенсі, що він оцінює працездатність системи в напрямку найбільшої зміни функції працездатності, тобто в напрямку більш швидкого досягнення припустимих значень чи у “небезпечному” напрямку.

Градiєнтне прогнозування розділяють на два етапи. На першому етапі визначають стан градієнта, тобто часткові похідні функції працездатності по координатах-параметрах $s(s=1,2,...,k)$. На другому етапі здійснюють прогнозування в градієнтному напрямку, тобто знаходять

$$Q[\xi(t_{n+1})] = Q[\xi(t_n)] + \gamma_{n+1} \nabla Q[\xi(t_n)] \quad (3.5.1)$$

де $Q[\xi(t_n)]$ - функція стану (працездатності) в існуючі моменти часу

$\gamma_{n+1} > 0$ - параметр, що характеризує довжину кроку прогнозування

$\nabla Q[\xi(t_n)]$ - вектор градієнта функції стану, у загальному випадку, який дорівнює

$$\nabla Q(\xi) = \frac{\partial Q(\xi)}{\partial \xi_1}, \frac{\partial Q(\xi)}{\partial \xi_2}, \dots, \frac{\partial Q(\xi)}{\partial \xi_k}$$

Маючи на увазі, що

$$\nabla Q(\xi) = \frac{\partial Q}{\partial \xi_1} i_1 + \frac{\partial Q}{\partial \xi_2} i_2 + \dots + \frac{\partial Q}{\partial \xi_k} i_k$$

де $Q = \xi_1 i_1 + \xi_2 i_2 + \dots + \xi_k i_k / i_1, i_2, \dots, i_k /$ - одиничні вектори.

Одержимо аналогічно формулі (3.5.1) прогнозоване значення кожного параметра

$$\xi_s(t_{n+1}) = \xi(t_n) + \gamma_{n+1} \frac{\partial Q}{\partial \xi_s}, s = 1, 2, \dots, k$$

У загальному випадку градієнтний метод є лінійним і ефективно застосовується в тих випадках, коли функція працездатності системи

змінюється по лінійному закону чи близькому до лінійного закону.

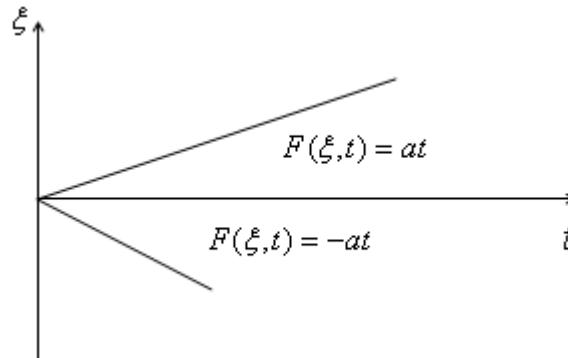
Одним із широко застосовуваних методів прогнозування технічного стану є метод узагальненого параметра.

Ідея методу узагальненого параметра при прогнозуванні полягає в тому, що процес, характеризуємий багатьма компонентами описується одномірною функцією, чисельні значення якої залежать від контрольованих компонентів процесу. Така функція розглядається, як узагальнений параметр процесу. При цьому може виявитися, що узагальнений параметр не має конкретного фізичного змісту, а є математичним вираженням, побудованим штучно з контрольованих компонентів процесу, що прогнозується.

Це ми розглянули складні аналітичні методи прогнозування. Але для рішення конкретних практичних задач з успіхом застосовують для прогнозування елементарні математичні функції. Аналіз кривих зміни параметрів окремих елементів, приладів і вузлів систем, говорить про можливість їхньої апроксимації порівняно простими функціями: лінійною, квадратичною, кубічною, показовою.

Розглянемо ці елементарні функції і можливість їхнього застосування для прогнозування.

Лінійна функція



Графік функції $F(\xi, t) = at$, де $a = f[\xi(t_i)]$, $t_i \in T_1$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$ - являє собою пряму лінію, що проходить через початок координат, найбільш часто з точки $\xi = 0$ беруть свій початок відносні зміни значень параметрів $\xi(t)$. Невідомий коефіцієнт “а” визначається, як величина і знак кута нахилу прямої, тобто швидкістю зміни контрольованого параметра

$$a = \frac{d\xi(t)}{dt}$$

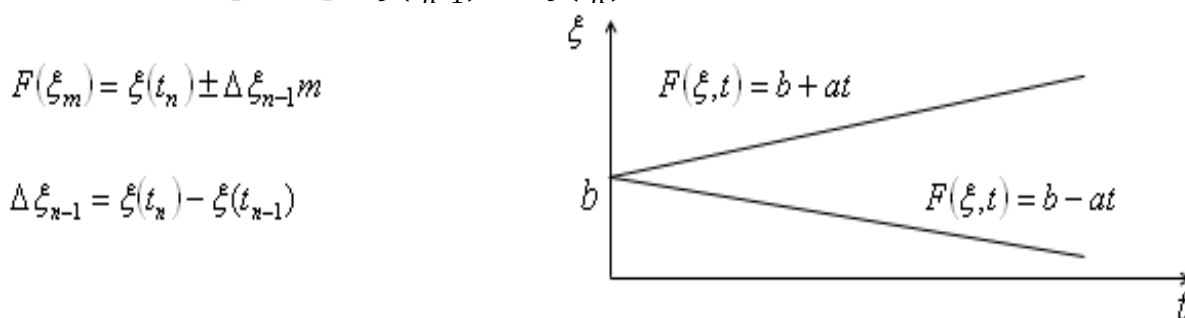
Більш загальне вираз лінійної функції має вигляд

$$F(\xi, t) = b + at,$$

де $b = f[\xi(t_0)]$ характеризує початкове значення параметра $\xi(t)$, $b \geq 0$.

У загальному випадку величини a і b є випадковими величинами. При періодичному контролі вони уточнюються на кожному кроці.

При прогнозуванні a і b можна обчислити за двома останніми значеннями параметра $\xi(t_{n-1})$ та $\xi(t_n)$ і тоді



При прогнозуванні на кілька кроків, а тим більше на один інтервал контролю, лінійна функція є дуже ефективною, тому що часто технічні параметри на окремих ділянках досить добре апроксимуються прямими.

Квадратична функція

У загальному випадку вона має вигляд

$$F(\xi, t) = ct^2 + at + b$$

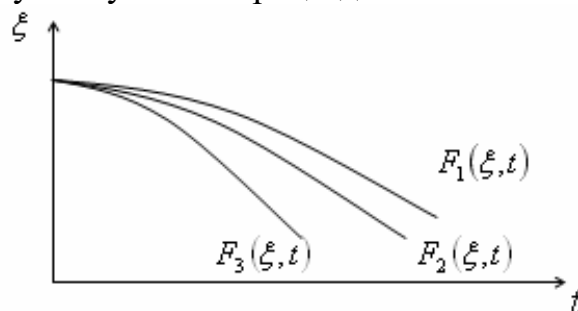
де

$$c = f[\xi(t_i)] \neq 0, \quad t_i \in T_i, i = 0, 1, 2, \dots, n$$

Коефіцієнт “с” ідентичний прискоренню процесу, іншими словами його другий похідній. Значення “с” може бути як позитивним, так і негативним, що відповідає збільшенню або зменшенню швидкості старіння, зносу. Застосування виразу $f(t) = ct^2 + at + b$ особливо доцільно тоді, коли в змінах $\xi(t)$ спостерігається визначена нелінійність і з часом параметр змінюється по параболічному закону.

Кубічна функція

Функція $F(\xi, t) = dt^3 + ct^2 + at + b$ для апроксимації зміни параметра $\xi(t)$ застосовується значно рідше. Цей вираз, судячи з графіка, вказує на свого роду гарантовану межу зміни працездатності технічних об'єктів.

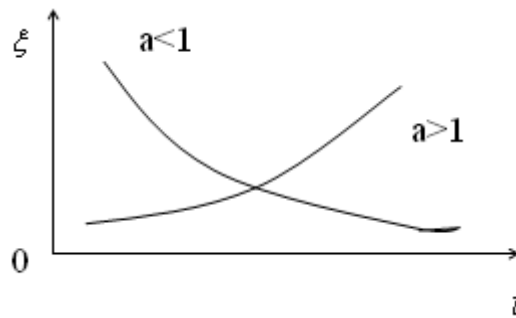


Показова функція

Досить розповсюдженою на практиці є залежність

$$F(\xi, t) = b[a^{ct}],$$

де $a, b, c = f[\xi(t_3)]$ невідомі коефіцієнти, $a > 0$. Якщо замість “ a ” у цьому виразі ввести експоненту, то одержимо експоненціальну функцію



де знаки коефіцієнтів b і c визначаються характером зміни $\xi(t)$.

Кожна з розглянутих вище функцій може бути використана для прогнозування технічного стану по одному контрольованому параметру чи узагальненому параметру. Конкретне їхнє застосування визначається результатами статистики.

3.5.3. Статистичні методи прогнозування відмовлень ТЗ.

Сутність статистичних методів прогнозування полягає в тому, що на підставі відомих статистичних даних про інтенсивність відмов елементів у процесі експлуатації даної апаратури роблять розрахунок їхньої надійності в майбутньому і визначають моменти для профілактичної заміни (ремонт, регулювання).

При експлуатації ТЗ для кожного елемента можна встановити допуск на його визначальний чи допоміжний параметр $\xi(t)$

$$A_H \leq \xi(t) \leq A_B$$

де A_H, A_B граничні значення параметрів.

Аналіз статистичних даних показує, що відмови, що є наслідком поступового старіння і зносу елементів підкорюються нормальному закону розподілу щільності $f(t)$.

Нехай для ТЗ у деякий момент щільність розподілу параметра, що визначається, для будь-якого моменту часу підкорюється нормальному закону.

Тоді імовірність справного стану ТЗ (елемента) для будь-якого моменту часу t (у тому числі і наперед заданого) може бути визначена по формулі відомої з теорії імовірності

$$P(t) = P[A_H < \xi(t) < A_B] = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{A_B - \xi_{CP}(t)}{\sigma(t)\sqrt{2}} \right) - \Phi \left(\frac{A_H - \xi_{CP}(t)}{\sigma(t)\sqrt{2}} \right) \right]$$

де $\xi(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_i(t)}{n}$ - середнє значення допоміжного(основного), (визначального) параметра $\xi(t)$ в момент часу t ;

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\xi_i(t) - \xi_{CP}(t))^2}{n-1}} \quad - \quad \text{СКВ} \quad \text{допоміжного(визначального)}$$

параметра $\xi(t)$;

$\Phi(Y)$ – табульована функція Лапласа.

Таким чином, на підставі наявних статистичних даних про реалізацію параметра визначають значення $\xi_{CP}(t)$ і $\sigma(t)$ для будь-якого моменту часу знаходять імовірність $P(t)$.

Але часто потрібно визначити час $t_{прогн}$, при досягненні якого здійснюється профілактична заміна елементів, що впливають на контрольований параметр.

Час $t_{прогн}$ визначають виходячи з потребуємого (заданого) рівня надійності $P_{TP}(t)$ і при підстановці $P(t)=P_{TP}(t)$ отримуємо:

$$P_{TP}(t) = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{A_B - \xi_{CP}(t_{прогн})}{\sigma(t_{прогн})\sqrt{2}} \right) - \Phi \left(\frac{A_H - \xi_{CP}(t_{прогн})}{\sigma(t_{прогн})\sqrt{2}} \right) \right]$$

Рішення задачі прогнозування буде найбільш простим, коли реалізація параметра апроксимується прямою лінією, тобто коли параметр змінюється в одну сторону і на нього встановлений односторонній допуск.

У цьому випадку обчислення спрощуються, тому що при $A_B = \infty$ отримаємо:

$$P(t) = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{\xi_{CP}(t) - A_H}{\sigma(t)\sqrt{2}} \right) \right]$$

3.5.4. Апаратурні методи прогнозування і забезпечення необхідної надійності ТЗ при експлуатації

Для використання апаратурних методів прогнозування відмов необхідно мати статичні дані про характер зміни визначеного параметра і результати періодичного апаратурного контролю параметра конкретного елемента при роботі ТЗ у нормальному і спеціальному режимі.

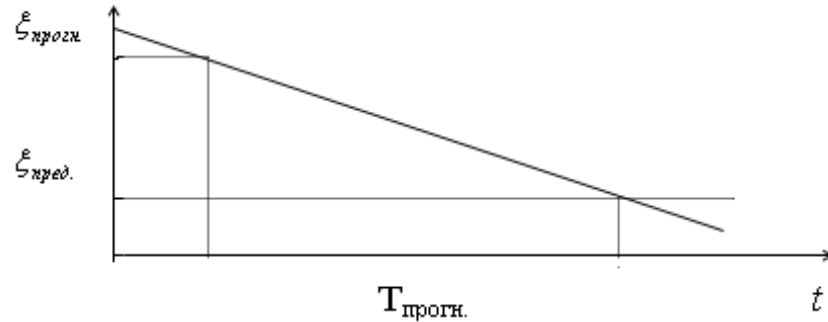
Метод контрольних вимірів прогнозованого параметра

Нехай апаратура ТЗ працює в нормальному режимі. Для прогнозування необхідно знати характеристики системи:

- а) загальний закон зміни параметрів $\xi(t)$ від часу експлуатації;
- б) швидкість зміни параметра $\xi(t)$ при наближенні до граничного значення параметра $\xi(t_{пред.})$

По цих характеристиках можна обрати визначений більш високий рівень прогнозування і відповідний інтервал контрольних вимірів.

Описаний принцип ілюструється малюнком

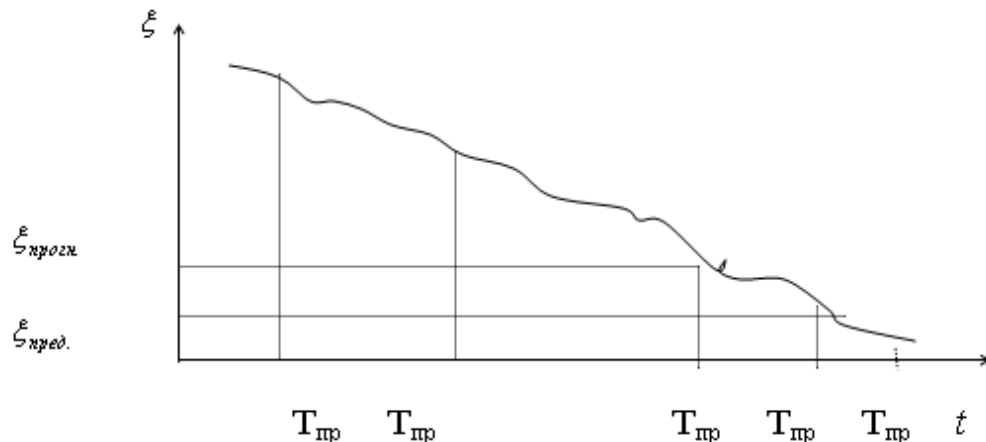


Практично прогнозування зводиться до наступних дій:

1. періодично контролюються вузлові вихідні параметри, що визначають успішне функціонування ТЗ.

2. Якщо контрольовані параметри знаходяться вище рівня прогнозування ($\xi_{\text{прогн}}$), то ТЗ вважається надійною й експлуатація її продовжується.

3. Якщо контрольовані параметри наблизилися до неприпустимих значень і знаходяться у середині області $\xi_{\text{прогн}} > \xi > \xi_{\text{пред.}}$, то ТЗ вважається не надійною, існує реальна можливість виникнення відмов і повинні бути прийняті заходи до з'ясування причин відходу параметрів нижче рівня прогнозування, при необхідності здійснюється регулювання чи попереджувальна заміна елементів.



Даний метод прогнозування використовується найчастіше при проведенні різних видів контролю.

При цьому $T_{\text{пр}} \geq T_{\text{фк}}$

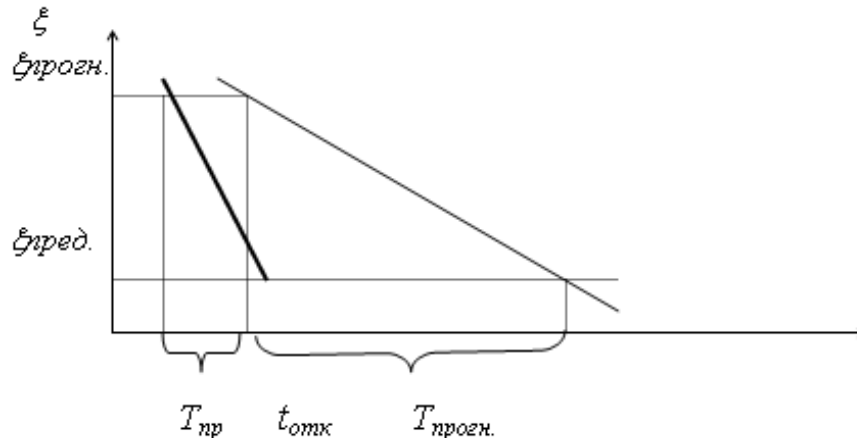
$T_{\text{фк}}$ - період функціонального контролю.

Метод зміни режиму роботи

При цьому методі прогнозування елементи ТЗ працюють у спеціальних режимах. Найбільш просто спеціальний режим роботи елемента забезпечується за рахунок зміни електричних режимів, напруги і струму живлення, струму бази або колектора для схем, зібраних на напівпровідникових приладах тощо.

Установлюється такий режим роботи ТЗ, при якому швидкість зміни параметра $\xi(t)$ збільшується, крива досягає рівня відмови раніше, ніж при нормальному режимі.

Виконавши виміри можна визначити момент переходу параметра через рівень відмови при незмінному режимі роботи апаратури.



Якщо прогнозований параметр при зміні режиму знаходиться вище рівня відмови, то контрольована ТЗ вважається надійною, якщо нижче – ненадійною і повинні бути прийняті заходи до виявлення і видалення елементів із граничними параметрами.

Даний метод прогнозування в основному проводиться при ТО.

Зміни режимів роботи обираються так, щоб забезпечити період прогнозування $T_{пр}$ не менш періодичності ТО при якому здійснюється це прогнозування, тобто $T_{пр} \geq T_{ТО}$.

Розглянутий метод широко застосовується в існуючих типах РЛС.

Зона стійкості роботи і межі зміни живлючих напруг (чи навантажень) визначаються експериментально і теоретично для кожних конкретних елементів і схем.

Заклучна частина

Розглянуті методи прогнозування відмов і технічного стану ТЗ, незважаючи на свої різновиди, спрямовані на те, щоб звести до мінімуму число можливих відмов між черговими ТО і підвищити надійність ТЗ при її експлуатації.

3.6. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЗ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ШЛЯХОМ УКОМПЛЕКТУВАННЯ КОМПЛЕКТОМ ЗІП

3.6.1. Види систем ЗІП

Умови експлуатації ТЗ висувають високі вимоги до її надійності. Необхідну надійність неможливо забезпечити не надаючи апаратурі запасні елементи. Як показує практика експлуатації ТЗ обмеженість запасів комплектуючих елементів настільки суттєво відбивається на

функціонуванні, що показники надійності, розраховані без врахування системи забезпечення запасними елементами не відображають реальної надійності ТЗ

Щоб гарантувати високу надійність складної ТЗ додається система забезпечення їх працездатності, котра включає діагностичні і ремонтні засоби, комплекти запасних елементів тощо. Іноді сукупність всіх запасних конструктивних елементів, що входять у систему забезпечення працездатності об'єкта називають системою ЗІП або просто ЗІП. У відповідності з ДСТ В 25-883-83Р, ЗІП – це запасні частини, інструменти та прилади необхідні для технічного обслуговування і ремонту виробів, що скомплектовані в залежності від призначення та умов їх використання.

В практиці забезпечення виробів запасними елементами використовуються різні прості і складні структури системи ЗІП але як правило всі будуються на основі наступних основних компонентів.

Класифікація ЗІП

Одиночний комплект ЗІП (ЗІП-О) — це комплект запасних конструктивних елементів, що надається безпосередньо виробу з метою забезпечення його надійності при тривалому використанні.

Груповий комплект ЗІП (ЗІП-Г) — надається групі виробів для поповнення одиночних комплектів за мірою їх витрачання або для забезпечення надійності виробів за тими типами елементів, які відсутні у номенклатурі одиночних комплектів ЗІП.

Ремонтний комплект ЗІП (комплект ЗІП ремонтного органу ЗІП-РО) — надається РО з метою забезпечення його працездатності. Функціонування РО полягає в усуненні відмов у несправних елементах за рахунок виявлення і заміни в них відмовивши більш малих конструктивних елементів.

Найбільш розповсюдженими структурами побудови систем ЗІП є (рис. 3.6.1):

Структура а). Виробу надано ЗІП-О, що поповнюється з невичерпного джерела поповнення (НДП), (Під НДП розуміють завод, склад тощо)

Структура б). Кожному з S виробів надано ЗІП-О. Всі ЗІП-О поповнюються частково або повністю із одного ЗІП-Г, а частково з НДП. Комплект ЗІП-Г поповнюється із НДП.

Структура с). Кожному виробу у групі надано ЗІП-О. Всі ЗІП-О поповнюються із ЗІП-Г. Комплект ЗІП-Г поповнюється частково (або повністю) з ЗІП-РО в результаті ремонту відмовлених елементів, а частково із НДП. Комплект ЗІП-РО поповнюється із НДП.

Ведучи мову про поповнення комплектів ЗІП необхідно відмітити, що існують різні стратегії поповнення запасів ЗІП. Стратегія поповнення запасу —це спосіб його відновлення за мірою того як він витрачається при експлуатації виробів або РО. Як правило на практиці зустрічаються наступні стратегії поповнення запасів: періодичне поповнення, періодичне

3.6.2. Показники достатності ЗІП

Комплекти ЗІП надаються виробам для забезпечення їх надійності при тривалому використанні. Недостатність ЗІП призводить до додаткових простоїв пристроїв і, відповідно, обмеженість комплекту ЗІП має враховуватись при розрахунку показника надійності виробу. Задача визначення показника надійності системи – «виріб – конкретне ЗІП» досить складна і громізка і не допускає у більшості випадків іншого рішення, крім математичного моделювання. Числові характеристики ЗІП, що дозволяють враховувати поправку, що вноситься обмеженістю даного ЗІП в показник надійності виробу називають показниками достатності ЗІП.



Ймовірність достатності ЗІП ($Pg(t)$) – це ймовірність того, що за час t роботи виробу не відбудеться жодної відмови ЗІП. $Pg(t)$ застосовується для оцінки достатності тільки комплектів ЗІП-О, тільки при умові, що всі запаси у цьому комплекті поповнюються періодично з однаковим періодом

і тільки, якщо показником надійності виробу слугує ймовірність безвідмовної роботи протягом часу t , при чому вважають, що ремонт виробу при наявності запасного елементу здійснюється миттєво.

Визначається $P_g(t)$ виходячи із співвідношення:

$$P(t) = P_{\infty}(t) * P_g(t), \text{ де}$$

$P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу t ;

$P_{\infty}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи виробу при наближеному комплекті ЗІП.

Коефіцієнт готовності ЗІП ($K_{ЗИП}$) — це середня за часом ймовірність того, що ЗІП знаходиться в безвідмовному стані. Цей показник визначається з наступного співвідношення:

$$K_{zin} = 1 - \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t_{вzin}}{t} = 1 - \frac{T_{вЗИП}}{(T_{оЗИП} + T_{вЗИП})},$$

де

$T_{вЗИП}$ – середня тривалість однієї відмови ЗІП;

$t_{вzin}$ – загальна тривалість відмови ЗІП за час роботи виробу;

$\hat{T}_{\text{ср}}$ – середній час між відмовами ЗІП.

Із приведеної формули чітко видно фізичний зміст $K_{ЗИП}$ – це доля часу, протягом якого виріб простоє через відсутність запасних елементів, в загальному часі експлуатації виробу.

В якості показника достатності коефіцієнт готовності використовується для оцінки ЗІП тих виробів, показником надійності яких служить коефіцієнт готовності. Коефіцієнт готовності виробу, що оснащений ЗІП, може бути представлений у вигляді добутку коефіцієнта готовності виробу при умові, що запасні елементи завжди у наявності і коефіцієнта готовності ЗІП.

$$K = K_{\infty} * K_{ЗИП}$$

Середній час затримки $\Delta t_{ЗИП}$ — це стаціонарне значення відношення.

$$\Delta t_{ЗИП} = \lim_{t \rightarrow \infty} T_z(t) / \Lambda(t)$$

д T_z – сумарний час, який заявки, що поступили в ЗІП за час T , чекатимуть через нехватку запасних елементів;

$\Lambda(t)$ – загальна кількість заявок, що поступили в ЗІП за час T .

Середній час затримки $\Delta t_{ЗИП}$ використовується у якості показника достатності комплектів ЗІП-О, ЗІП-Г, ЗІП-РО. Для того, щоб визначити показник надійності виробу, що був забезпечений комплектом ЗІП,

необхідно скласти середній час ремонту виробу при нескінченному ЗІП з показником достатності ЗІП.

$$t_p = t_{p\infty} + \Delta t_{ЗІП},$$

а потім розрахувати показник надійності виробу, вважаючи, що середній час ремонту дорівнює t_p , а запасний елемент завжди знайдеться.

3.6.3. Методичні основи розрахунку необхідної кількості запасних елементів.

Розрахунок необхідного комплексу ЗІП здійснюється виходячи із задання вимоги за показником достатності ЗІП які визначаються із розглянутих вище співвідношень:

$$P_o(T) \geq P_o^{Tp} = \frac{P_o^{Tp}(T)}{P_\infty(T)}; \quad K_{ЗІП} \geq K_{ЗІП_{Tp}} = \frac{R_{vir}^{Tp}}{K_\infty};$$

$$\Delta t_{ЗІП} \leq \Delta t_{ЗІП}^{Tp}$$

Тоді будується модель функціонування запасу елементів, як правило в передбаченні, що тривалість безвідмовної роботи кожного елементу розподілена за експоненціальним законом із середнім, що залежить від типу елементу і від того, де знаходиться даний елемент: у роботі, у резерві або у запасі.

Моделлю функціонування запасу елементів в ЗІП-О служить марківський ланцюг з кінцевим числом станів і з неперервним часом. Ймовірності переходів цього марківського кола із стану в стан визначаються як потоком відмов елементів даного типу, так і стратегією поповнення запасу.

Далі вирішуючи систему диференціальних рівнянь при нульових початкових умовах знаходять рішення задачі визначивши необхідну кількість елементів даного типу в складі ЗІП при цьому

$$\sum_{i=1}^N R_i(n_i) \geq R_{ЗІП}^{Tp},$$

де $R_i(n_i)$ - значення показника достатності елемента іншого типу в залежності від числа елементів (n) у складі ЗІП.

N – кількість типів елементів у складі ЗІП.

Звичайно комплект ЗІП розраховується при умові оптимальності у забезпеченні апаратури ЗІП.

$$\begin{cases} R_{\text{вир}} \geq R_{\text{вир}}^{\text{Tr}} \\ \sum_{i=1}^N C_i n_i \rightarrow \min \end{cases}$$

де $R_{\text{вир}}$ – розраховане і потребуєме значення показника надійності виробу або достатності ЗІП ;

C_i – вартість і-го типу .

Задачі розрахунку ЗІП на практиці є як правило досить складними, у зв'язку з своєю багатомірністю, особливо для великих складних систем і вирішуються вони за допомогою ЕОМ.

Необхідно відмітити, що розрахована на етапі проектування кількість запасних елементів повинна коригуватись у процесі експлуатації. Інакше комплект ЗІП не може забезпечувати потребуємих показників надійності у процесі експлуатації ТЗ. В цілому достатній ЗІП, правильно організована система ремонту є основною ефективною побудови системи технічного обслуговування і ремонту ТЗ.

Контрольні питання

1. Які аналітичні методи прогнозування надійності ТЗ ви знаєте.
2. Які статистичні та апаратурні методи прогнозування відмов ТЗ ви знаєте.
3. Дайте характеристику головних принципів і етапів експлуатації.
4. В чому полягає зміст експлуатації.
5. Керівні документи, що визначають порядок зберігання і експлуатації.
6. Розробка та значення рекламаций в процесі експлуатації.
7. Зміст, види, принципи організації технічного обслуговування.
8. Які основні показники ефективності технічного обслуговування ТЗ ви знаєте.
9. Види та порядок проведення ремонту.
10. Які керівні документи з організації і проведення ремонту ви знаєте.
11. Місце і значення технічної діагностики у забезпеченні надійності систем.
12. Які методи пошуку відмов ви знаєте.
13. Які апаратні засоби діагностування цифрових і мікропроцесорних пристроїв ви знаєте.
14. Як класифікується ЗІП.
15. В чому полягає задача контролю технічного стану.
16. Види контролю та їх зміст.
17. Які показники ефективності системи контролю ви знаєте.
18. Охарактеризувати основні структури побудови систем ЗІП.
19. Методичні основи розрахунку необхідної кількості елементів ЗІП.
20. Які показники достатності ЗІП ви знаєте.

СПИСОК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

АЛП – арифметично-логічний пристрій
АСРН – автоматизована система розрахунку надійності
АСУ – автоматизована система управління
АЦП – аналого-цифровий перетворювач
ВІС – велика інтегральна мікросхема
ВКС – відмовостійкі комп'ютерні системи
ЕКД – експлуатаційні конструкторські документи
ЕОМ – електронно-обчислювальні машина
ЕРВ – електро-радіовироби
ЕТХ – експлуатаційно-технічні характеристики
ЗІП – запасний інструмент та приладдя
ЗП – запам'ятовувальний пристрій
ІВ – інтенсивність відмов
ІЕ – інструкція з експлуатації
ІМ – інструкція з монтажу
ІС – інтегральна мікросхема
ЙБР – ймовірність безвідмовної роботи
КВА – контрольно-вимірювальна апаратура
КЗ – коротке замикання
КОМ – комплекс обчислювальних машин
КС – комп'ютерна система
МПП – мікропроцесорні пристрої
МШОІ – максимальна швидкість отримання інформації
НВІС – надвелика інтегральна мікросхема
НДП – невичерпне джерело поповнення
НПЗП – накопичувачі постійних запам'ятовувальних пристроїв
ОД – об'єкт діагностики
ОЗП – оперативний запам'ятовувальний пристрій
ОК – об'єкт контролю
ОС – операційна система
ПК – персональний комп'ютер
ПЗ – програмне забезпечення
ПЗП – постійний запам'ятовувальний пристрій
ППЗП – програмуємий постійний запам'ятовувальний пристрій
ПП – периферійний пристрій
ПЛІС – програмувальна логічна інтегральна схема
ПУ – периферійний пристрій
РЕА – радіоелектронна апаратура
РО – ремонтний орган
РТЗ – радіотехнічний засіб
РПЗП – репрограмуємий запам'ятовувальний пристрій
СКВ – середньо-квадратичне відхилення

СТО – система технічного обслуговування і ремонту

ТЗ – технічне завдання

ТО – технічне обслуговування

ТП – технічний пристрій

ТУ – технічні умови

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

Ц і МПП – цифрові і мікропроцесорні пристрої

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Денисюк А.Ю. Теорія надійності та експлуатація радіоелектронної апаратури. Конспект лекцій. Житомир: ЖВІ, 2016., 248 с.
2. Локазюк В. М, Савченко Ю.Г. Надійність, контроль, діагностика і модернізація ПК. Навч. Пос. К.: Видавничий центр «Академія», 2004., 376 с.
3. Волочков В. В. Основи надійності РЕЗ ч.1. Основи теорії надійності складних РЕЗ. Навч. Пос. Житомир: ЖВУРЕ ПВО, 1985.
4. Спецтехнічне забезпечення військ. Навч. Пос. ВІРТА ППО. Харків, 1987.
5. Основи надійності та технічне забезпечення РЕС РТВ ППО. Частина 1. /Під ред. Б. П. Креденцера - Київ, 1983.
6. ДСТУ 3524-97. Надійність техніки. Проектна оцінка надійності складних систем з урахуванням технічного і програмного забезпечення та оперативного персоналу. Основні положення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 36 с.
7. Porter D.C, Finke W.A. Reability characterization an prediction of IC. PADS-TR-70, p.232.
8. Military Handbook 217F. “Reability prediction of electronic equipment”. Department of Defence, Washington, DC 20301.
9. TMS320VC5416 Fixed-Point Digital Signal Processor, Data Manual, Literature Number SPRS095K.
10. CD-ROM фірми Integrated Device Technology.
11. CD-ROM фірми Holtec Semiconductor.
12. ДСТУ 3524-97. Надійність техніки. Проектна оцінка надійності складних систем з урахуванням технічного і програмного забезпечення та оперативного персоналу. Основні положення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 36 с.
13. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. – К.: Держстандарт України, 1994. – 36 с.
14. Кулаков. Управління якістю програмного забезпечення. К.: Видавничий центр «Академія», 2008., 241

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А		О	
апаратура, 7		одиничні показники, 15	
		науково-дослідна робота, 15	
В		П	
відмова, 13		програмне забезпечення, 79	
		програмувальні логічні інтегральні	
Е		схеми, 99	
ефективність, 15		прогнозування, 181	
експлуатація, 123			
Д		Р	
діагностика, 137		ресурс, 27	
		резервування, 47	
З		резервний елемент, 53	
запам'ятовуючий пристрій, 105		ремонт, 129	
		радіоелектронна апаратура, 7	
		радіоелектронний засіб, 181	
І		С	
імовірність відмов, 18		строк служби, 15	
інтенсивність відмов, 18		строки збереження, 27	
імовірність	відновлення	структурного резервування, 53	
працездатності, 25			
інтенсивність	відновлення		
працездатності, 26			
інтегральна мікросхема, 99			
К		Т	
комплексні показники, 16		технічний стан, 9	
коефіцієнт готовності, 30		технічне обслуговування, 159	
коефіцієнт простою, 34		технічне завдання, 99	
комплекс обчислювальних машин, 79		технічний опис, 131	
контроль технічного стану, 169			
М		У	
моделювання надійності, 90		ушкодження, 10	
мікроконтролери, 99			
мікропроцесори, 99			
Н		Я	
надійність, 9		якість об'єкту, 10	
науково-дослідна робота, 15			
невичерпне джерело поповнення, 192			

