

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА РОБОТОТЕХНІКИ

**НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК**  
з дисципліни «Діагностика та випробування приладів і машин»  
для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр»  
галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування»  
усіх форм навчання

Черкаси  
2019

УДК 620.1 (075.8)  
Н15

*Затверджено вченою радою ФЕТР,  
протокол № \_\_\_\_ від \_\_\_\_ \_\_\_\_\_ 2019 р.,  
згідно з рішенням кафедри приладобудування,  
мехатроніки та комп'ютеризованих  
технологій, протокол № 9 від «07» травня  
2019 р.*

**Упорядники: к.т.н., доцент, Т.Ю. Кісіль, к.т.н., ст. викладач, В.М. Заїка, к.т.н., доцент, В.В. Туз**

**Рецензент:** Бондаренко Ю.Ю., к.т.н., доцент, завідувач кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету, м. Черкаси

Н15 Навчально-методичний посібник з дисципліни «Діагностика та випробування приладів і машин» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування [Електронний ресурс] Упор./Т.Ю. Кісіль, В.М. Заїка В.В. Туз.; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2019. – 109 с. - Назва з титульного екрана

#### **анотація**

В основу навчально-методичного посібника покладено досвід викладання дисципліни «Діагностика та випробування приладів і машин» у Черкаському державному технологічному університеті. У зміст увійшли загальні питання технічної діагностики, поняття про дефекти і їх види, розглянуто способи побудови алгоритмів пошуку несправностей, діагностичні моделі, тощо. В кінці кожного розділу наведені питання для самоперевірки. У додатки винесені приклади вирішення задач.

**Навчальне електронне видання  
мережного використання**

Навчально-методичний посібник з дисципліни «Діагностика та випробування приладів і машин» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування

Упорядники: Кісіль Тетяна Юріївна  
Заїка Василь Михайлович  
Туз В'ячеслав Валерійович

*В авторській редакції.*

# ЗМІСТ

## Вступ

### 1. Предмет і завдання технічної діагностики

#### 1.1 Основні поняття та визначення

#### 1.2 Системи тестового та функціонального діагностування

#### 1.3 Технічна діагностика, генезис та прогнозування

#### 1.4 Якість і надійність

##### 1.4.1 Зв'язок технічної діагностики з надійністю і якістю

##### 1.4.2 Основні поняття надійності. Класифікація відмов

##### 1.4.3 Складові надійності

### 2. Основні напрямки конструювання радіоелектронної апаратури

#### 2.1 Тенденції розвитку засобів контролю та діагностування

### 3. Діагностичні моделі

#### 3.1 Узагальнена модель об'єктів діагностування

#### 3.2 Аналітичні моделі

#### 3.3 Графоаналітичні моделі

#### 3.4 Таблиця функцій несправностей

#### 3.5 Функціонально-логічні моделі

### 4. Способи побудови алгоритмів пошуку несправностей

#### 4.1 Метод половинного розбиття

#### 4.2 Метод «час - ймовірність»

#### 4.3 Методи розрахунку надійності приладів і систем автоматизації, види діагностичних параметрів

#### 4.4. Надійність і готовність

#### 4.5 Надійність простих схем

#### 4.6 Методи розрахунку надійності

## Приклади вирішення задач

## Висновок

## Література

## ВСТУП

Система контролю якості продукції є однією з найістотніших частин системи управління якістю. На кожному етапі розвитку суспільного виробництва існували специфічні вимоги до якості продукції. На ранніх стадіях становлення промисловості основними вимогами до якості були точність і міцність. Масштаби виробництва дозволяли проводити перевірку кожного і відбраковування дефектних виробів.

У міру розвитку промислового виробництва продукція ставала все більш складною, число її характеристик постійно зростало. Стало зрозуміло, що важливо перевіряти не окремі властивості виробів, а його функціональну здатність в цілому. Почала складатися система контролю якості продукції, суть якої полягала у виявленні дефектної продукції і вилучення її з виробничого процесу. Контроль якості продукції полягає в перевірці відповідності показників її якості встановленим вимогам.

Важливими критеріями високої якості деталей машин, механізмів, приладів є фізичні, геометричні і функціональні показники, а також технологічні ознаки якості, наприклад, відсутність неприпустимих дефектів; відповідність фізико-механічних властивостей і структури основного матеріалу і покриття; відповідність геометричних розмірів і чистоти обробки поверхні необхідним нормативам, тощо.

# 1. ПРЕДМЕТ І ЗАВДАННЯ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

## 1.1 Основні поняття та визначення

Діагноз в перекладі з грецького "Діагнозис" означає розпізнавання, визначення. У медицині, наприклад, це - визначення стану людини, а в техніці - визначення стану об'єкта технічної природи. Об'єкт, стан якого визначається, називають зазвичай об'єктом діагностування. Діагноз являє собою процес дослідження об'єкта діагностування. Завершення цього дослідження є отримання результатів діагнозу, тобто Висновок про стан об'єкта діагностування.

**Технічна діагностика** - галузь науково-технічних знань, сутність якої складає теорія, методи і засоби виявлення і пошуку дефектів об'єктів технічної природи.

Під дефектом слід розуміти будь-яке невідповідність властивостей об'єкта заданим, необхідним або очікуваним його властивостям. Термін "дефект" пов'язаний з терміном несправність, але не є його синонімом, так як у стані несправності об'єкт може мати безліч дефектів.

**Дефекти поділяються на:**

➤ **Явні** (для виявлення яких у нормативній документації передбачені відповідні правила, методи, засоби);

➤ **Приховані** (для виявлення яких відповідні правила, методи, кошти не передбачаються:

а) значні (впливають на ефективність використання БРЕА);

б) критичні (при наявності яких використання виробів за призначенням неможливо або недоцільно, при досягненні дефектом критичного рівня приходить відмова);

в) переборні (усунення яких технічно можливо і економічно доцільно).

**Виявлення дефекту** є встановлення факту його наявності або відсутності в об'єкті.

Пошук дефекту полягає у вказівці з певною точністю його місцеположення в об'єкті. Які ж причини виникнення дефектів?

Відмінною особливістю сучасної РЕА це складність апаратури як РЕА в цілому, так і її окремих елементів, різноманітність умов і режимів застосування.

В "житті" будь-якого об'єкта технічної природи можна виділити три основні етапи: етап виробництва, коли об'єкт створюється, етап експлуатації, коли об'єкт при-змінюється за призначенням, піддається профілактичним перевіркам, перевіркам перед застосуванням або після застосування, ремонту і т. п. І етап зберігання або перебування у резерві.

На першому з названих етапів у процесі виготовлення БРЕА використовуються комплектуючі елементи, що пройшли до моменту їх використання свій життєвий цикл.

На всіх етапах життя будь-який об'єкт технічної природи піддається дії зовнішніх факторів, результатом яких є деградаційні процеси, погіршують параметри і призводять, зрештою, до відмови апаратури, тобто до виходу одного або декількох параметрів за межі допуску або до повного припинення функціонування.

Під впливом зовнішніх умов і внутрішніх процесів деградації змінюється технічний стан апаратури.

На рисунку 1 зображено розподіл факторів, що негативно впливають на стан РСА.

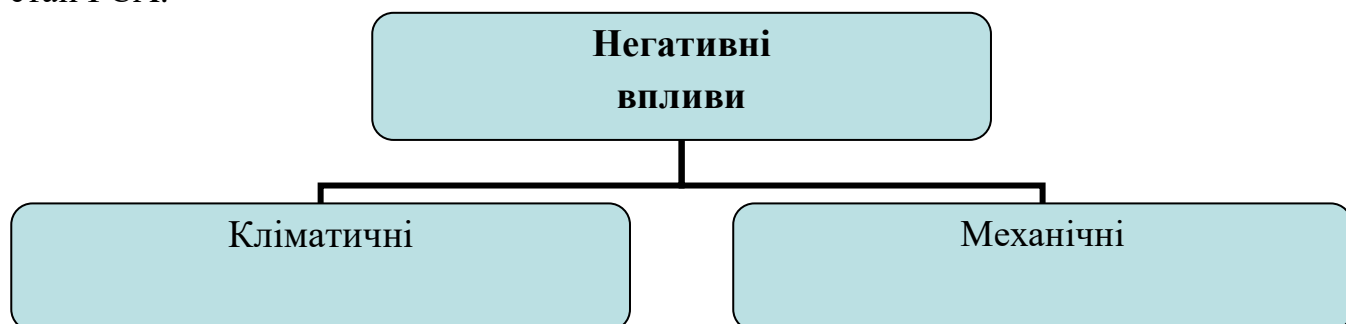


Рис. 1 – Фактори, що негативно впливають на стан РСА

**Кліматичні впливи** підрозділяють на дії температури, вологості, сонячної радіації.

**Механічні дії** - це удари, вібрації, прискорення і звукові тиску. Зміна температури навколишнього середовища впливає на параметри елементів БРЕА:

- Змінюється коефіцієнт посилення транзисторів;
- Змінюються зворотні струми р-п переходів;
- Змінюється величина струму витoku;
- Змінюється ємність конденсаторів і їх електрична міцність;
- Змінюються величини опору резисторів і втрат на перемагнічування;
- Коробляться ізоляційні матеріали та прокладки, знижується термомеханічна міцність термореактивних пластмас і т. д.

Вплив температур може призводити як до раптового виникнення, так і поступовим змінам, які часто виявляються незворотними.

Для ілюстрації впливу температурних впливів показники залежності інтенсивності відмов конденсаторів (рис. 2) і вуглецевих резисторів (рис. 3) від температури і відносної величини навантаження.

Електричні навантаження у разі неприпустимого їх зміни в процесі експлуатації призводять до порушення температурного режиму, електричним пробоїв, відмов при включенні-виключенні апаратури.

Вологість і атмосферні опади прискорюють процес корозії, внаслідок чого погіршуються характеристики міцності, порушуються контакти,

погіршуються ізоляційні властивості внаслідок чого зростають втрати в контурах, котушках, дроселях, трансформаторах.

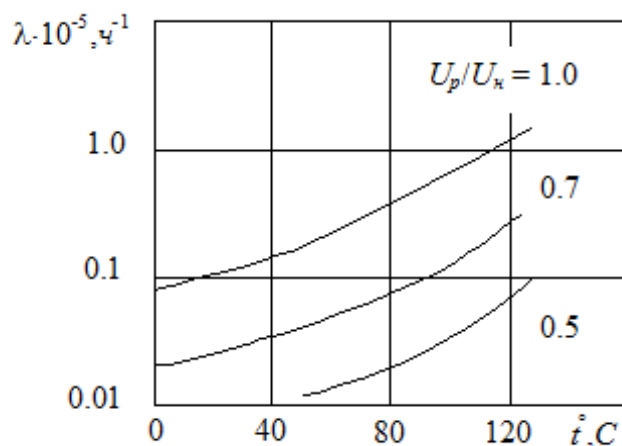


Рис.2 – Залежність інтенсивності відмов конденсаторів від температури середовища

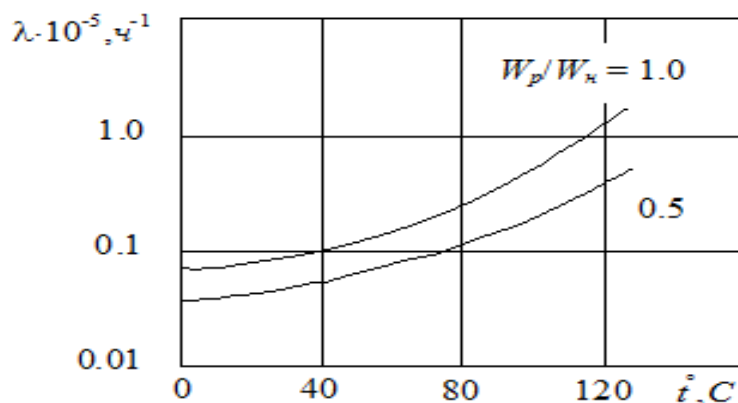


Рис.3 – Залежність інтенсивності відмов вуглецевих резисторів від температури навколишнього середовища

Механічні дії призводять до передчасного зношування елементів РСА, порушення початкового налаштування регульованих радіоелементів, виникненню мікрофонного ефекту в транзисторах.

На рис. 4 схематично показано зміна параметрів РСА в процесі експлуатації.

Комплектуючі елементи, як правило, проходять вхідний контроль, в ході якого відбувається їх відбраковування за параметрами. Однак, на жаль не завжди вдається виявити приховані виробничі дефекти. Крім того, неминучі конструкторські та технологічні помилки. З цих причин в початковий період експлуатації частота відмов дуже велика і багато компаній використовують випробування на примусову відмову, тобто роботу компонентів або обладнання в цілому при підвищених температурах для прискорення появи ранніх відмов.

В результаті ранні дефекти усуваються до того, як обладнання вийде з заводу виробника, і інтенсивність його відмов у споживача буде відповідати нижній частині кривої.

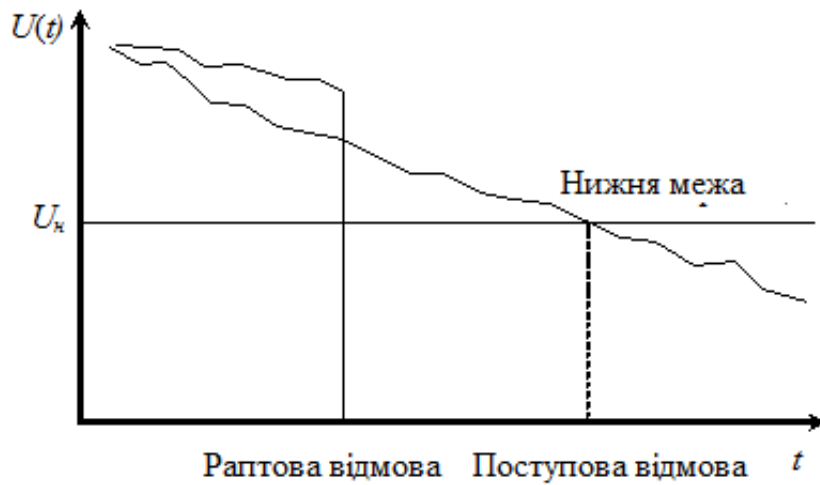


Рис.4 – Зміна параметрів РСА в процесі експлуатації

Відмови в період нормальної роботи пов'язані з "відходом" характеристики в результаті деградації компонентів, зайвим навантаженням апаратури в результаті неправильного використання. Основне призначення технічної діагностики полягає у підвищенні надійності об'єктів на етапі їх експлуатації, а також запобігання виробничого браку на етапі виготовлення об'єктів та їх складових частин.

Вимоги, яким повинен задовольняти виготовлений (новий) або експлуатований об'єкт, визначається відповідною нормативно-технічною документацією.

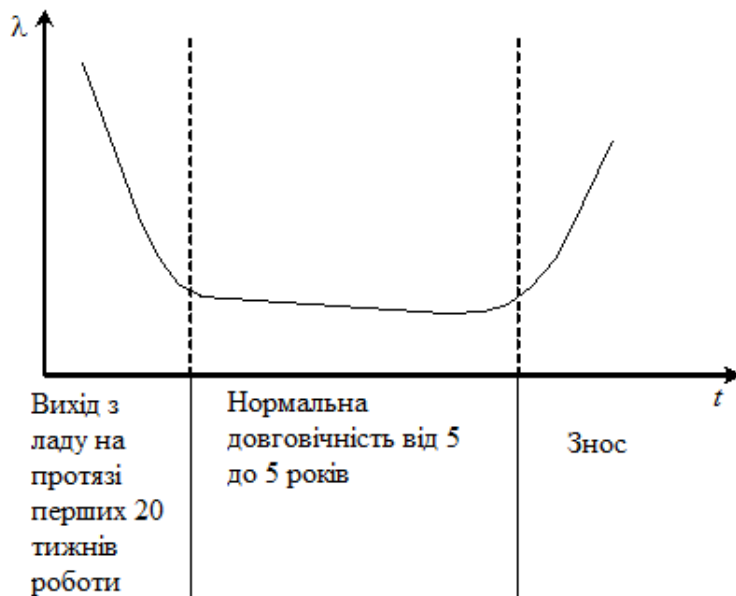


Рис.5 – Крива інтенсивності відмов



Об'єкт, що задовольняє всім вимогам нормативно-технічної документації, є справним або, кажуть, що він знаходиться в справному технічному стані.

На етапі виробництва, наприклад, перевірка справності дозволяє дізнатися, чи містить створений об'єкт дефектні компоненти (деталі, елементи, блоки, вузли, тощо).

В умовах ремонту перевірка справності дозволяє переконатися, чи дійсно усунені при ремонті всі наявні в об'єкті несправності, а в умовах зберігання - не виникли які-небудь несправності за час зберігання об'єкта.

Для умов експлуатації практично важливим є поняття працездатного технічного стану об'єкта.

Об'єкт працездатний, якщо він може виконувати всі задані йому функції зі збереженням значень заданих параметрів (ознак) в заданих межах.

Переконатися в працездатності об'єкта необхідно, наприклад, для профілактики, після транспортування і зберігання. Перевірка працездатності може бути менш повною, ніж перевірка справності, тобто може залишати невиявленими несправності, що не перешкоджають застосуванню об'єкта за призначенням. Наприклад, резервний об'єкт може бути працездатний незважаючи на наявність несправностей в резервних компонентах або зв'язках.

Розглянемо інший приклад працездатного, але несправного об'єкта (рис. 6).

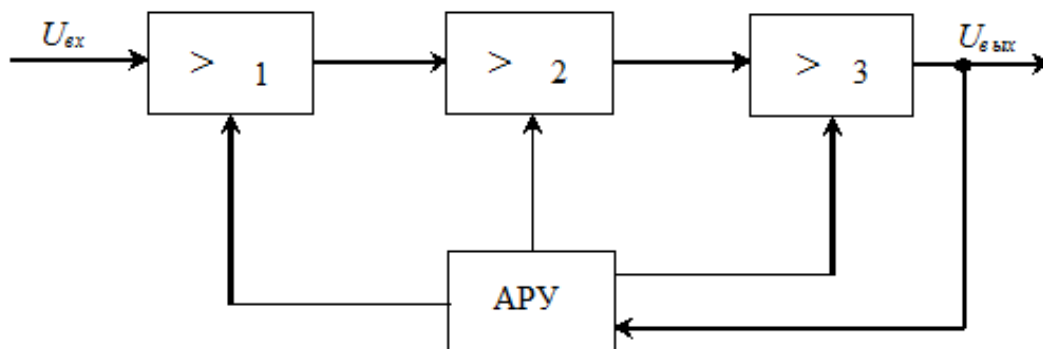


Рис.6 – Структурна схема трьох каскадного підсилювача АРУ

Нехай коефіцієнт посилення одного каскаду  $K_1 = 4$ , а нижні ( $K_{ін}$ ) і верхні ( $K_{ів}$ ) його допустимі значення рівні відповідно  $K_{ін} = 3.5$ ,  $K_{ів} = 4.5$ , сумарний коефіцієнт посилення  $K_{\Sigma} = 60$ , а нижні і верхнє його значення  $K_{\Sigma н} = 50$  і  $K_{ів} = 70$ .

Нехай у певний момент  $K_1 = K_2 = K_3 = 4$ . Тоді  $K_{\Sigma} = 64$  і підсилювач знаходиться в працездатному стані.

В результаті пошкодження коефіцієнт посилення другого каскаду вийшов за межі допуску та став рівним  $K_2 = 2.5$ . В результаті роботи АРУ  $K_1 = K_3 = 4.5$  і  $K_4 = 50.6$ . Тобто сумарний коефіцієнт посилення знаходиться в межах допуску. Отже, підсилювач працездатний. Проте має місце несправність другого каскаду посилення. Крім того, два інших каскаду працюють в максимально напружених режимах, що сприяє розвитку в них деградаційних процесів.

Для етапу застосування за призначенням суттєвим є поняття технічного стану правильно функціонуючого об'єкта.

Правильно функціонуючим є об'єкт, значення параметрів (ознак) якого в поточний момент реального часу застосування об'єкта за призначенням знаходяться в необхідних межах (у цей момент часу об'єкт не відмовив, тобто правильно виконує конкретну задану функцію).

Перевірка правильності функціонування, взагалі кажучи, менш повна, ніж перевірка працездатності, оскільки дозволяє переконуватися тільки в тому, що об'єкт правильно функціонує в даному режимі в даний момент часу.

Іншими словами, в правильно функціонуючому об'єкті можуть бути несправними, які не дозволяють йому правильно працювати в інших режимах. Працездатний об'єкт буде правильно функціонувати у всіх режимах і протягом усього часу його роботи.

Таким чином, справний об'єкт завжди працездатний і функціонує правильно, а неправильно функціонуючий об'єкт завжди непрацездатний і несправний. Правильно функціонуючий об'єкт може бути непрацездатним, і значить, несправним. Працездатний об'єкт також може бути несправним.

На рис. 7 показаний граф переходу об'єкта з одного стану в інший.

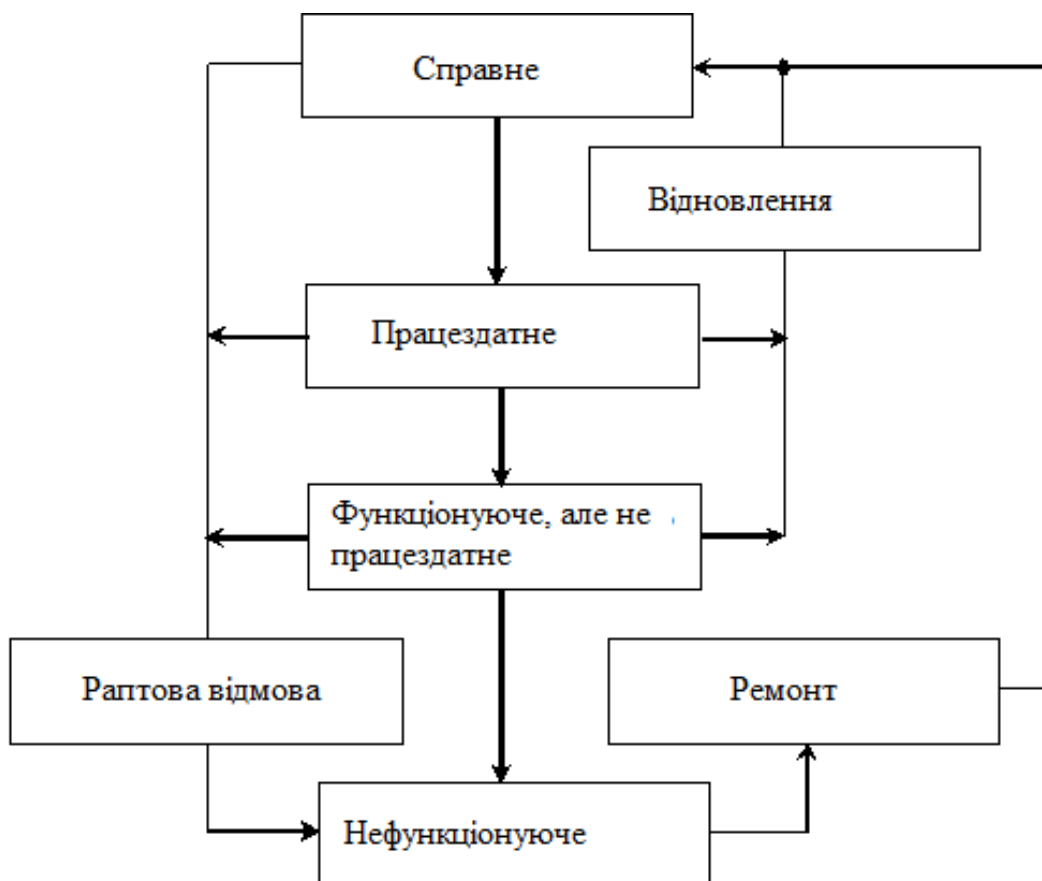


Рис.7 – Граф переходу РСА з одного стану в інший

Одним з найважливіших завдань діагнозу стану об'єкта є пошук несправностей, тобто вказівку місць і, можливо, причин виникнення наявних в об'єкті несправностей. Пошук несправностей необхідний для виявлення і заміни дефектних компонент або зв'язків об'єкта, для усунення помилок монтажу і т. п.

Після усунення несправності об'єкт стає справним, працездатним або правильно функціонуючим. Пошук несправностей є суттєвою складовою діяльності служб наладки на етапі виробництва і ремонтних служб на етапах експлуатації або зберігання об'єктів.

Справне і всі несправні стану об'єкта утворюють безліч  $E$  його технічних станів. Завдання перевірки справності, перевірки працездатності, перевірки правильності функціонування і пошуку несправностей є окремі випадки загальної задачі діагнозу технічного стану об'єкта.

На рис. 8 представлено безліч технічних станів об'єкта діагнозу умовно обмеженої замкнутої кривої, причому, справний стан позначено малим гуртком, а несправний стан - хрестиками.

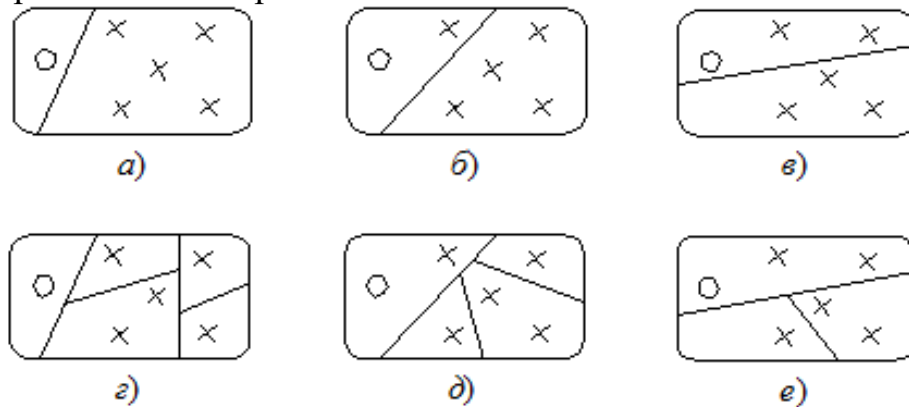


Рис.8 - Представлення задач діагнозу через розбиття технічних станів об'єкту

Результатами перевірки справності (рис. 8 а), перевірки працездатності (рис. 8 б) і перевірки правильності функціонування (рис. 8 в) є отримання двох підмножин технічних станів. Одне з них (ліве) містить або тільки справний стан (при перевірці справності), або крім справного стану також ті несправні стани, перебуваючи в яких об'єкт залишається працездатним або правильно функціонуючим. Друга підмножина містить або всі несправні стани (при перевірці справності), або такі, перебування в яких робить об'єкт непрацездатним або неправильно функціонуючим.

Результатами пошуку несправностей (рис. 8 г, д, е) є розбивки на класи не розрізняє між собою несправних станів друге підмножин. Число класів і, отже, число входять у них несправних станів (потужності класів) визначають досягається при пошуку ступінь деталізації місць і складу наявних (або підозрюваних на наявність) в об'єкті несправностей. Цю ступінь деталізації прийнято називати **глибиною пошуку або глибиною діагнозу**.

Зауважимо, що при перевірці правильності функціонування і при пошуку неполадки, що порушують правильне функціонування об'єкта, розбиття відносяться до певного (справжнього) моменту часу і тому можуть бути різними для раз-них моментів часу і різних режимів роботи об'єкта.

Таким чином, завданнями діагностування є завдання перевірки справності, працездатності і правильності функціонування об'єкта, а також завдання пошуку дефектів, що порушують справність, працездатність або правильність функціонування.

## 1.2 Системи тестового та функціонального діагностування

Діагностування технічного стану будь-якого об'єкта здійснюється тими чи іншими засобами діагностування (рис. 9).



Рис. 9 – Класифікація засобів діагностування

Засоби і об'єкт діагностування, взаємодіючи між собою утворюють систему діагностування.

Розрізняють системи **тестового і функціонального діагностування**.

У системах **тестового діагностування** (рис.10) на об'єкт подаються спеціально організовані тестові дії. В іншому випадку потрібна імітація умов функціонування об'єкта (зокрема, імітація робочих впливів).

Системи тестового діагностування необхідні для перевірки справності та працездатності, а також пошуку дефектів, що порушують справність і

працездатність об'єкта, і працюють тоді, коли об'єкт не застосовується за прямим призначенням.

Використання систем тестового діагностування при працюючому об'єкті також можливо, але при цьому тестові впливи можуть бути тільки такими, які не заважають нормальному функціонуванню об'єкта.

Для вирішення завдань тестового діагностування залучаються методи, засновані на результатах теорії чутливості тестового впливу при цьому є гармонійні вхідні сигнали. Методи, які отримали загальну назву методів інтегральної діагностики, засновані на аналізі перехідних процесів, що викликаються спеціальними вхідними впливами. Застосовуються для діагностування щодо простих «неподільних» об'єктів (наприклад, резисторів, конденсаторів та ін.)

Завдання побудови тесту полягає в тому, щоб знайти (обчислити, вибрати, призначити і ін.) Таку сукупність або послідовність вхідних впливів, при подачі якої на об'єкт діагностування (ОД), одержувані відповіді об'єкта в заданих контрольних точках дозволяють зробити висновок про технічний стан об'єкта .



Рис. 10 - Система тестового діагностування

Перевіряючі тести призначені для перевірки справності або працездатності об'єкта. Тести пошуку дефектів призначені для показу, і можливо, причин дефекту, що порушують справність або працездатність об'єкта.

При створенні систем діагностування не менш важливою задачею є задача вибору і розробки засобів реалізації тестів.

Засоби систем тестового діагностування містять дві основні частини - генератор тестових впливів і аналізатор відповідей об'єкта на ці впливи

А) «Класична» реалізація СТД:

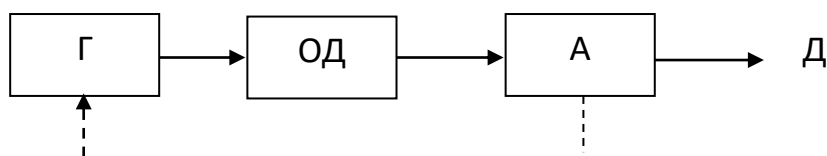


Рис.11 - Класична схема реалізації СТД

Г - генератор тестових впливів;

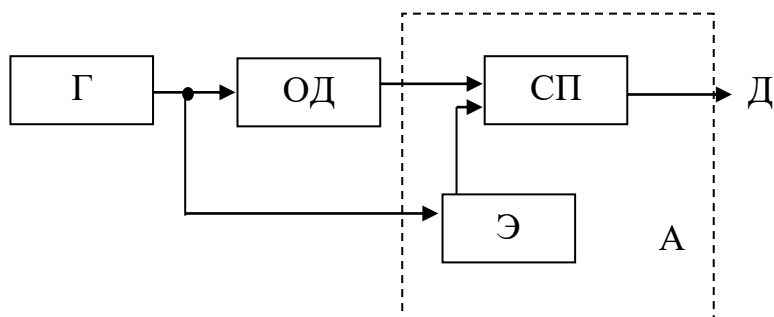
ОД - об'єкт діагностування;

А - аналізатор;

Д - Діагноз.

Г і А виконуються функціонально, можливо, конструктивно окремо. Функції Г полягають в тому, щоб в процесі роботи системи зберігати або генерувати тести і подавати останні на ОД. А - призначений для зберігання очікуваних відповідей об'єкта на тестові впливу, порівняння фактичних відповідей з очікуваними і для видачі Д (діагнозу).

Б)



СП - схема порівняння;

Е - еталон.

Там, де це можливо і доцільно, аналізатор можна виконати у вигляді сукупності еталона Е, що представляє собою свідомо справну копію об'єкта діагностування і схеми порівняння СП.

Гідність - виключається необхідність зберігання очікуваних відповідей об'єкта діагностування.

Недоліки - виникають турботи по створенню еталона і підтриманню його в справному стані.

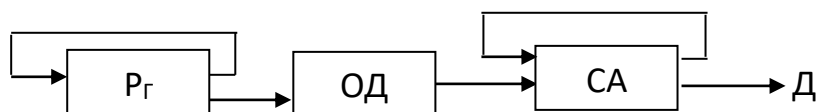
В)



РГ - реєстр зсуву зі зворотним зв'язком.

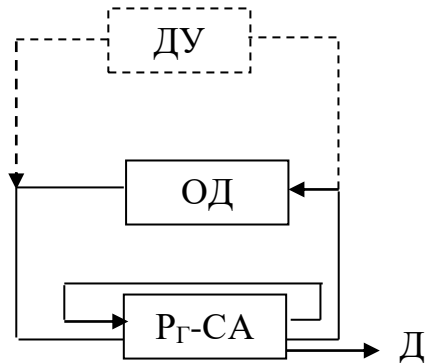
Використовується при діагностуванні дискретних об'єктів псевдовипадковими тестами. Тести генеруються реєстром зсуву РГ з зворотними зв'язками, що істотно скорочує витрати на апаратуру для реалізації генератора тестів, тому що не вимагається пам'ять для зберігання останніх.

Г)



СА - сигнатурні аналізатори.

З метою стиснення довгих вихідних послідовностей (відповідей дискретних об'єктів діагностування) застосовують сигнатурні аналізатори - реєстри зі зворотним зв'язком або лічильники.



Для дискретних об'єктів можна об'єднати функції генератора псевдовипадкових тестів і сигнатурного аналізатора в одному РГ-СА, з додаванням в ряді випадків додаткового пристрою ДУ, що забезпечує поліпшення якості генеруються тестів.

В автоматизованих системах діагностування частина функцій генератора тестів або аналізатора відповідей покладається на оператора. Для ОД, що працюють по змінній програмі (об'єкти обчислювальної техніки), генератори тестів і аналізатори відповідей повністю або частково реалізовані програмно.

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

Системи функціонального діагностування необхідні для перевірки правильності функціонування і для пошуку дефектів, що порушують правильне функціонування об'єкта.

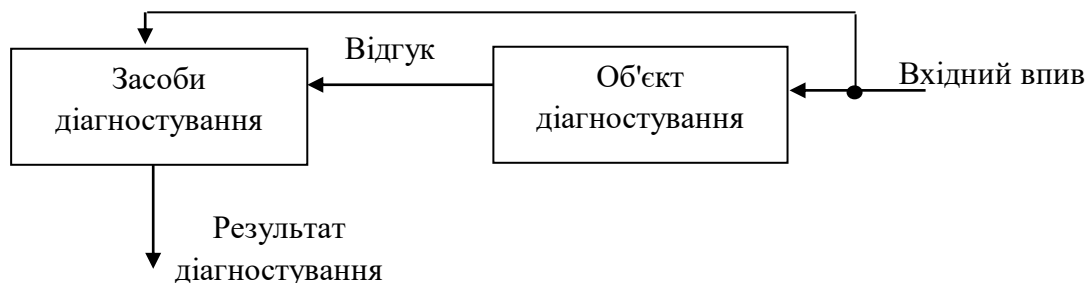


Рис. 12 - Система функціонального діагностування

У системах обох видів засоби діагностування сприймають відповіді об'єкта на вхідні (тестові чи робочі) впливу і видають результат діагностування, тобто ставлять діагноз:

- 1) об'єкт справний або несправний;
- 2) працездатний або непрацездатний;
- 3) функціонує правильно чи неправильно;
- 4) має такий-то дефект;
- 5) в об'єкті пошкоджена його складова частина;
- 6) тощо.

Система діагностування в процесі визначення технічного стану об'єктах реалізує певний алгоритм (тестового або функціонального) діагностування.

Алгоритм діагностування в загальному випадку складається з визначеною сукупності, так званих елементарних перевірок об'єкта, а також правил, що встановлюють послідовність реалізації елементарних перевірок та правил аналізу результатів останніх.

Кожна елементарна перевірка визначається своєю або робочою дією, що подається або надходять на об'єкт і складом контрольних точок, з яких знімаються відповіді об'єкта на цей вплив.

Результатом елементарної перевірки є конкретні значення відповідних сигналів об'єкта у відповідних контрольних точках.

Діагноз ставиться в загальному випадку за сукупністю отриманих результатів елементарних перевірок.

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

У завданнях тестового діагностування склади контрольних точок об'єкта часто визначені попередньо і вони однакові для всіх елементарних перевірок. У таких випадках вибирають тільки вхідні дії елементарних перевірок - це завдання побудови тестів.

У завданнях функціонального діагностування, навпаки, вхідні дії елементарних перевірок визначені заздалегідь робочим алгоритмів функціонування об'єкта і вибору підлягають тільки склади контрольних точок

При організації перевірки правильності функціонування або пошуку дефектів, що порушують правильне функціонування аналогових об'єктів, на основі допускового способу контролю параметрів завдання побудови алгоритмів діагностування зводиться до вибору складу контрольних точок.

Для вирішення однієї і тієї ж задачі діагностування (наприклад, перевірки справності) можна побудувати декілька алгоритмів, що розрізняються або складом елементарних перевірок, або послідовністю їх реалізації, або, нарешті, тим і іншим разом і тому, можливо, що вимагають різних витрат на їх реалізацію.



Звідси інтерес до розробки методів побудови оптимальних алгоритмів, потребуючих мінімальних витрат на їх реалізацію. У багатьох випадках це пов'язано з труднощами обчислень і тому часто задовольняються оптимізованими алгоритм діагностування, витрати на реалізацію яких якось зменшені, але не обов'язково мінімальні.

Для побудови алгоритмів діагностування формалізованими методами необхідно дані, які можна отримати шляхом аналізу моделей об'єктів. Крім того моделі об'єктів використовуються для формалізованого аналізу заданих (у тому числі по-прибудованих інтуїтивно, вручну) алгоритмів діагностування на повноту виявлення, на глибину пошуку дефектів.

Формалізованою моделлю об'єкта (або процесу) є його опис в аналітичній, графічній, табличній або іншій формі. Для простих об'єктів діагностування зручно користуватися так званими явними моделями, що містять поряд з описом об'єкта опис кожної з його несправних модифікацій. Неявна модель об'єкта діагностування передбачає наявність лише одного опису, наприклад справного об'єкта, формалізованих моделей дефектів і правил отримання по заданому опису та за моделями дефектів описів всіх несправних модифікацій об'єкта.

Моделі бувають **функціональні та структурні**.

**Функціональні моделі** дозволяють вирішувати завдання перевірки працездатності і правильності функціонування об'єкта (вони відображають тільки виконувані об'єктом функції, визначені щодо робочих входів і робочих виходів об'єкта).

**Структурні моделі** забезпечують можливість перевірки справності (у загальному випадку) і пошуку дефектів з глибиною більшою, ніж об'єкт в цілому.

Нарешті, моделі об'єктів діагностування можуть бути детермінованими і ймовірносними. До ймовірносному поданні найчастіше вдаються при неможливості або невмінні описати детерміновано поведінку об'єкта.

### 1.3 Технічна діагностика, генезис та прогнозування

Оцінюючи область, що охоплюється технічним діагностуванням, розглянемо три типи завдань для визначення технічного стану об'єкта:

а) до першого типу відносяться завдання визначення технічного стану, в якому знаходиться об'єкт в даний момент часу. *Це завдання діагностування.*

б) завдання другого типу - прогноз технічного стану, в якому виявиться об'єкт в певний момент в майбутньому. *Це завдання прогнозування.*

в) до третього типу відносяться завдання визначення технічного стану, в якому знаходився об'єкт в певний момент у минулому. *Це завдання генезу.*

Відповідно завдання першого типу відносяться до технічної діагностики, другого типу - до технічної прогностики (до технічного прогнозування), третього типу - до технічної генетиці.

Завдання технічної генетики виникають, наприклад, у зв'язку з розслідуванням аварій, їх причин, коли технічний стан об'єкта в розглядається час відрізняється від стану, в якому він був у минулому. Ці завдання вирішуються шляхом визначення можливих чи вірогідних передісторії, що ведуть в даний стан об'єкта.

До завдань технічної прогностики належать, наприклад, завдання, пов'язані з визначенням терміну служби об'єкта або з призначенням періодичності його профілактичних перевірок і ремонтів. Теоретично завдання прогнозування ставиться таким чином.

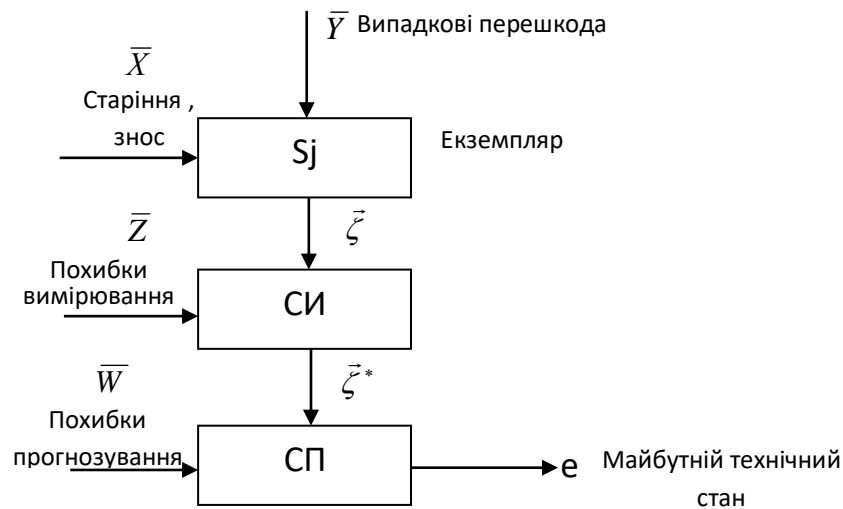


Рис. 13 - Однолінійна система прогнозування

На технічний стан об'єкта впливають фактори,  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$ ,  $\bar{Y}$ , де - випадкові перешкоди (внутрішні та зовнішні),  $\bar{X}$  - старіння, знос (необоротні процеси).

Для вимірювання обрана сукупність  $\{\zeta_l, l=1,2,\dots,n\}$  параметрів об'єкта (вектор  $\zeta$ ), щодо яких передбачається, що вони істотно залежать від  $\bar{X}$  і дозволяють передбачити майбутнє технічний стан об'єкта  $e$ . Ці параметри називають *прогнозуючими*. На значення прогнозуючих параметрів в загальному випадку накладають перешкоди  $\bar{Y}$  (випадкові перешкоди). При вимірюванні параметрів можливі похибки вимірювань (вектор  $\bar{Z}$ ), внаслідок чого замість  $\zeta$  вектора дійсних значень виходить вектор  $\zeta^* \neq \zeta$ . На результати прогнозування, можливо, впливають похибки прогнозування (вектор  $\bar{W}$ ).

Таким чином, майбутній стан  $e$  об'єкта залежить від декількох випадкових векторних аргументів:

$$e = f(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \bar{W}) \quad (1)$$

Залежність (1) є моделлю процесу прогнозування. Імовірнісний характер цієї моделі визначається тим, що аргументи  $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \bar{W})$  є випадковими

функціями. Отримати залежність (1) в явній аналітичній формі для складних об'єктів практично неможливо.

Найбільш простий була б явна аналітична модель виду:

$$e = f_x(\bar{X}), \quad (2)$$

в якій відсутня залежність майбутнього технічного стану від випадкових перешкод і похибок. Залежність (2) є ідеальною.

Прагнучи до "ідеальної" моделі (2), застосовують різні способи математичної обробки моделей виду (3) і (4) з метою зменшення залежності остаточних результатів вимірювання прогнозуючих параметрів і прогнозу від випадкових функцій  $\bar{Y}, \bar{Z}$  і  $\bar{W}$ .

$$\bar{\xi}_l^* = \varphi(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}), \quad l = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

і задачу отримання *прогнозу* (результату прогнозування) по моделі виду

$$e = \psi(\bar{\xi}^*, \bar{W}). \quad (4)$$

Ці способи полягають, головним чином, у згладжуванні випадкових процесів застосуванням операторів згладжування, таких, як оператори математичного очікування, поточного середнього, експоненціального згладжування, і деяких інших. Для застосування операторів згладжування необхідно знати характеристики згладжувати випадкових процесів, наприклад ймовірності появи величин  $\bar{Y}, \bar{Z}$  і  $\bar{W}$ , інтервалів згладжування та ін., Що пов'язане з отриманням і обробки великих обсягів апріорної інформації, що практично не завжди можливо.

Аналітичне подання моделі (4) утруднено навіть у тому випадку, коли відомі значення прогнозуючих параметрів  $\bar{\xi}^*$  у минулі періоди часу, задані діапазони їх допустимих значень і можна знехтувати похибками  $\bar{W}$ . Завдання вибору опису процесу зміни в часі робочої точки (кінець вектора  $\bar{\xi}^*$ ) в області допустимих значень прогнозуючих параметрів, тощо. Вибір моделі процесу еволюції технічного стану об'єкта прогнозування, залишається завжди. Відносно просто прогноз може бути отриманий градієнтним або операторних методами, коли процес еволюції може бути описаний лінійною або так званої центральної детермінованою моделлю, що, однак, не завжди допустимо в реальних практичних ситуаціях.

Завдання достовірного та сталого вимірювання значень прогнозуючих (як і будь-яких інших) параметрів, тощо. Вибору та обробки моделі (3), є типовою для теорії і практики вимірювання. Специфічними для технічного прогнозування є задача побудови та обробки моделі (4) з метою отримання прогнозу, а також задачі вибору прогнозуючих параметрів. Для вирішення завдання вибору сукупностей прогнозуючих параметрів не існує

формалізованих методів. Навіть для простих об'єктів прогнозуючі параметри вибираються інтуїтивно на основі знання функціональних, структурних, фізико-хімічних та інших властивостей конкретних об'єктів з урахуванням умов експлуатації і т. п.

Вибір та вимірювання прогнозуючих параметрів не є необхідним, оскільки при прогнозуванні в кінцевому підсумку цікавить залежність (2), де представляють фактори, що визначають незворотні зміни в об'єкті прогнозування. Проте встановити функціональну зв'язок в явному вигляді між технічним станом  $e$  і фактором у загальному випадку не представляється можливим. Більше того, вимірювання значень вектора вельми складно, якщо взагалі можливо. Тому зв'язок (2) устанавлюють опосередковано через залежність (3) шляхом вимірювання прогнозуючих параметрів, щодо яких передбачається, що їх значення змінюються у часі через вплив факторів, і потім через залежність (4), екстраполюючи значення прогнозуючих параметрів на майбутні періоди часу.

Таким чином, практична реалізація теоретично строгих постановок задач прогнозування технічного стану складних об'єктів зустрічається з труднощами і обмеженнями. Цим, мабуть, пояснюється слабе і повільне впровадження методів і засобів прогнозування в практику.

Апріорні дані про технічні характеристики об'єкта можна отримувати від засобів функціонального і тестового діагностування. Тим самим при достатньо "хороших" засобах функціонального і тестового діагностування та за умови організації накопичення та обробки видаваної ними інформації є можливість в будь-який період часу життєвого циклу конкретного екземпляра об'єкта мати не тільки абсолютні фактичні значення інтенсивності відмов і прогнозуючих параметрів, але також динаміку їх зміни, наприклад, у вигляді кривих.

При наявності таких кривих можна емпірично вибрати критерій придатності і призначити його граничне значення, після досягнення якого подальше використання даного екземпляра об'єкта або неможливо, або не виправдано за техніко-економічних міркувань. Вдалий вибір критерію придатності дозволяє використовувати його значення також для управління періодичністю тестового діагностування (тобто профілактики та ремонту) об'єкта. Це і буде реалізацією індивідуального прогнозування технічного стану об'єкта і тим самим обслуговування його станом. Найпростішими критеріями придатності можуть бути, наприклад, абсолютні значення або швидкості зміни абсолютних значень інтенсивності відмов, або деяких (прогнозуючих) параметрів. Звичайно, найбільш важкими є питання обґрунтованого призначення значення критеріїв придатності, а також вибору прогнозуючих параметрів. Теоретично обґрунтовані відповіді на ці питання вдається отримати далеко не завжди і тільки для дуже простих об'єктів. У більшості випадків можуть виявитися методи експертних оцінок.

## 1.4 Якість і надійність

*Якість продукції* є сукупність її властивостей, що обумовлюють придатність продукції задовольняти певні потреби у відповідності до її призначення. Серед показників якості продукції важливе місце займають показники її надійності (безвідмовності, довговічності, зберігання, ремонтпридатності). Наявність або поява дефектів, що можливо на будь-якій стадії життя продукції (об'єктів), негативно впливають на її якість та надійність.

У проблемі надійності можна виділити аспекти, які визначаються принципами, методами і засобами забезпечення і підтримки тих чи інших показників надійності.

Фізичний аспект, який є основним для неподільних об'єктів, охоплює вибір, вдосконалення і створення нових матеріалів, пошук і реалізацію нових фізичних принципів роботи, нових видів енергії і способів її перетворення, завдання сприятливих умов застосування об'єктів, вдосконалення технології виробництва і конструкції і т. п.

Апаратурний аспект охоплює принципи і методи організації і використання апаратурною (матеріальною) надмірністю. Це - мажорирування (зокрема, дублювання і троїровання), розподілення резервування, статичне і динамічне резервування, ненавантаження і навантажений резерв, і т.п.

Інформаційний аспект надійності включає в себе принципи і методи отримання і використання надлишкової інформації, що надходить на об'єкт, а також інформації, що передається, зберігається і видається об'єктом. Це, наприклад, застосування надлишкових кодів, що виправляють помилки, і багатократне повторення в часі операцій передачі і обробки інформації. До інформаційного аспекту слід віднести також питання, пов'язане з організацією надійного (зокрема, нечутливого до помилок) матзабезпечення обчислювальних машин.

Метою заходів, що виконуються в рамках фізичного аспекту надійності, є створення таких об'єктів, які якумога менше схильні до появи в них дефектів як при виробництві, так і при експлуатації. Але уникнути виникнення дефектів в більш-менш складних об'єктах, особливо при тривалій їх експлуатації, не можливо.

Заходи апаратурного та інформаційного аспектів надійності спрямовані на те, щоб виникаючі в об'єктах дефекти не приводили до їх неправильної роботи. Такі заходи «маскують» дефекти - через апаратурну і інформаційну надмірності дефекти не проявляються і, отже, не виявляються. Поки виявлених дефектів «мало», об'єкт може функціонувати правильно, однак у міру накопичення дефектів захисні властивості, якими володів об'єкт спочатку завдяки введеної в нього надмірності, поступово втрачаються.

Головними показниками якості систем діагностування є гарантовані ними повнота виявлення і глибина пошуку дефектів. До числа «вторинних» показників якості систем діагностування можна віднести витрати на апаратуру,

час, енергію, а також показники надійності засобів діагностування, в тому числі достовірність діагнозу. Не виключені ситуації, коли зазначені витрати виступають як органічних обмежень. У таких ситуаціях можливо вимушене зниження як бажаної повноти виявлення, так і бажаної глибини пошуку дефектів.

#### **1.4.1 Зв'язок технічної діагностики з надійністю і якістю**

**Якість продукції** є сукупність її властивостей, що обумовлюють придатність продукції задовольняти певні потреби відповідно до її призначення. Серед показників якості продукції важливе місце займають показники її надійності (безвідмовності, довговічності, зберігання, ремонтпридатності). Наявність або поява дефектів, що можливо на будь-якій стадії життя продукції (об'єктів), негативно позначається на її якості та надійності.

У проблемі надійності можна виділити аспекти, які визначаються принципами, методами і засобами забезпечення і підтримки тих чи інших показників надійності.

**Фізичний аспект**, що є основним для неподільних об'єктів, охоплює вибір, вдосконалення і створення нових матеріалів, пошук і реалізацію нових фізичних принципів роботи, нових видів енергії і способів її перетворення, завдання сприятливих умов застосування об'єктів, вдосконалення технології виробництва та конструкції і т. п.

**Апаратурний аспект** охоплює принципи і методи організації і використання апаратурною (матеріальною) надмірності. Це - мажорирування (зокрема, дублювання і троювання), розподілене резервування, статичне і динамічне резервування, ненавантажений і навантажений резерв, і т. п.

**Інформаційний аспект** надійності включає в себе принципи і методи отримання і використання надлишкової інформації, що надходить на об'єкт, а також переданої, що переробляється, зберігається та видається об'єктом. Це, наприклад, застосування надлишкових кодів, що виправляють помилки, і багаторазове (зокрема, дворазове) повторення в часі операцій передачі та обробки інформації. До інформаційного аспекту слід віднести також питання, пов'язані з організацією надійного (зокрема, нечутливого до помилок) забезпечення обчислювальних машин.

Метою заходів, виконуваних у рамках фізичного аспекту надійності, є створення таких об'єктів, які якомога менше схильні до появи в них дефектів як при виробництві, так і при їх експлуатації. Проте уникнути виникнення дефектів в більш-менш складних об'єктах, особливо при тривалій їх експлуатації, не можна.

Заходи апаратурного та інформаційного аспектів надійності спрямовані на те, щоб виникаючі в об'єктах дефекти не приводили до їх неправильної роботи. Такі заходи "маскують" дефекти - через апаратурною та інформаційною надмірності дефекти не виявляються і, значить, не виявляються. Поки

невиявлених дефектів "мало", об'єкт може функціонувати правильно, однак у міру накопичення дефектів захисні властивості, якими володів об'єкт спочатку завдяки введеної в нього надмірності, поступово втрачаються. Може наступити така ситуація, при якій будь-який "новий" дефект основної і резервної апаратури, в тому числі будь-яке "нове" спотворення основної або резервної інформації, викликатиме відмову (неправильну роботу) об'єкта. У зазначеній ситуації безвідмовність (тобто один з основних показників надійності) резервованого об'єкта може виявитися навіть нижче, ніж його безвідмовність при без надлишкової реалізації.

Таким чином, необхідно своєчасно виявляти, здійснювати пошук і усувати дефекти в об'єктах, для яких істотна правильна їх робота з заданими або необхідними показниками надійності. Для неремонтуємих як безнадлишкових, так і резервованих об'єктів досить забезпечити виявлення їх так називаються істотних дефектів, тобто дефектів, що порушують правильну роботу об'єкта-тов. Для ремонтваних об'єктів необхідно здійснювати також пошук дефектів, тощо. Точне або хоча б наближене вказівку пошкодженої області апаратури об'єкта і, можливо, характеру дефекту. Для ремонтваних резервованих об'єктів необхідні виявлення і пошук як істотних, так і "несуттєвих" дефектів, з тим щоб виключити процес накопичення дефектів і втрати захисних функцій резерву.

Для багатьох видів технічних об'єктів найбільший час витрачається на пошук їх дефектів. Формалізація та автоматизація процесів пошуку дефектів дозволяє різко скоротити ці витрати і тим самим істотно поліпшити такий важливий для багатьох об'єктів показник надійності, як коефіцієнт готовності, а також інші показники технічного обслуговування і ремонту.

Сукупність принципів, методів і засобів виявлення і пошуку дефектів або, іншими словами, організація діагностичного забезпечення об'єктів при їх виготовленні-ванні та експлуатації становить основу діагностичного аспекту надійності. В рамках діагностичного аспекту повинні вирішуватися завдання визначення технічного стану об'єктів, тобто організації перевірки справності, працездатності, правильності функціонування і пошуку дефектів об'єктів в процесі їх виробництва та експлуатації.

При забезпеченні надійності складних об'єктів багато з зазначених аспектів, як правило, взаємопов'язані. Так, при інформаційному та діагностичному аспектах майже завжди потрібні додаткові апаратурні і енергетичні витрати, а введення апаратурною надмірності зазвичай супроводжується появою нових каналів передачі інформації і додатковим споживанням енергії. Характерним прикладом об'єктів зі спільним використанням усіх зазначених аспектів надійності є сучасні обчислювальні системи, нечутливі до відмовою.

Діагностичне забезпечення, як і всі інші заходи з підвищення надійності, має закладатися на стадії проектування об'єкта, забезпечуватися на стадії виробництва і підтримуватися на стадії експлуатації. Відповідальність за

діагностичного забезпечення несе розробник об'єкта, однак ця вимога далеко не завжди виконується, в результаті чого об'єкти виявляються погано пристосованими до діагностування їх технічного стану, а виробники і експлуатаційники ви-потреби займатися розробкою і створенням малоефективних засобів "приставний діагностики», не завжди забезпечують повноту виявлення дефектів і належну глибину їх пошуку.

Ідеальні повнота виявлення і глибина пошуку дефектів складних об'єктів не завжди досяжні (або принципово через неможливість отримання необхідної інформації, або по техніко-економічних міркувань). Однак особливо небажана безконтрольна неповнота виявлення дефектів, коли невідомо, які віз-можна (або хоча б ймовірні) дефекти не виявляються. Тому, коли відсутні або не застосовуються формалізовані методи побудови алгоритмів діагностування, необхідно максимально прагнути до формальної перевірки ступеня повноти виявлення та глибини пошуку, забезпечується запропонованими неформальними рівнями завдань діагностування. Радикальним і ефективним засобом такої формальної перевірки є моделювання поведінки об'єкта як в справному стані, так і при наявності в ньому розглянутих дефектів (таке моделювання називають діагностичне). Перевагу слід віддавати моделюванню на обчислювальних машинах. Для машинного моделювання потрібні формальні моделі справного об'єкта і моделі його дефектів, а також відповідне матзабезпечення.

Неповнота виявлення дефектів при перевірці справності (після виготовлення або ремонту об'єкта) або при перевірці працездатності (при профілактиці) еквівалентного фактичного зниження показників безвідмовності (зокрема, імовірності безвідмовної роботи), довговічності (ресурсу) і зберігання об'єкта. Якщо зазначена неповнота враховується при розрахунках показників надійності, то отримані значення останніх будуть реальними (в межах достовірності вихідних даних і точності використовуваних методів розрахунку). Принципова помилка допускається тоді, коли незнанням ступеня повноти виявлення дефектів нехтують, вважаючи її ідеальною. У останнього випадку помилка буде складатися в завищенні показників надійності, що, звичайно, небажано або навіть неприпустимо. Крім того, наслідком неповноти виявлення дефектів (при будь-якої перевірці - справності, працездатності або правильності функціонування) може бути своєчасно не виявлена неправильна робота об'єкта в процесі його застосування за призначенням, що, в свою чергу, може призвести до серйозних наслідків.

Для реалізації діагностичного забезпечення в загальному випадку потрібно ввести апаратну та інформаційну надмірність, а також додатково затратити енергію. За цим розробник, який бажає мати хороше діагностичне забезпечення для проєктованого об'єкта, повинен усвідомлювати, що для цього будуть потрібні витрати, які повинні визначатися техніко-економічними міркуваннями або навіть розрахунками, але які почнуть окупатися негайно - в процесі виготовлення об'єкта і при його наладку. Впершу чергу, розробнику



належить розглянути всі стадії і етапи життя об'єкта і для кожного такого етапу вирішити питання про необхідність вирішення тієї чи іншої задачі діагностування, вибрати або призначити необхідну повноту виявлення і глибину пошуку можливих (імовірних, допустимих) дефектів об'єкта. За цим повинна слідувати розробка і створення відповідних систем діагностування.

Головними показниками якості систем діагностування є гарантуємо-мі ними повнота виявлення і глибина пошуку дефектів. До числа "показників якості систем діагностування можна віднести витрати на апаратуру, час, енергію, а також показники надійності засобів діагностування, в тому числі достовірність діагнозу. Не виключені ситуації, коли зазначені витрати виступають як обов'язкових обмежень. В таких ситуаціях можливо вимушене зниження, як бажаної повноти виявлення, так і бажаної глибини пошуку дефектів.

Загальновизнаним є наявність принципової зв'язку та взаємного впливу показників надійності об'єктів, з одного боку, і характеристик їх систем діагностування, з іншого. Однак потрібна розробка конкретних інженерних методів ко-кількісних розрахунків, що дозволяють отримувати вихідні дані для проектування систем діагностування, виходячи із заданих вимог по надійності, допустимих на діагностування, а також умов застосування і технічного обслуговування об'єктів. Завдання створення таких методів особливо ускладнена тією обставиною, що і обчислювані показники надійності та інші умови та обмеження, що впливають на організацію процесів діагностування, за своєю природою істотно відмінні від вихідних даних, необхідних для проектування систем діагностування і вельми опосередковано пов'язані з характеристиками останніх.

Наприклад, склад дефектів, що підлягають тестового виявленню і пошуку, пов'язаний з поточним значенням ймовірності перебування об'єкта в справному або працездатному стані, з періодичністю тестового діагностування, з допустимим часом відновлення об'єкта і т. п. Час реалізації перевіряючого тесту або тесту пошуку дефектів, т. е. швидкодію засобів діагностування, залежить від допустимих витрат, від конструктивних особливостей об'єкта і також від часу відновлення. Аналогічні залежності мають місце для систем і засобів функціонального діагностування. На глибину пошуку дефектів впливають не тільки конструктивне виконання об'єкта, його структура і заданий час відновлення, але і склад запасних частин для ремонту.

Для правильної організації проектування систем діагностування такі основні вихідні дані, як склад виявляються дефектів і глибина їх пошуку, повинні бути задано не "в середньому", а у вигляді абсолютно конкретних переліків дефектів і змінних складових частин об'єкта.

Впровадження в практику проектування зазначених вище методів кількісних розрахунків в певній мірі справа майбутнього. В даний час доцільно погоджувати показники надійності об'єктів і характеристики їх систем діагностування шляхом ітеративного розгляду ряду варіантів. При цьому

корисними і ефективними є машинні системи моделювання надійності, які забезпечують можливість обліку характеристик діагностичного забезпечення модельованих об'єктів.

#### 1.4.2 Основні поняття надійності. Класифікація відмов

**Надійність** - властивість об'єкта виконувати задані функції, зберігаючи в часі і в заданих межах значення встановлених експлуатаційних показників.

**Об'єкт** - технічний виріб певного цільового призначення, що розглядається в періоди проектування, виробництва, випробувань і експлуатації.

Об'єктами можуть бути різні системи і їх елементи.

**Елемент** - найпростіша складова частина виробу, в задачах надійності може складатися з багатьох деталей.

**Система** - сукупність спільно діючих елементів, призначена для самостійного виконання заданих функцій.

Поняття елемента і системи трансформуються в залежності від поставленого завдання. Наприклад, верстат, при встановленні його власної надійності розглядається як система, що складається з окремих елементів - механізмів, деталей і т.п., а при вивченні надійності технологічної лінії - як елемент.

Надійність об'єкта характеризується наступними основними станами та подіями.

**Справність** - стан об'єкта, при якому він відповідає всім вимогам, встановленим нормативно-технічною документацією (НТД).

**Працездатність** - стан об'єкта, при якому він здатний виконувати задані функції, зберігаючи значення основних параметрів, встановлених НД.

Основні параметри характеризують функціонування об'єкта при виконанні поставлених завдань.

Поняття справність ширше, ніж поняття працездатність. Працездатний об'єкт зобов'язаний задовольняти лише тим вимоги НТД, виконання яких забезпечує нормальне застосування об'єкта за призначенням. Таким чином, якщо об'єкт непрацездатний, то це свідчить про його несправність. З іншого боку, якщо об'єкт несправний, то це не означає, що він непрацездатний.

**Граничний стан** - стан об'єкта, при якому його застосування за призначенням неприпустимо або недоцільно.

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

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

Для деяких об'єктів граничний стан є останнім в його функціонуванні, тобто об'єкт знімається з експлуатації, для інших - певною фазою в

експлуатаційному графіку, що вимагає проведення ремонтно-відновлювальних робіт.

У зв'язку з цим, об'єкти можуть бути:

- **невідновлювані**, для яких працездатність в разі виникнення відмови, не підлягає відновленню;

- **відновлювані**, працездатність яких може бути відновлена, в тому числі і шляхом заміни.

До числа невідновлювальних об'єктів можна віднести, наприклад: підшипники кочення, напівпровідникові вироби, зубчасті колеса, тощо. Об'єкти, що складаються з багатьох елементів, наприклад, верстат, автомобіль, електронна апаратура, є відновлюваними, оскільки їх відмови пов'язані з ушкодженнями одного або небагатьох елементів, які можуть бути замінені.

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

**Відмова** - подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкта.

### **Класифікація і характеристики відмов**

За типом відмови підрозділяються на:

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

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

За своєю природою відмови можуть бути:

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

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

Основні ознаки класифікації відмов:

- характер виникнення;
- причина виникнення;
- характер усунення;
- наслідки відмов;
- подальше використання об'єкта;
- легкість виявлення;
- час виникнення.

Розглянемо докладніше кожен з класифікаційних ознак:

#### **характер виникнення:**

- раптова відмова - відмова, що виявляється в різкій (миттєвому) зміні характеристик об'єкта;
- поступова відмова - відмова, що відбувається в результаті повільного, поступового погіршення якості об'єкта.

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

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

**Причина виникнення:**

- конструкційна відмова, викликана недоліками і невдалою конструкцією об'єкта;

- виробнича відмова, пов'язана з помилками при виготовленні об'єкта через недосконалість або порушення технології;

- експлуатаційна відмова, викликана порушенням правил експлуатації.

**Характер усунення:**

- стійка відмова;

- виникає/зникає відмова. наслідки відмови: легка відмова (легкоусунена);

- середня відмова (що не викликає відмови суміжних вузлів - вторинні відмови);

- важка відмова (що викликає вторинні відмови або приводить до загрози життю і здоров'ю людини).

**Подальше використання об'єкта:**

- повна відмова, що виключають можливість роботи об'єкта до їх усунення;

- часткова відмова, при якій об'єкт може частково використовуватися.

**Легкість виявлення:**

- очевидна (явна) відмова;

#### Час виникнення:

- прихована (неявна) відмова.
- приробоча відмова, що виникає в початковий період експлуатації;
- відмова при нормальній експлуатації;
- ізносова відмова, викликана незворотними процесами зносу деталей, старіння матеріалів та ін.

### 1.4.3 Складові надійності

Надійність є комплексною властивістю, що включає в себе в залежності від призначення об'єкта або умов його експлуатації ряд простих властивостей:

- безвідмовність;
- довговічність;
- ремонтопридатність;
- збереженість.

**Безвідмовність** - властивість об'єкта безупинно зберігати працездатність протягом деякого напрацювання або протягом деякого часу.

**Напрацювання** - тривалість або обсяг роботи об'єкта, яка вимірюється в будь-яких незменшуваних величинах (одиниця часу, число циклів навантаження, кілометри пробігу, тощо).

**Довговічність** - властивість об'єкта зберігати працездатність до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонтів.

**Збереженість** - властивість об'єкта безупинно зберігати необхідні експлуатаційні показники протягом (і після) терміну зберігання і транспортування.

Залежно від об'єкта надійність може визначатися усіма перерахованими властивостями або частиною їх. Наприклад, надійність колеса зубчастої передачі, підшипників визначається їх довговічністю, а верстата - довговічністю, безвідмовністю і ремонтопридатністю.

#### Основні показники надійності

Показник надійності кількісно характеризує, якою мірою даному об'єкту притаманні певні властивості, що зумовлюють надійність. Одні показники надійності (наприклад, технічний ресурс, термін служби) можуть мати розмірність, ряд інших (наприклад, ймовірність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності) є безрозмірними.

Розглянемо показники складової надійності - довговічність.

**Технічний ресурс** - напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або відновлення експлуатації після ремонту до настання граничного стану.

Строго кажучи, технічний ресурс може бути регламентований в такий спосіб: до середнього, капітального, від капітального до найближчого середнього ремонту, тощо. Якщо регламентація відсутня, то мається на увазі ресурс від початку експлуатації до досягнення граничного стану після всіх видів ремонтів.

Для невідновлювальних об'єктів поняття технічного ресурсу і напрацювання до відмови збігаються.

**Призначений ресурс** - сумарне напрацювання об'єкта, при досягненні якої експлуатація повинна бути припинена незалежно від його стану.

**Термін служби** - календарна тривалість експлуатації (в тому числі, зберігання, ремонт, тощо). Від її початку до настання граничного стану.

На рис. 14 приведена графічна інтерпретація перерахованих показників, при цьому:

$t_0 = 0$  - початок експлуатації;

$t_1, t_5$  - моменти відключення з технологічних причин;

$t_2, t_4, t_6, t_8$  - моменти включення об'єкта;

$t_3, t_7$  - моменти виводу об'єкта в ремонт, відповідно, середній і капітальний;

$t_9$  - момент припинення експлуатації;

$t_{10}$  - момент відмови об'єкта.

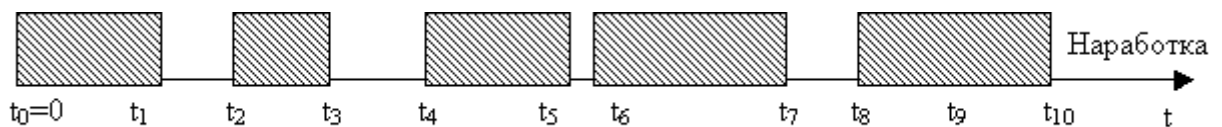


Рис.14 – Графічна інтепретація показників надійності

$$T_P = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_8).$$

призначений ресурс

$$T_H = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8).$$

Термін служби об'єкта  $T_C = t_{10}$ .

Для більшості об'єктів електромеханіки як критерій довговічності найчастіше використовується технічний ресурс.

### Контрольні питання:

1. У чому полягає поняття надійності як властивості об'єкта?

2. Перелічіть і дайте визначення основних станів і подій, якими характеризується надійність?
3. У чому спільність і відмінності станів «справність» і «працездатність» об'єкта?
4. За яких умов настає граничний стан об'єкта?
5. Якими можуть бути об'єкти по здатності до відновлення працездатного стану?
6. Якими можуть бути відмови по типу і природу походження?
7. Перерахуйте основні ознаки класифікації відмов?
8. Перелічіть і дайте визначення властивостей (складових) надійності?
9. Дайте визначення показника надійності?
10. Перелічіть і поясніть показники довговічності?

## **2. ОСНОВНІ НАПРЯМКИ КОНСТРУЮВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ**

Розвиток сучасної радіоелектронної апаратури (РЕА) базується на досягненнях мікроелектроніки, що забезпечує при багатосерійному випуску мікроелектронних інтегральних схем (ІС) різке зниження вартості, габаритних розмірів, маси вузлів і блоків апаратури і підвищення надійності. Можливість широкого запровадження уніфікації та стандартизації дозволяє підвищити якість апаратури при одно-тимчасове скорочення часу і витрат на її проектування, виготовлення і випробування. Процес розвитку РЕА обумовлений вимогами постійного ускладнення виконання функціональних завдань і розширенням областей застосування. При цьому функціональна складність виробів за кожне останнє п'ятиріччя збільшується приблизно в десять разів. Постійно зростають ступінь інтеграції та апаратурна складність, оцінювані числом схемних і активних елементів в електронному виробі.

Етапи розвитку РЕА прийнято характеризувати зміною поколінь, основною відмінною ознакою яких є елементна база і метод конструювання. У першому поколінні - електронна лампа, великогабаритні навісні електрорадіоелементи і блоковий метод; у другому - транзистор, мініатюрні елементи і модульний метод; в третьому - ІС з невеликим ступенем інтеграції (до 100-1000 елементів на корпус) і функціонально-вузловий метод; в четвертому - великі (ВІС) і надвеликі (НВІС) інтегральні схеми з числом елементів від десятків до сотень тисяч, функціональні компоненти і функціонально-вузловий метод із застосуванням мікрозбірок. Практично починаючи з апаратури другого покоління в конструюванні РЕА знаходить широке застосування і розвиток модульний метод із застосуванням планарної технології друкованого монтажу, що дозволяє збільшити надійність, поліпшити

експлуатаційні характеристики і технологію виготовлення функціональних вузлів і модулів апаратури.

Аналіз сучасного стану РЕА різного призначення, а також перспектив її розвитку показує, що особливо важливими є наступні напрямки конструювання:

- Традиційне конструювання та компоновка із застосуванням ІС і мікрозбірок в корпусах на друкованих платах;

- Розвивається конструювання друкованих плат підвищеної інтеграції з при-трансформаційних змін технології монтажу на поверхню;

- Компоновка мікроелектронних модулів з використанням безкорпусних мікрозбірок, БІС і НВІС на великоформатних, в тому числі металевих, підкладках.

Найбільш ефективний шлях розвитку і вдосконалення РЕА пов'язаний з комплексною мікромініатюризацією, основним завданням якої є зменшення маси, обсягу, споживаної потужності, вартості, інтенсивності відмов на одиницю ви-виконуваних функцій. Комплексна мікромініатюризація в широкому сенсі повинна забезпечувати системний підхід до застосування в РЕА всіх засобів мікроелектроніки, що відображає впровадження нових принципів створення апаратури на мікросхемах понад-високого ступеня інтеграції і розробок математичного та апаратурного забезпечення для автоматизованих систем проектування, конструювання, виготовлення і контролю.

В даний час вже реально ставиться завдання створення автоматизованих підприємств з проектування та виробництва РЕА на базі застосування загальної мережі, що включає в себе системи автоматизованого проектування (САПР), автоматичного монтажу друкованих плат, автоматизованих систем контролю, випробувань і в підсумку - управління виробництвом.

Можливість автоматизації конструювання та уніфікації виробів РЕА ґрунтується на функціонально-вузловому методі компоновання, при якому всі елементи раз-розміщуються на одній площині друкованої плати. Суттєвим кроком у цьому напрямку стало впровадження координатної сітки, співвіднесені зі сторонами друкованої плати. Поліпшенню компоновки плат сприяє прийнята прямокутна форма корпусів ІС і БІС. Стандартний крок розташування висновків ІС, що співпадає з кроком координатної сітки друкованих плат, також сприяє автоматизації їх проектування і компоновання. Аналогічні принципи конструювання реалізуються при проектуванні і компонованні мікрозбірок з безкорпусними мікросхемами і компонентами.

Для подальшого аналізу особливостей вимірювання електричних сигналів в елементів друкованих плат розглянемо способи установки елементів на плату і основні співвідношення їх розмірів.

При проектуванні друкованих плат зазвичай вибирається стандартний крок координатної сітки 2.5; 1.25 або 0.625 мм. Відповідно до ГОСТ 17467-79 корпусу ІС діляться на п'ять типів, які, в свою чергу, за габаритними і



приєднувальними розмірами поділяються на типорозміри, кожному з яких присвоюється свій шифр. Для всіх типів прямокутних корпусів ІС крок позицій зовнішніх висновків або вивідних майданчиків також вибирається з ряду розмірів 2.5; 1.25 або 0.625 мм.

Число зовнішніх висновків в корпусах ІС і БІС коливається звичайно в межах від 8 до 48 і більше.

Для металокерамічних і метало-скляних прямокутних корпусів ІС і БІС планарні зовнішні висновки мають крок 1.25 мм, а розміри поперечного перерізу видів залежно від типорозміру корпусу змінюються в межах від  $a \times b = 0.47 \times 0.23$  мм до  $a \times b = 0.59 \times 0.37$  мм. Для пластмасових корпусів ІС і БІС з кроком зовнішніх висновків 2.5 мм розміри поперечного перерізу висновків лежать в межах від  $a \times b = 1.2 \times 0.21$  мм до  $a \times b = 1.5 \times 0.36$  мм. Ширина друкованих провідників на платах може вимірюватися в значно ширшому діапазоні, але, як правило, не менше 0.25-0.3 мм. Мікросхеми з пластмасовими корпусами встановлюються на плати з металізований-ними отворами. При цьому зазор між платою і підставою корпусу ІС забезпечує конструкцією виведення, ширина якого на ділянці, впаюють в отвір, ступінчато зменшується до розміру  $C = 0.5 \div 0.6$  мм.

Мікросхеми в планарних корпусах з відформованими висновками можна встановлювати на плату впритул, на прокладку або з деяким зазором - приблизно  $0.3 \div 0.7$  мм. Зсув вільних кінців висновків з горизонтальної площині для їх суміщення з контактними майданчиками допускається в межах  $\pm 0.2$  мм. Додаткове зміцнення корпусів ІС на платі забезпечується за рахунок покриття лаком. Для підвищення стійкості мікросхем і вузлів до кліматичних впливів плати з мікросхемами покривають, як правило, захисними лаками УР-231 і ЕП-730. Оптимальна товщина покриття лаком УР-231 становить  $35 \div 55$  мкм, лаком ЕП-730 -  $35 \div 100$  мкм. Плати з мікросхемами рекомендується покривати лаком в три шари з проміжною сушкою.

Таким чином, в змонтованій платі після лакування відсутня можливість безпосереднього контакту з друкованими провідниками і зовнішніми висновками встановлених на платі елементів. Це істотно ускладнює можливості безпосереднього контролю електричного режиму елементів усередині плати, при високій функціональній складності яких на зовнішні крайові роз'єми вдається вивести відносно невелике число сигналів з внутрішніх контрольних точок. Доступ до них пов'язаний з необхідністю порушення захисного лакового покриття, що може призводити до додаткових дефектів і зниження вологостійкості. Крім того, при контролі лакованих плат практично виключається застосування високопродуктивних багатозондового контактують пристроїв для паралельного знімання сигналів з внутрішніх контрольних точок.

Аналогічна ситуація має місце в багатошарових друкованих платах, в яких число шарів друкованого монтажу може досягати 10-12 і більше. Тут

доступ до внутрішнім верствам монтажу різко обмежений навіть при відсутності зовнішнього лакового покриття.

Підвищення щільності компонування друкованих вузлів в 4-6 разів забезпечує новий метод монтажу на поверхню, заснований на використанні компонентів в мініатюрних плоских безвиводних корпусах. В платах з підвищеною щільністю упаковки, ви-виконаних методами технології монтажу на поверхню, крок розміщення висновків елементів зазвичай зменшується до 0.63 мм, а ширина друкованих доріжок - до 0.1 ÷ 0.125 мм. При таких розмірах застосування для контролю плат групових багатозондових контактуючих пристроїв ускладнено і потрібне введення додаткових тестових майданчиків для знімання сигналів в контрольних точках плати.

Близькі до розгляду вимоги виникають при конструюванні гібридних ІС і мікросбірок з безкорпусним ІС і компонентами. Розробка напівпровідникових мікросхем в корпусах супроводжується зазвичай розробкою їх аналогів в бескорпусном варіанті, які утворюють елементну базу гібридних мікросхем. Більшість безкорпусних елементів мають зазвичай прямокутну форму, а приєднувальні деталі безкорпусних елементів характеризуються великою різноманітністю форм і розмірів. Поряд з гнучкими дротяними висновками використовуються висновки, виконані з металевої фольги, а також жорсткі кулькові, стовпчикові і балочні висновки. Це обумовлює велику різноманітність варіантів установки безкорпусного виробу в мікросбірці.

На відміну від напівпровідникових мікросхем, в яких практично не допускається відновлення дефектних кристалів, в гібридних ІС та мікросбірках точна локалізації дефектних елементів дозволяє шляхом їх заміни відновити роботоздатність відмовила схеми. Це можна здійснювати, як правило, перед проведенням кінцевих операцій з корпусування і герметизації схеми. Така можливість, спо-власної збільшенню відсотка виходу придатних виробів, робить особливо актуальною розробку методів і контрольних-діагностичних засобів для виявлення і точної локалізації відмовили елементів в гібридних схемах і мікросбірках так само, як і в платах друкованого монтажу.

## **2.1 Тенденції розвитку засобів контролю та діагностування**

Основні етапи існування сучасної радіоелектронної апаратури, що включають в себе її розробку, промислове виробництво, експлуатаційне обслуговування і ремонт, характеризуються все зростаючою трудомісткістю операцій, зв'язаних з проведенням вимірювань, контролю та діагностування. Це зумовлено насамперед стійкою тенденцією постійного зростання функціональної складності і ступеня інтеграції радіоелектронних виробів (РЕІ), що обумовило також необхідність збільшення ступеня автоматизації випробувань і розробки все більш складних і дорогих котрольно-діагностичних випробувальних програм.

В середньому не менше 25% трудомісткості виготовлення РЕА припадає на операції контролю, пошуку дефектів та їх усунення в друкованих вузлах, які

є основною про-виробничою одиницею. Зростання ступеня інтеграції і щільності монтажу елементів на основі застосування великих і надвеликих інтегральних схем, а також застосування багатопарових друкованих плат і технології монтажу на поверхню ще більш обмежують доступ до внутрішніх елементів контрольованих виробів і можливість отримання інформації про режим роботи окремих компонентів Реі. Зі збільшенням щільності монтажу на роботу електронних вузлів все більший вплив роблять ємнісні і електромагнітні зв'язки між елементами монтажу, які можуть призводити до нестійкого функціонуванню апаратури. Крім того, збільшується кількість дефектів, що знижують число придатних плат друкованого монтажу (ППМ).

Залежність числа придатних ППМ, а також числа несправностей на одну плату від щільності монтажу характеризується кількістю компонентів на платі. Дані, отримані на основі результатів промислової статистики при виробництві електронної апаратури в деяких зарубіжних фірмах, показують, що збільшення числа компонентів на платі в 2 рази (з 150 до 300) призводить приблизно до п'ятикратного зниження числа придатних ППМ.

Найбільший відсоток несправностей готових друкованих вузлів складають несправності, що виникають в процесі виготовлення. Основну групу при цьому складають такі несправності: короткі замикання (КЗ) між провідниками друкованої плати через бризок припою, забруднення флюсами, дефекту припою, а також внаслідок пробоїв входів ІС і БІС статичною електрикою; обриви внаслідок протруювання провідників, недостатнього пропоює, поганий металізації отворів і незадовільного закріплення елементів. Другу групу складають несправності, що виникають при установці і монтажі компонентів: чи не встановлені компоненти й провідники, компоненти неправильного типу, перевернуті компоненти, деформовані провідники та висновки компонентів, неправильне приєднання проводів. До третьої групи відносяться несправності компонентів, їх взаємний вплив і підвищена чутливість до впливів навколишнього середовища (температури, вологості, тиску і т. д.).

За даними статистики найбільш типовими несправностями є короткі замикання (35 ÷ 70%), несправні компоненти (2 ÷ 20%), відсутні і перевернуті компоненти (2 ÷ 10%), обриви провідників (1 ÷ 3%), незадовільні робочі характеристики вузла (2 ÷ 4%). Несправності, зумовлені взаємним впливом активних компонентів, складають в середньому від 3 до 15%. Найбільше число несправностей мають вузли з гібридними мікросхемами, потім з цифровими і аналоговими.

Загальний напрямок розвитку контрольно-вимірювальної та випробувальної апаратури для РСА ґрунтується на принципі виявлення несправностей на більш ранній стадії технологічного процесу і максимального ступеня автоматизації контрольно-діагностичних випробувань. Це зумовлено насамперед економічними чинниками, оскільки вартість виявлення та усунення несправностей у готовому виробі або на заключних стадіях виробничого циклу

різко зростає. Наприклад, вартість виявлення та усунення несправності в електронному модулі при випуску з виробництва приблизно в 10 разів вище, ніж на початкових стадіях виробничого циклу. Ця вартість зростає ще приблизно в 10 разів на стадії експлуатації.

Тому ефективність застосовуваних і розроблюваних засобів вимірювань для контролю параметрів електронної апаратури визначається в багатьох випадках не стільки їх метрологічними характеристиками, скільки повнотою реалізації завдань діагностики, що забезпечують швидке і точне виявлення та усунення несправностей. У цьому зв'язку перевірка виконання контрольованим виробом заданих функцій не є визначальною і, як правило, пов'язана з меншою трудомісткістю і вартістю, ніж необхідні для локалізації несправностей детальні перевірки параметрів з'єднань та ізоляції ППМ, правильності проходження сигналів в окремих ланцюгах і елементах, перевірки їх взаємного електромагнітного впливу і т. д.

В цілому методи контролю та випробувань РСА прийнято розділяти на **функціональні та вбудовані**.

При функціональних випробуваннях перевіряються вихідні параметри готових вузлів і блоків, тому важко забезпечити більшу глибину контролю і високу точність локалізації відмовили елементів через обмежених можливостей знімання інформації з окремих внутрішніх елементів РСА. Необхідність точного діагностування несправностей при функціональних випробуваннях вимагає різкого ускладнення тестових випробувальних програм. Вартість діагностики при цьому обумовлюється високою вартістю програмування також і тому, що програми автоматизованих функціональних випробувань є індивідуальними для кожного функціонального вузла чи блоку. Так, програмування тестера, що виявляє короткі за-замикання в друкованих вузлах з ефективністю 35÷65%, займає 2÷6 годин. Всередині-схемні аналізатори виявляють 50÷92% дефектів, але їх програмування займає 1÷4 доби. вбудований тестер виявляє 85÷96% дефектів, однак конструювання його зондового адаптера може зайняти багато часу, а для програмування потрібно більше шести тижнів. Нарешті, високопродуктивний тестер для функціональної перевірки плат виявляє близько 98% дефектів, але його програмування може зайняти дев'ять місяців.

В середньому вартість програмування для вбудованих випробувань зазвичай в 5 ÷ 10 разів нижче, ніж для функціональних випробувань. Проте на практиці зазвичай застосовується поєднання обох видів випробувань, оскільки функціональні випробувач-ні тестери забезпечують високу швидкість і продуктивність контролю при бракуванні контрольованих РСА за принципом "Придатний - Брак". Браковані вузли перевіряють вбудованими тестерами для ідентифікації несправностей, пов'язаних з технологічного процесом чи якістю компонентів. Кінцеве завдання вбудованого контролю зводиться до діагностування несправностей для забезпечення точної локалізації дефектів з метою їх подальшого усунення та відновлення працездатності (регенерації)

відмовив РСА і, при необхідності, коригування технологічної операції, що викликає дефекти. Після усунення несправностей вбудований контроль плати повторюється і при його позитивних результатах проводиться остаточна перевірка робочих характеристик за допомогою функціонального тестера. Така організація випробувань РСА підвищує число придатних виробів в середньому на  $45 \div 75\%$ . Таким чином, виявлення несправностей при вбудованих випробуваннях значно зменшує витрати часу на виконання діагностичних операцій і дозволяє з більшою віддачею використовувати висококваліфікованих технічних фахівців з діагностики для проведення більш складних системних випробувань. Одночасно підвищуються продуктивність і ефективність функціональних випробувальних пристроїв.

Підвищення продуктивності вбудованого контролю залежить від швидкості знімання та обробки інформації про параметри діагностичних сигналів елементів, рас-покладених на поле контрольованої друкованої плати. Найбільш високу виробленість вбудованого контролю мають автоматичні тестери з багатозондовими контактними пристроями типу "ложе з цвяхів", що забезпечують можливість паралельного знімання електричних сигналів в численних точках, розташованих на поле контрольованої плати. Мінімальний крок установки зондів становить зазвичай 2.5 мм, а число зондів в контактує матриці може досягати декількох тисяч, що істотно ускладнює її конструкцію, вимагає збільшення притискного зусилля до 10Н і більше. Зменшення кроку розташування зондів до 1.25 мм ще більше ускладнює конструкцію, технологію виготовлення і застосування контактують пристроїв. Практичні - це значення кроку є граничним, тому перехід до прогресивної технології монтажу на поверхню з підвищеною щільністю упаковки елементів і кроком розміщення висновків 0.63 мм різко обмежує можливість застосування групових багатозондових контактуючих пристроїв. В платах з особливо високою щільністю монтажу для забезпечення контролю придатності доводиться вводити спеціальні тестові майданчики для знімання сигналу в контрольних точках схеми, що призводить до небажаному зменшенню корисної площі поля друкованої плати. Застосування зондових контактуючих пристроїв також різко обмежується при двосторонній установці навісних елементів на друкованій платі, після нанесення ізоляційних захисних покриттів на поверхню плати, а також при використанні багат шарового друкованого монтажу, контактування з внутрішніми шарами якого неможливо.

Крім розглянутих обмежень, методи внутрішньосхемного контролю та випробувань-ний, що базуються на вимірах електричних напруг і параметрів ланцюгів, навіть при забезпеченні контакту з контрольованими елементами не дозволяє локалізувати всі види дефектів. Насамперед це стосується локалізації найбільш широко поширених дефектів типу "короткого замикання" в гальванічно пов'язаних ланцюгах або вузлах, що знаходяться під загальним потенціалом. До них відносяться в першу чергу, шини друкованих плат та інші ланцюги з великими коефіцієнтами розгалуження, які найбільш часто

зустрічаються в мікропроцесорних системах з шинної організацією структури. В таких системах еквіпотенціальні лінії шини можуть об'єднувати десятки елементів схеми. При малому опорі лінії всі її точки знаходяться під однаковим потенціалом, тому вимірювання електричної напруги не може забезпечити локалізації дефектів, наприклад коротких замикань в окремих гілках лінії. Традиційно пошук таких дефектів здійснюється шляхом почергового відпаювання підключених до шини елементів або перерізання відповідних гілок вузла доти, поки не зникне підвищена провідність лінії, обумовлена короткозамкненою гілкою. Застосування такого способу вельми незручно, трудомістке і пов'язане з ймовірністю внесення додаткових дефектів, що знижують якість і надійність діагностованих виробів. Крім того, автоматизація діагностування та локалізації несправностей в таких ланцюгах з точністю до окремої гілки вузла або елемента в глибині гілки практично виключається при використанні тільки контактних методів вимірювань. Це ставить дуже серйозні проблеми при розробці ефективних методів діагностування несправностей сучасних мікропроцесорних Рел, для яких, як було показано, характерна велика функціональна складність і щільність монтажу з високою ймовірністю виникнення дефектів типу "монтажне АБО", обумовлених коротке замикання в гальванічні пов'язаних ланцюгах.

### 3. ДІАГНОСТИЧНІ МОДЕЛІ

Оптимальні рішення задач технічної діагностики складних об'єктів можуть бути отримані тільки в результаті аналізу безлічі  $N$  станів, у яких ці об'єкти можуть перебувати в період експлуатації. У свою чергу, аналіз може бути виконано теоретично в період розробки нового об'єкта або експериментально в період експлуатації готового об'єкта.

Проте, у ряді випадків виконання експерименту ускладнене або просто технічні нездійсненно. У зв'язку з цим потрібні спеціальні методи для теоретичного аналізу безлічі можливих станів складних технічних об'єктів. Подібні методи ґрунтуються на дослідженні аналітичних описів або графоаналітичних уявлень основних властивостей технічних об'єктів як об'єктів діагностування, які можуть бути названі їх діагностичними моделями. В якості діагностичних моделей можуть розглядатися диференціальні рівняння, логічні співвідношення, діаграми проходження сигналів та ін.

Вибір того чи іншого типу моделі для представлення конкретного об'єкта залежить від цілого ряду таких факторів, як умови експлуатації, можливе конструктивне виконання, тип комплектуючих елементів тощо.

Дослідження діагностичної моделі передбачає:

- Формулювання умов працездатності, тобто умов поділу множини  $N$  на дві підмножини: працездатних  $N_1$  і непрацездатних  $N_2$  станів;
- Отримання критерію для оцінки ступеня працездатності об'єкта діагностики (розрізнення станів в підмножині  $N_1$ );

- Встановлення ознак виниклих несправностей (розрізнення станів в підмножині  $N_2$ ).

Розглянемо більш докладно методи побудови моделей, які можна поділити на **аналітичні, графоаналітичні, і функціонально-логічні моделі**.

Інформація, закладена в моделях і використовується при побудові і реалізації алгоритмів діагностування і фізичних моделей, може бути представлена в табличній формі.

Спочатку дамо коротку характеристику діагностичним моделям, а потім роздивимося більш детально деякі з них.

**Аналітичні моделі** дозволяють вирішувати оптимізаційні задачі і отримувати відносини між станами об'єкта, діагностичними параметрами та показниками якості в аналітичному вигляді. До методів побудови аналітичних моделей відносять метод малого параметра, функція чутливості, аналітичний опис процесів проходження сигналів.

**Графоаналітичні моделі** - це діаграми проходження сигналів - карти, що ілюструють процеси, що протікають в аналогових об'єктах і дозволяють розкривати неочевидні, але важливі для вирішення діагностичних завдань зв'язку та впливу. До графоаналітичних моделей належать теоретико-множинні описи об'єктів на базі теорії множин та теорії графів, як одного із способів наочного теоретико-множинного представлення об'єктів.

**Функціонально-логічні моделі** - це моделі, побудовані на основі логічного аналізу функціональних схем виробів, враховують їх особливості, а також роботу в режимі діагностування.

### **3.1 Узагальнена модель об'єктів діагностування**

Формалізація методів побудови алгоритмів діагностування технічного стану деякого об'єкта передбачає наявність формального опису об'єкта та його поведінки в справному та несправних станах.

Таке формальне опис (в аналітичній, табличній, векторній, графічній та іншій формі) будемо називати математичною моделлю об'єкта діагностування.

Радіoeлектронні системи як об'єкти моделювання мають функціональним різноманітністю, конструктивною складністю і складністю розв'язуваних ними завдань, високою вартістю відмов і високим ступенем автономності, іншими словами, РЕЗ являють складними системами.

Класифікація моделей, як раціональних описів (подань), найбільш тісно пов'язана з самими структурами об'єкта. У цьому сенсі об'єкти діагностування можна розділити на класи (рис.15).

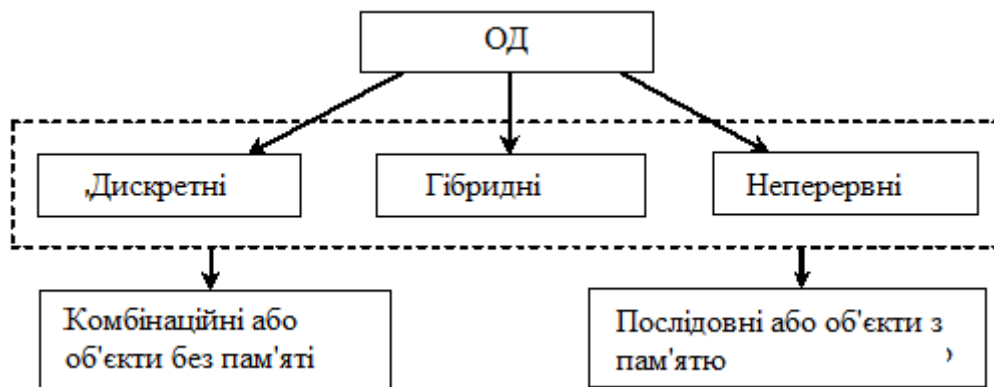


Рис. 15 – Класифікація об'єктів діагностування

Безперервні моделі ОД представляють об'єкт і протікають процеси в неперервному мінливому часу, який є аргументом певних функцій. Ці моделі в більшій частині алгебраїчні або диференціальні лінійні і нелінійні рівняння, включаючи передавальні функції.

Об'єкти називають комбінаційними або об'єктами без пам'яті, якщо значення їх вихідних координат однозначно визначаються тільки значеннями їх вхідних координат.

Об'єкти називають послідовних або об'єктами з пам'яттю, якщо у них спостерігається залежність значень вихідних координат не тільки від значень вхідних, але і від часу.

Приклади: резисторний ланцюг - безперервний об'єкт без пам'яті. Аналогова система регулювання з зворотними зв'язками - безперервний об'єкт з пам'яттю. Доданий дешифратор двійкових сигналів - дискретний комбінаційний об'єкт. Двійковий лічильник - дискретний об'єкт з пам'яттю. Аналого-цифровий перетворювач - гібридний об'єкт.

Надалі ми будемо користуватися поняттями вхідні та внутрішні змінні - вхідні та внутрішні координати, вихідні функції - вихідні координати.

Справний або несправний об'єкт може бути представлений як динамічна система, стан якої в кожен момент часу  $t$  визначається значеннями вхідних, внутрішніх та вихідних координат (параметрів).

Вхідні змінні і вихідні функції можуть бути співставлені як основним, так і додатковим входів і відповідно виходів об'єкта.

Позначимо символом  $X_n$ -мірний вектор, компонентами якого є значення  $n$  вхідних змінних  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Аналогічно  $Y$  є  $m$ -мірним вектором значень  $m$  внутрішніх змінних  $y_1, y_2, \dots, y_m$ , а  $Z$  -  $k$ -мірним вектором значень  $k$  вихідних функцій  $z_1, z_2, \dots, z_k$ .

$$Z = \Psi(X, Y_{\text{воч}}, t) \quad (5)$$

Запис будемо розглядати як деяку аналітичну, векторну, графічну, табличну або іншу форму представлення системи передавальних функцій справного об'єкта діагностування, що відображають залежність реалізованих



об'єктом вихідних функцій  $Z$  від його вхідних змінних  $X$ , початкового значення  $Y_{\text{поч}}$  внутрішніх змінних і від часу  $t$ . Система (5) є математичною моделлю справного об'єкта.

Виділимо для розгляду кінцеве безліч можливих несправностей об'єкта.

Прийнято розрізняти поодинокі і кратні несправності.

Під одиночною несправністю розуміється несправність, яка приймається в якості елементарної, тобто такої, що не може бути представлена сукупно нескількох інших, більш "дрібних" несправностей.

Кратна несправність є сукупністю одночасно існуючих двох або більшої кількості одиночних несправностей.

Символом  $S$  позначимо множину всіх розглянутих (не обов'язково усіх можливих) одиночних і кратних несправностей об'єкта, а символом  $O$  - безліч його одиночних несправностей. Очевидно, що  $O=S$ .

Будемо говорити, що при наявності в об'єкті несправності  $S_i \in S$ ,  $i = 1, 2, \dots, |S|$  або ( $o_i \in O$ ,  $i = 1, 2, \dots, |O|$ ) він знаходиться в  $i$ -несправному стані або є  $i$ -несправним. Об'єкт діагностування, що знаходиться в  $i$ - несправному стані, реалізує систему передавальних функцій

$$Z_i = \Psi^i(X, Y_{\text{поч}}^i, t), \quad (6)$$

представлених в тій же формі, що й у формулі (5). Зауважимо, що початкові значення  $Y_{\text{поч}}$  внутрішніх змінних  $i$ -несправного об'єкта може не збігатися з їх початковим значенням  $Y_{\text{поч}}$  в справному об'єкті. Система (6) для фіксованого  $i$  є математичною моделлю  $i$ -несправного об'єкта. Домовимося запис фактично реалізованих об'єктом діагностування передаточних функцій постачати знаком \*

$$Z^* = \Psi^i(X, Y_{\text{поч}}^i, t),$$

Система (5) і сукупність систем (6) для всіх  $S_i$  та  $S$  утворюють явну модель об'єкта діагностування. Будемо таку модель позначати записом. Часто, як зазначалося вище, в явному вигляді задається тільки модель справного об'єкта, тобто залежність (5), а поведінка об'єкта в  $i$  несправних станах представляється опосередковано через безліч  $S$  можливих несправностей. У цьому випадку неявну модель об'єкта діагностування утворюють: залежність (5), безліч  $S$  можливість не-несправностей об'єкта (представлених їх математичними моделями) і, нарешті, спосіб обчислення залежностей (6) по залежності (5) для будь-якої несправності  $s_i$ . Таку неявну модель об'єкта діагностування будемо позначати записом:

$$\left( \Psi, S, \Psi \xrightarrow{S_i} \Psi^i \right).$$

Якщо математичні моделі несправностей відомі для всіх  $s_i \in S$ , то перетворенням  $\Psi \xrightarrow{S_i} \Psi^i$  можна отримати всі залежності (6) и тим самим від моделі  $\left( \Psi, S, \Psi \xrightarrow{S_i} \Psi^i \right)$  перейти до явної моделі  $\left( \Psi, \{ \Psi^i \} \right)$ . Якщо ж математичні моделі деяких або навіть всіх несправностей з безлічі  $S$  невідомі,

то залежності (6) можуть бути отримані в результаті фізичного експерименту безпосередньо над об'єктом діагностування при наявності в ньому відповідних несправностей. Модифікацією цього підходу є використання при експерименті не найбільшого об'єкта, а деякої його фізичної моделі.

При побудові неявній моделі об'єкта діагностування математичними моделями фізичних несправностей найчастіше є певні "спотворення" залежно (5), наприклад зміна в останній значень коефіцієнтів, фіксації константами деяких вхідних змінних, виключення наявних або додавання нових членів і т. Д. при цьому отримання залежностей (6) полягає у здійсненні відповідних "спотворень" залежності (5). Природно вимагати, щоб ці спотворення правильно відображали фізичні несправності об'єкта, тобто щоб одержувані залежності (6) дійсно представляли відповідні і-несправні об'єкти, причому для всіх розглянутих несправностей з безлічі  $S$ .

Зазначена вимога, однак, не завжди здійснимо, якщо залежність (5) є система передавальних функцій справного об'єкта, складених щодо його основних входів і основних виходів. Тому в багатьох випадках залежність (5) задається у вигляді, що враховує внутрішню будову об'єкта, і тим самим дозволяє більш точно представляти його фізичні несправності. Наприклад, при розгляді дискретних об'єктів діагностування використовується прийом "розщеплення" тих вхідних змінних, для яких представляються ними сигнали поширюються в об'єкті по які-скільком фізичних каналах. В інших випадках застосовується неявна модель об'єкта діагностування, в якій задане опис (позначимо його символом) об'єкта містить додаткові фіктивні аргументи. Завданням значень цих аргументів можна отримати моделі як справного, так і всіх і-несправних об'єктів.

Основним поняттям, використовуваним при вирішенні завдань побудови та реалізації алгоритмів діагностування, є елементарна перевірка об'єкта. Розглянемо завдання моделей об'єктів діагностування в термінах елементарних перевірок об'єкта та їх результатів. Позначимо символом  $\Pi$  безліч всіх допустимих елементів-тарних перевірок  $j$ ,  $j = 1, 2, \dots, \Pi$  об'єкта, тобто таких його перевірок, які фізично здійсненні в конкретних умовах проведення процесу діагностування. Кожна елементарна перевірка, за визначенням, характеризується значенням впливу, подаваного (вступника) на об'єкт при реалізації елементарної перевірки, і відповіддю об'єкта на цей вплив. Значення впливу в елементарній перевірці  $\Pi$  визначається складом вхідних змінних і послідовністю в часі  $t$  їх значень  $X_j$ , а також початковим значенням  $Y_{jнач}$  внутрішніх змінних. Відповідь об'єкта в елементарній перевірці  $j$  характеризується складом контрольних точок і значенням (результатом елементарної перевірки)  $R_{ij}$ , що залежать від технічного стану об'єкта (від присутність індексу і відповідає справного об'єкту).

Таким чином, результат  $R_{ij}$  елементарної перевірки представляється в загальному випадку послідовністю векторів  $i$  є функцією значення дією:

$$R_j^i = \Psi^i(\alpha_j, \{\gamma\}_j).$$

Замість такого запису домовимося застосовувати більш коротку

$$R_j = \Psi(\pi_j) \quad (7)$$

для справного об'єкта і

$$R_j^i = \Psi^i(\pi_j) \quad (8)$$

для  $i$ -несправних об'єктів.

Опису фактичної поведінки об'єкта відповідає запис

$$R_j^* = \Psi^*(\pi_j). \quad (9)$$

Зв'язок між моделями типу (5), (6) і типу (7), (8) полягає в тому, що останні можуть бути отримані шляхом підстановки в праві частини (5) і (6) значень  $X_j$ ,  $Y_{\text{поч}}$ ,  $t$  (для кожної елементарної перевірки  $\Pi$ ) і подальшого обчислення значень тих компонент векторів  $Z$  і  $Z_i$ , які зіставлені контрольним точкам з безлічі. Явну модель об'єкта діагностування, коли залежності (8) задані для всіх  $s_i \in S$ , будемо позначати, як і колись, записом  $(\Psi, \{\Psi^i\})$ . Неявна модель об'єкта діагностування в даному випадку передбачає заданих модель справного об'єкта, безліч  $S$  несправностей, а також безліч  $\Pi$  допустимих елементарних перевірок і тому представляється записом

$$(\Psi, S, \Pi, \Psi \xrightarrow{S_i, \Pi} \Psi^i).$$

### 3.2 Аналітичні моделі

Аналітичними моделями є різні функції, що зв'язують між собою зовнішні вимірювані параметри і внутрішні параметри елементів системи виду:

$$U_{\text{ввх}} = f[A(t), U_{\text{вх}}(t)]$$

Аналітичні моделі, як правило, містять диференціальні рівняння, граничного і початкові умови до них, алгебраїчні залежності, отримані із загальних фізичних закономірностей.

Одним з поширених описів РЕУ є передавальна функція в операторній формі, яка має речові і комплексні полюса. Перехідна характеристика такого пристрою представляється рівнянням, яке є сумою коливальних і аперіодичних складових.

Ще одним видом діагностичної моделі може служити функція чутливості, що характеризує чутливість вимірюваних параметрів до зміни параметрів елементів схеми. Функція чутливості може бути використана при обчислюванні допусків на зміну параметрів.

При побудові математичної моделі допустима ступінь спрощення моделі визначається умовами функціонування системи.

Іноді корисно почати дослідження з більш простих моделей, що не задовольняючих повністю умовам функціонування системи, але зручних як "нульове" при-наближенні. За допомогою цих моделей, завдяки їх простоті і наочності, можна достатньо повністю дослідити деякі загальні закономірності процесів, зокрема розрізнення несправності. Прості моделі зручні також для перевірки більш складних варіантів математичних моделей (ММ) (за допомогою граничних переходів).

Моделі об'єктів діагностування можуть формуватися в два етапи:

- Спочатку створюється ММ процесів в окремих елементах, вузлах і т.д. системи;

- Потім, враховуючи приватні ММ і структури зв'язків між ними, розробляється ММ системи.

Очевидно, що сукупність ММ, що входять в систему елементів, ще не є ММ системи.

Для формування замкнутої системи рівнянь до рівнянь елементів необхідно додати рівняння зв'язків між параметрами входять до ММ елементів.

У схемі всі елементи пов'язані між собою. Для точок зв'язують між собою елементи дотримуються закони збереження. У цьому випадку застосовується апарат теорії кіл.

На схемі системи, елементи якої є елементами із зосередженими параметрами, можна виділити вузли, що зв'язують між собою окремі елементи, і замкнуті контури.

Закони збереження в цьому випадку визначаються двома правилами Кірхгофа для вузлів і контурів електричного кола.

Основними перевагами аналітичних моделей - глибина і повнота опису об'єктів діагностування.

До недоліків можна віднести:

- Невисоку точність опису властивостей багатьох ОД через складність реальних процесів і відсутності для них досить точних аналітичних залежностей;

- Трудомісткість знаходження рішень, що описують більш-менш складні процеси;

- Складність і відсутність інженерної наочності.

### **2.3. Графоаналітичні моделі**

Графоаналітичні моделі є однією широко застосовуваних форм діагностичних моделей. Якщо об'єкт діагностування може бути описаний, наприклад, системою лінійних алгебраїчних рівнянь, то цю систему можна представити діаграмою проходження сигналів (ДПС). Діаграма проходження сигналів - це власне карта, ілюструє процеси, що протікають в технічному об'єкті, і являє собою схему, складається з вузлів з'єднаних спрямованими

гілками. Вузли діаграми відповідають змінним, а гілки - операторам, що характеризує коефіцієнти при змінних. У ряді випадків діаграми проходження сигналів дозволяють розкрити не цілком очевидні, але важливі для вирішення завдань діагностики властивості об'єкта. Крім того, діаграми проходження сигналів часто може бути побудована без складання рівнянь, тільки на підставі розгляду структури об'єкта. Відволікаючись від фізичної сутності зв'язків і змінних, наявних в об'єкті, можна, користуючись досить простими правилами, перетворити діаграму проходження сигналів і знайти всі можливі рішення рівнянь. Коротко зупинимось на основних властивостях ДПС. Вузли (точки, що виражають змінні величини) бувають трьох типів: джерела, прості каскадні вузли і стоки. Джерела - це такі вузли, які мають тільки вихідні гілки, а стоки - тільки вхідні гілки. Джерела відповідають незалежним змінним, а стоки - залежним. Прості каскадні вузли мають як вхідні, так і вихідні гілки. Кожної гілки, тобто лінії, що з'єднує два вузли, відповідає свій оператор, що позначається  $T_{ij}$ , де  $i$  означає вузол, звідки починається гілка,  $j$  - вузол, де гілка закінчується. Напрямок гілки вказується стрілкою. Кожному вузлу відповідає своя змінна (сигнал). Сигнал кожного вузла  $x_k$  дорівнює сумі входять сигналів:

$$x_k = \sum x_j T_{jk}, \quad (j = 1, 2, 3, \dots).$$

При цьому кожен вхідний сигнал дорівнює добутку оператора входить гілки на сигнал вузла, з якого гілка виходить.

Для прикладу розглянемо діаграму проходження сигналів, яка відповідає системі рівнянь

$$x_1 = x_0 T_{01} + x_1 T_{11} + x_2 T_{21},$$

$$x_2 = x_1 T_{12}.$$

Розглядаючи діаграму проходження сигналів можна помітити, що існують гілки різних типів:

- Гілка, у якій оператор має індекси, розташовані в порядку зростання ( $T_{01}$ ,  $T_{12}$ ), називається прямою;

- Гілка, у якій оператор має індекс, розташований в порядку убутання ( $T_{21}$ ) - зворотною.

Кілька послідовно з'єднаних гілок являють собою шлях від одного вузла до іншого.

Замкнений шлях являє собою контур зворотного зв'язку, який може бути утворений однією ( $T_{11}$ ) або декількома гілками.

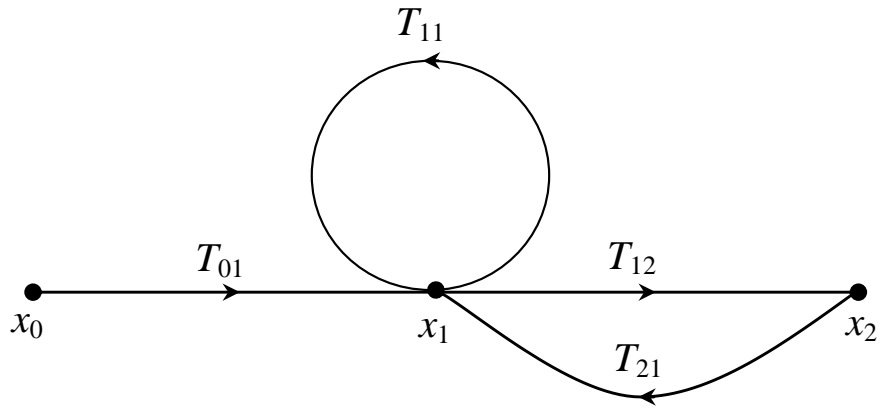


Рис.16 – Діаграма проходження сигналів

**Приклад 1:** Побудуємо діаграму проходження сигналів для електричного кола рис. 17.

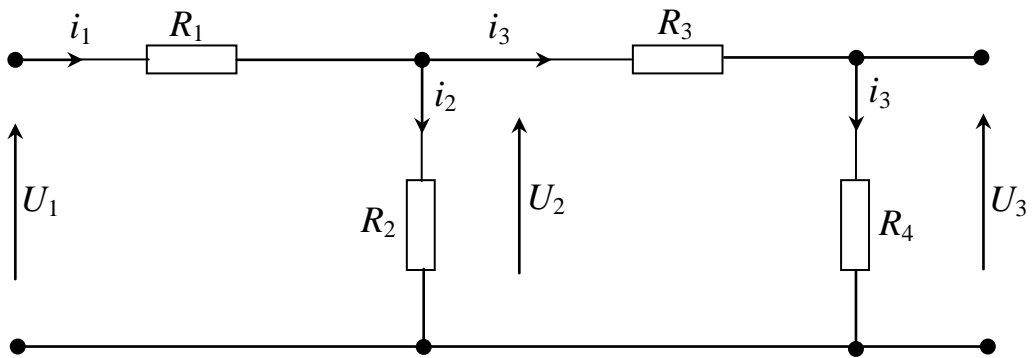


Рис.17 – Електричне коло, виконане на опорах

Це коло описується системою рівнянь:

$$i_1 = (U_1 - U_2) / R_1; U_2 = i_2 R_2; i_2 = i_1 - i_3; U_3 = i_3 R_4; i_3 = U_2 / (R_3 + R_4).$$

Використовуючи рівняння, будуюмо діаграму проходження сигналів

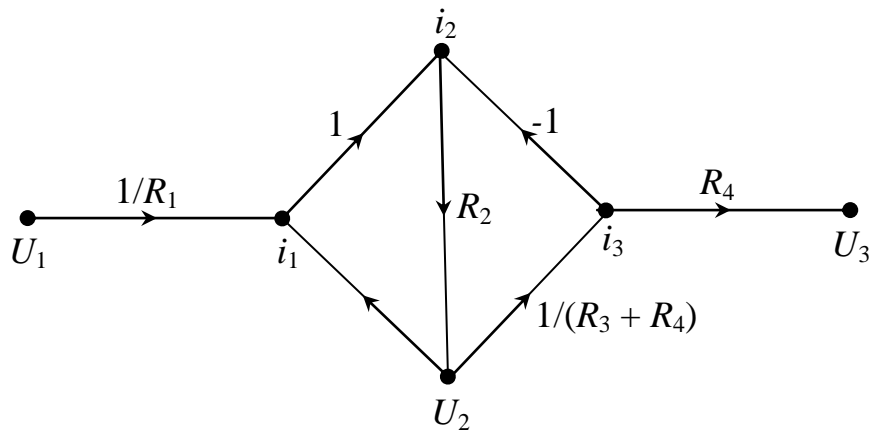
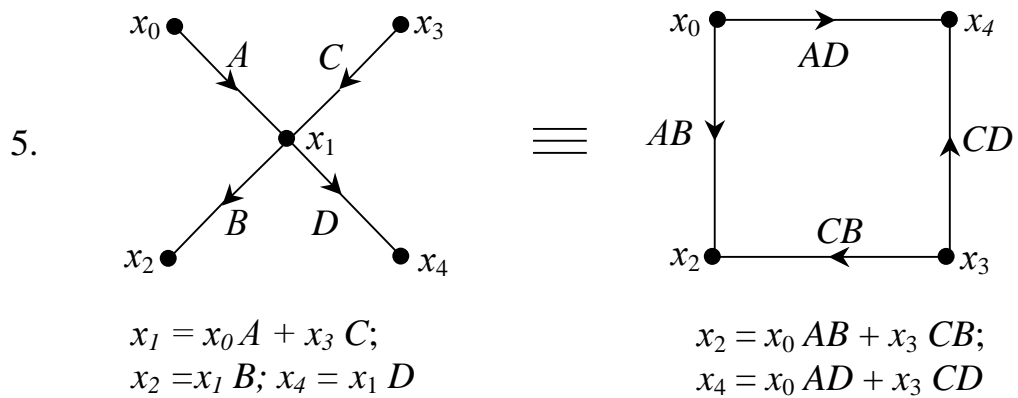
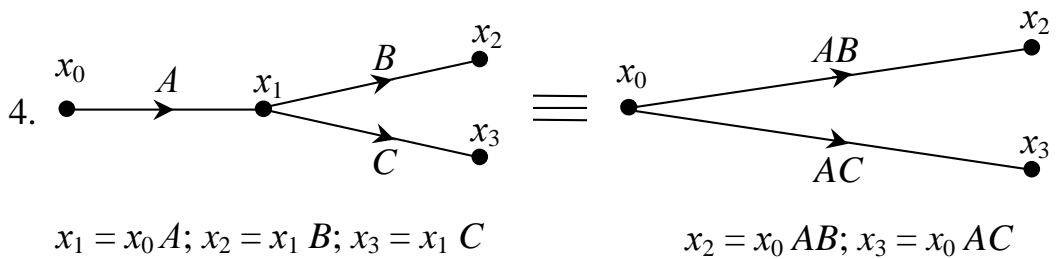
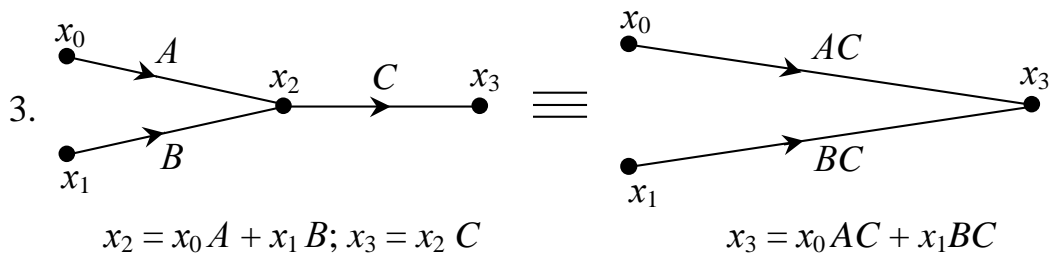
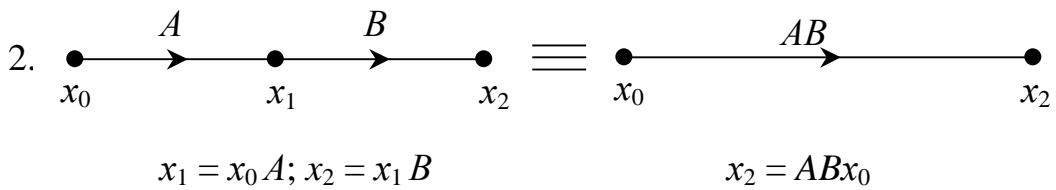
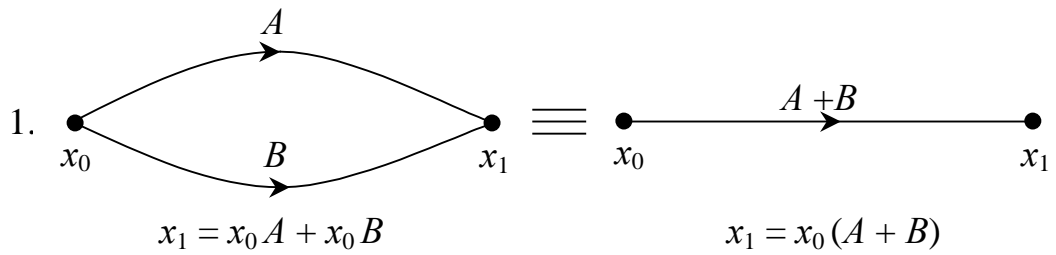


Рис. 18 – Діаграма проходження сигналів для кола, зображеного на рис.17

Отримана діаграма містить два контури зворотнього зв'язку  $i_1 i_2 U_2 i_1$  і  $i_2 U_2 i_3 i_2$ .

Діаграму проходження сигналів можна спростити, користуючись наступними правилами:



Ці перетворення дозволяють замінити паралельні і послідовні шляхи окремими гілками і відповідають виключенню залежних змінних з рівнянь.

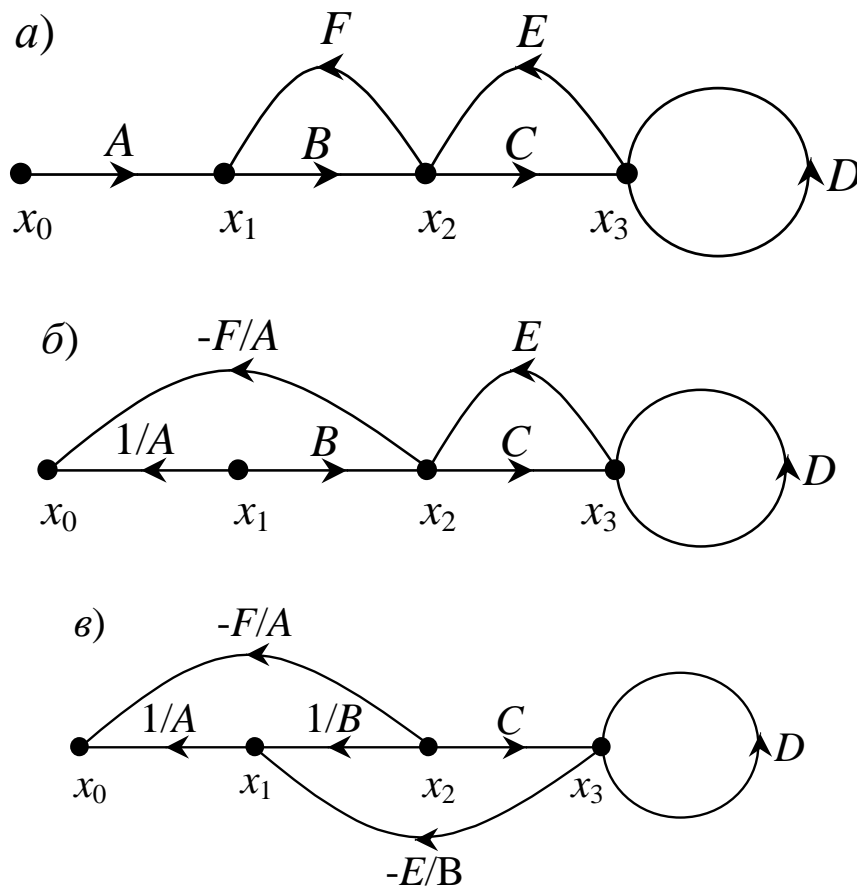
Розглянемо ще два основних правила перетворення ДПС, які значно спрощують рішення задачі аналізу технічних об'єктів.

Одне з них називається інверсією шляху або контуру. Його застосування дозволяє зменшити число контурів зворотного зв'язку і зробити взаємну заміну залежних і незалежних змінних.

Для прикладу розглянемо інверсію, що зберігає вузли розімкнутого контуру і контуру зв'язку.

При інвертуванні гілки треба змінити її напрямок на протилежне і перенесеної кінці всіх гілок, спрямованих спочатку до того ж вузлу, що й обрана гілка, в кінцевий вузол інвертованою гілки. Передача інвертованою гілки дорівнює зворотній величині первісної передачі гілки; передача інших гілок змінюється таким чином, що загальна передача від джерела до стоку залишається незмінною. Щоб інвертувати шлях, потрібно інвертувати всі гілки, що входять в цей шлях.

Нехай потрібно здійснити інверсію діаграми, наведеної на рис. 19а.





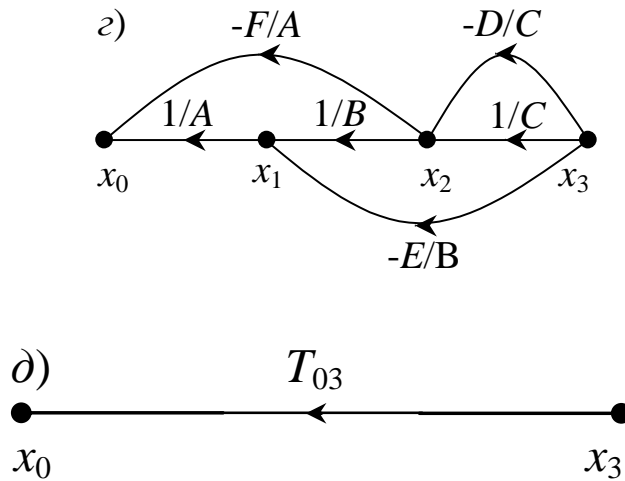


Рис.19 – Інвертовані шляхи від  $x_0$  до  $x_3$

Рішення почнемо з інвертування гілки А, тобто з вузла  $x_1$ . Результат інвертування наведено на рис. 19б. Потім послідовно інвертуємо гілки В (рис. 19В) і С (рис. 19Г). Після чого, послідовно застосовуючи правила 1, 4, 1, 2, 1 перетворення діаграми проходження сигналів, отримаємо діаграму, яка записана однією гілкою (рис. 2.5д). Оператор цієї гілки буде дорівнює:

$$T_{03} = \left[ \left( \frac{1}{C} - \frac{D}{C} \right) \frac{1}{B} - \frac{E}{B} \right] \frac{1}{A} - \left( \frac{1}{C} - \frac{D}{C} \right) \frac{F}{A}$$

Таким чином, інверсія в даному випадку дозволила усунути контури зворотного зв'язку.

Інше правило - правило "виключається контурів", або правило Мезона, дозволяє звести до мінімуму число математичних операцій, що застосовуються для рішення діаграми проходження сигналів. Математично правило Мезона виражається формулою

$$T_{ij} = \sum_k p_k \frac{\Delta_k}{\Delta},$$

де  $T_{ij}$  - функція передачі від  $i$ -го вузла  $j$ -му вузлу;  $p_k$  -  $k$ -й прямий шлях проходження сигналу;  $\Delta_k$  - мінор визначника системи, відповідний  $k$ -му шляху;  $\Delta$  - визначник системи.

При цьому визначник системи може бути обчислений як одиниця мінус сума передач всіх замкнених контурів, плюс сума добутків пар які не стосуються контурів (контурів не мають загальних вузлів), мінус сума добутків трійок не стосуються контурів, плюс тощо.

У більшості практичних випадків виявляється, що твори контурів другого і більш високого порядку мало впливають на величину функції передачі і тому можуть не враховуватися.

Міnor  $k$  може бути отриманий з визначника системи винятком членів, що містять вузли, що належать  $k$ -му шляху.

Слід особливо відзначити, що визначник характеризує не якийсь окремий шлях, а є характеристикою діаграми проходження сигналів в цілому, тобто системи рівнянь, яка описує даний об'єкт.

Застосування правила Мезона дозволяє безпосередньо з розгляду діаграми проходження сигналів знайти залежності між будь-якими двома змінними в системі рівнянь.

Орієнтовані графи можуть бути побудовані і безпосередньо по функціональній схемі РЕА. Будь функціональна (принципова) схема РЕА може бути представлена логічною структурою формування та проходження сигналів, в яких закладена споживча інформація та інформація про стан РЕА. Таким чином, первинним видом діагностичної моделі є структурна схема, вона ж геологічна модель.

У вигляді орієнтованого графа, дуги (ребра) якого забезпечені стрілками, може бути представлена радіоелектронна схема будь-якої складності. Орієнтований граф позначають символом  $G(X, V)$ , де  $X(x_1, \dots, x_n)$  і  $V(v_1, \dots, v_m)$  - відповідно безлічі вершин і дуг. З поняттям орієнтований граф пов'язаний термін "відображення" (рис. 2.6). Відображення показує, яким чином вершина  $x_i$  відображається в інших вершинах. Граф (рис. 2.6) має відображення такого вигляду:

$$\Gamma x_1 = \{x_2, x_3\}, \Gamma x_2 = \{x_4, x_5\}, \Gamma x_3 = \{x_5\}, \Gamma x_4 = \{x_5\}, \Gamma x_5 = \emptyset.$$

Остання рівність вказує на відсутність відображення.

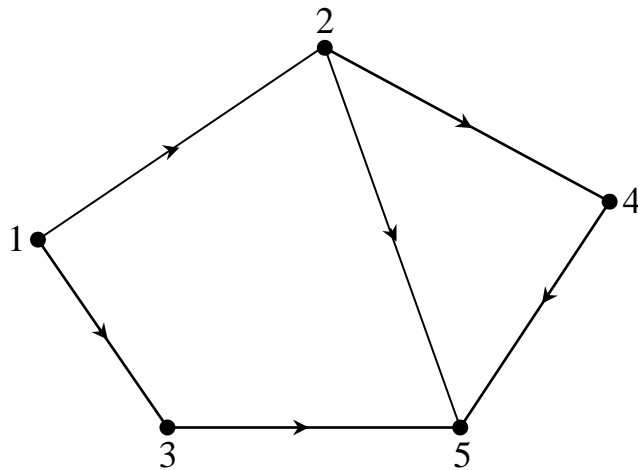


Рис.20 – Структура орієнтованого графа

Повертаючись до графічного подання складних схем, відзначимо, що відображення орієнтованого графа  $G(x, \Gamma)$  дозволяє наочно простежити взаємний вплив попередніх виходів на наступні і визначити взаємний вплив параметрів.

Застосування відображення функціональних схем в орієнтовані граfi дозволяє також представити схему, як і будь граf, у вигляді матриці, так званої "матриці суміжності".

Матриця суміжності графа  $G$ , що складається з  $n$  вершин, - це квадратична матриця  $A = |a_{ij}|$  з  $n$  рядками і  $n$  стовпцями; її загальний елемент  $a_{ij} = 1$ , коли між вершинами  $x_i$  і  $x_j$  є зв'язок, і  $a_{ij} = 0$ , коли вершини  $x_i$  і  $x_j$  - пов'язані дугами. Для графа на рис. 2.6 матриця суміжності визначається виразом.

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Рядок матриці суміжності, що складається тільки з нулів, свідчить про те, що в цю вершину відображаються всі інші.

При розгляді деяких завдань діагностичного аналізу використовується особливий вид графа, який називається "деревом". Особливість цього графа полягає в тому, що в ньому немає контурів і в вершину  $x_1$  (корінь) не заходить не одна дуга, а в кожную другу вершину заходить тільки одна дуга. Вершини графа, в які дуги не заходять, називаються висячими. "Дерево" є своєрідною формою опису логічних можливостей схем, які подаються даними графом, і знаходить застосування для складання різних діагностичних програм.

#### 2.4. Таблиця функцій несправностей

Явну математичну модель об'єкта діагностування, тобто сукупність функцій (7) і (8), можна представити у табличній формі.

Позначимо безліч технічних станів об'єкта символом  $E$ . Нехай  $e \in E$  позначає справний стан об'єкта, а  $e_i \in E$  - його  $i$ -несправний стан. Кожному  $i$ -несправного стану відповідає несправність  $s_i$  з безлічі  $S$  і навпаки.

Побудуємо прямокутну таблицю, рядками якої поставимо у відповідність до-допустимі елементарні перевірки  $\pi_j$  з безлічі  $\Pi$ , а стовпцями - технічні стану об'єкта з безлічі  $E$  або, що те ж, функції  $\Psi$  і  $\Psi^i$ ,  $i = 1, 2, \dots, |S|$ , реалізовані об'єктом, що знаходиться в справному  $e$  або  $i$ -несправному  $e_i$  стані. Будемо надалі значення індексу  $i = 0$  відносити до колонки справного стану  $e$ . У клітці  $(j, i)$  таблиці, що знаходиться на перетині рядка  $\pi_j$  і шпальти  $e_i$ , проставимо результат елементарної перевірки  $j$  об'єкту, що знаходиться у технічному стані  $e_i$ . Безліч всіх результатів  $R_j^i$ ,  $j = 1, 2, \dots, |\Pi|$ ;  $i = 0, 1, 2, \dots, |S|$  позначимо

символом  $R$ . Очевидно,  $|R| = (|S| + 1)$ . Побудовану таблицю 1 називатимемо таблицею функцій несправностей об'єкта діагностування.

Зауважимо відразу, що безпосереднє використання таблиці функцій несправностей як форми подання інформації при побудові і реалізації алгоритмів діагностування часто неможливо через високу розмірності таблиці. Однак як універсальна математична модель об'єкта діагностування таблиця функцій несправностей дуже наочна і зручна при обговоренні та класифікації принципів, а також основних процедур побудови та реалізації алгоритмів діагностування, навіть якщо ці принципи і процедури спочатку формулюються на мовах, відмінних від мови таблиць функцій несправностей.

Завдання таблиці функцій несправностей еквівалентно завданню системи функцій (7) і (8). Дійсно, стовпець  $e_0$  таблиці задає поведінку справного об'єкта, тобто функцію (7), а решта її стовпчики - поведінка об'єкту, що знаходиться у відповідних несправних станах, тобто функції (8).

Таблиця 1

$R$		$E$				
		$e$	$\dots$	$e_i$	$\dots$	$e_{ S }$
$\Pi$	$\pi_1$	$R_1$		$R_1^i$		$R_1^{ S }$
	$\vdots$					
	$\pi_j$	$R_j$		$R_j^i$		$R_j^{ S }$
	$\vdots$					
	$\pi_{ \Pi }$	$R_{ \Pi }$		$R_{ \Pi }^i$		$R_{ \Pi }^{ S }$

Для визначеності приймемо тут, що безліч  $\Pi$  має *властивість виявлення* будь-якої несправності з безлічі  $S$ , тобто для будь-якої несправності  $s_i \in S$  знайдеться хоча б одна елементарна перевірка  $\pi_j \in \Pi$  - така, що  $R_j \neq R_j^i$ , а також властивістю розрізнення всіх несправностей з безлічі  $S$ , тобто для кожної пари несправностей  $s_i, s_k \in S, i \neq k$ , знайдеться хоча б одна елементарна перевірка  $\pi_j \in \Pi$  така, що  $R_j^i \neq R_j^k$ .

Наявність у безлічі  $\Pi$  властивості виявлення несправностей еквівалентно тому, що стовпець  $e$  таблиці функцій несправностей відрізняється від кожного з

інших її стовпців  $e_i, i = 1, 2, \dots, |S|$ , а властивості розрізнення - тому, що всі стовпці таблиці, що представляють несправні стану, попарно різні.

Як всяка математична модель об'єкта діагностування, таблиця функцій несправностей потрібна для двох застосувань: для побудови алгоритмів діагностування при побудові систем діагностування і для побудови фізичної моделі об'єкта при реалізації цих систем.

Викладемо основні операції процесу побудови алгоритму діагностування по таблиці функцій несправностей.

Будемо припускати, що безліч  $S$  несправностей об'єкта містить або всі несправності (при розгляді задач перевірки справності та пошуку всіх несправностей), або тільки ті з них, які порушують працездатність об'єкта (в задачах перевірки працездатності і пошуку несправностей, що роблять об'єкт непрацездатним), або, нарешті, тільки несправності, що порушують правильне функціонування об'єкта (при перевірці правильності функціонування і при пошуку несправностей, що порушують функціонування об'єкта). Ця умова поширюється на безліч  $E$  технічних станів об'єкта.

Завдання на побудова алгоритму діагностування поряд із зазначенням безлічі  $E$  можливих технічних станів об'єкта (або безлічі  $S$  його несправностей) повинно містити відомості про необхідній глибині діагностування. Незалежно від призначення алгоритму діагностування (для перевірки справності, працездатності, правильності функціонування або для пошуку несправностей) необхідну глибину діагностування можна задати через фіксоване розбиття множини  $E$  на  $\lambda$  непересічних підмножин  $E_\nu, \nu = 1, 2, \dots, \lambda$ ,

$$\bigcup_{\nu=1}^{\lambda} E_\nu = E, \quad E_\nu \cap E_\mu = \emptyset \text{ при } \nu \neq \mu.$$

Тоді перевірці справності, працездатності або правильності функціонування відповідає мінімальна глибина діагностування, при якій  $\lambda = 2$ , причому  $E_1 = \{e\}$  и  $E_2 = \{e_i / i = 1, 2, \dots, |S|\}$ . При пошуку несправностей з максимальною глибиною діагностування (тобто з точністю до кожного одного технічного стану)  $\lambda = |S| + 1, E_1 = \{e\}, E_\nu = \{e_i\}, i = 1, 2, \dots, |S|, \nu = i + 1$ . Проміжні значення глибини діагностування характеризуються умовою  $2 < \lambda < |S| + 1$ .

Спосіб завдання глибини діагностування розбиттям безлічі  $E$  технічних станів об'єкта на підмножини  $E_1$  є досить універсальним, але він незручний практично тоді, коли відсутня відповідність такого розбиття об'єкта на конструктивні складові частини. Значно зручніше необхідну глибину діагностування задавати через розбиття множини конструктивних компонент об'єкта на непересічні підмножини. Наприклад, широко відомо вимога проведення діагностування з глибиною до змінного блоку (вузла, компоненти) об'єкта. Розглянемо особливості такого способу завдання глибини діагностування.

Нехай об'єкт розбитий на  $N$  змінних блоків. Зіставимо  $l$ -му ( $l = 1, 2, \dots, N$ ) змінному блоку підмножина  $E_l$  технічних станів, кожне з яких визначається несправностями тільки цього блоку. Якщо припустити, що в об'єкті може бути несправним тільки один (будь-який) блок, то об'єднання  $N$  підмножин  $E_l$  разом з справним станом  $e$  об'єкта утворює безліч  $E$  всіх можливих технічних станів. Тому отримуємо:  $\lambda = N + 1$ ,  $E_1 = \{e\}$ ,  $E_v = E_l$ . Цей випадок відповідає розгляду одиночних несправностей об'єкта, якщо в якості останніх прийняти несправності кожного змінного блоку.

Інакше справа йде тоді, коли не можна виключити можливість одночасного існування несправностей у двох або більшому числі змінних блоків (кратних НЕ-несправностей). При цьому, крім зазначеного вище формування підмножин  $E_l$  для кожного одного змінного блоку необхідно кожній групі з двох, трьох тощо. Змінних блоків зіставити підмножини технічних станів, обумовлених одночасним існуванням несправностей у всіх блоках (і тільки в них) розглянутої групи. При цьому буде отримано  $2N - 1$  непересічних підмножин технічних станів об'єкта, тобто (з урахуванням справного стану  $e$ )  $\lambda = 2^N$ .

Отже, нехай  $\epsilon$  таблиця функцій несправностей і задана тим чи іншим способом необхідна глибина діагностування. Домовимося, що в таблиці немає незаповнених клітин.

Основу будь-якого алгоритму діагностування складає сукупність (безліч)  $T$  вхідних у нього елементарних перевірок. Для того щоб забезпечити необхідну глибину діагностування, ця сукупність повинна розрізняти кожну пару технічних станів, що належать різним підмножини  $E_v$  и  $E_\mu$   $v \neq \mu$ , хоча може не розрізняти будь-яку пару технічних станів, що належать одному і тому ж підмножині  $E_v$ . Перша умова означає, що для кожної пари технічних станів  $e_i$  і  $e_k$ , приналеж-службовців різних підмножини  $E_v$  і  $E_\mu$ , серед елементарних перевірок сукупності  $T$  знайдеться хоча б одна елементарна перевірка  $t_j$ , результати і якій різні, т. Е.. Сукупність  $T$  елементарних перевірок алгоритму діагностування будемо називати повною, якщо вона забезпечує проведення діагностування або з заданою глибиною, або з глибиною, забезпечується безліччю  $P$  усіх допустимих елементів-тарних перевірок. Сукупність  $T$  називається ненадлишковою, якщо видалення з неї будь-якої однієї елементарної перевірки веде до зменшення глибини діагностування.

За однією і тією ж таблиці функцій несправностей і при заданому розбитті безлічі  $E$  на підмножини  $E_\mu$  можна побудувати в загальному випадку кілька повних ненадлишкових сукупностей  $T$ . Ці сукупності можуть відрізнятися як складом, так і числом вхідних в них елементарних перевірок. Повні ненадлишкові сукупності  $T$  з найменшим числом елементарних перевірок називаються мінімальними.

Побудова по таблиці функцій несправностей всіх повних ненадлишкових (а значить, і мінімальних) сукупностей  $T$  можна здійснити, виконавши такі дві операції:

- Переглядом (перебором) всіх можливих невпорядкованих пар стовпців таблиці функцій несправностей виділити пари  $e_i, e_k$  технічних станів, що належать різним підмножини  $E_\mu, E_\nu$  і для кожної такої пари переглядом (перебором) усіх рядків таблиці визначити підмножини  $P_{ik}$  елементарних перевірок  $R_j$ , результати  $R_j^i$  і  $R_j^k$  яких для технічних станів  $e_i$  і  $e_k$ , різні;

- Переглядом (перебором) всіх підмножин  $P_{ik}$ , отриманих в результаті виконання операції 1, знайти всі такі сукупності  $T$  елементарних перевірок, щоб в кожній з них для кожної підмножини  $P_{ik}$  знайшлася хоча б одна елементарна перевірка  $t_j$ , що належить цій підмножині  $P_{ik}$ .

Блок-схема алгоритму  $A_1$  виконання операції 1 приведена на рис. 21. Вихідними-ми даними є таблиця функцій несправностей і розбиття множини  $E$  на підмножини  $E_\square$ . Номери стовпців таблиці відзначаються індексами  $i = 0, 1, \dots, |S| - 1, k = i + 1, i + 2, \dots, |S|$ , а номери її рядків - індексом  $j = 1, 2, \dots, |P|$ .

Формальний спосіб виконання операції 2 полягає в наступному. Позначимо символом  $U$  безліч всіх підмножин  $P_{ik}$ , отриманих в результаті виконання операції 1. Нехай  $l$  - порядковий номер деякої підмножини  $P_{ik}$  як елемента (  $P_{ik}$  )  $l$  безлічі  $U, l = 1, 2, \dots, |U|$ . Візьмемо два перших підмножини (  $P_{ik}$  )  $1$  і (  $P_{ik}$  )  $2$  і утворимо всі можливі пари входять до них елементарних перевірок. Серед цих пар проведемо наступні спрощення: кожну пару виду (  $\pi_j; \pi_j$  ) замінимо однієї елементарної перевіркою (  $j$  ); при наявності однієї елементарної перевірки (  $\pi_j$  ) і пар виду (  $\pi_j; \pi_j$  ) видалимо останні. Отримане після таких спрощень безліч пар  $i$ , можливо, одиночних елементарних перевірок позначимо символом  $\Pi_1$ . Потім візьмемо безліч (  $P_{ik}$  )  $3$  і побудоване безліч  $\Pi_1$  і утворимо всі можливі пари їх елементів. Після виконання серед цих пар спрощень, аналогічних зазначеним вище, отримуємо безліч  $\Pi_2$  і т. Д. Підмножина (  $P_{ik}$  )  $l$  і безліч  $\Pi_{l-1}$  дають безліч  $\Pi_l$ . Кожен елемент безлічі  $\Pi_{|U|}$  є повною неізбиточною сукупністю  $T$  елементарних перевірок.

Блок-схема алгоритму  $A_2$  виконання операції 2 зображена на рис. 22. вихідними даними є безліч  $U$  підмножин  $P_{ik}$ . Індексом  $l = 1, 2, \dots, |U|$  відзначений порядковий номер підмножини  $P_{ik}$ . Знак  $\emptyset$  означає порожню безліч.

Зупинимось тепер на застосуванні таблиці функцій несправностей при побудові фізичної моделі об'єкта в засобах діагностування.

Визначення сукупності  $T \subseteq \Pi$  елементарних перевірок, що входять в алгоритм діагностування, відповідає виділенню певної сукупності рядків таблиці функцій несправностей. Для алгоритмів перевірки справності, працездатності або правильності функціонування об'єкта ця сукупність рядків така, що стовпець  $e$  утвореною ними підтаблиці функцій несправностей

відрізняється від будь-якого іншого її шпальти. Аналогічно при пошуку несправностей з максимальною глибиною всі стовпці такої підтаблиці функцій несправностей попарно різні.

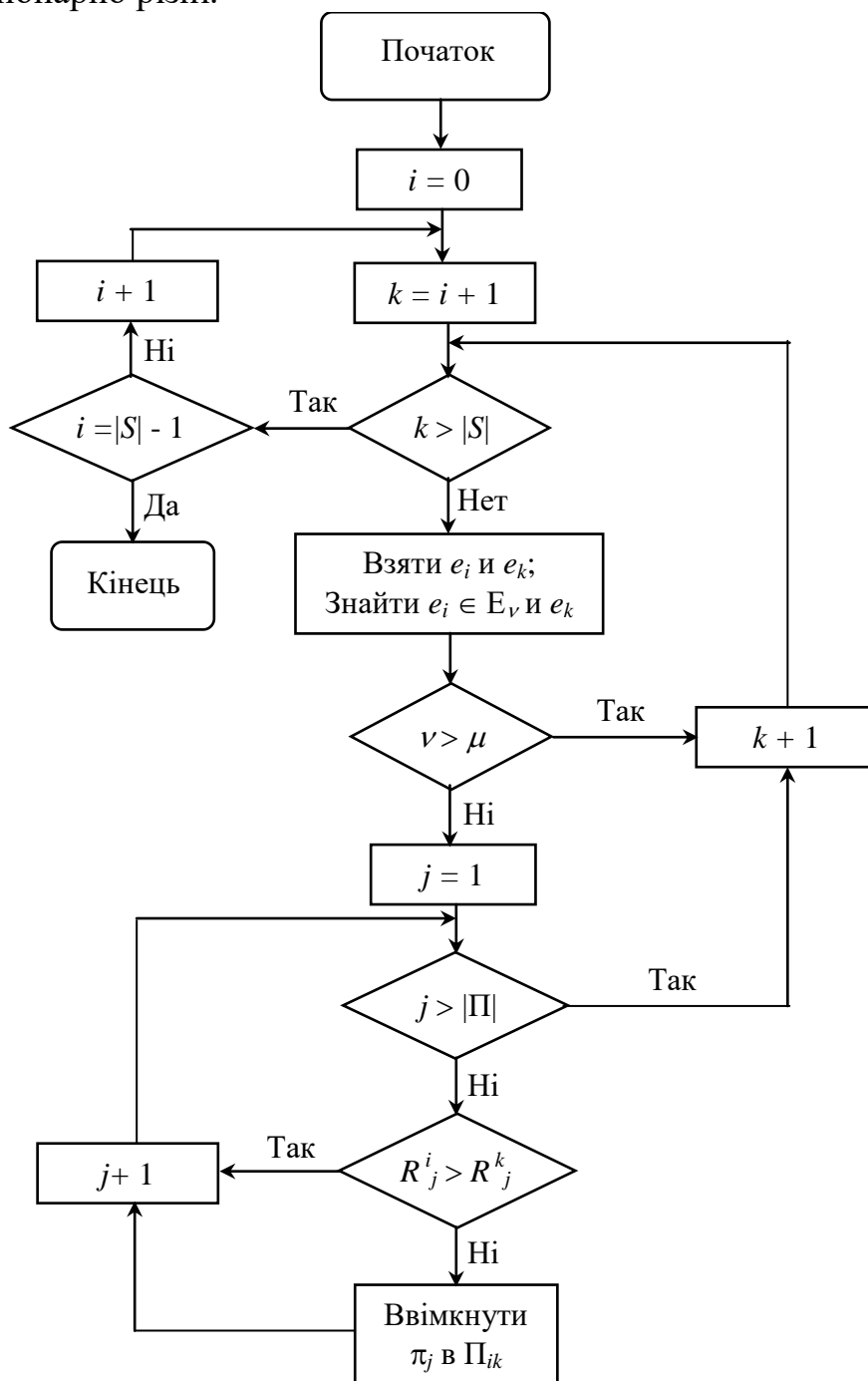


Рис. 21 – Блок-схема алгоритму A1

Підтаблицю, утворену сукупністю  $T$  рядків, будемо називати  $T$ -таблицею функцій несправностей, щоб відрізнити її від вихідної таблиці функцій несправностей, яку можна називати  $\Pi$ -таблицею.

Неважко бачити, що  $T$ -таблиця функцій несправностей є завданням функцій  $R_j = \Psi(t_j)$  і  $R_j^i = \Psi^i(t_j)$ , що визначають фізичну модель об'єкта в засобах



діагности-вання. При поданні фізичної моделі об'єкта Т-таблицею функцій несправностей процес розшифровки фактичних результатів  $R_j^*$  елементарних перевірок можна представити таким чином. Кожна реалізована елементарна перевірка  $t_j \in T$  виділяє відповідний рядок  $T$  таблиці, а її фактичний результат  $R_j^*$  ділить безліч стовпців таблиці на дві підмножини. Ті стовпці  $e_i, i = 0, 1, \dots, |S|$ , для яких  $R_j^i \neq R_j^*$ , "викреслюються" з таблиці. Решта стовпці, для яких  $R_j^i = R_j^*$ , представляють підмножина технічних станів об'єкта. Завершенню процесу діагностування відповідає момент, коли в таблиці залишиться єдиний "невикреслений" стовпець. Зауважимо, що "викреслювання" стовпчика  $e$  означає, що об'єкт діагностування несправний.

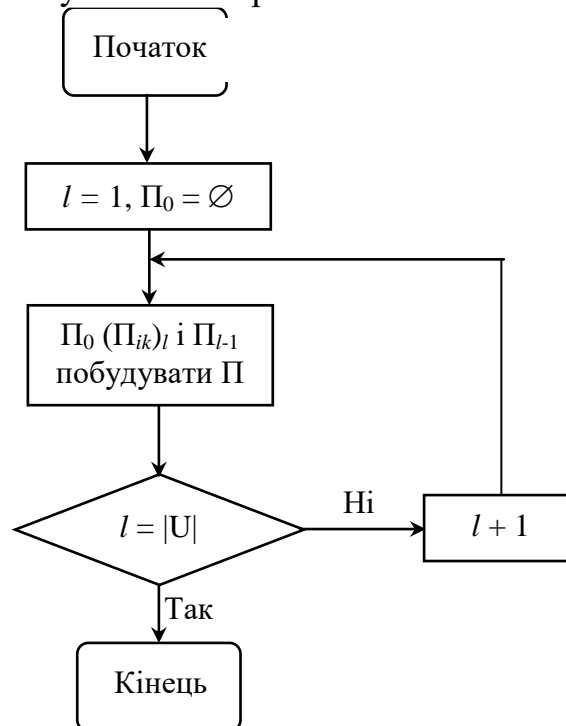


Рис. 22 – Блок-схема алгоритму А2

Отже, чим менше число рядків Т-таблиці функцій несправностей, тим (за інших рівних умов) простіше реалізація відповідного їй алгоритму діагностування (в усякому разі, в системах тестового діагностування) і представляється нею фізичної моделі об'єкта. Тому при проектуванні систем діагностування часто прагнуть будувати алгоритми діагностування з якомога меншим числом вхідних в них елементарних перевірок.

Чим більше розмаїття (а значить, число) елементарних перевірок в безлічі  $\Pi$ , тим ширші можливості отримання алгоритмів діагностування з малим числом елементів-тарних перевірок. Однак, взагалі кажучи, чим більше рядків (а також стовпців) містить  $\Pi$ -таблиця функцій несправностей, тим більше потрібно операцій по її обробці для побудови економних алгоритмів діагностування. Звідси можна зробити неформальний висновок про те, що чим

більше зусиль буде витрачено при побудові алгоритму діагностування, тим буде простіше подальша технічна реалізація системи діагностування.

Зокрема, ніяких зусиль не потрібно на побудову так званого тривіального алгоритму діагностування, що містить всі елементарні перевірки множини  $\Pi$ , але при цьому фізична модель повинна бути представлена  $\Pi$ -таблицею функцій несправності і тому буде максимально складною, а час і інші витрати на реалізацію алгоритму діагностування будуть найбільшими.

Інша крайня, завжди бажана, але часто недосяжна ситуація полягає в отриманні всіх ненадлишкових алгоритмів діагностування з метою подальшого вибору з них в якомусь сенсі найкращого (наприклад, мінімального) алгоритму. Цього можна досягти, зокрема, застосуванням алгоритмів  $A_1$  і  $A_2$ , що представляють собою, по суті, повний перебір всіх можливих рішень і тому вимагають максимально обсягу операцій з обробки  $\Pi$ -таблиці функцій несправностей. Між цими двома крайніми ситуаціями лежить ряд проміжних, що розрізняються об'ємами обчислень і відповідно розмірами витрат на реалізацію систем діагностування.

Найчастіше причиною вимушеної відмови від отримання мінімальних алгоритми-мов діагностування є великі розміри  $\Pi$ -таблиці функцій несправностей. Розміри таблиці визначаються як числом її рядків і стовпців, так і розмірністю результатів  $R_j, R^i_j \in R$  елементарних перевірок. Розглянемо шляхи зменшення розмірів  $\Pi$ -таблиці функцій несправностей, тобто обсягів тієї інформації, яка задається в якості вихідної для побудови алгоритмів діагностування, не маючи на увазі такі тривіальні можливості, як видалення повторюваних рядків і стовпців таблиці.

Почнемо з зменшення числа рядків шляхом укрупнення елементарних перевірок. Елементарна перевірка вище була визначена як деякий, в значній мірі довільний, експеримент над об'єктом діагностування. Якщо як елементарну перевірку прийняти такий експеримент, реалізація якого дає достатню для цілей діагностування опис поведінки об'єкта (в справному та всіх його несправних станах), то безліч  $\Pi$  стає одноелементна (таблиця функцій несправностей містить один рядок). Таке гранично можливе скорочення числа рядків  $\Pi$ -таблиці буде супроводжуватися збільшенням розмірності результатів елементарної перевірки, так як опис поведінки об'єкта буде максимально складним. При цьому втрачає сенс завдання мінімізації алгоритмів діагностування, бо існує єдиний тривіальний алгоритм діагностування. У цих умовах фізична модель і алгоритм діагностування будуть досить складними. Тим не менш, у ряді випадків подання математичної моделі об'єкта діагностування у вигляді однорядковою таблиці функцій несправностей може мати практичне значення. Це має місце, наприклад, у тому випадку, коли недоцільно або неможливо розчленувати експеримент над об'єктом на ряд елементарних перевірок.

Інший шлях скорочення числа рядків  $\Pi$ -таблиці функцій несправностей полягає у виключенні частини елементарних перевірок з числа всіх

допустимих. Прикладом може служити завдання тільки тих елементарних перевірок, впливу яких можуть зустріти в процесі виконання об'єктом його робочого алгоритму функціонування. Це безліч елементарних перевірок може виявитися достатнім для вирішення завдань перевірки справності, працездатності або правильності функціонування, чого не можна сказати щодо завдань пошуку несправностей об'єкта.

Ідеальним було б виключення з безлічі  $\Pi$  всіх тих елементарних перевірок, які свідомо не увійдуть в мінімальні алгоритми діагностування. Однак прості способи знаходження таких "непотрібних" рядків  $\Pi$ -таблиці функцій несправностей тобто способи, які не потребують складних процедур аналізу складу і властивостей всіх елементарних перевірок безлічі  $\Pi$ , невідомі.

Загальною вимогою при скороченні числа рядків таблиці функцій несправностей є контроль за тим, щоб у обраного безлічі  $\Pi$  елементарних перевірок зберігалася властивість повноти. Слід також пам'ятати, що скорочення числа рядків  $\Pi$ -таблиці, взагалі кажучи, може призвести до збільшення числа елементарних перевірок, що входять в алгоритм діагностування.

Скорочення числа стовпців таблиці функцій несправностей відповідає зменшенню числа розглянутих технічних станів об'єкта діагностування. У ряді випадків таке зменшення може бути визначене умовами розв'язуваної задачі. Наприклад, завдання діагностування технічного стану об'єкта в умовах його експлуатації в ряді випадків може вирішуватися при розгляді тільки безлічі.

Принципово можливо і завжди бажано виняток "непотрібних" стовпців таблиці, відсутність яких не знижує точності результатів (глибини) діагностування. Знаходження всіх таких стовпців, на жаль, є складним завданням, вирішення якої потребує спеціальних досліджень і відомо тільки для ряду окремих випадків, при яких враховуються як властивості структури об'єкта діагностування, так і класи можливих несправностей.

У загальному випадку при зменшенні числа стовпців таблиці функцій несправностей слід мати на увазі, що алгоритми діагностування, побудовані щодо деякого підмножини можливих технічних станів об'єкта, не завжди дозволяють визначити виключені з розгляду технічні стани. Більш того, необгрунтований виняток стовпців таблиці може призвести до отримання помилкових результатів діагностування. Наприклад, при реалізації алгоритму перевірки справності, побудованого в припущенні наявності тільки однієї несправної компоненти, можна одержати помилковий сигнал справності об'єкта при фактичній наявності в ньому кількох несправних компонент.

Тепер зупинимося на питанні скорочення розмірності результатів  $R_j, R^j \in R$  елементарних перевірок. Результат елементарної перевірки  $\pi_j$ , як зазначалося вище, перед-ставлять собою послідовність  $|\{\gamma\}_j|$ -мірних векторів значень сигналів в контрольних точках об'єкта. Значить, скорочення розмірності результатів елементарної перевірки можливе шляхом зменшення розмірності

вектора значень зазначених сигналів, а також шляхом зменшення числа векторів в їх послідовності.

Максимальне скорочення розмірності результатів елементарних перевірок П-таблиці функцій несправностей дає наступний прийом. У кожному рядку  $j$  таблиці всі результати елементарної перевірки  $\pi_j$ , що задовольняють умові  $R^i_j = R_j$ ,  $i = 1, 2, \dots, |S|$ , приймаються рівними одиниці. Решта результатів цієї елементарної перевірки, для яких має місце нерівність  $R^i_j \neq R_j$ , приймаються рівними нулю, незалежно від того, різні вони між собою або однакові. При цьому результат будь елементарної перевірки (безвідносно до фізичній природі впливів і відповідей, а також до складу і значенням вхідних сигналів і сигналів в контрольних точках) може трактуватися тільки як позитивний ( $R^i_j = 1$ ) або як негативний ( $R^i_j = 0$ ).

Спрощену таким чином таблицю функцій несправностей будемо називати двійковою математичною моделлю об'єкта діагностування. Зауважимо, що в цій моделі стовпець  $e$ , відповідний справного стану об'єкта, містить тільки позитивні результати елементарних перевірок.

У загальному випадку скорочення розмірності результатів елементарних перевірок супроводжується зменшенням числа різних результатів останніх. Це знижує можливості розрізнення технічних станів об'єкта і, як наслідок, може споживати збільшення числа елементарних перевірок, що входять в алгоритм діагностування. З іншого боку, скорочення розмірності результатів елементарних перевірок веде до спрощення реалізації операцій передачі, вимірювання, порівняння та аналізу цих результатів в системах діагностування.

Звичайно, завжди бажано скорочення розмірності результатів елементарних перевірок за рахунок виключення несуттєвих компонент векторів значень сигналів у контрольних точках і несуттєвих векторів цих значень, тобто таких компонент і векторів, виключення яких не змінює складу і кількості різних результатів елементарних перевірок в П-таблиці.

Зауважимо, що "укрупнення" елементарних перевірок збільшує розмірність їх результатів. Максимуму ця розмірність, як вказувалося, досягає в однорядковою таблиці функцій несправностей.

Отже, ефективних шляхів скорочення розмірів таблиці функцій несправностей практично немає. Таблиця залишається громіздкою і тому вимагає великих обсягів ви-чисельний в процесі її обробки. У цьому полягає основна причина пошуку та розробки різних більш економних способів подання та обробки інформації, необхідно для побудови та реалізації алгоритмів діагностування і фізичних моделей об'єктів діагностування. Природно, що в багатьох випадках "платою" за цю економію є відмова від отримання точних (оптимальних або мінімальних) рішень.

Як вказувалося, П-таблиця функцій несправностей є табличній формою завдання явної математичної моделі об'єкта діагностування ( $\psi, \{\psi_i\}$ ). Інформацію, що містить в П-таблиці, можна отримувати по частинах, що

відповідає роботі з неявній математичною моделлю об'єкта діагностування ( $\Psi, S, \Pi, \Psi \xrightarrow{s_i, \Pi} \Psi^i$ ).

### 3.5. Функціонально-логічні моделі

При діагностуванні технічного стану неперервних об'єктів широкого поширення набули допускові способи контролю.

Результати контролю параметрів у багатьох випадках при цьому наводяться по оцінкам виду "в нормі - не в нормі", "в допуску - не в допуску". Тому для опису поведінки неперервних об'єктів, діагноз технічного стану яких проводиться до-пусковими способами, природно застосовувати математичні моделі логічного типу, а для аналізу останніх - різні логічні методи.

Вихідні форми представлення об'єкта діагностування, за якими будуються математичні моделі логічного типу, можуть бути різними. Характерними формами є структурні, функціональні або принципіві схеми справного об'єкта, а також системи алгебраїчних, диференціальних та інших рівнянь.

Іноді для побудови моделей логічного типу досить знання причинно-наслідкових зв'язків між координатами або параметрами об'єкта діагностування.

Простота математичних моделей логічного типу є їх перевагою. Однак внаслідок цієї простоти на мові таких моделей деякі завдання діагностування технічного стану безперервних об'єктів не мають рішення. Наприклад, за допомогою логічної моделі місце несправності може бути зазначено лише з глибиною, що не перевищує частини об'єкта, що об'єднує в собі всі елементи замкнутого контуру зворотного зв'язку.

Рішення такого роду завдань вимагає залучення більш складних математичних моделей, що описують поведінку об'єкта більш точно, ніж логічна модель.

При вирішенні завдань діагностування технічного стану складних неодмінних об'єктів слід в першу чергу використовувати моделі логічного типу і тільки при необхідності залучати більш складні математичні моделі, прагнучи використати їх не для об'єкта в цілому, а тільки для деяких його складових частин.

Розглянемо формальну процедуру побудови логічної моделі. Нехай невідмінний об'єкт діагностування складається з  $N$  пов'язаних між собою блоків. Склад блоків, зв'язки між ними і зовнішні зв'язки представляють структуру об'єкта. Один і той же об'єкт може бути представлений різними його структурами, які відрізняються між собою в першу чергу складом і числом блоків.

З точки зору діагностування технічного стану об'єкта при його розбитті-ванні слід враховувати такі показники, як:

- Змінність блоків;

- Зручність вимірювання вихідних параметрів блоків;
- Конструктивні міркування і тобто будемо вважати, що структура об'єкта задана і представлена структурною схемою.

Кожен вхідний і вихідний сигнал характеризується, як правило, одним або не скільки фізичними параметрами. Кожен з цих параметрів можна представити окремим входом (виходом) блоку. Наприклад, якщо блок  $P_i$  (рис. 2.9) має два вхідних сигналу  $x_i$  і  $y_i$  і один вихідний сигнал  $z_i$ , кожен з яких характеризується двома фізичними параметрами, то в функціональній схемі блок  $P_i$  матиме чотири входи і два виходи.

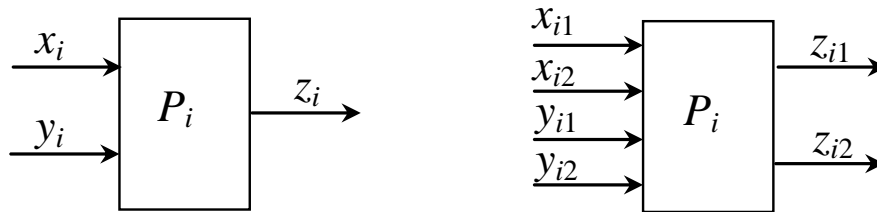


Рис. 23 – Ілюстрація «розщеплення» входів и виходів блока

Таким чином, деякі зв'язки структурної схеми опиняться на функціональній схемі "розщепленими".

Якщо деякий вихід  $z_i$  блоку  $P_i$  є входом  $u_k$  блоку  $P_k$ , "розщеплюється" на кілька виходів, то вхід  $u_k$  "розщеплюється" на таке ж число входів.

Виконавши "розщеплення" входів і виходів всіх блоків і з'єднавши між собою відповідні один одному "розщеплені" входи і виходи блоків, отримаємо функціональну схему об'єкта діагностування.

Слід зазначити, що при побудові функціональної схеми об'єкта вказане вище "розщеплення" входів і виходів блоків структури не є обов'язковим, тобто може не виконуватися зовсім або виконуватися частково. Тобто у функціональній схемі можуть бути входи і виходи, сигнали яких характеризуються декількома фізичними параметрами.

Якщо вхідні і вихідні параметри блоку не виходять за межі допустимих значень, то допустимо логічне висловлювання "значення входу (виходу) допустимо" або значення "істинно". В іншому випадку - "значення входу (виходу) не допустимо", "хибно". Тоді вхідні і вихідні змінні можна вважати двійковими логічними змінними.

Для отримання логічної моделі об'єкта кожен блок  $P_i$  функціональної схеми замінюється  $k_i$  блоками, кожен з яких має один вихід і суттєві для даного виходу входи.

Позначимо блоки логічної моделі об'єкта символами  $Q_1, Q_2, \dots, Q_h$ , де

$$h = \sum_{i=1}^N k_i .$$

У загальному випадку кожному вихідного блоку у функціональній схемі відповідає підмножина блоків логічної моделі з безлічі  $\{Q_1, \dots, Q_h\}$ . В окремому випадку, коли всі блоки мають по одному виходу, кожен з яких характеризується одним фізичним параметром, логічна модель може збігатися з функціональною схемою об'єкта.

Логічну модель називають правильною, якщо:

- для будь-якої пари її блоків  $Q_i$  і  $Q_j$ , у яких вихід  $z_i$  одного з блоків є входом  $u_j$  іншого, виконується умова: області допустимих значень входу  $u_i$  і виходу  $z_i$  і області їх неприпустимих значень відповідно збігаються;

для будь-якої пари її блоків  $Q_i$  і  $Q_j$ , що мають вхід  $u_i$  і  $u_j$ , які характеризуються одним і тим же параметром, виконується умова: області допустимих значень і відповідної області неприпустимих значень цих входів збігаються.

Для правильної логічної моделі символи внутрішніх входів можна замінити на символи пов'язаних з ними виходів. На цьому завершується побудова логічної моделі.

Кількість блоків в такій моделі, як правило збільшується в порівнянні з вихідною функціональною схемою, але цінність цієї моделі полягає в наступному:

- Кожен вихідний сигнал  $z_i$  ототожнюється з результатом елементарної перевірки;

- Функціональна діагностична модель може бути представлена орієнтованим графом, вершини якого - блоки функціонально-діагностичної моделі - з'єднані дугами, що представляють зв'язки між блоками, вхідними та вихідними полюсами;

- Орієнтовані графи на базі функціонально-діагностичної моделі є графоаналітичними моделями і в рамках теорії підкоряються перетворенням і спрощень, тобто в кінцевому рахунку оптимізації алгоритмів діагностування;

- Логічна функціонально-логічна модель лежить в основі побудови матриці станів, важливого інструменту аналізу об'єкта діагностування та синтезу систем технічного діагностування;

- Логічна функціонально-діагностична модель дає наочне представлення про точки і характері виникнення відмови, а також його прояви.

Розглянемо приклад перетворення функціональної схеми, зображеної на рис. 23, в логічну модель з "розщепленими" входами і виходами. Нехай вхідна змінна  $x_4$  і вихідна  $z_5$  характеризуються одним параметром, а решта вхідні і вихідні змінні - двома. Тоді після перетворення відповідно до розглянутих вище правилами отримаємо логічну модель, зображену на рис. 24.

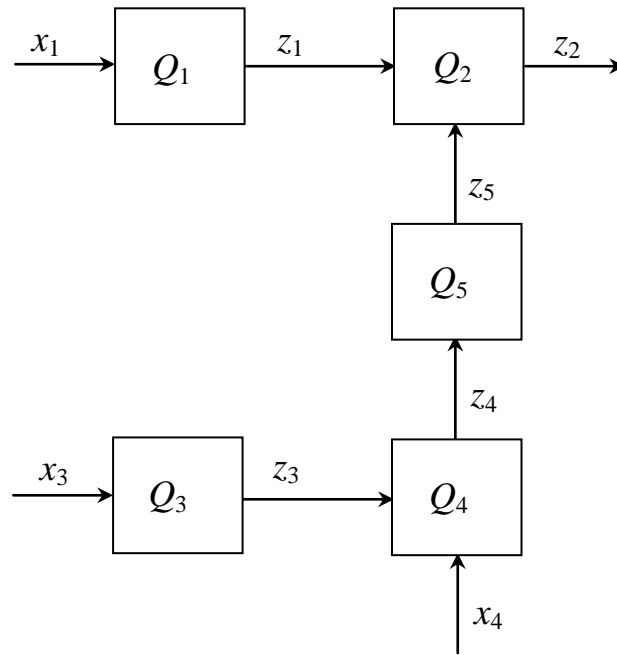


Рис. 24 – Логічні моделі об'єкта діагностування

При побудові логічної моделі "розщеплення" входів і виходів не є обов'язковою умовою. Однак при використанні в якості моделі схему, зображено на рис 24, ми можемо визначити несправний блок, але не можемо сказати який з вихідних параметрів цього блоку не «в допуску». Розглянемо характер можливих несправностей. Введемо поняття функції умов роботи  $F_i$  блоку  $Q_i$ ,  $F_i$  - це булева функція входніх змінних блоку  $Q_i$ . Припустимо, що об'єкт однорежимний, а мінімальні форми функцій умов роботи всіх блоків моделі складаються з одного члена, що є кон'юнкція зовнішніх і внутрішніх змінних, тобто мають вигляд

$$F_i = x_{i1}x_{i2} \cdots x_{in}y_{i1}y_{i2} \cdots y_{im} \quad (10)$$

Всі можливі несправності блоку  $Q_i$  можна розбити на два класи:

- Несправності, які призводять до появи неправильного значення виходу  $z_i = 0$  замість очікуваного правильного  $z_i = 1$  (позначимо таку несправність як  $1 \rightarrow 0$ );
- Несправності, які переводять правильне значення  $z_i = 0$  в неправильний  $z_i = 1$  (позначимо  $0 \rightarrow 1$ ).



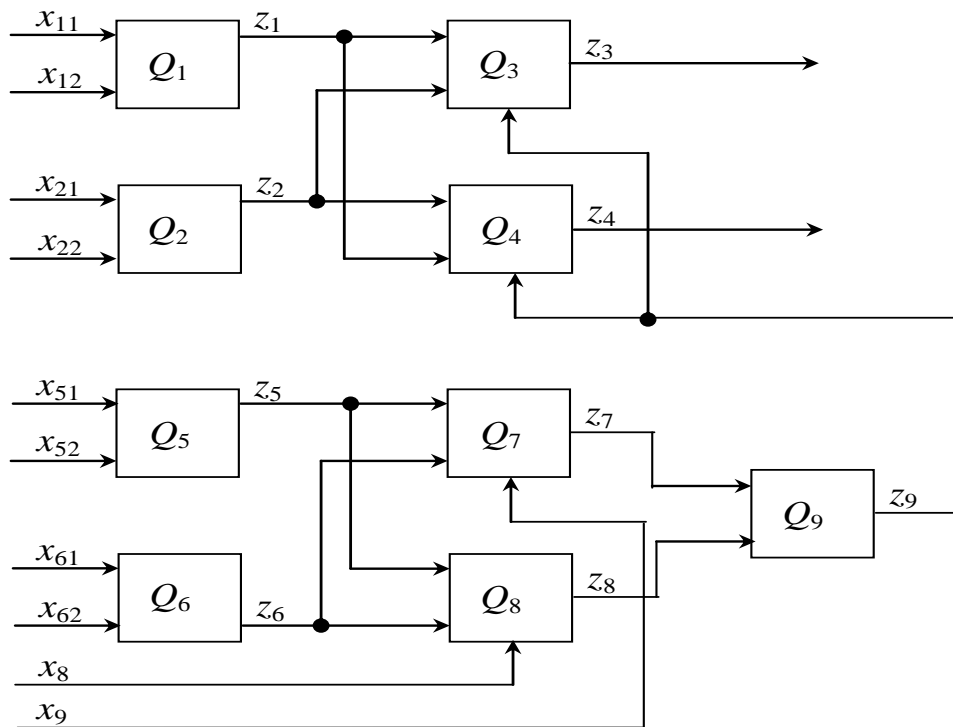


Рис. 25 – Логічна модель з «розщепленими» входами і виходами

Для більшості реальних неперервних об'єктів фізично можуть мати місце несправності тільки типу 1→0. Виключення з розгляду 0→1 відповідає передположенню, що ніяка несправність блоку при неприпустимому значенні хоча б одного вхідного параметра, коли згідно з формулою  $F_i = 0$ , не призводить до появи допустимо значення вихідного параметра. Якщо таке можливо, то для обробки логічної моделі слід користуватися методами обробки моделей дискретних об'єктів діагностування. Фактично значення виходу  $z_i$  блоку  $Q_i$  залежить від того, чи справний цей блок або несправний, а також від значення функції  $F_i$ . Складемо логічний вираз: "блок  $Q_i$  справний" і позначимо цей стан як  $Q_i = 1$ ; в іншому випадку  $Q_i = 0$ . Розглянемо можливі поєднання довічних змінних  $F_i$  і  $Q_i$  і відповідне цьому поєднанню  $z_i$  (таблиця 2) Формально з таблиці випливає, що  $z_i$  є кон'юнкція змінних  $F_i$  и  $Q_i$ :

$$z_i = Q_i F_i \quad (11)$$

Фізично це відповідає тому, що вихід  $z_i$  блоку  $Q_i$  буде прийнятний тільки в тому випадку, якщо всі його входи допустимі (при этом  $F_i = 1, Q_i = 1$ ).

Таблиця 2

$F_i$	$Q_i$	$z_i$
1	1	1
0	1	0
1	0	0
0	0	0

При прийнятих умовах (об'єкт однорежимний, умови роботи всіх блоків визначаються (10), можливі несправності тільки типу 1→0) завдання правильності функціонування, працездатності і справності об'єкта не різняться між собою. Не розрізняються і завдання пошуку несправностей. Користуючись функціональною моделлю, можна задати всі безліч можливих со-стоянь об'єкта. При цьому потужність безлічі станів  $\{S_i\}$  визначається числом можливих станів функціональних елементів моделі. Для заповнення таблиці функції несправностей необхідно виконати аналіз логічної моделі. Звернемося до рис.2.10 і випишемо функції умов роботи блоків моделі:  $F1 = x1$ ;  $F2 = z1 z5$ ;  $F3 = x3$ ;  $F4 = x4 z3$ ;  $F5 = z4$ . Складемо рівності типу  $z_i = Q_i F_i$ :

$$z_1 = Q_1 x_1; z_2 = Q_2 z_1 z_5; z_3 = Q_3 x_3; z_4 = Q_4 x_4 z_3; z_5 = Q_5 z_4 \quad (12)$$

Єдиним впливом буде  $x1 = x3 = x4 = 1$ . Заповнення клітин таблиці 3 можна вести або за стовпцями, або по рядках.

При побудові за стовпцями задаються технічним станом об'єкта, підставляючи в рівняння (12) відповідні значення.

Перший стовець обчислюється за умови  $Q_i = 1$  для всіх  $i$ .

Другий стовець: умова  $Q1 = 0$ ; решта рівні одиниці.

Отримуємо:  $z_1 = 0$ , т. к.  $Q_1 = 0$ ;

$z_2 = 0$ , т. к.  $z_1 = 0$ ;

$z_3 = 1$ , т. к.  $Q_3 = 1, x_3 = 1$ ;

$z_4 = 1$ , т. к.  $Q_4 = 1, x_4 = 1, z_3 = 1$ ;

$z_5 = 1$ , т. к.  $Q_5 = 1, z_4 = 1$ .

Таблиця 3

R		Таблиця 3					
		e	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$
П	$z_1$	1	0	1	1	1	1
	$z_2$	1	0	0	0	0	0
	$z_3$	1	1	1	0	1	1
	$z_4$	1	1	1	0	0	1
	$z_5$	1	1	1	0	0	0

Заповнення по рядкам зводиться до визначення залежності виходів блоків моделі від всіх змінних  $Q_i$  із рівняння (12):

Перший рядок:  $z_1 = Q_1 x_1$ .

Другий рядок:  $z_2 = Q_2 z_1 z_5 = Q_2 Q_1 x_1 z_5 = (Q_5 z_4) Q_1 Q_2 x_1 = Q_1 Q_2 x_1 Q_5 z_4 = (Q_4 x_4 z_3) Q_1 Q_2 Q_4 Q_5 x_1 = Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 Q_5 x_1 x_3$ , тощо.

## 4 СПОСОБИ ПОБУДОВИ АЛГОРИТМІВ ПОШУКУ НЕСПРАВНОСТЕЙ

### 4.1 Метод половинного розбиття

Метод половинного розбиття використовується при розробці алгоритмів пошуку несправностей в побутовій РЕА з послідовно з'єднаними елементами. Апаратура, що діагностується, складається з  $N$  послідовно сполучених функціональних елементів, непрацездатна через відмову  $i$ -го елемента ( $i=1, 2 \dots n$ ). Ймовірності станів  $P(S_i)$  однакові для всіх функціональних елементів, вартості контролю вихідних параметрів також однакові. За цих умов першим слід контролювати параметр, що несе максимум інформації про стан апаратури, що діагностується, невизначеність стану якої оцінюється величиною ентропії.

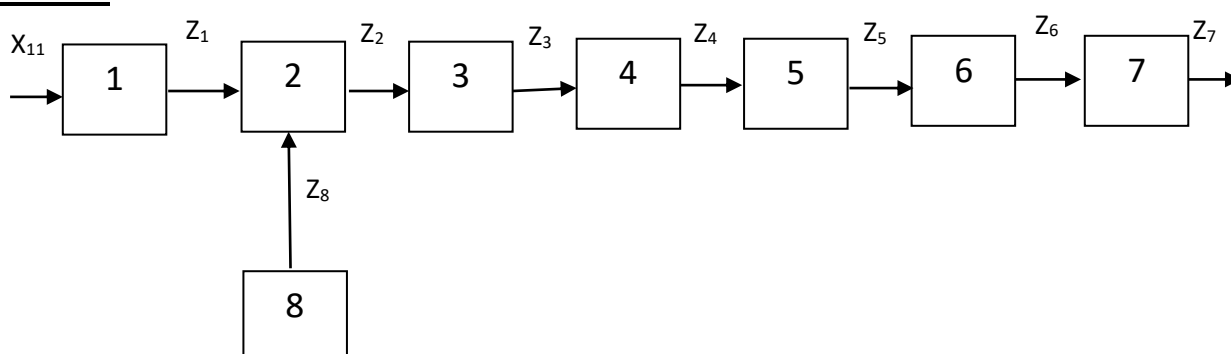
$$H_0 = -\sum_{i=1}^N P(S_i) \log_2 P(S_i) = \log_2 N$$

Таким чином, доцільно контролювати такий параметр  $z_k$ , який розбиває об'єкт діагностики навпіл, тобто щоб  $H(z_k) = \frac{H_0}{2}$  при позитивному і негативному результатах контролю. Кожен наступний параметр для контролю вибирається аналогічно, тобто ділять систему, що утворюється навпіл, після виконання попередньої перевірки залежно від результатів її результату.

Приклад 2. Для об'єкта, що діагностується, функціональна схема якого наведена на рис. 1.1, методом половинного розбиття побудувати алгоритм пошуку несправностей. Ймовірності станів  $P(S_i)$  однакові для всіх функціональних елементів, вартості контролю вихідних параметрів  $Z_i$  також однакові.

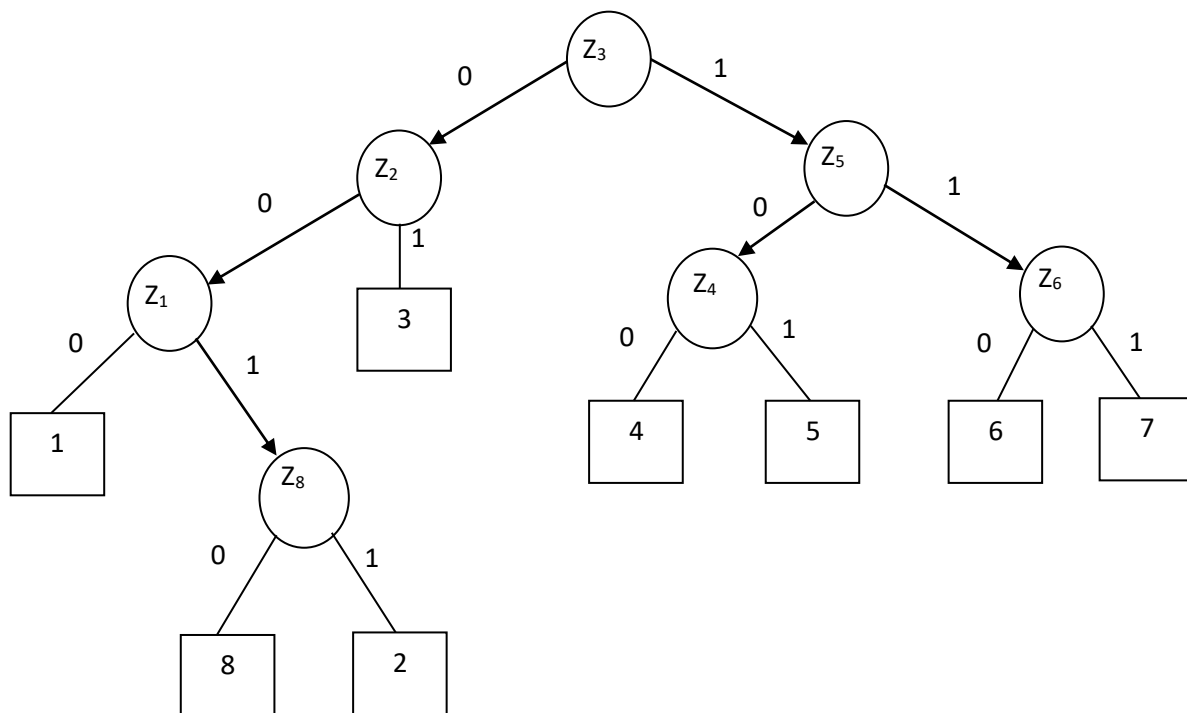
Функціональна схема вибирається згідно варіанту.

#### Рішення:



Оскільки пристрій, що діагностується, складається з парного числа функціональних елементів, першим контролюється параметр  $Z_3$ , який

розбиває об'єкт, що діагностується, навпіл. При позитивному результаті  $Z_3$  (у допустимих межах), приймають, що *функціональні елементи* 1, 2, 3, і 8 справні, а несправність знаходиться у функціональному елементі 4, 5, 6 або 7. При цьому наступним контролюватиметься параметр  $Z_5$  і т. д. При негативному результаті контролю параметра  $Z_3$  наступним контролюється параметр  $Z_2$  і т. д. В результаті отримаємо схему пошуку несправностей в об'єкті, що діагностується. (0 – значення не лежать в межах допустимих значень 1 – значення лежать в межах допустимих значень). Метод половинного розбиття застосуємо і для випадку, коли в ОД (об'єкті діагностування) несправні декілька елементів.



#### 4.2 Метод «час - ймовірність»

Цей спосіб знаходить застосування для РЕА, в якій функціональні елементи з'єднані довільно і мають різні ймовірності станів і різні вартості проведення контролю параметрів. Ефективність способу оцінюється середнім часом пошуку несправного елемента або середнім часом контролю одного параметра.

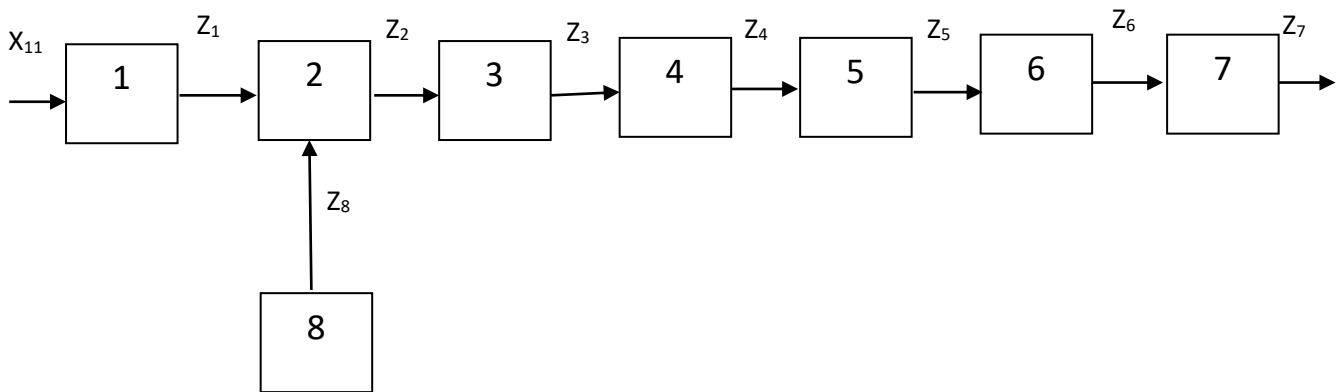
Послідовність контролю параметрів встановлюється у порядку зменшення величин

$$\frac{P(S_1)}{t_1} > \frac{P(S_2)}{t_2} > \dots > \frac{P(S_N)}{t_N}, \text{ де } t - \text{ час пошуку}$$

Алгоритм, побудований за таким способом, володіє мінімальним середнім часом пошуку будь-якого несправного елементу.

Приклад 3. Для функціональної моделі, наведеної на рисунку дано ймовірності станів  $P(S_i)$  і ефективність способу оцінюваним середнім часом пошуку несправного елементу. Визначити за методом «час - ймовірність» послідовність контролю параметрів.

Рішення:



Для функціональної моделі, наведеної на рисунку дано:

1.  $P(S_1) = 0,1$ ;  $P(S_2) = 0,25$ ;  $P(S_3) = 0,05$ ;  $P(S_4) = 0,08$ ;  $P(S_5) = 0,1$ ;  $P(S_6) = 0,15$ ;  $P(S_7) = 0,17$ ;  $P(S_8) = 0,1$ .
2.  $t_1 = t_4 = 2$  хв;  $t_2 = t_6 = t_8 = 0,5$  хв;  $t_3 = t_5 = t_7 = 1$  хв.

Розраховуємо відношення за формулою  $\frac{P(S_1)}{t_1} > \frac{P(S_2)}{t_2} > \dots > \frac{P(S_N)}{t_N}$

$$P(S_1) = 0,1/2 = 0,05; P(S_2) = 0,25/0,5 = 0,5; P(S_3) = 0,05/1 = 0,05;$$

$$P(S_4) = 0,08/2 = 0,04; P(S_5) = 0,1/1 = 0,1; P(S_6) = 0,15/0,5 = 0,3;$$

$$P(S_7) = 0,17/1 = 0,17; P(S_8) = 0,1/0,5 = 0,2.$$

Розташовуючи в порядку зменшення величини  $P(S_i)/t_i$ , отримаємо наступну послідовність для контролю параметрів:

$$Z_2 \rightarrow Z_6 \rightarrow Z_8 \rightarrow Z_7 \rightarrow Z_5 \rightarrow Z_1 \rightarrow Z_3 \rightarrow Z_4$$

### 4.3 Методи розрахунку надійності приладів і систем автоматизації, види діагностичних параметрів

#### Різновиди відмов

Виникнення **відмов** (відмова – подія, що полягає в частковій або повній втраті працездатності) в РЕА залежить від різних факторів, обумовлених як внутрішніми властивостями апаратури, так і впливом зовнішніх факторів.

## Класифікація відмов

По характеру зміни параметрів до моменту виникнення відмови	По взаємозв'язку між собою	По характеру часу порушення працездатності	За наявністю зовнішніх ознак	По причинах виникнення
<b>Раптова</b> – характеризуються стрибкоподібною зміною одного або декількох параметрів	<b>Залежна</b> – відмова елемента об'єкта, обумовлена відмовою іншого елемента	<b>Збої</b> – відмова, що самоусувається, приводить до короткочасного порушення працездатності	<b>Явна</b> - відмова, яка виявляється відразу після її появи без застосування вимірювальних приладів	<b>Конструкційна</b> - відмова, що виникає в результаті порушення встановлених правил і норм конструювання об'єкта
<b>Поступова</b> - характеризуються поступовою зміною значень одного або декількох параметрів	<b>Незалежна</b> - відмова, не обумовлена відмовами інших елементів	<b>Переміжна</b> – багаторазовий збій одного і того ж характеру	<b>Неявна</b> - відмова, яка не має зовнішніх ознак прояву і може бути виявлена тільки за допомогою відповідних вимірювань	<b>Виробнича</b> - відмова, що виникає в результаті порушення встановленого процесу виготовлення або ремонту об'єкта <b>Експлуатаційна</b> - відмова, що виникає в результаті порушення встановлених правил або умов експлуатації об'єкта

**Повна відмова** - виключає будь-яке використання об'єкта за призначенням.

**Часткова відмова** - допускає обмежене використання виробів за призначенням.

Залежно від характеру змін параметрів об'єкта розрізняють:

**Раптова відмова** - викликається статистично незакономірними змінами параметрів об'єкта.

**Поступова (дрейфова) відмова** - при статистично закономірних змінах параметрів об'єкта.

При поступових відмовах слід вказувати допустимі межі, в межах яких елемент ще обмежено застосовний. Ці межі для різних елементів (відповідно допустимим для різних класів змін) визначені національними та міжнародними стандартами, що забезпечує оптимальне застосування їх у відповідних схемах. Слід враховувати, що стосовно кожної конкретної схеми для кожного елемента допустимо інше, часто досить велике відхилення від нормальних експлуатаційних характеристик. Результатом цього є часто дуже утруднений облік поступових відмов у складних схемах при розрахунках найбільших ймовірностей відмов елементів і приладів.

Таблиця 4

Причини відмов різних конструктивних елементів

Конструктивні елементи	Причини відмов	Розподіл ймовірностей повних відмов, %	
		коротке замикання	обрив
<i>Резистори</i>			
Об'ємні Плівкові Металоплівкові Дротові Змінні	Дрейф R, коротке замикання	90	10
	Дрейф R, коротке замикання, шуми	5	95
	Дрейф R, коротке замикання	5	95
	Дрейф R, обрив	5	95
	Дрейф R (привод), обрив контакта, шуми	10	90
<i>Конденсатори</i>			
Слюдяні Керамічні Плівкові Паперові Танталові (сухі)	Дрейф C, коротке замикання	90	10
	Те ж	95	5
	»	80	20
	»	80	20
	Дрейф C, струм витоку	90	10
<i>Транзистори</i>			
Підсилювачі Вентилі	Зміна коефіцієнта посилення, коротке замикання	90	10

Діоди	Коротке замикання, обрив	40	60
Трансформатори	Замикаючий струм (80%),	90	10
Катушки	коротке замикання		
Дроселі	Коротке замикання, обрив	60	40
	Коротке замикання, обрив	50	50

Якщо події  $A$  і  $B$  взаємно виключають один одного, то

$$P(A \cap \tilde{B}) = 0. \quad (13)$$

Ймовірність настання події  $A$  або  $B$ , що взаємно не виключають один одного, рівна

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B), \quad (14)$$

звідки, використовуючи рівняння (11) для незалежних подій  $A$  і  $B$ , маємо

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B), \quad (15)$$

тобто в загальному випадку отримуємо *правило складання вірогідності*.

#### 4.4. Надійність і готовність

При аналізі приладів і систем автоматизації з точки зору певних видів відмов часто використовують метод «дерева помилок». Вид відмови, що підлягає дослідженню (так звана небажана подія) утворює вершину дерева; потім систематично визначаються окремі помилки, комбінації з двох, з трьох і так далі помилок, що викликають небажану подію. Вживання цього методу особливо виправдане при аналізі великих складних систем, що складаються з електронних, електричних і механічних частин.

При розгляді приладів і систем автоматизації необхідно також враховувати можливість *ремонту*. Принципово розрізняють два випадки:

- ремонт після виникнення несправності;
- попереджувальне обслуговування перед виникненням несправності.

Потім можуть бути наступні відмінності:

а) несправність елемента викликає відмова об'єкта; після закінчення певного часу, необхідного для ремонту, об'єкт знову готовий до застосування;

б) несправність елемента не викликає відмови об'єкта (конструкцією об'єкта передбачено резервування); після певного ремонту резервування об'єкта знову повністю відновлено.

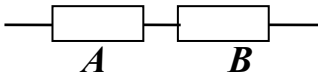
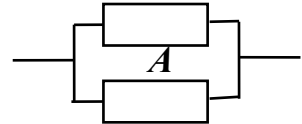
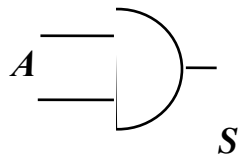
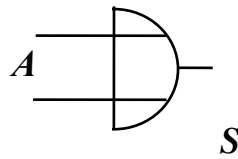


У цьому зв'язку слід звернути увагу на дуже важливу відмінність між *надійністю* і *готовністю*.

**Надійність** (ймовірність безвідмовної роботи) об'єкта характеризує ймовірність того, що до моменту часу  $t$  об'єкт буде діяти (тобто до певного часу не буде відмови); **готовність** об'єкта характеризує ймовірність того, що в певний момент часу  $t$  об'єкт буде діяти (тобто протягом часу  $0 \dots t$  можуть відбуватися відмови і проводитися ремонт). Від призначення об'єкта залежить, яка з двох ймовірностей є визначальною. З обох наведених визначень випливає, що система, що легко ремонтується при малій надійності може володіти високим коефіцієнтом готовності. У той же час система, що володіє високою надійністю, рідше повинна ремонтуватися, що вимагає менше запасних частин і меншій чисельності обслуговуючого персоналу. Тому для оцінки можливості застосування об'єкта або системи завжди необхідно оцінити як його надійність, так і готовність.

Таблиця 5

Ймовірності безвідмовної роботи і відмов схем з послідовно і паралельно сполученими елементами

Система	Тип з'єднання	
	послідовне	паралельне
Блок-схема		
Логічна схема		
Логічне представлення функції системи		

Таблиця можливих комбінацій станів елементів (таблиця істинності)	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>S</i>
	1	1	1	1	1	1
	1	0	0	1	0	1
	0	1	0	0	1	1
	0	0	0	0	0	0
Представлення матриці істинності за допомогою логічно виключаючих елементів «ИЛИ»	Система діє					
	Система відмови- ла					
Відповідні показники надійності (при незалежних блоках <i>A</i> і <i>B</i> )	Ймовір- ність безвід- мовної роботи	$R_A(t)R_B(t) = R_S(t)$	$R_A(t)R_B(t) + R_A(t)[1 - R_B(t)] +$ $+ [1 - R_A(t)] R_B(t) = R_S(t)$ $R_A(t) + R_B(t) - R_A(t)R_B(t) =$ $= R_S(t)$			
	Ймові- рність відмов	$F_A(t)F_B(t) +$ $+ F_A(t)[1 - F_B(t)] +$ $+ [1 - F_A(t)] F_B(t) =$ $= F_S(t)$ $F_A(t) + F_B(t) -$ $- F_A(t)F_B(t) = F_S(t)$	$F_A(t)F_B(t) = F_S(t)$			

#### 4.5 Надійність простих схем

При оцінці сумарної надійності  $R_S(t)$  насамперед встановлюють блоки, несправність яких може призвести до відмови схеми. Потім  $R_S(t)$  визначаються за рівнянням (16) стосовно послідовного з'єднання цих блоків як добуток їх надійності  $R_i(t)$ :

$$R_S(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \dots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t); \quad (16)$$

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i} = e^{-\lambda_s t};$$

$$Z_S = \lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \quad f_S(t) = \lambda_s e^{-\lambda_s t} = \sum_{i=1}^n \lambda_i e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i};$$

### Надійність схем з резервуванням

У схемах з резервуванням передбачені додаткові блоки, що забезпечують при відмові частин, що визначають дію системи, заміну останніх і, таким чином, подальшу працездатність всієї системи. Найпростішими формами резервування є наступні:

а) **паралельне з'єднання** двох блоків **A** та **B**. Для виконання системою заданих функцій досить бездоганної дії блоку **A** чи **B**; обидва блоки діють незалежно, але не виключають один одного. З рівняння (3.4) слідує:

$$R_S(t) = R_A(t) + R_B(t) - R_A(t) \cdot R_B(t). \quad (17)$$

Відповідно для **n** паралельних блоків (1 з **n** блоків системи):

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)]; \quad R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\lambda_i t}]; \quad (18)$$

і для  $\lambda_i = \lambda$

$$R_S(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n; \quad Z_S(t) = \frac{n\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{n-1}}{1 - (1 - e^{-\lambda t})^n}.$$

б) **часткове резервування**. На відміну від паралельного з'єднання (1 з **n** блоків системи) при частковому резервуванні для забезпечення виконання системою заданих функцій необхідно більше одного з **n** блоків (**m** з **n** блоків системи). Для схеми 2 з 3, що складається з блоків **A**, **B**, **C**, згідно з наведеними в табл. 5 правилами отримуємо:

$$S = (A \cap B \cap C) \cup (A \cap B \cap \bar{C}) \cup (A \cap \bar{B} \cap C) \cup (\bar{A} \cap B \cap C); \quad (19)$$

$$R_S(t) = R_A \cdot R_B + R_A \cdot R_C + R_A \cdot R_C - 2R_A \cdot R_B \cdot R_C$$

і при рівній надійності всіх трьох блоків:

$$R_A = R_B = R_C = R; \quad R_s(t) = 3R^2(t) - 2R^3(t) = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}. \quad (20)$$

За допомогою отриманих формул для послідовного і паралельного з'єднань, а також часткового резервування можуть бути розраховані і схеми більш складних конфігурацій, наприклад, паралельно-послідовні і послідовно-паралельні системи. При цьому схеми поділяють на групи блоків, розрахунок яких виконують незалежно, а потім групи з'єднують.

в) **резервування з перемиканням.** У багатьох випадках з схемних міркувань доцільно, щоб резервний блок при нормальній роботі системи був відключений і лише при несправності основного блоку підключався до системи. Принципово розрізняють два випадки - навантажений і ненавантажений резерв. У першому випадку резервний блок, будучи відключеним від основної лінії, працює практично в тому ж режимі, що й основний (при нормальних умовах); у другому випадку резервний блок повинен включатися лише при необхідності. У першому випадку резервний блок  $B$  володіє до моменту  $t_1$  свого підключення надійністю  $R_B(t_1) < 1$ , у другому - приймає  $R_B(t) = 1$ .

**Навантажений (гарячий) резерв.** Для простої схеми, показаної на рис. 26, приймаючи можливі при відмові перемикача  $\bar{U}$  помилки «включає помилково без необхідності» і «не включає при необхідності» рівноімовірними, знаходимо згідно з правилами, наведеними в табл. 5:

$$S = (A \cap B \cap U) \cup (A \cap B \cap \bar{U}) \cup (A \cap \bar{B} \cap U) \cup (\bar{A} \cap B \cap U); \quad (21)$$

$$R_s(t) = R_A R_B + R_U (R_A + R_B) - 2R_A R_B R_U$$

і при  $R_A = R_B = R = e^{-\lambda t}$

$$R_s(t) = R^2(1 - 2R_U) + 2RR_U;$$

$$R_s(t) = e^{-\lambda t} - 2R_U(t)(e^{-2\lambda t} - e^{-\lambda t}). \quad (22)$$

**Ненавантажений (холодний) резерв.** Вважаючи переключаючий елемент ідеальним ( $R_U = 1$ ), для схеми, отримаємо:

$$S = (A \cap B) \cup (A \cap \bar{B}) \cup (\bar{A} \cap B) \rightarrow R_s(t) = R_A(t) + R_{\bar{A} \cap B}(t); \quad (23)$$

Другий член повинен бути розрахований окремо, тому що внаслідок прийнятої умови  $R_B(t_1) = 1$  відмови обох блоків  $A$  та  $B$  незалежні. Ймовірність відмови блоку  $A$  в інтервалі часу  $dt_1$  становить:

$$f_A(t_1) dt_1 =$$

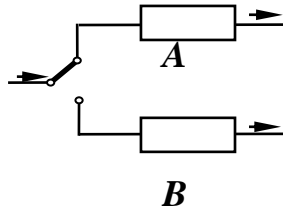


Рис. 26 - Проста резервована схема з перемиканням

Ймовірність безвідмовної роботи блоку  $B$  після моменту перемикання  $t_1$  дорівнює  $R_B(t) = e^{-\lambda_B(t-t_1)}$ . При узгодженні обох ймовірностей і інтегруючи, одержуємо:

$$R_{\bar{A} \cap B}(t) = \int_0^t \lambda_A e^{-\lambda_A t_1} e^{-\lambda_B(t-t_1)} dt_1$$

або

$$R_S(t) = e^{-\lambda_A t} + \frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_B} (e^{-\lambda_B t} - e^{-\lambda_A t}), \quad (27)$$

де другий член визначає поліпшення надійності блоку  $R_A(t) = e^{-\lambda_A t}$  при наявності резервного блоку. Тому надійність перемикача  $R_U(t)$  може бути легко введена в рівняння (27):

$$R_S(t) = e^{-\lambda_A t} + R_U(t) \frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_B} (e^{-\lambda_B t} - e^{-\lambda_A t}). \quad (28)$$

Якщо бажано врахувати певну інтенсивність відмов ненагруженого резервного блоку ( $\lambda'_B$  для  $t < t_1$ ), то отримуємо

$$R_S(t) = e^{-\lambda_A t} + R_U(t) \frac{\lambda_A}{\lambda_A + \lambda'_B - \lambda_B} (e^{-\lambda_B t} - e^{-(\lambda_A + \lambda_B)t}). \quad (29)$$

#### 4.6 Методи розрахунку надійності

Залежно від поставленого завдання і складу складних систем застосовуються різні методи розрахунку їх надійності. Для малих систем з успіхом застосовні методи аналізу функції небезпеки відмови, ефективності або станів системи.

Методи *аналізу функції небезпеки відмови та ефективності* засновані на складанні переліку всіх можливих відмов елементів системи та розгляді їх впливу на її працездатність. Ці методи дозволяють оцінювати якісно, а також кількісно вимоги, пред'явлені до системи. Однак для великих систем вони малоприменні і недостатньо наочні.

Метод аналізу станів системи застосовний при можливості визначення кількості різних станів системи і опису її переходів з одного стану в інший, як стохастичних процесів. Дуже часто використовуються процеси оновлення, процеси Маркова або їх узагальнення. У числі інших показників може бути обчислена ймовірність перебування системи в різних станах. Зазвичай поведінка системи дуже добре описується стохастичними процесами. При аналізі станів виникає проблема визначення перехідних станів і ймовірностей переходів або розподілів останніх. Метод непридатний для великих схем, так як при знаходженні кожного елемента системи в одному з двох станів («робочому» або такому, що «відмовив») система, що містить  $n$  елементів, може перебувати в  $2^n$  різних станах.

Для досліджень великих систем зазвичай застосовується комбінований метод аналізу "дерева помилок" і послідовності подій. При аналізі послідовності подій для кожної події (наприклад, припинення живлення), що виділяється, визначаються успішність або недостатність передбачених захисних заходів (наприклад, включення місцевого джерела живлення) і вплив цієї події на систему, що відображається у вигляді графіку послідовності подій. Оцінка різних послідовностей подій зазвичай робиться методом "дерева помилок". "Дерево помилок" є логічною (булевою) моделлю, причому, як правило, стан кожного елемента системи називається при відмові "істинне", а в робочому стані "помилкове". При можливості більш двох станів одного елемента (наприклад, "клапан працює", "клапан помилково відкритий", "клапан помилково закритий") останній розглядається як той, що складається з декількох елементів.

Обробка "дерева помилок" здійснюється за допомогою обчислювальних машин. Залежно від використовуваного методу обробки застосовні моделюючі або аналітичні програми.

## Різновиди дефектів

Дефекти поділяють на допустимі і недопустимі в залежності від їх потенційної небезпеки. До недопустимих дефектів відносять ті, які підлягають обов'язковому виявленню і негайному усуненню або виправленню.

Різноманіття дефектів можна проілюструвати прикладом можливих порушень суцільності металу, які є наслідком недосконалості його структури і виникають на різних стадіях технологічного процесу. До дефектів тонкої структури відносяться дислокації - особливі зони спотворень атомної решітки. Субмікроскопічні тріщини (кілька мікрон) утворюються в процесі обробки деталі і різко знижують її міцність. Найбільш грубими дефектами металу є макроскопічні.

Дефекти металу розрізняють за розмірами і розташуванням, а також за природою і походженням. Вони можуть утворитися в процесі плавки і лиття

(раковини, пори, зони рихлості, включення, ліквідаційні зони, неслітинб, гарячі тріщини і т.д.), обробки тиском (внутрішні та поверхневі тріщини, розшарування, прес-утяжини, рваніни, закати, плени, флокени та ін.), термічної і хіміко-термічної обробки (зони грубозернистої структури, перегріву, перепалу та ін.), обробки різанням (шліфувальні тріщини, припалу), зварювання, пайки, склеювання (непровар, тріщини, непропай, непроклеї) , зберігання та експлуатації (корозія, втомні тріщини, повзучість та ін.).

## Класифікація фізичних параметрів

Фізичні параметри поділяють на такі групи:

**1. Кінематичні:** час, швидкість, прискорення, кутова швидкість, кутове прискорення, період, частота періодичного процесу, фаза, об'ємна витрата, щільність об'ємної витрати, градієнт швидкості.

**2. Геометричні:** довжина, площа, плоский кут, тілесний кут, кривизна лінії, кривизна поверхні, момент опору плоскої фігури, осьовий і полярний моменти інерції площі плоскої фігури.

**3. Статичні і динамічні:** маса, сила, імпульс сили, кількість руху, тиск, градієнт тиску, робота, енергія, об'ємна щільність, потужність, коефіцієнт тертя, коефіцієнт опору, коефіцієнт пружності, момент сили, момент інерції, масова витрата, масова швидкість потоку, згасання, добротність.

**4. Механічні і молекулярні:** щільність, питомий об'єм, питома вага, кількість речовини, відносна молекулярна маса, молярна маса, молярний об'єм, коефіцієнт поздовжнього розтягування, модуль поздовжньої пружності, коефіцієнт всебічного стиснення, твердість, ударна в'язкість, динамічна в'язкість, текучість, кінематична в'язкість, коефіцієнт поверхневого натягу, концентрація, коефіцієнт дифузії, функція розподілу.

**5. Теплові:** температура, кількість теплоти, температурний градієнт, тепловий потік, поверхнева щільність теплового потоку, ентропія, теплоємність, теплота фазового перетворення, теплота згоряння палива, коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт теплопередачі, коефіцієнт температуропровідності, температурні коефіцієнти.

**6. Акустичні:** звуковий тиск, об'ємна швидкість, звукова енергія, щільність звукової енергії, інтенсивність звуку, акустичне опір, питомий акустичний опір, механічний опір, інтенсивність звуку, висота звуку, тембр звуку, гучність звуку, акустичний коефіцієнт відбиття, акустичний коефіцієнт поглинання, акустична проникність перегородки, час реверберації.

**7. Електричні та магнітні:** електричний заряд, поверхнева щільність заряду, напруженість електричного поля, електричне зміщення, потік електричного зміщення, потенціал, електричний момент диполя, ємність, поляризована, діелектрична проникність, діелектрична сприйнятливність, сила струму, щільність струму, електричний опір, електрична провідність, питомий електричний опір, провідність, магнітна індукція, магнітний потік,

напруженість магнітного поля, магнітний момент, магніторушійна сила, магнітний опір, індуктивність, взаємна індуктивність, намагніченість, магнітна проникність.

**8. Випромінювань:** променистий потік, поверхнева щільність потужності випромінювання, енергетична освітленість, промениста експозиція, сила світла, енергетична яскравість, енергія випромінювання, спектральна щільність енергії випромінювання по довжині хвилі, спектральна щільність променевої енергії (за частотою), світлова енергія, освітленість, яскравість, світлова експозиція, відносна світлова ефективність, коефіцієнт заломлення, коефіцієнт відбиття, коефіцієнт поглинання, коефіцієнт пропускання.

**9. Атомної фізики:** момент кількості руху, момент диполя, поляризованість, доза поглиненого випромінювання, експозиційна доза випромінювання, радіоактивність, коефіцієнт рекомбінації.

**10. Універсальні фізичні постійні:** швидкість світла у вакуумі, гравітаційна стала, маса (спокою) електрона, маса (спокою) протона, маса (спокою) нейтрона, число Фарадея, постійна Планка, стала тонкої структури, комптоновська довжина хвилі, постійна Рідберга, борівський радіус, магнетон Бора, магнітний момент електрона, універсальна газова стала.

Число фізичних величин обмежене і не перевищує 200.

Вимірювання фізичних параметрів покладено в основу різних методів і засобів технічного діагностування, за допомогою яких аналізують і оцінюють складний технічний стан об'єкта.

Для дослідження цього стану застосовують усі відомі види електромагнітного випромінювання - низькочастотне ( $0-10^3$ ) Гц, радіохвилі ( $10^4-10^{10}$ ) Гц, інфрачервоне ( $10^{11}-4 \times 10^{14}$ ) Гц, видиме ( $4 \times 10^{14}-7,5 \times 10^{14}$ ) Гц, ультрафіолетове ( $7,5 \times 10^{14}-3 \times 10^{16}$ ) Гц, рентгенівське ( $3 \times 10^{16}-3 \times 10^{20}$ ) Гц, гамма-промені ( $3 \times 10^{19}-3 \times 10^{22}$ ) Гц, космічні промені ( $3 \times 10^{21}$ ) Гц. Широке застосування отримали численні акустичні, звукові і вібраційні методи дослідження, а також корпускулярні випромінювання (нейтронів, протонів, електронів, позитронів) і електростатичні поля. Багато методів і засобів діагностування радіоелектронної апаратури засновані на вимірі електричних величин. У деяких методах для виміру використані різноманітні фізичні ефекти, наприклад, капілярне проникнення спеціальних дефектоскопічних матеріалів в порожнину дефекту і спостереження контрасту в оптичному випромінюванні, магнітопорошкові і ін.

Для діагностування об'єктів використовують широку номенклатуру випробувальної техніки, у тому числі прилади для визначення твердості й пружних констант матеріалів, дослідження впливу кліматичних факторів, машини для випробування матеріалів на стиск, вигин, удар, зріз, кручення і т.п.

Перспектива розвитку методів і засобів технічного діагностування пов'язана з оптимальним застосуванням для вимірювань відомих фізичних ефектів і явищ, а також з вивченням нових можливостей, які з'являються у зв'язку з розвитком фізики. Найбільш суттєвими і часто зустрічаються в практиці технічного діагностування машин наступні види вимірювань:



електрометрія, віброакустика, дефектоскопія, структуроскопія, інтроскопія, вимірювання механічних властивостей, складу речовини, розмірів, сил, деформацій, тиску, температури, часу, маси, вологості, витрати і рівня.

Приклад

На випробування поставлене  $N_0=1600$  зразків апаратури, що не ремонтується. Число відмов  $n(\Delta t)$  фіксувалося через кожні 100 годин роботи ( $\Delta t=100$  год). Дані про відмови наведені в таблиці 6. Необхідно визначити наступні критерії надійності:

- ймовірність безвідмовної роботи  $P^*(t)$
- ймовірність відмови  $Q^*(t)$
- інтенсивність відмов  $\lambda^*(t)$
- частоту відмов  $f^*(t)$
- середній час безвідмовної роботи  $T^*_{cp}$

Побудувати залежності  $P^*(t)$ ,  $Q^*(t)$ ,  $\lambda^*(t)$ ,  $f^*(t)$  від часу.

Рішення.

Таблиця 6

$\Delta t_i$	$n(\Delta t)$	$\Delta t_i$	$n(\Delta t)$	$\Delta t_i$	$n(\Delta t)$	$\Delta t_i$	$n(\Delta t)$
0-100	67	500-600	47	1000-1100	37	1500-1600	35
100-200	62	600-700	42	1100-1200	36	1600-1700	34
200-300	57	700-800	39	1200-1300	37	1700-1800	36
300-400	54	800-900	38	1300-1400	35	1800-1900	35
400-500	50	900-1000	38	1400-1500	36	1900-2000	37

Статистично  $P(t)$  оцінюється виразом:

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

де  $n(t)$  - число виробів, які відмовили за час  $t$

$N_0$  - кількість виробів на початку випробувань.

$$P^*(100) = \frac{1600 - 67}{1600}$$

$$P^*(200) = \frac{1600 - (67 + 62)}{1600}$$

Занесемо результати в таблицю 7

Таблиця 7

$\Delta t_i$	$P^*(t)$	$\Delta t_i$	$P^*(t)$	$\Delta t_i$	$P^*(t)$	$\Delta t_i$	$P^*(t)$
100	0,95813	600	0,78938	1100	0,66813	1600	0,55625
200	0,91938	700	0,76313	1200	0,64563	1700	0,535
300	0,88375	800	0,73875	1300	0,6225	1800	0,5125
400	0,85	900	0,715	1400	0,60063	1900	0,49063
500	0,81875	1000	0,69125	1500	0,57813	2000	0,4675

Ймовірність відмови  $Q^*(t)$

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

Відмова та безвідмовна робота є подіями протилежними і несумісними, тому  $Q^*(t) = 1 - P(t)$

Занесемо результати в таблицю 8.

Таблиця 8

$\Delta t_i$	$Q^*(t)$	$\Delta t_i$	$Q^*(t)$	$\Delta t_i$	$Q^*(t)$	$\Delta t_i$	$Q^*(t)$
100	0,04188	600	0,21063	1100	0,33188	1600	0,44375
200	0,08062	700	0,23688	1200	0,35438	1700	0,465
300	0,11625	800	0,26125	1300	0,3775	1800	0,4875
400	0,15	900	0,285	1400	0,39938	1900	0,50938
500	0,18125	1000	0,30875	1500	0,42188	2000	0,5325

Частота відмов  $f^*(t)$

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

де  $n(\Delta t)$  – число виробів, які відмовили в інтервалі часу від  $t - \Delta t/2$  до  $t + \Delta t/2$

$$f^*(50) = \frac{67}{1600 \cdot 100} \quad f^*(150) = \frac{62}{1600 \cdot 100}$$

Занесемо результати в таблицю 9.

Таблиця 9

$\Delta t_i$	$f^*(t) \cdot 10^{-3}$	$\Delta t_i$	$f^*(t) \cdot 10^{-3}$	$\Delta t_i$	$f^*(t) \cdot 10^{-3}$	$\Delta t_i$	$f^*(t) \cdot 10^{-3}$
100	0,41875	600	0,29375	1100	0,23125	1600	0,21875
200	0,3875	700	0,2625	1200	0,225	1700	0,2125
300	0,35625	800	0,24375	1300	0,23125	1800	0,225
400	0,3375	900	0,2375	1400	0,21875	1900	0,21875
500	0,3125	1000	0,2375	1500	0,225	2000	0,23125

Інтенсивність відмов  $\lambda(t)$

$$\lambda^*(t_i) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{срi}} \cdot \Delta t_i}$$

де  $N_{\text{срi}}$  – середнє число справно працюючих виробів в інтервалі  $\Delta t_i$

$$N_{\text{срi}} = \frac{N(t_i - 1) + N(t_i)}{2}$$

де  $N(t_i - 1)$  – число виробів, справно працюючих в момент часу  $t_i - 1$

$N(t_i)$  – число виробів, справно працюючих в кінці інтервалу  $t_i$

$$\lambda^*(50) = \frac{67}{[(1600 + 958) / 2] \cdot 100}$$

$$\lambda^*(150) = \frac{62}{[(958 + 919) / 2] \cdot 100}$$

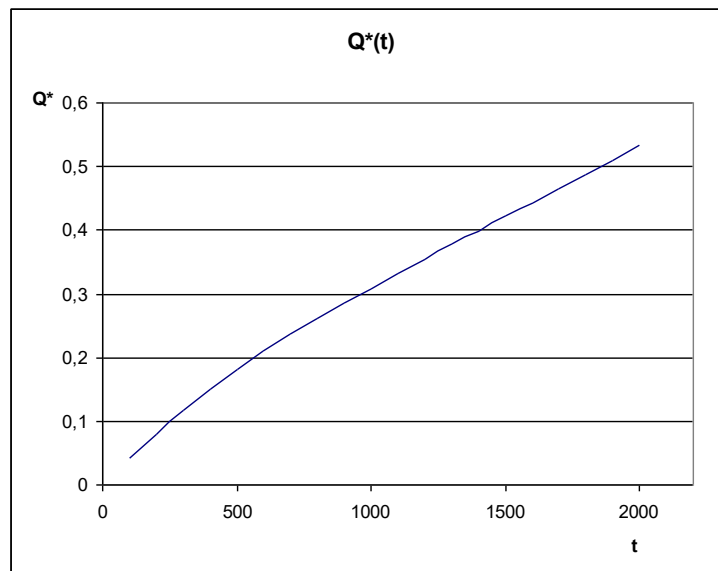
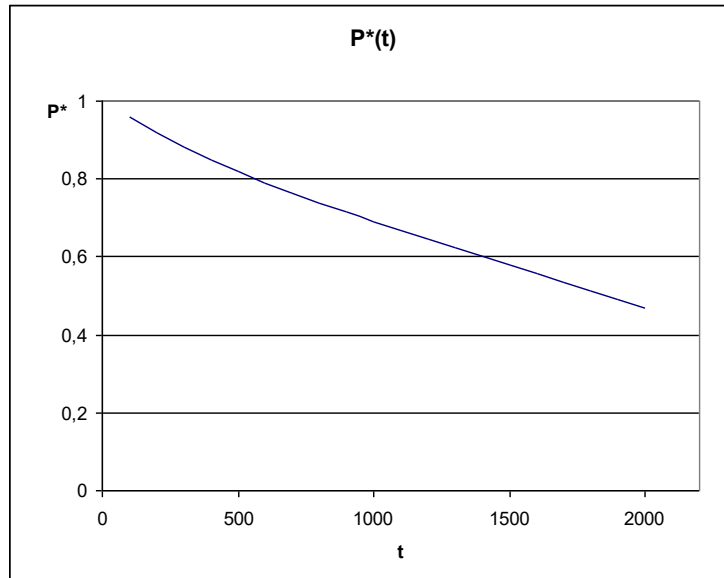
Занесемо результати в таблицю 10.

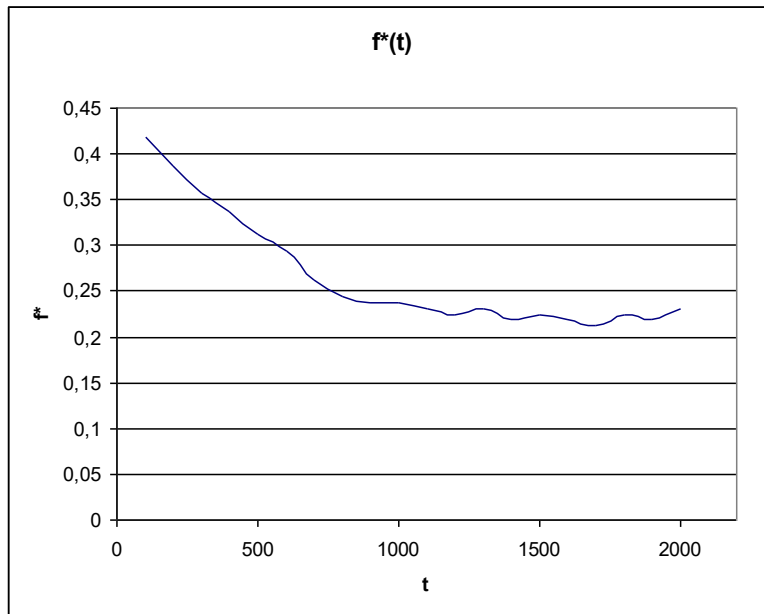
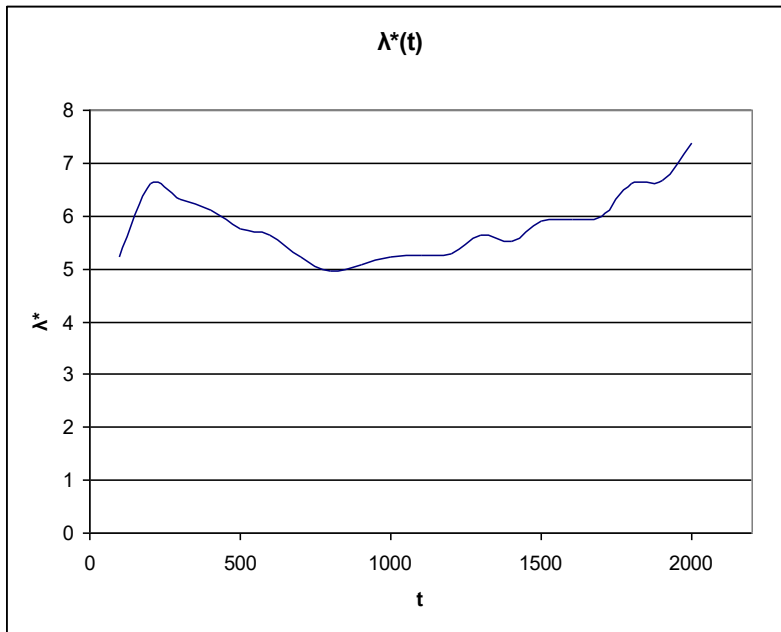
Таблиця 10

$\Delta t_i$	$\lambda^*(t) \cdot 10^{-3}$	$\Delta t_i$	$\lambda^*(t) \cdot 10^{-3}$	$\Delta t_i$	$\lambda^*(t) \cdot 10^{-3}$	$\Delta t_i$	$\lambda^*(t) \cdot 10^{-3}$
100	5,238	600	5,635	1100	5,263	1600	5,942
200	6,606	700	5,227	1200	5,298	1700	5,996

300	6,323	800	4,962	1300	5,636	1800	6,599
400	6,112	900	5,063	1400	5,525	1900	6,686
500	5,77	1000	5,231	1500	5,892	2000	7,385

Побудуємо залежність  $P^*(t)$ ,  $Q^*(t)$ ,  $\lambda^*(t)$ ,  $f^*(t)$  від часу.





Середній час безвідмовної роботи

$$T_{cp}^* = \frac{\sum_{i=1}^m t_{cp} \cdot n(\Delta t) + t_i (N_0 \cdot n(t_i))}{N_0}$$

$$T_{cp}^* = 430 \text{ годин}$$

### Приклад

При експлуатації системи автоматики було зафіксовано  $n=49$  відмов протягом  $t=624$  годин. При цьому розподіл відмов по елементах і час витрачений на їх усунення (час відновлення), наведені в таблиці 11

Таблиця 11

Елементи системи	Кількість відмов – $n_i$	Час відновлення $t_{в}$ хв	Сумарний час відновлення $t_i$
Напівпровідникові елементи	6	52	–
		42	
		43	
		40	
		41	
		39	
Реле	3	32	–
		44	
		30	
Резистори	7	–	127
Конденсатори	9	–	181
Дроти	5	–	90
Пайка	22	–	150

Потрібно визначити:

- середній час відновлення  $t_{в}^*$ ;
- середнє напрацювання на відмову  $T_0$ ;
- коефіцієнт готовності ( $k_r$ ), використання ( $k_u$ ), простою ( $k_p$ )

Рішення.

Визначаємо середній час відновлення системи  $t_{вj}$  для груп елементів:

$$t_{вj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} t_i}{n_j}$$

$$t_{в.п.э} = (52+42+43+40+41+39)/6 = 42,8 \text{ хв}$$

$$t_{в.р} = (32+44+30)/3 = 35,3 \text{ хв}$$

$$t_{в.рез} = 127/7 = 18,14 \text{ хв}$$

$$t_{в.к} = 181/9 = 20,1 \text{ хв}$$

$$t_{в.пр} = 90/5 = 18 \text{ хв}$$

$$t_{в.пай} = 150 / 22 = 6,82 \text{ хв}$$

Визначаємо середній час відновлення системи:

$$T_{в.с.}^* = \sum_{j=1}^m t_{в.рj} m_j = 42,8 \frac{6}{49} + 35,3 \frac{3}{49} + 18,14 \frac{7}{49} + 20,1 \frac{9}{49} + 18 \frac{5}{49} + 6,82 \frac{22}{49} = 18,58 \text{ хв} = 0,31 \text{ години}$$

Визначимо середнє напрацювання на відмову  $T_0^*$

$$T_0^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{624 - 0,31 * 49 - 0,31 * 49 * 1,5}{49} = 11,96 \text{ годин}$$

Визначимо коефіцієнт готовності ( $K_r$ ), використання ( $K_u$ ), простою ( $K_n$ )

$$K_r = \frac{T_0^*}{T_0^* + T_{в.с.}^*} = \frac{11,96}{11,96 + 0,31} = 0,975$$

$$K_u = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{вi} + \sum_{j=1}^n t_{пj}} = \frac{586,04}{586,04 + 15,2 + 4,8} = 0,967$$

$$K_n = 1 - K_u = 0,033$$

Приклад

Час роботи повністю підпорядкований усіченому нормальному закону з параметрами  $T_1 = 7600$ ,  $\sigma = 2250$

Обчислити середній час роботи до першої відмови –  $T_{ср}$ , побудувати графіки  $p(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$ .

Рішення.

$$P(t) = \frac{0,5 - \Phi_0\left(\frac{t - T_1}{\delta}\right)}{0,5 + \Phi_0\left(\frac{T_1}{\delta}\right)}$$

$$\text{де } \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

Визначимо частоту відмов:

$$f(t) = \frac{e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\delta^2}}}{\left[0.5 + \Phi_0\left(\frac{T_1}{\delta}\right)\right] \delta \sqrt{2\pi}}$$

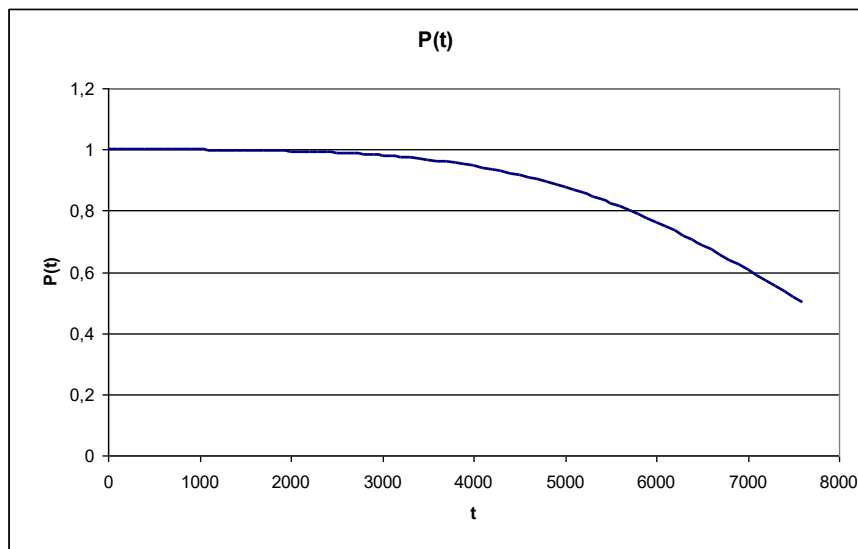
Розрахуємо інтенсивність відмов  $\lambda(t)$ .

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$$

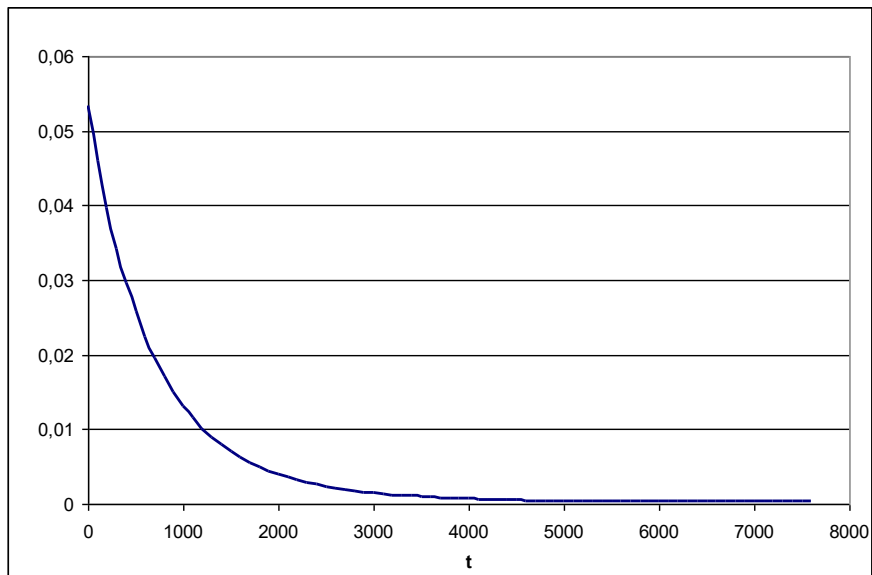
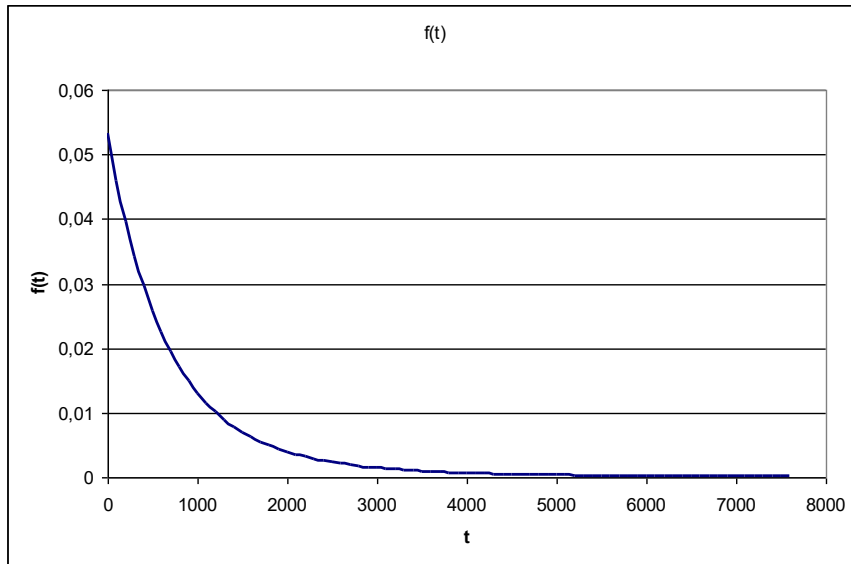
Вичислимо середнє напрацювання відмови

$$T_{cp} = T_1 + \frac{\delta e^{-\frac{T_1^2}{2\delta^2}}}{\sqrt{2\pi} (0.5 + \Phi(\frac{T_1}{\delta}))} = 277297,8$$

Побудуємо графіки  $P(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$ .







### Приклад

В результаті аналізу даних про відмови виробів встановлено, що один з критеріїв надійності визначається виразами:

$$\lambda = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Год}$$

$$k = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Год}$$

$$\lambda_1 = 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Год}$$

$$\lambda_2 = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Год}$$

$$\lambda(t) = \lambda^2 t e^{-\lambda t}$$

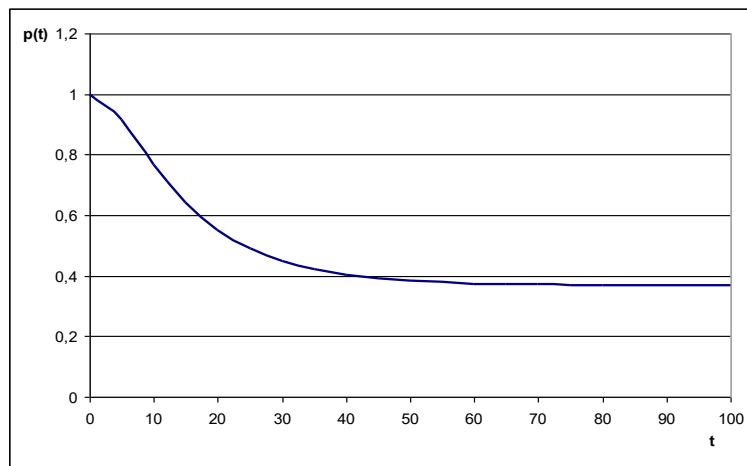
Потрібно знайти інші кількісні характеристики надійності –  $p(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $f_{cp}(t)$ ,  $T_{cp}$ . Побудувати графіки  $p(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $f_{cp}(t)$ .

Рішення.

Визначимо ймовірність безвідмовної роботи:

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\int_0^t \lambda^2 t e^{-\lambda t} dt}$$

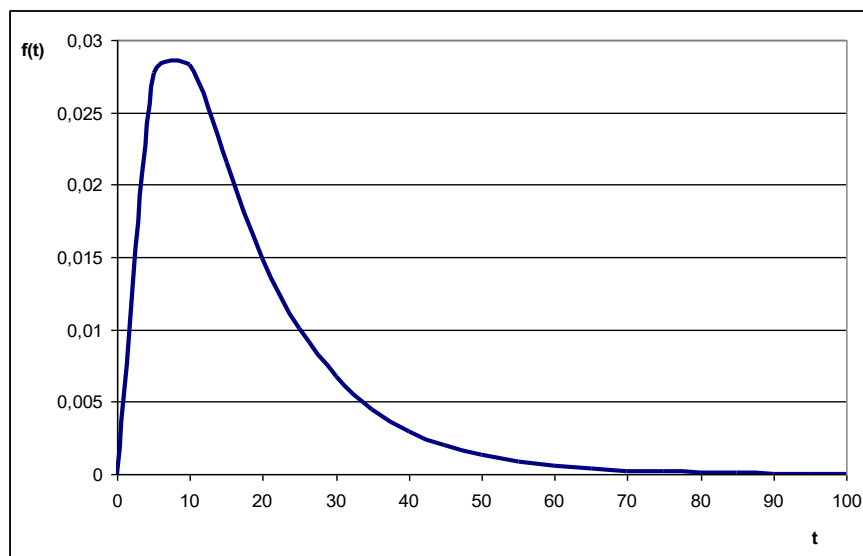
t	p(t)
0	1
10	0.768
20	0.552
30	0.449
40	0.403
50	0.383
60	0.374
70	0.371
80	0.369
90	0.368
100	0.368



Визначимо частоту відмов

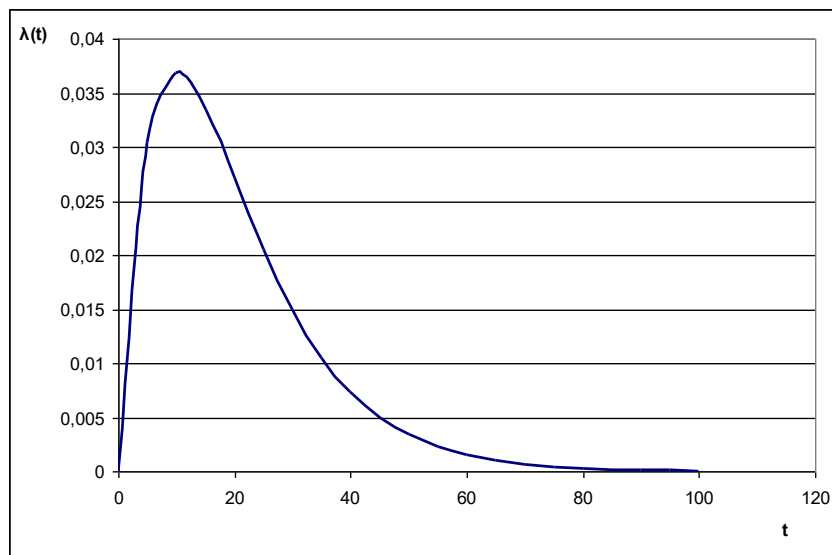
$$f(t) = -p'(t) \text{ або } f(t) = \lambda(t) * p(t)$$

t	f(t)*10 <sup>-3</sup>
0	0
10	28.2
20	14.9
30	6.7
40	2.9
50	1.29
60	0.55
70	0.23
80	0.02



Визначимо  $\lambda(t) = \lambda^2 t e^{-\lambda t}$

t	$\lambda(t) \cdot 10^{-3}$
0	0
10	30.3
20	36.7
30	27
40	14.9
50	7.3
60	3.3
70	1.4



Визначимо залежність параметра потоку відмов  $f_{cp}(t)$  від часу. Необхідно знайти  $f_{cp}(S) = \frac{f(S)}{1 - f(S)}$

$$f(S) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-St} dt$$

$$\begin{aligned}
f(S) &= \int_0^{\infty} (1,4 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0,7 \cdot 10^{-6} \cdot t} - 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-1,5 \cdot 10^{-6} \cdot t}) \cdot e^{-St} dt = \\
&= -\frac{1,4 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-(0,7 \cdot 10^{-6} + S)t}}{0,7 \cdot 10^{-6} + S} \Big|_0^{\infty} + \frac{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-(1,5 \cdot 10^{-6} + S)t}}{1,5 \cdot 10^{-6} + S} \Big|_0^{\infty} = \frac{1,4 \cdot 10^{-6}}{0,7 \cdot 10^{-6} + S} - \frac{1,5 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-6} + S} = \\
&= \frac{1,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} + 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot S - 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,7 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot S}{(0,7 \cdot 10^{-6} + S)(1,5 \cdot 10^{-6} + S) - 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} - 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot S + 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,7 \cdot 10^{-6} + 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot S} = \\
&= \frac{1,05 \cdot 10^{-12} - 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot S}{S^2 + 2,3 \cdot 10^{-6} \cdot S}
\end{aligned}$$

$$f_{cp}(S) = \frac{\frac{1,4 \cdot 10^{-6}}{0,7 \cdot 10^{-6} + S} - \frac{1,5 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-6} + S}}{1 - \frac{1,4 \cdot 10^{-6}}{0,7 \cdot 10^{-6} + S} + \frac{1,5 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-6} + S}} = S^2 + 2,3 \cdot 10^{-6} \cdot S = 0$$

$$S(S + 2,3 \cdot 10^{-6}) = 0$$

$$S = 0; S = -2,3 \cdot 10^{-6}$$

$$f_{cp}(S) = \frac{1,05 \cdot 10^{-12} - 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot S}{(S + 2,3 \cdot 10^{-6})S} = \frac{A}{S} + \frac{B}{S + 2,3 \cdot 10^{-6}}$$

$$A(S + 2,3 \cdot 10^{-6}) + B \cdot S = 1,05 \cdot 10^{-12} - 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot S$$

$$A \cdot S + A \cdot 2,3 \cdot 10^{-6} + B \cdot S = 1,05 \cdot 10^{-12} - 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot S$$

$$A \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} = 1,05 \cdot 10^{-12}$$

$$A = \frac{1,05 \cdot 10^{-12}}{1,2 \cdot 10^{-6}} = 0,875 \cdot 10^{-6}$$

$$A + B = -0,1 \cdot 10^{-6}$$

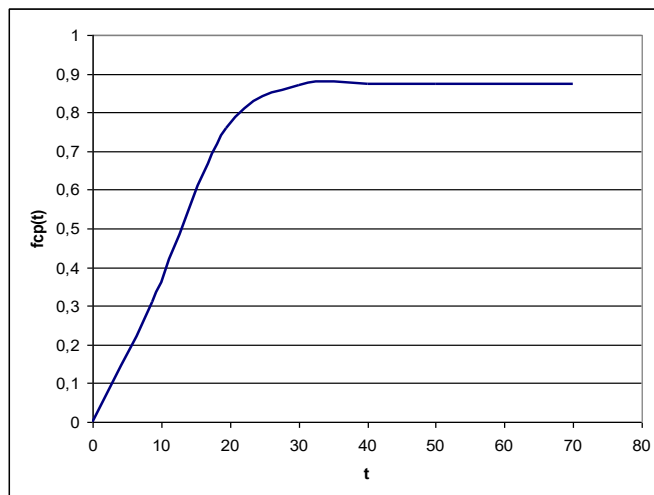
$$B = -0,1 \cdot 10^{-6} - A$$

$$B = -0,1 \cdot 10^{-6} - 0,875 \cdot 10^{-6} = -0,975 \cdot 10^{-6}$$

$$f_{cp}(S) = \frac{0,875 \cdot 10^{-6}}{S} + \frac{-0,975 \cdot 10^{-6}}{S + 2,3 \cdot 10^{-6}}$$

$$f_{cp}(t) = 8,75 \cdot 10^{-7} - 9,75 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-23 \cdot 10^{-7} t}$$

t	fcp(t)*10 <sup>8</sup>
0	0
10	0,31
20	0,76
30	0,86
40	0,8742
50	0,8746
60	0,8749
70	0,8749



Знайдемо середнє напрацювання до першої відмови  $T_{cp}$ :

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt = 26,1 \cdot 10^5$$

### **Розрахунок надійності невідновлювальних систем при основному з'єднанні елементів. Орієнтовний розрахунок надійності**

Приклад

Проектована система включає в себе чотири групи елементів: напівпровідникові елементи з середньою інтенсивністю відмов –  $\lambda_{cp.п}$ ; конденсатори –  $\lambda_{cp.с}$ ; резистори –  $\lambda_{cp.р}$ ; трансформатори, дроселі і реле –  $\lambda_{cp.т.р}$ .

Виконати орієнтовний розрахунок надійності: визначити ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  для  $t = 300, 700, 1000$  і  $2000$  годин; відносну ймовірність безвідмовної роботи в інтервалі від  $t = 500$  годин до  $t = 1000$  годин; інтенсивність відмов системи  $\Lambda_c$  і середній час безвідмовної роботи  $T_{cp}$ , припускаючи, що відмови елементів розподілені за експоненціальним законом.

Вихідні дані:

Тип елемента:	$N_i$	$\lambda_i, *10^{-5} 1/ч$
Напівпровідникові елементи	34	0,28
Конденсатори	28	1,6
Резистори	48	0,10
Трансформатори, дроселі і реле	4	3,5

Рішення

Визначаємо інтенсивність відмов системи і середній час безвідмовної роботи:

$$\Lambda_c = \sum_{i=1}^m N_i \lambda_i = 9,52 * 10^{-5} + 44,8 * 10^{-5} + 4,8 * 10^{-5} + 14 * 10^{-5} = 7,312 * 10^{-4} \quad 1/ч.$$

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda_c} = \frac{1}{7,312 * 10^{-4}} = 1367,6 \quad ч.$$

Визначаємо ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = \exp[-\Lambda_c t]$$

$$P(300) = \exp[-7,312 * 10^{-4} * 300] = 0,803.$$

$$P(700) = \exp[-7,312 * 10^{-4} * 700] = 0,599.$$

$$P(1000) = \exp[-7,312 * 10^{-4} * 1000] = 0,481.$$

$$P(2000) = \exp[-7,312 * 10^{-4} * 2000] = 0,232.$$

Визначаємо відносну ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(500;1000) = \frac{P(1000)}{P(500)} = \frac{\exp[-7,312 * 10^{-4} * 1000]}{\exp[-7,312 * 10^{-4} * 500]} = 0,694.$$

Приклад

Кількість елементів в проєктованій системі дорівнює  $N=242$ . Для проєктованої схеми знайти систему аналог. Час напрацювання до відмови, визначений в результаті експлуатації системи-аналога, дорівнює  $T_{0A}=1562$ .

Потрібно визначити очікуване напрацювання на відмову проєктованої системи  $T_{0П}$ ; інтенсивність відмов системи  $\Lambda_c$ ; ймовірність безвідмовної роботи

системи за 1000 годин роботи, припускаючи, що відмови розподілені за експоненціальним законом.

Дані по системі-аналог.

Групи елементів	Кількість	$\lambda_{cp}, 10^{-5}, 1/ч$	$N_i * \lambda_i * 10^{-5}$
Напівпровідникові	34	0,28	9,52
Конденсатори	28	1,6	44,8
Резистори	48	0,1	4,8
Трансформатори	4	3,5	14
<b>Всього елементів</b>	114	$\Lambda_c =$	73,12

Рішення.

Визначимо загальну інтенсивність відмов системи:

$$\Lambda_c = \sum_{i=1}^k N_i * \lambda_i = 9,52 * 10^{-5} + 44,8 * 10^{-5} + 4,8 * 10^{-5} + 14 * 10^{-5} = 7,312 * 10^{-4} \quad 1/ч$$

Знайдемо середній час напрацювання до першої відмови:

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda_c} = 1367,6$$

Визначимо час безвідмовної роботи системи на задане значення:

$$P_c(t) = e^{-\Lambda_c t} = e^{-\frac{t}{T_{cp}}} = e^{-\frac{1000}{1367,6}} = e^{-0,73} = 0,482$$

Визначимо очікуване напрацювання на відмову проектованої системи:

$$T_{on} = \frac{N_a}{N_n} T_{oa} = \frac{114}{242} 1562 = 735,82ч$$

### **Розрахунок надійності систем з урахуванням режимів і умов роботи елементів (остаточний розрахунок надійності)**

Приклад

Провести повний розрахунок надійності тригера, при наступних параметрах елементів:

R1, R9 – МЛТ –0,25 –10 кОм

R2, R8 – МЛТ –0,5 –5,1 кОм

R3, R7 – МЛТ –0,5 –3,0 кОм

R4, R5 – МЛТ –0,25 –1,5 кОм

R6 – МЛТ –1 –120 кОм



VT2, VT1 – МП42А

C1, C5 – МБМ –1000 пФ

C3 – К-50 –6 - 0,1 мкФ

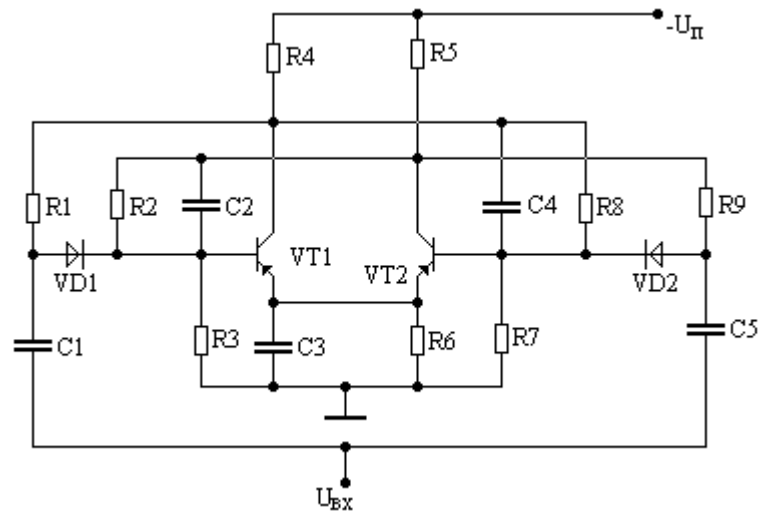
C2, C4 – КМ –300 пФ

VD1, VD2 – Д9А

напруга живлення тригера  $U_{\pi} = -10\text{В}$

$t^{\circ}\text{C} = 40^{\circ}\text{C}$

умови експлуатації тригера: залізничні.



Необхідно знайти інтенсивність відмов, ймовірність безвідмовної роботи і середній час напрацювання до першої відмови тригера, якщо відмови його елементів розподілені за експоненціальним законом.

Для лабораторних умов. Зробити аналіз отриманих даних і дати рекомендації щодо підвищення надійності.

Рішення.

$$1) K_{\text{н}}^{R1, R9} = \frac{P_{\text{ф}}}{P_{\text{д}}} = \frac{I_{\text{R}}^2 \cdot R}{P_{\text{д}}}$$

$$I_{\text{R1}} = \frac{U_{\text{БХ}} - \Delta U_{\text{VT1}}}{R1} = \frac{-10 \cdot 0,9 - 0,5}{10 \cdot 10^3} = 0,95 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$K_{\text{н}}^{R1, R9} = \frac{(0,95 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10 \cdot 10^3}{0,25} = 0,0361$$

$$I_{\text{R8}} = \frac{U_{\pi} - \Delta U_{\text{VT1}}}{R5 + R2} = \frac{-10 - 0,5}{(1,5 + 5,1) \cdot 10^3} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$K_{\text{H}}^{\text{R2,R8}} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 5,1 \cdot 10^3}{0,5} = 0,026$$

$$I_{\text{R3}} = \frac{\Delta U_{\text{R6}} - \Delta U_{\text{VT1}}}{\text{R3}} = \frac{I_{\text{R4}} \cdot \text{R6} - \Delta U_{\text{VT1}}}{\text{R3}} = \frac{0,087 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 10^3 - 0,5}{3 \cdot 10^3} = 3,31 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$K_{\text{H}}^{\text{R3,R7}} = \frac{(3,31 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3 \cdot 10^3}{0,5} = 0,066$$

$$I_{\text{R4}} = \frac{U_{\text{н}} - \Delta U_{\text{VT1}}}{\text{R4} + \text{R6}} = \frac{-10 - 0,5}{(1,5 + 120) \cdot 10^3} = 0,087 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$K_{\text{H}}^{\text{R4,R5}} = \frac{(0,087 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,5 \cdot 10^3}{0,25} = 0,045 \cdot 10^{-3}$$

$$I_{\text{R6}} = I_{\text{R4}} = 0,087 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$K_{\text{H}}^{\text{R6}} = \frac{(0,087 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 120 \cdot 10^3}{1} = 0,91 \cdot 10^{-3}$$

$$K_{\text{H}}^{\text{C1,C5}} = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{д}}} = \frac{0,9 \cdot 10}{20} = 0,45$$

$$K_{\text{H}}^{\text{C2,C4}} = \frac{U_{\text{C2}}}{U_{\text{д}}} = \frac{U_{\text{R2}}}{U_{\text{д}}} = \frac{I_{\text{R2}} \cdot \text{R2}}{U_{\text{д}}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 5,1 \cdot 10^3}{20} = 0,41$$

$$K_{\text{H}}^{\text{C3}} = \frac{U_{\text{C3}}}{U_{\text{д}}} = \frac{U_{\text{R6}}}{U_{\text{д}}} = \frac{I_{\text{R6}} \cdot \text{R6}}{U_{\text{д}}} = \frac{0,087 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 10^3}{20} = 0,52$$

$$K_{\text{H}}^{\text{VT1,VT2}} = \frac{W_{\text{ф}}}{W_{\text{н}}} = \frac{0,5 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{0,2} = 0,25 \cdot 10^{-3}$$

$$K_{\text{H}}^{\text{VD1,VD2}} = \frac{I_{\text{ф}}}{I_{\text{д}}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-3}}{30 \cdot 10^{-3}} = 4,33 \cdot 10^{-5}$$

Тип элемента	$N_i$	$\lambda_0 \cdot 10^6, 1/\text{ч}$	$K_{\text{H}}$	$t^\circ\text{C}$	$\alpha_1$	$\lambda(\nu) \cdot 10^6, 1/\text{ч}$	$N_i \cdot \lambda(\nu) \cdot 10^6, 1/\text{ч}$	$N_i \cdot \lambda_0 \cdot 10^6, 1/\text{ч}$
R1, R9 – МЛТ – 0,25 – 10кОм	2	0,4	$\approx 0,1$	40	0,27	0,108	0,216	0,8
R2, R8 – МЛТ – 0,5 – 5,1кОм	2	0,5	$\approx 0,1$	40	0,27	0,135	0,27	1
R3, R7 – МЛТ – 0,5 – 3,0кОм	2	0,5	$\approx 0,1$	40	0,27	0,135	0,27	1

R4, R5 – МЛТ – 0,25 – 1,5кОм	2	0,4	≈0,1	40	0,27	0,108	0,216	0,8
R6 – МЛТ – 1 – 120кОм	1	1,0	≈0,1	40	0,27	0,27	0,27	1
VT1, VT2 – МП42А	2	4,6	≈0,1	40	0,25	1,15	2,3	9,2
C1, C5 – МБМ – 1000пф	2	2,0	≈0,5	40	0,54	1,08	2,16	4
C2, C4 – КМ – 300пф	2	1,4	≈0,4	40	0,9	1,26	2,52	2,8
C3 – К50 – 6 – 0,1мкф	1	2,4	≈0,6	40	1,24	2,98	2,98	2,4
VD1, VD2 – Д9А	2	0,7	≈0,1	40	0,15	0,105	0,21	1,4

$$2) \Lambda(\nu) = \sum_{i=1}^k \lambda_0 \cdot N_i = 24,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}$$

Сумарна інтенсивність відмов тригера:

$$\Lambda(\nu) = \sum_{i=1}^k \lambda_i(\nu) \cdot N_i = 11,412 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}$$

3) Ймовірність безвідмовної роботи за 10000 годин:

$$P(10000) = e^{-\Lambda(\nu) \cdot t} = e^{-24,4 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,783$$

$$P(10000) = e^{-\Lambda(\nu) \cdot t} = e^{-11,412 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,892$$

4) Середній час напрацювання до першої відмови тригера:

$$T_0(\nu) = \frac{1}{\Lambda(\nu)} = \frac{1}{24,4 \cdot 10^{-6}} = 40984 \text{ год}$$

$$T_0(\nu) = \frac{1}{\Lambda(\nu)} = \frac{1}{11,412 \cdot 10^{-6}} = 87627,1 \text{ год}$$

Основна інтенсивність відмов припадає на транзистори і конденсатори

( $N_i \cdot \lambda(\nu) \geq 0,3$ ). Для підвищення надійності транзисторів можна їх замінити на кремнієві, а також використовувати транзистори з радіаторами. Конденсатори вибирати більш надійні. Також значно підвищить надійність тригера використання полегшених режимів роботи елементів і щадних умов експлуатації.

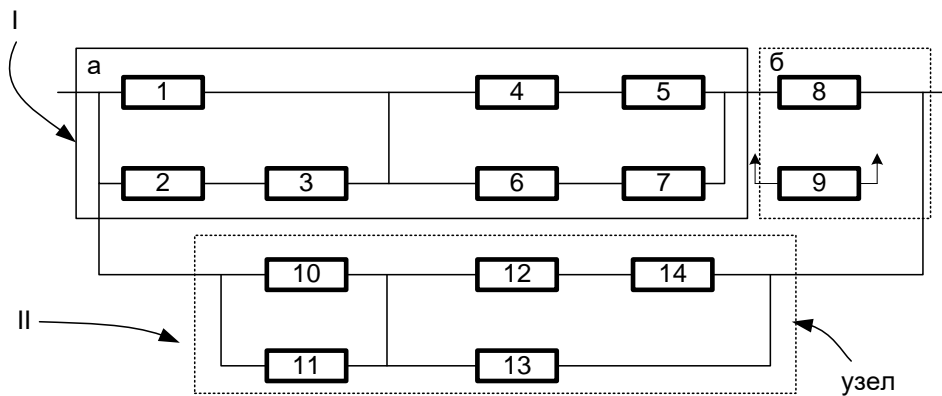
## Розрахунок надійності невідновлювальних резервуючих систем

### Приклад

Задана структурна схема для розрахунку надійності системи, по відомим інтенсивностям відмов її елементів, припускаючи, що відмови елементів розподілені за експоненціальним законом, визначити:

- ймовірність безвідмовної роботи системи..
- інтенсивність відмов вузлів (обведені пунктиром)
- середній час напрацювання до першої відмови вузла системи

На підставі виконаних розрахунків представити графік  $\lambda_{\text{вузла}}(t)$ , висновки та рекомендації щодо підвищення надійності заданої резервованої системи.



№ ел-та	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\lambda * 10^{-6}$ 1/ч	0,95	0,72	1,34	4,11	2,31	0,78	0,88	0,91	0,91	0,17	0,82	0,35	1,67	1,37

### Рішення.

Визначимо ймовірність безвідмовної роботи системи.

$$p_{\text{сист}}(t) = 1 - (1 - p_I)(1 - p_{II})$$

$$p_I(t) = 1 - (1 - p_a)(1 - p_b)$$

$$p_a(t) = [1 - (1 - p_1)(1 - p_2 * p_3)][1 - (1 - p_4 * p_5)(1 - p_6 * p_7)] =$$

$$= (p_2 * p_3 + p_1 - p_1 * p_2 * p_3)(p_6 * p_7 + p_4 * p_5 - p_4 * p_5 * p_6 * p_7)$$

$$p_b(t) = e^{-\Lambda t} (1 + \Lambda t) \text{ де } \Lambda = \lambda_8 + \lambda_9$$

$$p_{II}(t) = [1 - (1 - p_{10})(1 - p_{11})][1 - (1 - p_{12} * p_{14})(1 - p_{13})] = (p_{11} + p_{10} - p_{10} * p_{11})X$$

$$X(p_{13} + p_{12} * p_{14} - p_{12} * p_{14} * p_{13})$$

$$\text{де } p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$$

## Вирішимо отримані рівняння

$$p_a(t) = (e^{-0,72t \cdot 10^{-6}} e^{-1,34t \cdot 10^{-6}} + e^{-0,95t \cdot 10^{-6}} - e^{-0,95t \cdot 10^{-6}} e^{-0,72t \cdot 10^{-6}} e^{-1,34t \cdot 10^{-6}})(e^{-0,78t \cdot 10^{-6}} e^{-0,88t \cdot 10^{-6}} + e^{-4,11t \cdot 10^{-6}} e^{-2,31t \cdot 10^{-6}} - e^{-4,11t \cdot 10^{-6}} e^{-2,31t \cdot 10^{-6}} e^{-0,78t \cdot 10^{-6}} e^{-0,88t \cdot 10^{-6}}) = (e^{-2,06t \cdot 10^{-6}} + e^{-0,95t \cdot 10^{-6}} - e^{-3,01t \cdot 10^{-6}})(e^{-1,66t \cdot 10^{-6}} + e^{-6,42t \cdot 10^{-6}} - e^{-8,08t \cdot 10^{-6}}) = e^{-3,72t \cdot 10^{-6}} + e^{-8,48t \cdot 10^{-6}} - e^{-10,14t \cdot 10^{-6}} + e^{-2,61t \cdot 10^{-6}} + e^{-7,37t \cdot 10^{-6}} - e^{-9,03t \cdot 10^{-6}} - e^{-4,67t \cdot 10^{-6}} - e^{-9,43t \cdot 10^{-6}} + e^{-11,09t \cdot 10^{-6}}$$

$$\Lambda = \lambda_8 + \lambda_9 = 1,82 \cdot 10^{-6}$$

$$p_{\sigma}(t) = e^{-1,82 \cdot 10^{-6} t} \cdot (1 + 1,82 \cdot 10^{-6} t) = e^{-1,82 \cdot 10^{-6} t} + 1,82 \cdot 10^{-6} e^{-1,82 \cdot 10^{-6} t} t$$

$$p_I(t) = 1 - (1 - \{e^{-3,72t \cdot 10^{-6}} + e^{-8,48t \cdot 10^{-6}} - e^{-10,14t \cdot 10^{-6}} + e^{-2,61t \cdot 10^{-6}} + e^{-7,37t \cdot 10^{-6}} - e^{-9,03t \cdot 10^{-6}} - e^{-4,67t \cdot 10^{-6}} - e^{-9,43t \cdot 10^{-6}} + e^{-11,09t \cdot 10^{-6}}\})(1 - [e^{-1,82 \cdot 10^{-6} t} + 1,82 \cdot 10^{-6} e^{-1,82 \cdot 10^{-6} t} t])$$

$$p_{II}(t) = (p_{11} + p_{10} - p_{10} * p_{11})(p_{13} + p_{12} * p_{14} - p_{12} * p_{14} * p_{13}) = (e^{-0,82t \cdot 10^{-6}} + e^{-0,17t \cdot 10^{-6}} - e^{-0,99t \cdot 10^{-6}}) X(e^{-1,67t \cdot 10^{-6}} + e^{-1,72t \cdot 10^{-6}} - e^{-3,39t \cdot 10^{-6}})$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи:

$$p_{сум}(t) = 1 - (1 - p_I)(1 - p_{II}) = p_{II} + p_I - p_I * p_{II} = (e^{-0,82t \cdot 10^{-6}} + e^{-0,17t \cdot 10^{-6}} - e^{-0,99t \cdot 10^{-6}}) X(e^{-1,67t \cdot 10^{-6}} + e^{-1,72t \cdot 10^{-6}} - e^{-3,39t \cdot 10^{-6}}) + 1 - (1 - [e^{-3,72t \cdot 10^{-6}} + e^{-8,48t \cdot 10^{-6}} - e^{-10,14t \cdot 10^{-6}} + e^{-2,61t \cdot 10^{-6}} + e^{-7,37t \cdot 10^{-6}} - e^{-9,03t \cdot 10^{-6}} - e^{-4,67t \cdot 10^{-6}} - e^{-9,43t \cdot 10^{-6}} + e^{-11,09t \cdot 10^{-6}}])(1 - [e^{-1,82 \cdot 10^{-6} t} + 1,82 \cdot 10^{-6} e^{-1,82 \cdot 10^{-6} t} t]) - \{1 - (1 - [e^{-3,72t \cdot 10^{-6}} + e^{-8,48t \cdot 10^{-6}} - e^{-10,14t \cdot 10^{-6}} + e^{-2,61t \cdot 10^{-6}} + e^{-7,37t \cdot 10^{-6}} - e^{-9,03t \cdot 10^{-6}} - e^{-4,67t \cdot 10^{-6}} - e^{-9,43t \cdot 10^{-6}} + e^{-11,09t \cdot 10^{-6}}])(1 - [e^{-1,82 \cdot 10^{-6} t} + 1,82 \cdot 10^{-6} e^{-1,82 \cdot 10^{-6} t} t])\} X(e^{-0,82t \cdot 10^{-6}} + e^{-0,17t \cdot 10^{-6}} - e^{-0,99t \cdot 10^{-6}})(e^{-1,67t \cdot 10^{-6}} + e^{-1,72t \cdot 10^{-6}} - e^{-3,39t \cdot 10^{-6}})$$

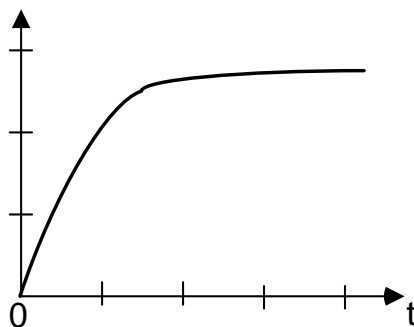
Визначимо інтенсивність відмов вузла.

$$\lambda_{узн}(t) = \frac{f_{узн}(t)}{P_{узн}(t)}$$

$$f_{узн}(t) = P'_{узн}(t)$$

$$\lambda_{узн}(t) = \frac{-2,49 \cdot 10^{-6} t e^{-2,49t \cdot 10^{-6}} - 2,54 \cdot 10^{-6} t e^{-2,54t \cdot 10^{-6}} + 4,21 \cdot 10^{-6} t e^{-4,21t \cdot 10^{-6}} - 1,84 \cdot 10^{-6} t e^{-1,84t \cdot 10^{-6}}}{e^{-2,49t \cdot 10^{-6}} + e^{-2,54t \cdot 10^{-6}} - e^{-4,21t \cdot 10^{-6}} + e^{-1,84t \cdot 10^{-6}} + e^{-1,89t \cdot 10^{-6}} - e^{-3,56t \cdot 10^{-6}} - 1,89 \cdot 10^{-6} t e^{-1,89t \cdot 10^{-6}} + 3,56 \cdot 10^{-6} t e^{-3,56t \cdot 10^{-6}} + 2,66 \cdot 10^{-6} t e^{-2,66t \cdot 10^{-6}} + 2,71 \cdot 10^{-6} t e^{-2,71t \cdot 10^{-6}} - 4,38 \cdot 10^{-6} t e^{-4,38t \cdot 10^{-6}} - e^{-2,66t \cdot 10^{-6}} - e^{-2,71t \cdot 10^{-6}} + e^{-4,38t \cdot 10^{-6}}} \quad \Pi$$

Побудуємо графік інтенсивності відмов вузла:



Середній час напрацювання до першої відмови вузла системи:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P_{узел}(t) dt = \int_0^{\infty} (e^{-2.49 \cdot 10^{-6} t} + e^{-2.54 \cdot 10^{-6} t} - e^{-4.21 \cdot 10^{-6} t} + e^{-1.84 \cdot 10^{-6} t} + e^{-1.89 \cdot 10^{-6} t} - e^{-3.56 \cdot 10^{-6} t} - e^{-2.66 \cdot 10^{-6} t} - e^{-2.71 \cdot 10^{-6} t} + e^{-4.38 \cdot 10^{-6} t}) dt = 8.33 \cdot 10^5 \text{ год}$$

Приклад

Система містить n груп елементів, кожна j-група, у свою чергу, містить  $N_j$  елементів, причому  $\lambda_j$  - інтенсивність відмов елементів j-групи. Ймовірність безвідмовної роботи системи за час t дорівнює  $P_k(t)$ . Потрібно визначити число елементів ЗІПа.

$P_k(t)$	t, ч	n	Реле		Резистори		Конденсатор		Діоди		Транзистори	
			$N_1$	$\lambda_1 \cdot 10^{-5}$	$N_2$	$\lambda_2 \cdot 10^{-5}$	$N_3$	$\lambda_3 \cdot 10^{-5}$	$N_4$	$\lambda_4 \cdot 10^{-5}$	$N_5$	$\lambda_5 \cdot 10^{-5}$
0,92	17000	5	20	1,4	36	0,2	36	1,6	28	2,5	40	0,95

Визначимо інтенсивність відмов груп елементів.

$$\Lambda_{гр} = N_i \cdot \lambda_i$$

$$\Lambda_{реле} = 28 \cdot 10^{-5}$$

$$\Lambda_{рез} = 7,2 \cdot 10^{-5}$$

$$\Lambda_{кон} = 57,6 \cdot 10^{-5}$$

$$\Lambda_{д} = 70 \cdot 10^{-5}$$

$$\Lambda_{тр} = 38 \cdot 10^{-5}$$

Визначимо ймовірність роботи груп елементів.

$$P_{cp} = e^{-\Lambda_{cp} t}$$

$$P_{реле} = e^{-28 \cdot 10^{-5} \cdot 17000} = 0,00857$$

$$P_{рез} = 0,29$$

$$P_{кон} = 5,59 \cdot 10^{-5}$$

$$P_{д} = 6,79 \cdot 10^{-6}$$

$$P_{тр} = 0,00156$$

Визначимо ймовірність безвідмовної роботи системи при послідовному з'єднанні без ЗІПа.

$$P_0 = \prod_{i=1}^n P_i = P_{\text{реле}} \cdot P_{\text{рез}} \cdot P_{\text{кон}} \cdot P_{\text{д}} \cdot P_{\text{мп}} = 1,47 \cdot 10^{-15}$$

Визначимо коефіцієнт ЗІПа.

$$P_k = P_0 \cdot k^n$$

$$k = \sqrt[n]{\frac{P_k}{P_0}} = 5001.7$$

Число запасних елементів  $m$  визначається підбором за умови:

$$: P_k \leq e^{-\Lambda t} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{(\Lambda t)^i}{i!}$$

Визначимо число елементів ЗІПа для реле:

$$P_k \leq 0,00857 \cdot \sum_{i=0}^m \frac{(4,76)^i}{i!}$$

Отже:  $m \geq 8$   $0,92 \leq 0,947$

Визначимо число елементів ЗІПа для резисторів:

$$P_k \leq 0,29 \cdot \sum_{i=0}^m \frac{(1,224)^i}{i!}$$

$$m \geq 3$$

$$0,92 \leq 0,951$$

Визначимо число елементів ЗІПа для конденсаторів:

$$P_k \leq 5,59 \cdot 10^{-5} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{(9,792)^i}{i!}$$

$$m \geq 14$$

$$0,92 \leq 0,927$$

Визначимо число елементів ЗІПа для діодів:

$$P_k \leq 6,79 \cdot 10^{-6} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{(11,9)^i}{i!}$$

$$m \geq 17$$

$$0,92 \leq 0,941$$

Визначимо число елементів ЗІПа для транзисторів:

$$P_k \leq 0,00156 \cdot \sum_{i=0}^m \frac{(6,46)^i}{i!}$$

$$m \geq 10$$

$$0,92 \leq 0,933$$

**Оцінка і контроль надійності пристроїв за результатами їх випробувань.**

### **Оцінка надійності пристроїв**

Приклад

За планом  $[n, B, t_0]$  випробувано  $n = 100$  виробів протягом  $t_0 = 100$  годин. При цьому виникло 48 відмов. Відомо, що розподіл часу до відмови експоненціальний. Оцінити нижню довірчу межу середнього напрацювання до відмови з ймовірністю  $\alpha_1 = 0,95$ .

Рішення.

Нижня довірча межа:

$$\lambda_{\min} = \frac{\chi^2(1-\alpha_1)[2n(T)]}{2S_6(T)}$$

Загальне напрацювання усіх елементів:

$$S_6(T) = \sum_{i=0}^d t_i + (n-d) \cdot t_0$$

$d$  – число відмов.

$$S_6(T) = \sum_{i=0}^d t_i + (n-d) \cdot t_0 = 7650 \text{ч}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{\chi^2(0,05)[200]}{2 \cdot 7650} = 9,8 \cdot 10^{-3}$$

Приклад.

За планом  $[n, B, d]$  були випробувані 20 електродвигунів. Після 6-ї запланованої відмови, яка настала через 180 годин після початку випробувань, випробування призупинені. Потрібно оцінити інтенсивність відмов і знайти її верхню межу з ймовірністю  $\alpha_2=0,95$ .

Рішення:



Проведення випробувань організується відповідно до плану, в якому вказується: кількість випробовуваних виробів, чи будуть замінюватися вироби, які відмовили і коли випробування необхідно припинити.

У нашому випадку випробування проходять за планом [n, Б, d]

де: n – кількість виробів, встановлених на випробування;

Б – план випробувань без заміни виробів, які відмовили;

d – припинення випробувань при виникненні d-ї відмови.

Припустимо, що відмови виникали через рівні проміжки часу  $\Delta t = 180/d$ . Тоді спільне напрацювання всіх елементів:

$$S(r) = \sum_{i=1}^d \Delta t * i + [N - d] * t_d = 3150 \text{ год.}$$

де  $t_d$  - час від початку випробувань до d-ї відмови

Оцінка інтенсивності відмов знаходиться за формулою:

$$\bar{\lambda} = \frac{r-1}{S(r)} = 1.59 * 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

Для визначення довірчих меж  $\lambda$  необхідно користуватися таблицею квантилів  $\chi^2$ -квадрат розподілу.

Під довірчим інтервалом розуміється діапазон значень параметра, в межах якого із певною ймовірністю  $\gamma$  може перебувати його істинне значення. Ймовірність  $\gamma$  в цьому випадку називають довірчою ймовірністю або коефіцієнтом довіри.

Верхня межа інтенсивності відмов:

$$\lambda = \frac{\chi_{(\alpha_2)(2d)}^2}{2S(r)} = 2,94 * 10^{-3}$$

Приклад

В результаті випробувань 12 комплектів апаратури були отримані наступні значення напрацювання на відмову в годинах: 16,8; 18,4; 22,3; 22,7; 23,1; 25,5; 26,4; 29,2; 30,3; 32,5; 33,3; 38,1; 42,2. Визначити оцінку середнього напрацювання відмови  $T^*$  і дисперсію  $\delta^2$ , а також нижню межу  $T$  і верхню межу  $\delta$  з ймовірністю  $\alpha=0,9$ .

Рішення.

Проведення випробувань організується відповідно до плану, в якому вказується: кількість випробовуваних виробів, чи будуть замінятися вироби, які відмовили і коли випробування необхідно припинити.

Метою обробки статистичних даних про відмови є визначення закону розподілу відмов кількісних характеристик надійності а також періодичний контроль якості продукції, що випускається.

У нашому випадку випробування проходять за планом [n, Б, r]

де: n - кількість виробів, встановлених на випробування;

Б - план випробувань без заміни виробів, які відмовили;

r - припинення випробувань з приводу виходу всієї апаратури з ладу.

Так як випробування проводилися до відмови всіх виробів, то оцінка математичного очікування і середньоквадратичного відхилення можуть бути визначені з виразу:

$$T^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad \delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - T)^2}{n-1}}$$

$$T^* = 27.754 \quad \delta = 7.466 \quad \delta^2 = 55.744$$

В даному випадку, величина підкоряється закону розподілу Стьюдента з (n - 1) ступенями свободи, де n - число відмов. Тому для того щоб знайти нижню межу T і верхню межу  $\delta$  з імовірністю  $\alpha = 0,9$ , нам необхідно визначити коефіцієнт довіри  $\gamma$  по таблиці квантилів Стьюдента. Знаючи  $\gamma$ , знаходимо  $t_\alpha$  і  $\chi^2$ . В нашому випадку  $t_\alpha = 1,356$ ,  $\chi^2 = 18,5$ ; тому знаходимо межі:

$$T_{\min} = T - t_\alpha \frac{\delta}{\sqrt{n}}$$

$$\delta_{\max} = \delta \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2}}$$

$$T_{\min} = 24.946; \quad \delta_{\max} = 6.013$$

### Контрольні питання

1. Що таке повна і часткова відмова?
2. Що таке раптова і поступова відмова?
3. Яка причина відмов у більшості випадків для різних типів конденсаторів?
4. Як визначити ймовірність одночасного настання двох залежних і двох незалежних подій?
5. Як визначити ймовірність настання події А або В, які взаємно виключають і не виключають один одного?
6. Що таке метод "дерева помилок"?
7. Як несправність елементів об'єкта може впливати на його працездатність?
8. Поясніть різницю між поняттями "надійність" і "готовність".

9. Як визначається надійність простих схем з послідовним з'єднанням блоків?
10. Що таке резервування?
11. Як визначити надійність схеми з резервуванням з паралельним з'єднанням двох блоків?
12. Як визначити надійність схеми з частковим резервуванням?
13. Що таке резервування з перемиканням?
14. Як визначити надійність схеми з навантаженим резервом?
15. Як визначити надійність схеми з ненавантаженим резервом?
16. Які методи застосовуються для розрахунку надійності малих систем?
17. Які методи застосовуються для розрахунку надійності складних систем?
18. Що значить допустимі і недопустимі дефекти?
19. Наведіть приклади кінематичних і геометричних параметрів (не менше, ніж по 6).
20. Наведіть приклади статичних та динамічних параметрів (не менше 8).
21. Наведіть приклади механічних і молекулярних параметрів (не менше 8).
22. Наведіть приклади теплових параметрів (не менше 6).
23. Наведіть приклади акустичних параметрів (не менше 8).
24. Наведіть приклади електричних і магнітних параметрів (не менше 15).
25. Наведіть приклади параметрів випромінювань (не менше 5).
26. Наведіть приклади параметрів атомної фізики і універсальних фізичних постійних (не менше 7).
27. Перелічіть види електромагнітного випромінювання.
28. Які види вимірювань найбільш часто використовуються при діагностуванні технічних об'єктів?

## Список літератури

1. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання.
2. ДСТУ 3017:2015 Інформація та документація. Видання. Основні види. Терміни та визначення понять.
3. ДСТУ 4861:2007 Інформація та документація. Видання. Вихідні відомості.
4. ДСТУ 3582:2013 Інформація та документація. Бібліографічний опис скорочення слів і словосполучень українською мовою. Загальні вимоги та правила.
5. ДСТУ 7093:2009 Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Скорочення слів і словосполук, поданих іноземними європейськими мовами.
6. ДСТУ 8302:2015 Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання.
7. ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання.
8. ДСТУ ГОСТ 7.80:2007 Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Заголовок. Загальні вимоги та правила складання.
9. ДСТУ 7157:2010 Інформація та документація. Видання електронні. Основні види та вихідні відомості.
10. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
11. Надежность в машиностроении: Справочник. Под ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. – СПб.: Политехника, 1992. – 719 с.
12. Калявин В.П. Надежность и диагностика. – СПб., «Элмор», 1998. – 230 с.
13. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
14. Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами. – Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.
15. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
16. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание: Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 506 с.
18. Расчет показателей надежности по результатам экспериментов. Методические указания / Состав. Колобов А.Б. – Иваново, ИГЭУ. – 36 с., № 602.

19. Статистико-вероятностная оценка прочностной надежности элементов механических систем. Методические указания / Состав. Колобов А.Б. – Иваново, ИГЭУ. – 40 с., № 742.
20. Теория вероятностей в моделях расчета надежности и задачах диагностики технического состояния. Методические указания / Состав. Колобов А.Б. – Иваново, ИГЭУ. – 40 с., № 819.
21. Оценка работоспособности объектов при постепенных отказах. Методические указания / Состав. Колобов А.Б., Огурцов Ф.Б. – Иваново, ИГЭУ. – 40 с., № .
22. Регрессионный анализ результатов испытаний. Методические указания / Состав. Колобов А.Б. – Иваново, ИГЭУ. – 36 с., № 715.
23. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Клюев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.; Под общ.ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
24. Основы технической диагностики. В 2-х книгах. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / Под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
25. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики / (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / Под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1981. – 320 с.
26. Фолкенберри Л.М. Справочное пособие по ремонту электрических и электронных систем: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
27. Леонов А.И., Дубровский Н.Ф. Основы технической эксплуатации бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – 272 с.
28. Ксенз С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1989. – 248 с.
29. Мозгалевский А.В., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика. – М.: Высшая школа, 1975. – 206 с.
30. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
31. Яковлев Н.И. Бесконтактные электроизмерительные приборы для диагностирования электронной аппаратуры. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
32. Мирский Г.Я. Электронные измерения. – М.: Радио и связь, 1986. – 440 с.