

В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна



# **ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ**



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна**

# **ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ**

Вінниця  
ВНТУ  
2014

УДК 621.382  
ББК 31.261я73  
К95

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України, молоді та спорту України (протокол №11 від 30.06.2011 р.).

*Рецензенти:*

**В. В. Кухарчук**, доктор технічних наук, професор

**М. Й. Бурбело**, доктор технічних наук, професор

**О. М. Сінчук**, доктор технічних наук, професор

**Кутін, В. М.**

К95 Діагностика електрообладнання : навчальний посібник /  
В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна – Вінниця : ВНТУ, 2014. –  
161 с.

У посібнику розглянуто: основи керування технічним станом електрообладнання; діагностичні системи перевірки технічного стану, методи визначення несправного елементу в об'єкті і прогнозування технічного стану об'єкта, а також показники ефективності технічного діагностування енергетичного обладнання. Посібник відповідає вимогам програми дисципліни "Діагностика електрообладнання" для студентів галузі знань 0507 – "Електротехніка та електромеханіка", напрям підготовки - 6.050701 - "Електротехніка та електротехнології"; спеціальності 7.05070101, 7.05070102.

УДК 621.313(075)

ББК 31.261я73

## ЗМІСТ

1 ОСНОВИ КЕРУВАННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ .....	5
1.1 Основні поняття та означення .....	5
1.2 Цілі і задачі технічної діагностики .....	7
1.3 Діагностичне забезпечення технічних виробів .....	8
1.4 Види технічного діагностування та їх особливості .....	10
1.5 Методи технічного діагностування .....	10
1.6 Зміна технічного стану електроустановок в процесі експлуатації.....	14
1.7 Стратегії вибору ремонтно-обслуговуючих дій .....	17
1.8 Системи технічного обслуговування і ремонту (СТОР) в Україні і закордоном.....	21
2 ДІАГНОСТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕВІРКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВИРОБУ .....	24
2.1 Класифікація та загальна характеристика систем діагностування.....	24
2.2 Математичні моделі об'єкта перевірки .....	25
2.3 Діагностичні моделі аналогових об'єктів .....	29
2.4 Функціональні моделі.....	48
2.5 Методика побудови діагностичної моделі об'єкта на основі теорії подібності .....	50
2.6 Ймовірнісні діагностичні моделі для опису процесів діагностування .....	53
2.7 Модель витрати ресурсу .....	55
2.8 Моделі дискретних об'єктів .....	57
2.9 Особливості діагностування пристроїв релейного захисту .....	63
2.10 Контроль ТС сенсорів та аналого-цифрових перетворювачів.....	65
2.11 Вибір умов роботоздатності об'єкта.....	67
2.12 Вибір сукупності показників для оцінення роботоздатності об'єкта.....	71
2.13 Інформаційна оцінка вибраної сукупності контрольованих показників.....	73
3 ВИЗНАЧЕННЯ НЕСПРАВНОГО ЕЛЕМЕНТА В ОБ'ЄКТІ.....	77
3.1 Формування процедури і програми пошуку дефекту .....	77
3.2 Алгоритм пошуку несправностей за параметрами надійності .....	79
3.3 Інформаційний алгоритм пошуку пошкоджень .....	80
3.4 Метод віток і границь.....	86
3.5 Оптимізація процесу пошуку пошкоджень в розподільних мережах з повітряними лініями.....	96
4 ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТА .....	114
4.1 Задачі прогнозування ТС об'єкта протягом його життєвого циклу .	114
4.2 Основні питання теорії прогнозування .....	116
4.3 Методи математичного прогнозування.....	123

4.4 Оцінення точності і ефективності методів прогнозування.....	130
<b>5 ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО</b>	
<b>ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ .....</b>	<b>144</b>
5.1 Загальна характеристика та експлуатаційне забезпечення енергетичного обладнання .....	144
5.2 Організація діагностичного забезпечення складних об'єктів .....	146
5.3 Основні показники СТД .....	147
5.4 Показники ефективності процесу діагностування .....	149
5.5 Вибір раціональної структури системи діагностування .....	151
ЛІТЕРАТУРА .....	156
ГЛОСАРІЙ.....	160

# 1 ОСНОВИ КЕРУВАННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

## 1.1 Основні поняття та означення

Технічна діагностика — наукова дисципліна, зміст якої вивчення чи визначення дійсного технічного стану об'єкта та характеру його змін з часом. Вона спрямована на дослідження форм прояву технічного стану об'єкта та розробку принципів побудови систем діагностування.

Під технічним станом (*technical state*) (ТС) об'єкта діагностування розуміють сукупність властивостей об'єкта чи їх залежностей між собою, які можуть змінюватись під дією зовнішніх факторів, що визначаються в певний момент часу за певних умов зовнішнього середовища певними значеннями діагностичних показників відповідно до норм [1].

Об'єктом діагностування може бути технічний виріб будь-якої складності чи його складові частини, технічний стан яких визначається в процесі діагностування.

Технічне діагностування (ТД) об'єкта є інформаційною процедурою, метою якої має бути відображення його технічного стану у вигляді висновку про характер та важливість цього стану. Такий висновок щодо результату діагностування має назву технічного діагнозу або просто діагнозу.

Технічна діагностика як наукова дисципліна ґрунтується на таких основних принципах:

- принцип причинно-наслідкових зв'язків;
- принцип використання мінімальної інформації щодо технічного виробу під час його діагностування при максимумі інформації про цей виріб як об'єкт діагностування (мінімум апостеріорної інформації при максимумі апріорної інформації щодо бази знань);
- принцип застосування тільки неруйнівних дій, що не можуть за час проведення діагностування змінити технічний стан виробу.

В технічній діагностиці (ТД) розглядають такі основні властивості об'єкта (виробу): надійність, безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, функція реакції, контролепридатність.

Надійність (*reliability*) — властивість об'єкта виконувати задані функції в заданому об'ємі при визначених умовах функціонування.

Безвідмовність (*safety margin*) — властивість об'єкта неперервно зберігати роботоздатність протягом визначеного часу.

Довговічність (*durability*) — властивість об'єкта зберігати роботоздатність до моменту виникнення граничного стану виробу при визначеній системі технічного обслуговування.

Ремонтпридатність (*serviceability*) — властивість об'єкта, яка полягає в пристосованості до попередження та можливості визначення причин

виникнення відмов, несправностей та усунення їх наслідків.

Функція реакції — властивість об'єкта реагувати на зовнішні збурюючі фактори.

Контролепридатність — властивість об'єкта забезпечувати вірогідну оцінку його ТС та раннє визначення несправностей та відмов.

В технічній діагностиці розглядають такі стани об'єкта: справний — несправний, роботоздатний — нероботоздатний, робочий, граничний, критичний.

Справний — це такий стан об'єкта, при якому він відповідає всім вимогам, які установлені нормативно-технічною документацією.

Несправний — це такий стан об'єкта, при якому він не відповідає хоча б одній із вимог, яка установлена нормативно-технічною документацією.

Роботоздатний — це такий стан об'єкта, при якому він здатен виконувати всі або частину заданих функцій в повному або неповному обсязі. Тобто коли виріб роботоздатний він може бути справним або несправним.

Нероботоздатний — це такий стан об'єкта, при якому він не здатен виконувати всі задані функції. Тобто коли нероботоздатний, то обов'язково і несправний.

Робочий — це такий стан об'єкта, при якому об'єкт виконує всі задані функції.

Граничний стан відображає такий стан виробу, при якому його подальше використання є недопустимим чи недоцільним згідно з вимогами безпеки або відновлення роботоздатного стану просто неможливе.

Критичний стан пов'язаний з таким станом, коли подальше застосування виробу може призвести до аварії чи катастрофи з недопустимими наслідками.

Основні події та процеси: несправність, відмова, вимкнення, відновлення, старіння, обслуговування, ремонт, локалізування відмов, пошук пошкоджень.

Несправність — це порушення справності об'єкта або його елементів під впливом зовнішньої дії, яка перевищує рівень, установлений нормативно - технічною документацією.

Відмова — це подія, яка полягає в порушенні роботоздатного стану об'єкта.

Вимкнення — це перехід об'єкта із робочого стану в неробочий.

Відновлення — це подія, яка полягає в переході об'єкта із нероботоздатного стану в роботоздатний.

Ввімкнення — це перехід об'єкта із неробочого стану в робочий.

Старіння — це процес поступової, незворотної, неперервної зміни фізико-хімічних властивостей об'єкта.

Обслуговування — це сукупність заходів, які передбачаються для збереження або відновлення справного стану об'єкта.

Ремонт — це сукупність заходів, які передбачаються для відновлення робоздатності об'єкта.

Локалізування відмов — це керування об'єктом, спрямоване на зменшення наслідків відмов шляхом виділення несправних елементів.

Пошук несправностей — це комплекс вимірвальних та логічних операцій з локалізування несправного елемента.

## 1.2 Цілі і задачі технічної діагностики

Основна ціль ТД — визначення виду технічного стану об'єкта, в першу чергу складного. Однак ТД не можна розглядати як частину контролю. Процес перевірки технічного стану об'єкта — це процес керування цим об'єктом, який виконується за визначеною програмою. Побудова програми перевірки, оптимальної для тої або іншої цільової функції оптимізації, рівнозначна організації відповідного оптимального процесу керування, результатом якого є визначення технічного стану.

Процес перевірки здебільшого являє собою процес керування з багаторазовою подачею керуючих дій, коли керуюча дія може бути складною, а послідовність її подачі залежить від реакції об'єкта на попередні дії. Функціональну схему діагностичної системи керування можна зобразити як показано на рис. 1.1.

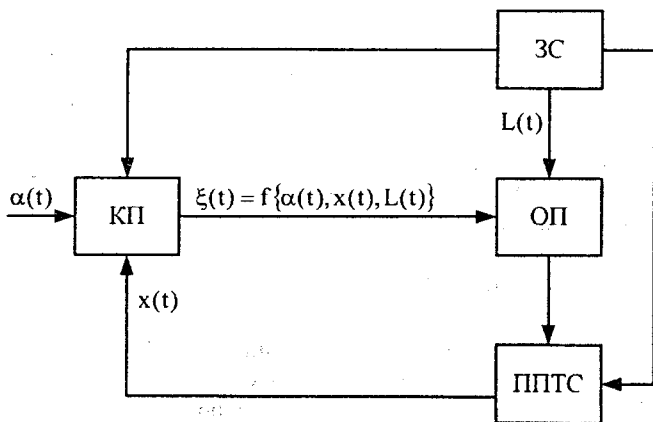


Рисунок 1.1 — Функціональна схема діагностичної системи керування ОП — об'єкт перевірки; ЗС — зовнішнє середовище; ППТС — підсистема перевірки ТС об'єкта; КП — керуючий пристрій;  $\alpha(t)$  — задана мета керування;  $x(t)\{x_1; \dots; x_n\}$  — параметри перевірки ТС об'єкта;  $L(t)$  — параметри зовнішнього середовища;  $\xi(t) = f\{\alpha(t), x(t), L(t)\}$  — керуюча дія

Отже, ТД розглядає специфічні процеси керування, які потребують розробки спеціальних методів дослідження оптимальних процесів керування. Перевірка та відновлення ТС об'єкта становлять суть керування ТС. Ефективна організація такого керування є головною метою ТД, яка виступає одним із засобів підвищення надійності. Підвищення надійності є основною областю застосування ТД.

Більш чітку уяву про межі застосування ТД можна отримати, розглянувши різні типи задач визначення ТС. Найбільш поширеною є задача визначення ТС об'єкта в даний момент часу. Це задача діагнозу (розпізнавання, визначення). До другого типу відносять задачі з передбачення ТС, в якому об'єкт буде знаходитись в деякий момент часу в майбутньому. Це задача прогнозу. До третього типу відносять задачі з визначення ТС об'єкта, в якому він знаходився в минулому. Це задача генеза (походження, виникнення). Задачі першого типу відносять до власне ТД, другого — до технічної прогностики (ТП), третього — до технічної генетики (ТГ).

До задач ТП відносять, наприклад, задачі з визначення терміну роботи виробу, періодичності його профілактичних перевірок та ремонту. Розв'язування їх здійснюють шляхом визначення можливих або ймовірних еволюцій ТС виробу, які починаються його дійсним технічним станом.

Задачі технічної генетики виникають, наприклад, в зв'язку з необхідністю проводити розслідування аварій та їх причин, коли дійсний технічний стан об'єкта відрізняється від стану, в який він перейшов в минулому, в результаті появи першопричини, що викликала аварію. Розв'язання задачі здійснюють шляхом визначення можливих або ймовірних передісторій, які призвели до теперішнього технічного стану об'єкта перевірки.

Отже, знання дійсного технічного стану об'єкта перевірки є обов'язковим як для генезу, так і для прогнозу, тому технічна діагностика є основою як технічної генетики, так і технічної прогностики.

### **1.3 Діагностичне забезпечення технічних виробів**

Діагностичне забезпечення — це сукупність взаємопов'язаних правил, методів, алгоритмів і засобів, необхідних для здійснення технічного діагностування на всіх етапах життєвого циклу об'єкта.

При складанні вимог до технічного забезпечення необхідно визначити, на яких етапах життєвого циклу виробу застосовується технічне діагностування відповідно до поставлених домінант кожного етапу. На рис. 1.2 показано застосування технічної діагностики на концептуальному рівні.



Рисунок 1.2 — Застосування ТД на всіх етапах життєвого циклу об'єкта

В сучасній промисловості при виробництві та експлуатації (*maintenance*) найбільш відповідальної техніки існує спеціальна система аналізу відмов (САВ), що допомагає постійно слідкувати за появою відмов і несправностей та встановлювати причини їх виникнення. В загальному випадку визначають конструкторські, технологічні і експлуатаційні відмови. Інформація про характер відмов та причини їх виникнення дозволяє сформулювати вимоги до діагностичного забезпечення на основних етапах життєвого циклу об'єкта: розробки, виробництва і експлуатації (рис. 1.2).

Коли на етапі розробки вирішується питання технічної досконалості виробу, то перш за все визначається його пристосованість до діагностування, тобто контролепридатність, відмовостійкість, технічна досконалість.

На етапі виробництва виробу вирішальним є забезпечення якості технології виготовлення та безпека праці при його виготовленні. Тому виріб як об'єкт діагностування має бути пристосований для вияву відмов та несправностей при його застосуванні під час експлуатації. Метою

діагностування технічного виробу на етапі експлуатації є підтримання встановленого рівня надійності, забезпечення всіх вимог безпеки та високої ефективності використання виробу за призначенням при встановлених нормативах обслуговування. Для цього створюється система технічного обслуговування та ремонту (СТОР).

#### 1.4 Види технічного діагностування та їх особливості

Розрізняють такі види технічного діагностування: робоче технічне діагностування, тестове технічне діагностування, експрес-діагностування, прогнозувальне технічне діагностування [2, 3].

Робоче діагностування — такий вид діагностування, при якому ТС об'єкта визначається при безпосередньому виконанні ним робочих функцій без тестування його спеціальними випробувальними діями.

Тестове діагностування є видом діагностування, при якому технічний стан об'єкта визначається його тестуванням спеціальними випробувальними діями без безпосереднього виконання робочих функцій. Цей вид діагностування виконується тоді, коли об'єкт не експлуатується за призначенням.

Експрес-діагностування є видом технічного діагностування, при якому діагностування об'єкта виконується за частиною діагностичних показників (параметрів та ознак) протягом обмеженого часу.

В цьому випадку об'єкт може знаходитись в робочому стані і виконувати робочі функції, а частіше може бути в режимах тестування під дією спеціальних випробувальних впливів.

Прогнозувальне діагностування є видом технічного діагностування, за допомогою якого визначається час, протягом якого ТС об'єкта буде знаходитись в нормі за всіма діагностичними показниками з заданою ймовірністю.

При цьому ймовірність безвідмовної роботи не задається, а визначається середнє напрацювання до відмови як математичне сподівання напрацювання об'єкта до першої відмови.

#### 1.5 Методи технічного діагностування

Методи технічного діагностування — це сукупність способів та умов використання технічних засобів і відповідних процедур для визначення технічного стану об'єкта в процесі робочого, тестового чи експрес-діагностування або для визначення фізичного стану об'єкта в процесі прогнозувального діагностування.

Розрізняють алгоритмічний (операторний), сигнально-параметричний та фізичний методи діагностування [4, 5].

Алгоритмічний метод технічного діагностування ґрунтується на

використанні перевірки правильності функціонування об'єкта в цілому, або окремих його частин на основі оцінювання відповідними технічними засобами логічних ознак виконання робочих дій в процесі робочого діагностування, або при тестовому діагностуванні з перевіркою технічного стану.

При алгоритмічному підході об'єкт діагностування може бути визначений множиною видів технічного стану  $S = \{S_i\}$ , де  $S_i$  — ТС з числа вірогідних станів  $N$  залежно від числа несправностей, що можуть виникнути в об'єкті при його експлуатації, тобто  $i = 1 \dots N$ . Технічний стан такого об'єкта буде визначатись множиною перевірок  $\pi = \{\pi_j\}$ ,  $j = 1 \dots M$ . Результати множини перевірок для всієї множини станів будуть визначатись множиною  $A = \{a_{ij}\}$ , що є матрицею результатів з розмірністю  $N \times M$ . Ця матриця буде відображати діагностичну інформацію, за якою можна визначити діагноз як заключний висновок з діагностування об'єкта із точним визначенням ТС за умови виконання нерівностей  $a_{ij} \neq a_{\gamma j}$ , де  $i, \gamma = 1 \dots N$ ;  $i \neq \gamma$ . Така умова може бути інтерпретована так: технічний стан точно визначається тоді і тільки тоді, коли знайдеться хоча б одна перевірка, результати якої будуть різні для двох несумісних станів  $S_i$  і  $S_\gamma$ . Якщо ця умова не виконується, то об'єкт не може бути продіагностований відносно визначення технічного стану або пошуку місця пошкодження.

**Приклад.** Об'єкт складається з шести елементів; відомі входи, виходи і функціональні зв'язки (рис. 1.3).

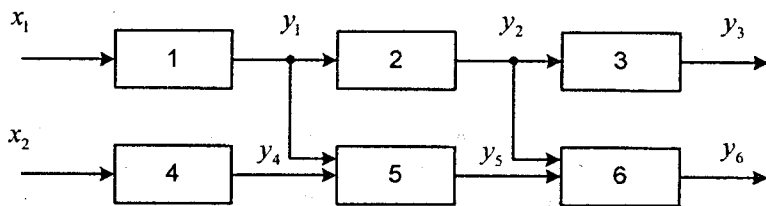


Рисунок 1.3 — Функціональна модель об'єкта

Користуючись функціональною моделлю, побудуємо таблицю функцій станів (таблицю несправностей, табл. 1.1), вважаючи, що одночасно може пошкодитись тільки один елемент, а ймовірність пошкодження кожного із елементів є однаковою і в процесі пошуку пошкоджень елемент не може переходити з одного стану в інший. Елементу, що відмовив, в векторі станів буде відповідати 0, наприклад,  $S_1(0,1,1,1,1,1)$ ;  $S_2(1,0,1,1,1,1)$

Таблиця 1.1 — Таблиця функцій несправностей (технічних станів)

$S_i \backslash \pi_j$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_6$
$S_0$	1	1	1	1	1	1
$S_1$	0	0	0	1	0	0
$S_2$	1	0	0	1	1	0
$S_3$	1	1	0	1	1	1
$S_4$	1	1	1	0	0	0
$S_5$	1	1	1	1	0	0
$S_6$	1	1	1	1	1	0

Користуючись таблицею несправностей побудуємо діагностичний тест для визначення технічного стану та пошуку несправностей в об'єкті. Для цього побудуємо таблицю покриття (табл. 1.2) перевірки двох станів за правилом, що сума двох рядків 1+1 та 0+0 дає 0, а 1+0 та 0+1 дає 1.

Таблиця 1.2 — Таблиця покриття ОД

$S_i \backslash \pi_j$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_6$
$S_{01}$	1	1	1	0	1	1
$S_{02}$	0	1	1	0	0	1
$S_{03}$	0	0	1	0	0	0 ✓
$S_{04}$	0	0	0	1	1	1
$S_{05}$	0	0	0	0	1	1
$S_{06}$	0	0	0	0	0	1 ✓

По рядках встановленого набору обов'язковими перевірки є  $\pi_3$ ,  $\pi_6$ . Коли одночасно результатом цих перевірок є одиниця, то об'єкт діагностування знаходиться в роботоздатному стані, а коли хоча б один результат дає нуль, то об'єкт є нероботоздатним.

Для другої таблиці покриття (табл. 1.3) обов'язковими будуть перевірки  $\pi_4$ ,  $\pi_5$ .

Таблиця 1.3 — Друга таблиця покриття для пошуку пошкоджень

$S_i \backslash \pi_i$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_6$
$S_{12}$	1	0	0	0	1	0
$S_{13}$	1	1	0	0	1	1
$S_{14}$	1	1	1	1	0	0
$S_{15}$	1	1	1	0	0	0
$S_{16}$	1	1	1	0	1	0
$S_{23}$	0	1	0	0	0	1
$S_{24}$	0	1	1	1	1	0
$S_{25}$	0	1	1	0	1	0
$S_{26}$	0	1	1	0	0	0
$S_{34}$	0	0	1	1	1	1
$S_{35}$	0	0	1	0	1	1
$S_{36}$	0	0	1	0	0	1
$S_{45}$	0	0	0	1	0	0
$S_{46}$	0	0	0	1	1	0
$S_{56}$	0	0	0	0	1	0

Перевіримо покриття цими перевірками всіх рядків і визначимо неперекриті рядки, тобто ті, де результати перевірок  $\pi_4, \pi_5 = 0, 0; 1, 1$ . Це рядки  $S_{15}, S_{23}, S_{24}, S_{26}, S_{34}, S_{36}, S_{46}$ . Це означає, що треба призначити додаткові перевірки. Ними можуть бути такі  $\pi_1 \wedge \pi_5; \pi_2 \wedge \pi_3; \pi_2 \wedge \pi_4; \pi_2 \wedge \pi_6; \pi_3 \wedge \pi_4; \pi_3 \wedge \pi_6; \pi_4 \wedge \pi_6$ . За допомогою цих додаткових перевірок виконуються вимоги покриття усіх рядків таблиць 1.2 і 1.3.

Таким чином, обов'язковими слід вважати перевірки  $\pi_4, \pi_5, \pi_3, \pi_6$ , за якими і буде встановлюватись діагноз відносно об'єкта діагностування.

Для визначення роботоздатності об'єкта використовують спочатку перевірки  $\pi_3$  і  $\pi_6$ , а потім здійснюють пошук пошкоджень. В останньому випадку послідовність перевірок може бути різною. Наприклад, (рис. 1.4), побудова графа повністю визначається логікою дії прямих зв'язків між блоками. Коли за вихідну вершину графа на рис. 1.4 призначити перевірку  $\pi_3$ , то дерево графа за наслідками цієї перевірки розгалужується на дві гілки. Лівій гілці відповідають результати перевірки 1, а правій — 0 таблиці станів (табл. 1.1).

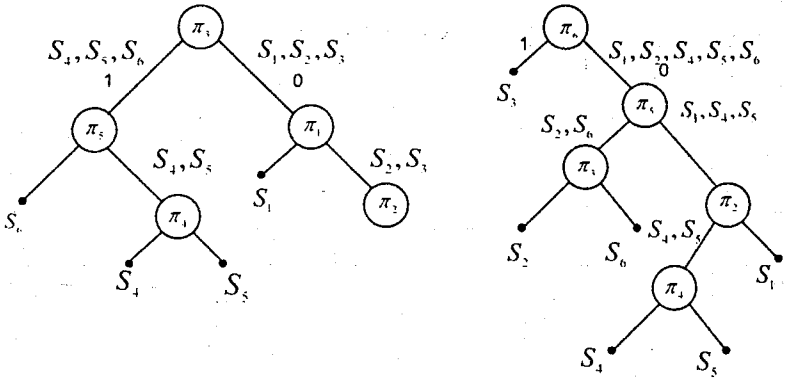


Рисунок 1.4 — Дерево можливих розв'язків

Для того, щоб знайти оптимальний розв'язок, необхідно додати критерій оптимальності і ймовірності станів.

В сигнально-параметричному методі для виконання технічного діагностування використовуються перевірки правильності функціонування об'єкта цілому чи окремих робочих сигналів або параметрів діючих елементів об'єкта в процесі робочого чи тестового діагностування. В цьому випадку необхідно виконати дві умови: формування сигналу відгуку на несправність; виведення цього сигналу відгуку на зовнішній вихід виробу як носія діагностичної інформації для його обробки та формування діагнозу. Коли одна з цих умов не виконується то об'єкт вважається непридатним для діагностування.

При фізичному підході можливі дві умови діагностування технічних виробів: за встановленням технічного або фізичного стану, за властивостями фізичного середовища об'єкта діагностування.

Перша умова: існує хоча б один фізичний ефект, що відображає дефект чи несправність об'єкта в певній залежності однієї фізичної величини від іншої через сприйнятливості.

Друга умова: фізичний ефект, що використовується, має властивість спостережуваності, що дозволяє вимірювальними пристроями реєструвати кількісну зміну показників сприйнятливості фізичного середовища об'єкта залежно від його стану.

Показниками, що визначають дієвість діагнозу як висновку процесу діагностування, приймається його вірогідність та точність.

## 1.6 Зміна технічного стану електроустановок в процесі експлуатації

Можливим є варіант експлуатації виробу до повної його відмови без

використання будь-яких робіт з ТО і Р в процесі експлуатації з наступною його утилізацією після відмови. Економічно це доцільно тільки для обмеженої кількості простих виробів. В загальному випадку, особливо в складних електроустановках, при відмові одного із елементів ресурс інших елементів повністю не вичерпано. Усунути відмову або здійснити профілактику з її попередження, як правило, більш вигідно, ніж змонтувати нову електроустановку. Така ситуація виникає тому, що створювати електрообладнання з однаковим ресурсом всіх його елементів технічно складно або економічно недоцільно. Наприклад, значно розрізняються терміни використання контактів електричних апаратів і їх обмоток. В свою чергу термін використання обмоток значно нижчий, ніж осердя і корпусів цих апаратів. Іноді стверджують, що знос елементів обладнання, їх заміна в процесі експлуатації — недолік конструкції і в обладнанні майбутнього не буде змінних або таких що потребують ремонту елементів. Таке твердження є безпідставним. Забезпечити конструктивними і технологічними заходами однаковий темп зносу всіх елементів неможливо. Якоюсь мірою ресурс їх можливо лише наблизити, але в цьому випадку потрібно збільшити їх масу або використати дорогі матеріали, або застосувати технологію високої вартості. Раціональним є не створення будь-якою ціною електрообладнання, що не потребує технічного керування його станом, а врахування конструктивних, технологічних і інших факторів як в сфері виробництва, так і в сфері експлуатації, при яких сумарні питомі витрати були б мінімальними в заданих умовах використання.

Отже, для отримання найбільшого ефекту від використання електрообладнання під час його експлуатації здійснюють керуючі дії з часткового або повного відновлення властивостей машини, або дії з попередження очікуваного погіршення. Вибір відновлювальних дій тісно пов'язаний зі зміною властивостей електрообладнання з часом, тобто погіршенням його технічного стану. Першопричиною зміни властивостей електрообладнання є деградація його елементів під руйнуючими діями експлуатаційних навантажень різної природи, що змінює його якісні показники — вихідні параметри, які повинні відповідати нормативно-технічній документації. При виготовленні електрообладнання кожен із параметрів виконує свою певну функцію і по-своєму важливий на етапі створення електрообладнання. Але якщо розглядати електрообладнання з позиції його ТО і Р, то підхід до значення параметрів інший. Є така група параметрів, яка хоч і змінюється в процесі експлуатації, однак практично не впливає на якість електрообладнання до його утилізації. В той час, коли можна виділити таку групу параметрів, які змінюються в процесі експлуатації і впливають на властивості електрообладнання безпосередньо або через інші елементи настільки, що доводиться вживати заходів з їх відновлення декілька разів до повного

морального або фізичного зносу електрообладнання. Це деградуючі параметри конструктивних елементів — їх будемо називати параметрами ТС конструктивних елементів або діагностичними параметрами, оскільки вони змінюються в процесі експлуатації і впливають на властивості електрообладнання.

Параметри технічного стану елементів мають свою кількісну оцінку у вигляді номінального  $U_{\text{н}}$ , поточного  $U_{\text{п}}$  і граничного значення  $U_{\text{гр}}$ . В довільний момент параметр може характеризуватись відхиленням

$$\Delta U = |U_{\text{п}} - U_{\text{н}}|,$$

величина  $\Delta U$  характеризує міру зносу елемента або запас робото-здатності.

Всі види втрат від відхилення параметрів можна звести до одного інтегрального показника  $\theta$ . Зв'язок між  $\theta$  і  $U_{\text{п}}$  є різним для різних параметрів елементів, але можна виділити три характерні види зв'язків (рис. 1.5). В першому випадку (крива 1) зміна параметра в інтервалі  $U_{\text{п}}$  до  $U'_{\text{п}}$  не викликає втрат, вони виникають тільки при перевищенні  $U'_{\text{п}}$ , це означає що при конструюванні електрообладнання в цей елемент був закладений певний запас. При другому виді зв'язку (крива 2) втрати з'являються одночасно із зміною  $U_{\text{п}}$ . При третьому виді (крива 3) — тільки в момент досягнення параметром значення  $U''_{\text{п}}$  миттєво зростають втрати до  $\theta'$ .

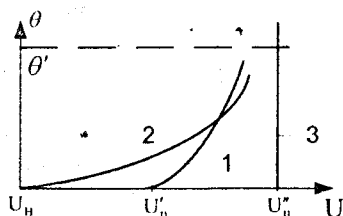


Рисунок 1.5 — Вплив відхилення діагностичного параметра на втрати

В більшості випадків цей зв'язок є стохастичним. Для зменшення негативних наслідків, тобто для зменшення  $\theta$ , необхідно відновлювати параметри до номінального або близького до нього значення.

## 1.7 Стратегії вибору ремонтно-обслуговуючих дій

Основною класифікаційною ознакою стратегії керування ТС об'єкта або його елементів прийнято вважати принцип прийняття рішень у випадку проведення відновлюваних дій. Можливі три стратегії відновлення елементів: після відмови; попереджувальна за напрацюванням — після виконання певного об'єму робіт або часу використання елементу; попереджувальна за станом — за результатами контролю параметрів технічного стану, за станом з контролем рівня надійності.

В наявній системі ТО і Р в основному використовується стратегія відновлюваних дій після відмови та попереджувальна за напрацюванням [6,7]. Стратегію відновлювальних дій після відмови доцільно застосовувати для елементів, яким властива експоненційна щільність розподілу напрацювання на відмову виду

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

де  $T$  — час безвідмовної роботи;  $\lambda$  — параметр потоку відмов.

Цю стратегію можна застосувати і для елементів, відмова яких приводить не до втрати робоздатності виробу, а до виникнення пошкодження, яке не пов'язане з погіршенням електробезпеки. Економічний показник відновлювальних робіт після відмови — рівень питомих втрат  $C'_n$  — визначається рівнем втрат від відмови елемента  $C_0$  і його середнім напрацюванням на відмову  $\bar{T}$

$$C'_n = \frac{C_0}{\bar{T}} = \frac{C_0}{\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T f(T) dT}, \quad (1.2)$$

де  $T_{\min}, T_{\max}$  — мінімальний та максимальний час напрацювання на відмову;  $f(T)$  — щільність розподілу напрацювання на відмову.

Для керування технічним станом виробу за напрацюванням, роботи групуються в комплекси, які відрізняються за періодичністю і номенклатурою [8]. В загальному випадку елемент відмовить і буде відновлений до моменту  $T_p$  попереджувального відновлення з ймовірністю

$$Q(T_p) = \int_{T_{\min}}^{T_p} f(T) dT. \quad (1.3)$$

Середнє напрацювання на відмову за умови, що вона виникає до  $T_p$ , визначимо як [9]:

$$T' = \frac{\int_{T_{\min}}^{T_p} T f(T) dT}{Q(T_p)}. \quad (1.4)$$

Середній використаний ресурс елемента  $\bar{R}$  з урахуванням відновлення через відмови і попереджувальної заміни через напрацювання  $T_p$ :

$$\bar{R} = \int_{T_{\min}}^{T_p} T f(T) dT + T_p [1 - Q(T_p)]. \quad (1.5)$$

Якщо відсутні неперервні втрати від зміни параметра елемента, питомі втрати

$$C_{II}'' = \frac{(C_0 - C_{II}) \cdot Q(T_p) + C_{II}}{\bar{R}}, \quad (1.6)$$

де  $C_{II}$  — втрати, пов'язані з попереджувальним відновленням елемента.

Із виразів (1.4), (1.6) видно, що зменшуючи  $T_p$  можна знизити ймовірність відмови елемента, а збільшуючи  $T_p$  — збільшити середній використаний ресурс. Значення  $T_p$  при досягненні мінімуму питомих втрат можна визначити із диференційного рівняння

$$\frac{dC_{II}''(T_p)}{dT_p} = 0. \quad (1.7)$$

Розглянемо можливості керування основними показниками виробу — безвідмовністю і рівнем питомих втрат при цих стратегіях відновлення. Для елементів, відмова яких є одночасно і відмовою виробу, у випадку відновлювальних дій після відмови, попереджувальне керування ТС взагалі не має сенсу. Рівень безвідмовності і нижня границя втрат у випадку відмови в даному випадку визначаються тільки надійністю елемента, яку можна підвищити тільки зміною конструкції самого елемента. Ефективність відновлювальних робіт при даній стратегії можна досягти лише за рахунок автоматизації процесу пошуку пошкодженого елемента.

У випадку застосування стратегії за напрацюванням маємо два види втрат — відмови одних елементів і недовикористаний ресурс інших. Зменшити один вид втрат без одночасного збільшення іншого неможливо. Можна тільки мінімізувати сумарні питомі втрати за рівнянням (1.7). З іншого боку, стратегія відновлення за напрацюванням, в більшості об'єктів, ґрунтується на використанні, в основному, евристичних методів оцінювання ТС. Суб'єктивно вирішується і питання періодичності ТО і Р, план складається попередньо на запланований рік і не може відображати фактичного ТС обладнання в наперед заданий момент часу. Покладені в основу планування терміну ремонту середні величини ремонтного циклу і міжремонтних періодів, хоч і спрощують планування, але мають суттєвий недолік — не дають об'єктивної оцінки суб'єктивної необхідності в ремонті обладнання або діючої мережі. Отже, наявна система ТО і Р недостатньо відображає взаємодію між об'єктивним процесом зміни технічного стану та суб'єктивним процесом експлуатації й потребує подальшого вдосконалення. Оптимізувати взаємодію цих процесів можна шляхом доповнення існуючої системи системою передбачаючого обслуговування, що ґрунтується на неперервних спостереженнях за діагностичними параметрами ТС, на рівні взаємодіючих елементів.

В загальному випадку при здійсненні відновлювальних дій за результатами контролю параметрів ТС визначають допустиме значення контрольованого параметра (умови роботоздатності)  $U_D$  і періодичність контролю діагностичного параметра  $T_K$ . Якщо із зміною діагностичного параметра неперервні витрати не зростають, то аналогічно попередньому, питомі витрати при здійсненні відновлювальних дій за контролем ТС визначимо як

$$C_n''(U_D, T_K) = \frac{Q(U_D, T_K)C_0 + [1 - Q(U_D, T_K)]C_{\Pi} + K_D(U_D, T_K)C_D}{\bar{T}_\phi(U_D, T_K)}, \quad (1.8)$$

де  $Q(U_D, T_K)$  — ймовірність того, що елемент пошкодиться і буде відновлений при вибраних  $U_D, T_K$ ;  $C_D$  — витрати на діагностування;  $K_D(U_D, T_K)$  — середня кількість перевірок параметра за термін служби елемента;  $\bar{T}_\phi(U_D, T_K)$  — середнє напрацювання елемента до відновлення за результатами контролю.

Із виразу (1.8) зрозуміло, що при використанні стратегії відновлення за контролем ТС з'являється можливість зменшити втрати і від відмов, і від недовикористаного ресурсу, причому тим більшою мірою, чим нижче рівень витрат на діагностування  $C_D$ .

Використання стратегії відновлення за контролем ТС має очевидні переваги, але потребує розв'язання низки задач. Перша задача полягає у виборі сукупності контрольованих діагностичних параметрів та визначенні умови роботоздатності елементів. Друга задача — визначення можливості контролювати діагностичні параметри взагалі або з потрібною вартістю і точністю неруйнівними методами. Третя задача полягає в можливості пошуку місць пошкодження на ранній стадії їх розвитку.

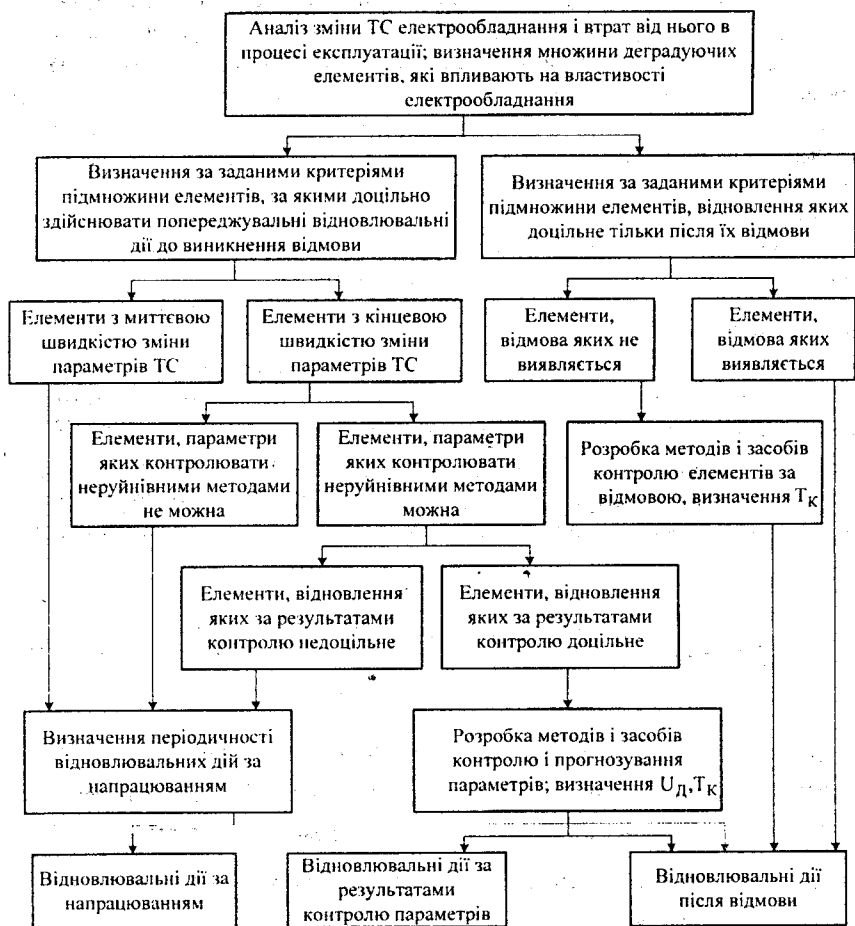


Рисунок 1.6 — Схема вибору стратегії відновлювальних дій

Ці обмеження є відносними. Вони зумовлені вдосконаленням методів і засобів діагностування. В міру того, як будуть з'являтися нові способи і

засоби діагностування, будуть розширюватись і можливості контролю неруйнівними методами параметрів механічних і електричних систем, тобто буде зніматись перше обмеження.

Стрибокподібна зміна параметрів реальних фізичних об'єктів малоймовірна. Цьому передують квазімонотонне накопичення пошкоджень які приводять до зміни механічних та електричних характеристик матеріалу конструктивного елемента. Ці зміни починаються з атомно-молекулярного рівня, вимірювання яких без пошкодження самого елемента є надзвичайно складною задачею. Природно прогнозувати, що методи і засоби таких вимірювань з прийнятною для практики точністю будуть винайдені.

Важливо підкреслити, що попереджувальні дії за напрацюванням або результатами контролю параметрів, зменшують, але не виключають ймовірність відмови об'єкта до моменту відновлення, оскільки при визначенні напрацювання до відмови або основних показників ми оперуємо детермінованими, а не випадковими величинами. Тому не виключається відновлення в окремих випадках після відмови тих елементів, для яких передбачалась попереджувальна дія. Схема вибору стратегії відновлювальних дій показана на рис. 1.6 [10].

## 1.8 Системи технічного обслуговування і ремонту (СТОР) в Україні і за кордоном

СТОР — сукупність взаємопов'язаних засобів, документації ТО і Р і виконавців, необхідних для підтримки і відновлення якості виробу, що входить в цю систему.

В Україні використовується “Система планово-попереджувального обслуговування”. В ній планування ремонту передбачається на основі кількості годин роботи обладнання. Ця система була розроблена в 20-30-ті роки ХХ століття німцями та американцями і в 1940 р. була введена на машинобудівних підприємствах СРСР. В 1955 р. Рада Міністрів СРСР затвердила єдину систему планово-попереджувального ремонту і раціональної експлуатації обладнання машинобудівних підприємств. Вона стала основою для розробки галузевих систем. Так в 1955 р. вийшла праця “Планово-предупредительный ремонт энергетического оборудования промышленных предприятий”. В 60-ті і подальші роки отримала розвиток теорія надійності. Була розроблена теорія старіння та відновлення машин, яка стала основою створення діючої сьогодні СТОР.

Найбільш поширеною формою проведення ТО і Р є комплексний метод виконання робіт. Цей метод базується на принципі сумісництва виконання робіт за місцем та часом, що дозволяє зменшити витрати часу на підготовчо-заклучні операції, переходи, переїзди; ефективніше використовувати засоби механізації; підвищити рівень керівництва

роботами та якість виконання робіт.

Планування технічного обслуговування та ремонту здійснюють шляхом складання багаторічного графіка комплексного ремонту та технічного обслуговування. На основі цього графіка, результатів контрольних оглядів, профілактичних вимірів та перевірок обладнання складають річний план-графік для комплексного ремонту, одночасно складають заявки на необхідні матеріали, запчастини, обладнання. Виходячи із річного плану-графіка складають місячні плани-графіки робіт. Роботи, які виконуються комплексним методом, групуються в комплекси, які відрізняються за періодичністю та номенклатурою.

Системи обслуговування та ремонту електрообладнання за кордоном мають деякі відмінності від тієї системи, яка існує в Україні.

В США [11] система технічного обслуговування та ремонту складається з ТО між ремонтами, поточних ремонтів, під якими розуміють аварійний ремонт. Капітальні ремонти проводяться за спеціальною програмою і до поняття планово-попереджувального обслуговування не належать. В існуючій системі ТО і Р США відсутній примусовий, попередній план. Вдосконалення ТО і Р знайшло відображення в розробці таких систем як системи попереджувального обслуговування, корегувального обслуговування, передбачального обслуговування, ремонтних пріоритетів.

Система попереджувального обслуговування ставить задачу досягти на стадії проектування скорочення або повного усунення необхідності обслуговування електрообладнання. Основу цієї системи складає висока надійність електрообладнання та забезпечення мінімального об'єму його обслуговування.

Система корегувального обслуговування є програмою регулярного аналізу витрат на обслуговування електрообладнання з метою виявлення вузлів та елементів, обслуговування яких викликає великі витрати, причини цих витрат та проведення заходів для їх усунення. Розповсюдженню цієї системи сприяє застосування ЕОМ, які забезпечують облік витрат на обслуговування в розрізі окремих елементів та вузлів.

Система передбачального обслуговування вирішує задачу передбачення можливих відмов електрообладнання на основі неперервних спостережень за станом електрообладнання та його вузлів, його технічних параметрів та характеристик на основі технічної діагностики.

Система ремонтних пріоритетів застосовується для визначення черги ремонтних робіт залежно від двох факторів: рангу електрообладнання та рангу робіт. Для впровадження цієї системи все електрообладнання класифікується по десяти групах. Найвищий ранг (10 балів) присвоюють електростанціям, лініям електропередачі, котлам, бойлерам. Робота також оцінюється балами. Найвищим балом оцінюються аварійні роботи та роботи, які пов'язані з усуненням небезпеки для життя та здоров'я

працівників.

Пріоритет ремонту визначається добутком бальних оцінок обладнання та роботи. Отримані результати є основою для планування ремонтних робіт.

В Японії [12] використовується система ТО і Р, яка називається "Система повного технічного обслуговування". Вона також є системою планово-попереджувального ремонту з тією лише різницею, що структура обслуговування в кожному конкретному випадку враховує специфіку, умови та можливості кожного конкретного підприємства, фірми. До структури повного технічного обслуговування та ремонту входять такі розділи як планування, організація праці, організація виробничого процесу, керування, тобто вона вирішує такі ж задачі, як і система ТО і Р США та країн СНД.

Досвід організації ТО і Р на підприємствах Західної Європи частково викладений в [12]. На підприємствах Франції забезпечення надійної роботи обладнання досягається за рахунок удосконалення організації технічного обслуговування між ремонтами. Технічне обслуговування проводиться за системою планово-попереджувальних оглядів, спрямованих на постійну підтримку обладнання в роботоздатному стані. Огляди здійснюють інспектори ремонтних підрозділів, які усувають незначні пошкодження та визначають необхідність втручання основної ремонтної групи. Для реєстрації планово-попереджувальних оглядів використовують інспекторські листки. Періодичність оглядів визначається в залежності від накопиченого досвіду експлуатації електрообладнання.

Удосконалення системи ТО і Р пов'язане з застосуванням різних технічних засобів контролю функціональних параметрів та характеристик елементів та вузлів. Розглядається можливість розробки та конструювання такого обладнання, машин та механізмів, технічне обслуговування і ремонт яких потребує мінімальних витрат.

## 2 ДІАГНОСТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕВІРКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВИРОБУ

### 2.1 Класифікація та загальна характеристика систем діагностування

Основним предметом дослідження ТД є системи перевірки ТС і діагностичні системи керування ТС (рис. 2.1). Робіт із діагностичних систем керування недостатньо, тому не будемо наводити їх класифікацію.

Роботи із створення систем перевірки ТС зручно поділити на чотири групи: дослідження об'єктів перевірки, теорія, методи і алгоритми побудови програми перевірки, способи і засоби перевірки і, нарешті, дослідження властивостей і характеристик системи в цілому.

Дослідження об'єктів перевірки охоплює дослідження властивостей і характеристик реальних фізичних об'єктів і методи побудови їх математичних моделей (рис. 2.2).

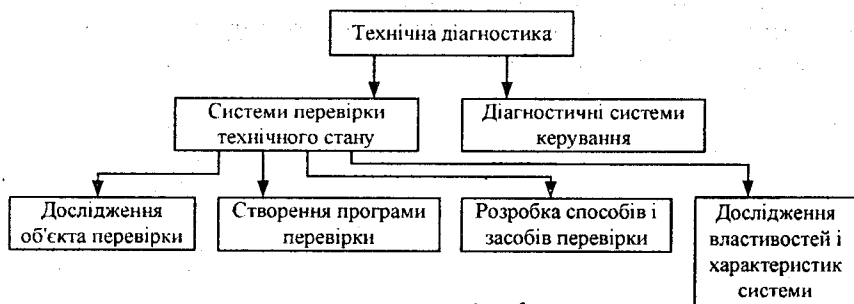


Рисунок 2.1 — Побудова системи перевірки технічного стану.

Вивчення реальних фізичних об'єктів передбачає класифікацію їх за областю застосування, за енергетичними ознаками, за характером сигналу, за складністю і таке інше. Передбачається також вивчення несправностей, дослідження характеристик та параметрів, що визначають справний та несправний стан об'єкта, збір та обробку статистичних даних. Необхідно класифікувати несправності за їх видами (наприклад, стійкі та нестійкі), причинами, ознаками та частотою їх виникнення.

Дослідження параметрів об'єкта перевірки охоплює розвиток методів задання допусків, вставок і визначення контрольних співвідношень між окремими параметрами, дослідження точності вимірювання параметрів у випадку перевірки об'єкта, визначення закону зміни параметрів для цілі прогнозування і генезу.

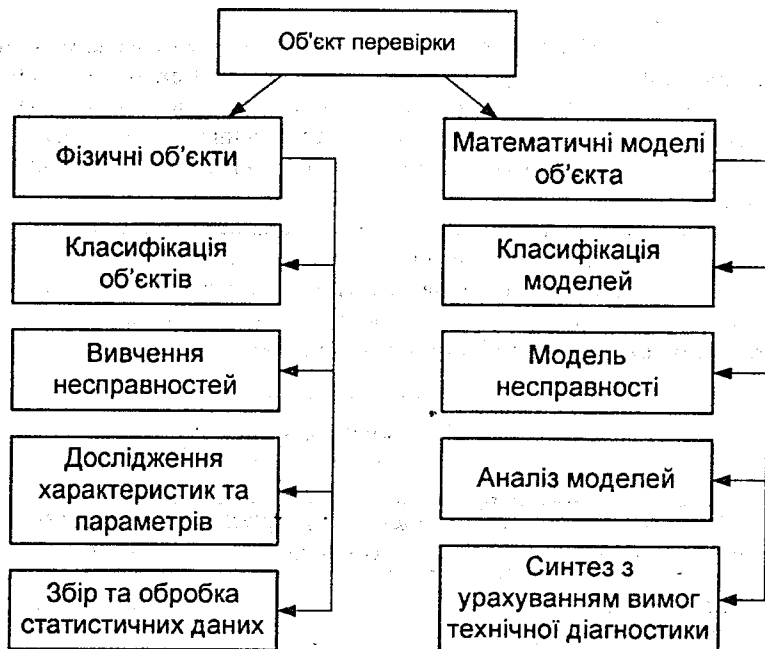


Рисунок 2.2 — Схема дослідження об'єкта перевірки

Суттєвим для побудови оптимальних програм перевірки ТС реальних об'єктів є збір і обробка статистичних даних, особливо за ймовірністю виникнення несправності і за витратами часу, енергії, матеріальних і грошових витрат, при пошуку несправностей та їх усуненні. Статистичні дані є дуже важливими для розв'язання задач технічної прогностики та генетики.

Математичні моделі об'єкта перевірки складають основу формальних методів побудови програми перевірки ТС об'єкта. В цьому випадку необхідно вирішувати такі задачі: класифікація моделей, розробка математичних моделей несправностей, розробка методів і алгоритмів аналізу моделей, а також розробка методів і алгоритмів структур об'єкта перевірки з урахуванням вимог ТД (рис. 2.2).

## 2.2 Математичні моделі об'єкта перевірки

Модель — це об'єкт (явище, процес, система), що знаходиться у відношенні подібності до модульованого об'єкта.

Діагностичною моделлю (ДМ), або моделлю з порушенням, називають формальний опис, який відображає зміну стану об'єкта діагностування під

дією порушень.

Всі ДМ можна поділити на дві групи: звичайні та спеціальні. Під звичайними моделями розуміють такі, в яких математичний опис поведінки об'єкта без порушень збігається з описом, який ми використовуємо для дослідження об'єкта з порушеннями. В спеціальних моделях опис поведінки об'єкта з порушеннями та без них суттєво відрізняється.

Залежно від того, які використовуються характеристики об'єкта, їх поділяють на детерміновані та ймовірнісні (стохастичні). Особливістю детермінованої моделі є єдина траєкторія, яка визначає детермінований зв'язок роботоздатності з характеристикою пошкодження. Класифікацію математичних моделей за іншими ознаками подано на рис. 2.3.

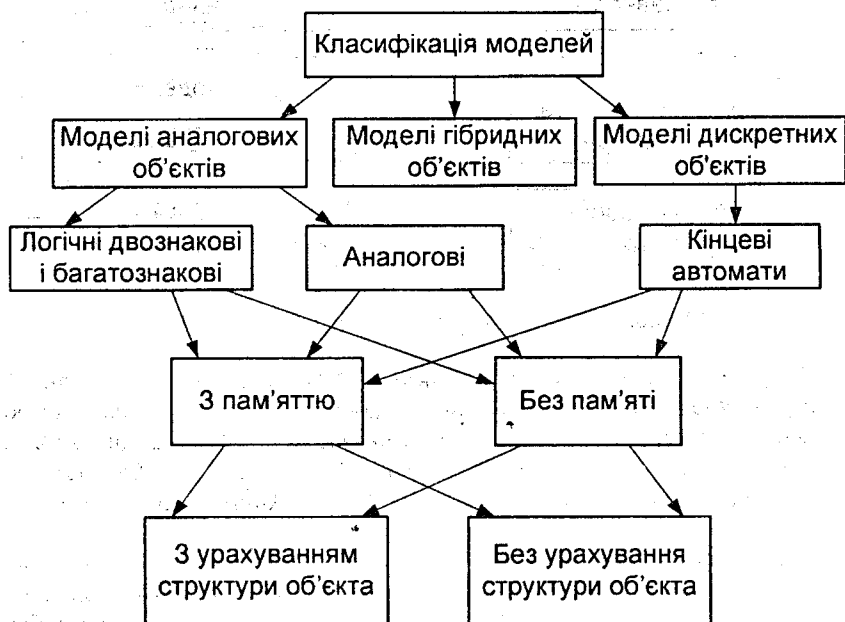


Рисунок 2.3 — Класифікація моделей

Для аналогових об'єктів найчастіше використовують двознакові логічні моделі, які застосовуються для різних способів задання об'єктів перевірки: функціональними схемами або структурами, системами рівнянь будь-якого виду, а також сукупність причинно-наслідкових зв'язків між параметрами об'єктів. Двознакові логічні моделі, однак, мають обмежені можливості з локалізування пошкоджень, які входять до контурів

зворотних зв'язків. Усунути цей недолік можна шляхом розімкнення зворотних зв'язків, якщо це допустимо в процесі перевірки об'єкта. В протилежному випадку необхідно застосувати більш складні математичні моделі — наприклад, багатозначні логічні або навіть аналогові.

Для дискретних об'єктів перевірки природною моделлю є кінцевий автомат. Питання побудови, аналізу і синтезу таких моделей є предметом дослідження теорії релейних пристроїв і кінцевих автоматів. Умовою побудови математичних моделей об'єктів перевірки є задання моделі несправності. Коли моделлю об'єкта перевірки є структурний кінцевий автомат або двозначова логічна модель, то розглядають логічні несправності виду: константа 0 або константа 1. В багатозначних логічних і аналогових моделях несправність модулюється як зміна значень відповідних параметрів.

При виборі моделі несправності важливою є однозначність між моделлю несправності і її фізичним тлумаченням. На рис. 2.4 подана класифікація несправностей.

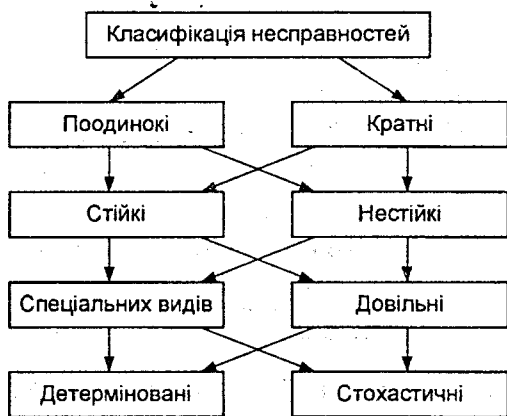


Рисунок 2.4 — Класифікація несправностей

Аналіз математичних моделей об'єктів перевірки відносять до головних етапів побудови програм перевірки технічного стану об'єкта. Метою аналізу (рис. 2.5) є отримання: таблиці функцій несправності в цілому або окремих її частин; переліку несправностей (пар несправностей), які розрізняються заданою окремою перевіркою, або переліку окремих перевірок, які виявляють дану несправність (пару несправностей).

Відомі методи аналізу поділяються на аналітичні, які працюють з "формульним" поданням моделі об'єкта, і структурні, які працюють з моделлю, поданою у вигляді структури об'єкта. Як в аналітичних, так і в

структурних моделях аналіз поведінки моделі може здійснюватись за прямими і зворотними функціями компонентів моделі.

При аналізі моделі об'єкта перевірки основною є задача пошуку і розробки ефективних за об'ємом обчислення і пам'яті методів і алгоритмів аналізу.

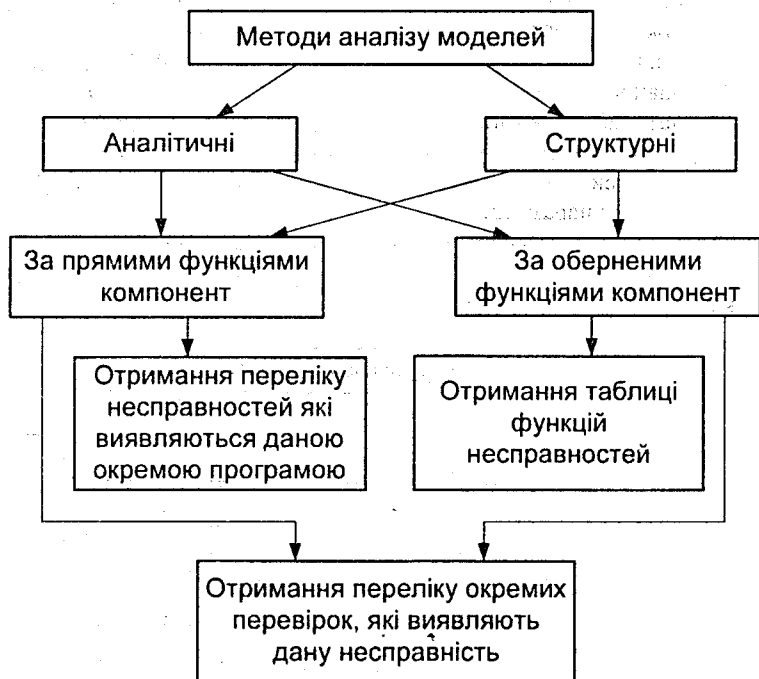


Рисунок 2.5 — Класифікація методів аналізу математичних моделей

Під раціональністю моделі розуміють зручність проведення її аналізу і отримання кінцевого результату. Вибір того чи іншого типу моделі залежить від великої кількості різних факторів: режиму роботи, умов експлуатації, конструктивного виконання, типу комплектуючих елементів і т. п.

Дослідження ДМ передбачає: визначення умов роботоздатності, тобто правила розділу множини станів  $S$  на підмножини: роботоздатних  $S_1$  та нероботоздатних  $S_2$  станів; визначення критерію для оцінювання роботоздатності ОД (різницю станів в підмножині  $S_1$ ); визначення ознак порушень (різницю станів в підмножині  $S_2$ ).

## 2.3 Діагностичні моделі аналогових об'єктів

Технічний об'єкт в загальному випадку можна розглядати як перетворювач одних величин  $x_i$ , які вводяться в об'єкт спеціально, в інші —  $y_i$ , які виникають на виході та називаються вихідними. Це перетворення можна записати так

$$\bar{Y} = A \cdot \bar{X}, \quad (2.1)$$

де  $\bar{X}$  та  $\bar{Y}$  відповідно вектори вхідних та вихідних величин;  $A$  — оператор, який характеризує ці перетворення.

Як модель об'єкта розглядають оператор  $A$ , а умовами роботоздатності при цьому буде ступінь відповідності дійсного оператора  $A$  заданому  $A_0$ .

Математичне формування оператора  $A$  може бути різним залежно від природи системи, що розглядається. Однак будь-який стан системи повинен визначатися оператором однозначно, тобто він є детермінованим. Це складає особливість моделі роботоздатності першого типу. Але обмеженість наших знань фізики процесів зміни роботоздатності (*working capacity*) приводить до необхідності використовувати ймовірнісні характеристики, тобто моделі роботоздатності другого типу.

Особливістю моделей першого типу є єдина траєкторія, що визначає детермінований зв'язок роботоздатності з характером пошкодження. В другому випадку в силу гіпотетичності оператора перетворень необхідно враховувати ймовірні характеристики причинно-наслідкових зв'язків.

При використанні детермінованого оператора роботоздатність розглядається з урахуванням того, що нами визначено характер зміни параметрів. При гіпотетичному операторі ми повинні враховувати ймовірні закони зміни параметрів, а роботоздатність оцінюється з допомогою усереднених ймовірних характеристик. Тобто ми вважаємо, що існує фіксована ймовірність того, що система, яка знаходиться в стані  $i$  в момент часу  $t$  перейде в стан  $j$  в момент часу  $t + \Delta t$ .

Згідно з цим матрицю переходів можна подати як

$$P = \parallel p_{ij} \parallel,$$

де  $p_{ij}$  — ймовірність переходу виробу із стану  $i$  в стан  $j$ , причому

$$p_{ij} \leq 1; \quad \sum_{i=1}^n p_{ij} = 1.$$

Якщо розглядати дискретний марковський процес і характеризувати

поведінку системи  $n$ -вимірним вектором з компонентами  $p_{ij}$ , що визначають ймовірність знаходження системи в момент часу  $t$  в стані  $j$ , то поведінку системи в момент часу  $t+1$  можна визначити із розв'язання системи рівнянь виду [13]

$$X_i(t+1) = \sum_{j=1}^n p_{ij} X_j(t), \quad i=1, \dots, n.$$

Реальні об'єкти мають нелінійні елементи, але для практичних цілей вони можуть бути лінеаризовані і як діагностичні моделі можна використати лінійні диференційні рівняння, передатні функції або характеристичні рівняння передатної функції. В цьому випадку умови роботоздатності задають в найбільш загальному вигляді як обмеження на переміщення нулів і полюсів на комплексній площині і, використовуючи метод малого параметра, визначають допустиму зміну контрольованого параметра. На практиці обмежуються побудовою моделі на основі передавальної функції від вибраних входів і цікавих для нас виходів або задовольняються визначенням тих характеристик передатної функції, які мають значення для оцінення роботоздатності об'єкта.

У багатьох практичних випадках як діагностичну модель можна розглядати характеристичне рівняння типу  $a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0 = 0$  та аналізувати тільки переміщення полюсів  $p_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) системи.

**Приклад.** Нехай передатна функція має вигляд  $W(p) = \frac{k}{[(p+2)(p+4)+k]}$ , тоді як діагностичну модель використаємо характеристичне рівняння  $p^2 + 6p + (8+k) = 0$ . Корені (полюси) будуть  $p_{1,2} = -3 \pm \sqrt{1-k}$ . Отже, положення коренів на комплексній площині буде визначатись зміною  $k$ . Якщо на комплексну площину нанести корені при різних величинах  $k$ , то можна безпосередньо отримати часову характеристику об'єкта. Так при зміні  $k$  від 0 до  $+\infty$  корені будуть переміщуватись по дійсній осі від -2 до -4 і по прямій, паралельній уявній осі  $x = -3$  (рис. 2.6).

Оскільки будь-яку пару комплексних коренів можна зобразити як  $p_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2}$ , то фазовий кут  $\theta = \arctg\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right)$ , а тому  $\cos\theta = \xi$ , і якщо задати обмеження на часову характеристику в формі допустимих значень зміни коефіцієнта демпфіювання  $\xi$ , то можна

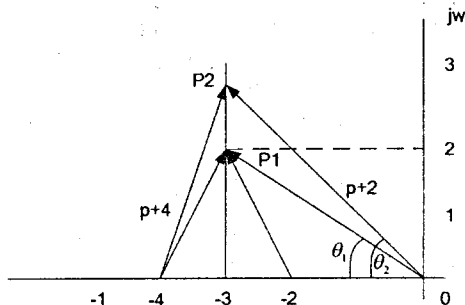


Рисунок 2.6 — Положення полюсів характеристичного рівняння

простою геометричною побудовою знайти допустиме переміщення коренів (умови роботоздатності в області контрольованого параметра). При цьому в загальному випадку значення контрольованого параметра  $k$  можуть бути подані як [8]

$$k = \frac{\prod_{i=1}^z r_{zi}}{\left( r_{po}^n \prod_{i=1}^{p-n} r_{pi} \right)} = 1, \quad (2.2)$$

де  $r_z, r_p$  — відповідно радіуси - вектори нулів та полюсів передаючої функції  $z$ ;  $p$  — порядок полінома відповідно в числівнику та знаменнику передаючої функції;  $n$  — кількість кратних коренів.

Наприклад, для  $\theta_1$  та  $\theta_2$  корені запишуться  $P_1 = -3 + j2$ ,  $P_2 = -3 + j3$ ; при цьому межа допустимої зміни параметра визначиться як (рис. 2.6) :

$$r_{p_1} = |p + 2| = |-3 + j2 + 2| = \sqrt{(-1)^2 + 2^2} = \sqrt{5};$$

$$r'_{p_1} = |p + 4| = |-3 + j2 + 4| = \sqrt{1^2 + 2^2} = \sqrt{5};$$

$$k_1 = \sqrt{5} \cdot \sqrt{5} = 5; \quad r_{p_2} = |-3 + j3 + 2| = \sqrt{10};$$

$$r'_{p_2} = |-3 + j3 + 4| = \sqrt{10}; \quad k_2 = \sqrt{10} \cdot \sqrt{10} = 10.$$

Тобто при вибраних обмеженнях контрольований параметр знаходиться в межах  $5 \leq k \leq 10$ . Характеристичне рівняння може мати високий порядок  $n > 3$ . Аналіз його викликає значні труднощі. Тому

намагаються спростити характеристичне рівняння об'єкта за умови збереження основних показників, які визначають його роботоздатність. Відомими є методи заміни характеристичних рівнянь або передатних функцій високого порядку еквівалентними, які мають більш низький порядок за умови збереження динамічних характеристик (*dynamic characteristic*) об'єкта.

**Приклад.** Для елемента системи, заступна схема якого показана на рис. 2.7, задати умови роботоздатності, якщо параметри мають такі початкові значення:  $R_1 = 0,3 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 0,7 \text{ кОм}$ ;  $L = 1 \text{ Гн}$ ;  $C = 1 \text{ мкФ}$  і можуть змінюватись в межах  $\Delta R_1 \pm 20\%$ ,  $\Delta R_2 \pm 30\%$ .

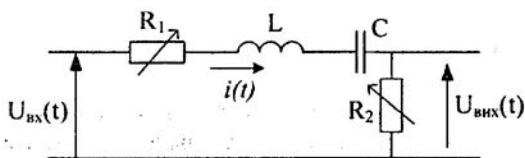


Рисунок 2.7 — Заступна схема

**Розв'язання.** Для заступної схеми, поданої на рис. 2.7, визначимо передатну функцію від вибраних входу і виходу. Складемо рівняння динаміки:

$$U_{\text{вх}}(t) = i(t)(R_1 + R_2) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt;$$

$$U_{\text{вих}}(t) = i(t)R_2,$$

звідки  $i(t) = \frac{U_{\text{вих}}(t)}{R_2}$ ;

$$U_{\text{вх}}(t) = \frac{U_{\text{вих}}(t)(R_1 + R_2)}{R_2} + \frac{L}{R_2} \frac{dU_{\text{вих}}(t)}{dt} + \frac{1}{CR_2} \int U_{\text{вих}}(t) dt.$$

Запишемо диференціальне рівняння в операторній формі при нульових початкових умовах:

$$U_{\text{вх}}(p) = U_{\text{вих}}(p) \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} + p \frac{L}{R_2} + \frac{1}{CR_2 p} \right);$$

$$W(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{pCR_2}{Cp(R_1 + R_2) + LCp^2 + 1} \quad (2.3)$$

Як діагностичну модель використаємо характеристичне рівняння з (2.3)

$$p^2 + p \frac{R_1 + R_2}{L} + \frac{1}{LC} = 0. \quad (2.4)$$

Введемо позначення  $T = \frac{L}{R_1 + R_2}$ ;  $\omega^2 = \frac{1}{LC}$ , тоді (2.3) буде мати вигляд:

$$p^2 + \frac{1}{T}p + \omega^2 = 0,$$

i

$$\begin{aligned} p_{1,2} &= -\frac{1}{2T} \pm \sqrt{\frac{1}{4T^2} - \omega^2} = -\frac{1}{2T} \pm j\sqrt{\omega^2 - \frac{1}{4T^2}} = \\ &= -\frac{\omega}{2T\omega} \pm j\omega\sqrt{1 - \frac{1}{4T^2\omega^2}} = -\omega\xi \pm j\omega\sqrt{1 - \xi^2}, \end{aligned}$$

де  $\xi = \frac{1}{2T\omega}$ .

Визначимо допустимі зміни величин  $R_1$  і  $R_2$ :  $240 \leq R_1 \leq 360$  (Ом) та  $490 \leq R_2 \leq 910$  (Ом). За класичним планом вводу вхідних даних в експеримент спочатку вважаємо, що  $R_2 = \text{const} = 700$  Ом, а  $240 \leq R_1 \leq 360$  Ом. Враховуючи те, що

$$\xi = \frac{1}{2T\omega} = \frac{(R_1 + R_2)\sqrt{LC}}{2L},$$

масмо

$$\xi_1' = \frac{(240 + 700)\sqrt{1 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}}{2 \cdot 1} = 0,465; \quad \xi_1'' = \frac{(360 + 700)\sqrt{1 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}}{2 \cdot 1} = 0,530,$$

тобто  $0,465 < \xi_1 < 0,530$ . В другому випадку  $R_1 = \text{const} = 300$  Ом,  $490 \leq R_2 \leq 910$  і  $0,395 < \xi_2 < 0,605$ . В загальному випадку  $0,395 < \xi < 0,605$  і цю зміну  $\xi$  вводимо в експеримент. Визначимо корені (полюси) характеристичного рівняння і подамо їх величину у вигляді табл. 2.1.

Таблиця 2.1 — Величини полюсів характеристичного рівняння

$\xi$	$P_1$	$P_2$
0,395	-395+j918	-395-j918
0,420	-420+j907	-420-j907
0,450	-450+j893	-450-j893
0,470	-470+j779	-470-j779
0,490	-490+j759	-490-j759
0,510	-510+j739	-510-j739
0,530	-530+j847	-530-j847
0,550	-550+j835	-550-j835
0,570	-570+j821	-570-j821
0,605	-605+j0,796	-605-j0,796

Графічне відображення умов роботоздатності елемента об'єкта діагностування подано на рис. 2.8.

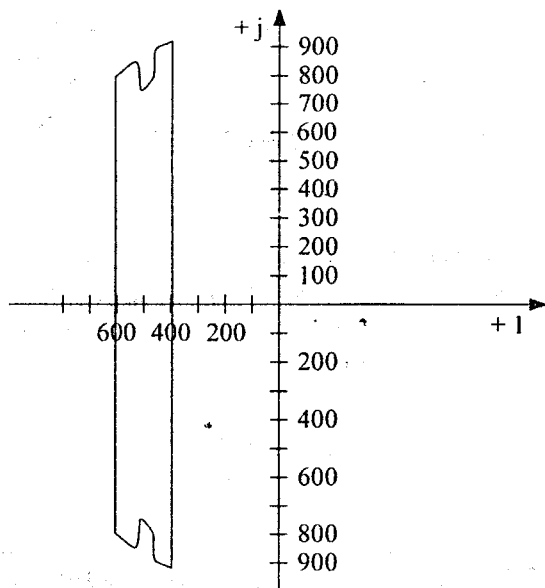


Рисунок 2.8 — Умови роботоздатності елемента об'єкта діагностування

Для зворотної задачі, коли задано допустиме переміщення полюсів, межа допустимої зміни активних опорів може бути визначена так. Для

першого кореня  $\cos \theta = \xi_1 = \frac{0.5 \cdot 10^3}{\sqrt{0.5^2 + 0.86^2}} = 0.5$ . Для другого кореня

$P_2 = -19.96 \cdot 10^3 = -\omega \xi_2 + j\omega \sqrt{1 - \xi_2^2}$ ; а тому  $\xi > 1$  і, користуючись методом ітерації, з останнього рівняння можна визначити  $\xi_2 = 10$ . Якщо відомо  $\xi_1$  і  $\xi_2$ , то

$$\xi_1 = 0.5 = \frac{R_1 + R_2}{2\omega L}; \text{ і } R_1 + R_2 = \omega L = 1 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$\xi_2 = 10; R_1 + R_2 = 20 \cdot \omega L, \text{ а тому } 1 \cdot 10^3 \leq R_1 + R_2 \leq 20 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Аналіз аналітичних моделей часто пов'язаний з великим обсягом розрахунків. Спростити процес розв'язування можна шляхом використання матричних рівнянь. Зокрема, для електротехнічних виробів невеликої складності як діагностичну модель можна використати невизначену матрицю вузлових провідностей (*conductivity*) [14].

$$\bar{y} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1k} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2k} & \dots & y_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ y_{j1} & y_{j2} & \dots & y_{jj} & \dots & y_{jn} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{n3} & \dots & y_{nn} \end{pmatrix},$$

де  $y_{jj}$  — сума провідностей віток, приєднаних до  $j$  вузла;  $y_{jk}$  — провідність вітки, що з'єднує вузли  $j$  і  $k$ , яку завжди беруть зі знаком “—”.

В невизначеній матриці вузлових провідностей сума елементів кожного стовпця та кожного рядка дорівнюють нулю. Вона дозволяє просто визначити функцію передачі за напругою та струмом між вибраним входом і виходом, наприклад, для двополюсника функція передачі за напругою

$$T_{gp} = \frac{y_{gm,kj}}{y_{mm,jj}}, \quad (2.5)$$

де  $g, p$  — вхідний та вихідний елемент;  $y_{gm,kj}, y_{mm,jj}$  — алгебраїчні доповнення другого порядку, отримані з визначника шляхом

викреслювання стовпців  $r$  та  $k$  та рядків  $j$  і  $m$ , при цьому  $r$  та  $k$  номери вузлів вихідного елемента  $p$ , а  $j$  і  $m$  номери вузлів вхідного елемента  $g$ .

**Приклад.** Заступна схема зображена на рис. 2.9. Входи 1, 2 будемо вважати фіксованими. В процесі експлуатації змінюються параметри схеми  $Z_1, Z_2, Z_5, Z_1 = 1\text{кОм}, Z_2 = 2\text{кОм}, Z_3 = 0,2\text{мкФ}, Z_4 = 1\text{Гн}$ . Необхідно

визначити найбільш чутливі передачі до зміни параметрів  $S_{Z_i}^{T_{gp}} = dT_{gp}/dZ_i$ .

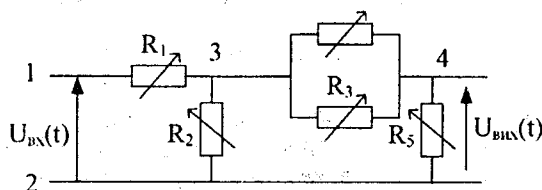


Рисунок 2.9 — Заступна схема

Визначимо провідності окремих віток:

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ см}; \quad Y_2 = \frac{1}{Z_2} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ См};$$

$$Y_3 = j\omega c = \frac{1}{Z_3} = j \cdot 314 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} = j \cdot 62,8 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$Y_4 = -j(\omega L)^{-1} = \frac{1}{Z_4} = -j \cdot 3,185 \cdot 10^{-3} \text{ См}; \quad Y_5 = \frac{1}{Z_5} = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ См}.$$

Невизначену матрицю вузлових провідностей можна записати у вигляді

$$y = \begin{vmatrix} y_1 & 0 & -y_1 & 0 \\ 0 & y_2 + y_5 & -y_2 & -y_5 \\ -y_1 & -y_2 & y_1 + y_2 + y_3 + y_4 & -y_3 - y_4 \\ 0 & -y_5 & -y_3 - y_4 & +y_3 + y_4 + y_5 \end{vmatrix}$$

Визначимо передачу  $T_{gp}$  за (2.5) до виходу  $p \Rightarrow 1,3$  при фіксованому вході  $g \Rightarrow 1,2$ , тоді  $r \Rightarrow 1$ ,  $k \Rightarrow 3$ ,  $m \Rightarrow 1$ ,  $j \Rightarrow 2$ . Шляхом викреслювання стовпців 1, 3 і рядків 1, 2 із визначника отримасмо алгебраїчне доповнення чисельника, а шляхом викреслення стовпців і рядків 1 і 2 алгебраїчне доповнення знаменника, тоді передача:

$$T_{1213} = \frac{\begin{vmatrix} -y_2 & -y_3 - y_4 \\ -y_5 & y_3 + y_4 + y_5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} y_1 + y_2 + y_3 + y_4 & -y_3 - y_4 \\ -y_3 - y_4 & y_3 + y_4 + y_5 \end{vmatrix}} =$$

$$= \frac{-y_2(y_3 + y_4 + y_5) - y_5(y_3 + y_4)}{(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2}$$

Розглянемо чутливість передач до зміни параметрів  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_5$ :

$$S_{y_1}^{T_{1213}} = \frac{dT_{1213}}{dy_1} = \frac{1 \cdot (y_3 + y_4 + y_5) \cdot [-y_2(y_3 + y_4 + y_5) - y_5(y_3 + y_4)]}{[(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2]^2} =$$

$$= \frac{(0,33 \cdot 10^{-3} - j3,12 \cdot 10^{-3}) \cdot [-0,5 \cdot 10^{-3}(0,33 \cdot 10^{-3} - j3,12 \cdot 10^{-3}) - 0,33 \cdot 10^{-3}(-j3,13 \cdot 10^{-3})]}{[(1,5 \cdot 10^{-3} - j3,12 \cdot 10^{-3})(0,33 \cdot 10^{-3} - j3,12 \cdot 10^{-3}) - (-j3,12)^2]^2} =$$

$$= \frac{-8,054 \cdot 10^{-9} - j1,385 \cdot 10^{-9}}{-32,461 \cdot 10^{-12} - j5,714 \cdot 10^{-12}} = \frac{-8,054 - j1,385}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}}$$

$$|S_{y_1}^{T_{1213}}| = 247,94.$$

$$S_{y_2}^{T_{1213}} = \frac{dT_{1213}}{dy_2} =$$

$$= \frac{-(y_3 + y_4 + y_5) \cdot [(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2]}{[(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2]^2} -$$

$$\dots \frac{-(y_3 + y_4 + y_5) \cdot [-y_2(y_3 + y_4 + y_5) - y_5(y_3 + y_4)]}{\dots}$$

$$= \frac{9,63 + j2,081}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}};$$

$$|S_{y_2}^{T_{1213}}| = 298,63.$$

$$S_{y_5}^{T_{1213}} = \frac{dT_{1213}}{dy_5} =$$

$$= \frac{-(y_3 + y_4 + y_2) \left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]}{\left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]^2} - \dots$$

$$\dots \frac{-(y_3 + y_4 + y_1 + y_2) \cdot [-y_2(y_3 + y_4 + y_5) - y_5(y_3 + y_4)]}{\dots} = -270,79 + j51,19;$$

$$|S_{y_5}^{T_{1232}}| = 295,267.$$

$$T_{1232} = \frac{\begin{vmatrix} -y_1 & -y_3 - y_4 \\ 0 & y_3 + y_4 + y_5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} y_1 + y_2 + y_3 + y_4 & -y_3 - y_4 \\ -y_3 - y_4 & y_3 + y_4 + y_5 \end{vmatrix}} =$$

$$= \frac{-y_1(y_3 + y_4 + y_5)}{(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2}$$

$$S_{y_1}^{T_{1232}} = \frac{-(y_3 + y_4 + y_5)(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - \dots}{\left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]^2} \dots$$

$$\dots \frac{-(y_3 + y_4)^2 + (y_3 + y_4 + y_5)^2 \cdot y_1}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}} = \frac{8,066 + j1,388}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}};$$

$$|S_{y_1}^{T_{1232}}| = 247,96.$$

$$S_{y_2}^{T_{1232}} = \frac{+(y_3 + y_4 + y_5)y_1(y_3 + y_4 + y_5)}{\left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]^2} =$$

$$= \frac{-9,625 - j2,078}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}};$$

$$|S_{y_2}^{T_{1232}}| = 298,74.$$

$$S_{y_5}^{T_{1232}} = \frac{-y_1 \left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right] + \dots}{\left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]^2} \dots$$

$$\dots + \frac{(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \cdot y_1 (y_3 + y_4 + y_5)}{\dots} = \frac{-9,74}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}};$$

$$\left| S_{y_5}^{T_{1232}} \right| = 295,26.$$

$$T_{1234} = \frac{\begin{vmatrix} -y_1 & -y_2 \\ 0 & -y_5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} y_1 + y_2 + y_3 + y_4 & -(y_3 + y_4) \\ -(y_3 + y_4) & y_3 + y_4 + y_5 \end{vmatrix}} =$$

$$= \frac{y_1 \cdot y_5}{(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2}$$

$$S_{y_1}^{T_{1234}} = \frac{y_5 \left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]}{\left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]^2} \dots$$

$$\dots - \frac{(y_3 + y_4 + y_5) \cdot y_1 \cdot y_5}{\dots} = \frac{55,56 - j867,2}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}};$$

$$\left| S_{y_1}^{T_{1234}} \right| = 26,326.$$

$$S_{y_2}^{T_{1234}} = \frac{-(y_3 + y_4 + y_5) \cdot y_1 \cdot y_5}{\left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]^2} =$$

$$= \frac{-0,111 + j1,039}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}};$$

$$\left| S_{y_2}^{T_{1234}} \right| = 31,7.$$

$$S_{y_5}^{T_{1234}} = \frac{y_1 \left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]}{\left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]^2} \dots$$

$$\dots - \frac{y_1 y_5 (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)}{\dots} = \frac{-j4,68}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}};$$

$$|S_{y_5}^{T_{1234}}| = 141,99.$$

$$T_{1242} = \frac{\begin{vmatrix} -y_1 & y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \\ 0 & -(y_3 + y_4) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} y_1 + y_2 + y_3 + y_4 & -(y_3 + y_4) \\ -(y_3 + y_4) & y_3 + y_4 + y_5 \end{vmatrix}} =$$

$$= \frac{y_1(y_3 + y_4)}{(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2}.$$

$$S_{y_1}^{T_{1242}} = \frac{(y_3 + y_4) \left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]^{-1}}{\left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]^{-2}} =$$

$$= \frac{-(y_3 + y_4 + y_5) \cdot y_1(y_3 + y_4)}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}} = \frac{-8,11 - j0,519}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}};$$

$$|S_{y_1}^{T_{1242}}| = 246,56.$$

$$S_{y_2}^{T_{1242}} = \frac{-(y_3 + y_4 + y_5)y_1(y_3 + y_4)}{\left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]^{-2}} =$$

$$= \frac{9,736 + j1,039}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}};$$

$$|S_{y_2}^{T_{1242}}| = 297,06.$$

$$S_{y_3}^{T_{1242}} = \frac{-(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)y_1(y_3 + y_4)}{\left[ (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)(y_3 + y_4 + y_5) - (y_3 + y_4)^2 \right]^{-2}} =$$

$$= \frac{9,73 + j4,68}{-32,461 \cdot 10^{-3} - j5,714 \cdot 10^{-3}};$$

$$|S_{y_3}^{T_{1242}}| = 327,742.$$

Оскільки розглянуто всі можливі виходи, а вхід є фіксованим, то за отриманими результатами побудуємо таблицю чутливості (*sensitivity*) 2.2.

Таблиця 2.2 — Таблиця чутливості передач до зміни параметрів

$y_i$	$y_1$	$y_2$	$y_5$
$\left  S \frac{T_{ij}}{y_i} \right $			
$\left  S \frac{T_{1213}}{y_i} \right $	247,94	298,63	295,26
$\left  S \frac{T_{1232}}{y_i} \right $	247,96	298,74	295,26
$\left  S \frac{T_{1234}}{y_i} \right $	26,32	31,7	141,99
$\left  S \frac{T_{1242}}{y_i} \right $	246,56	297,06	327,742

Висновок. Аналіз таблиці чутливості показав, що при фіксованому вході найбільш чутливою передачею до зміни  $y_1 \in T_{1232}$ ;  $y_2 \in T_{1232}$ ;  $y_5 \in T_{1242}$ .

Можна суттєво скоротити об'єм обчислення використавши для побудови діагностичної моделі сигнальний граф або діаграму проходження сигналу [14, 15].

Діаграма проходження сигналу (ДПС) є схемою, яка складається з вузлів, з'єднаних напрямними вітками, і яка відображає систему алгебраїчних рівнянь, що описують процеси, які відбуваються в об'єкті.

Вузли діаграми відображають змінні, а вітки — оператори, які характеризують коефіцієнти при змінних. Вузли бувають трьох типів: джерела, прості каскадні вузли та стоки.

Джерела — це такі вузли, які мають тільки вихідні вітки; стоки — тільки вхідні. Джерела відповідають незалежним змінним, а стоки — залежним. Прості каскадні вузли мають як вхідні, так і вихідні вітки. Кожній вітці відповідає свій оператор  $T_{jk}$ , напрямок вітки показують стрілкою. Кожному вузлу відповідає своя змінна  $X_k = \sum x_j T_{jk}$ , тобто при цьому кожний сигнал дорівнює добутку оператора вхідної вітки на сигнал вузла, із якого вітка виходить. Наприклад, для схеми заміщення елемента складної системи (рис. 2.10) можна скласти систему рівнянь:

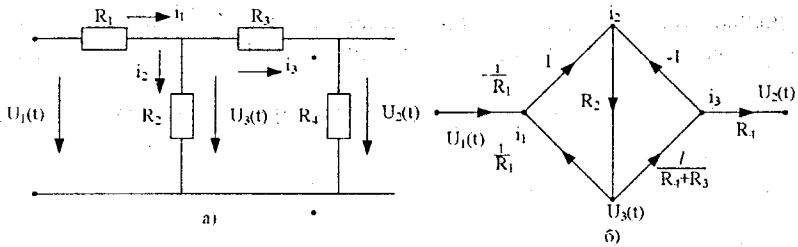


Рисунок 2.10 — Схема заміщення а); діаграма проходження сигналу б)

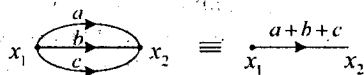
$$\left. \begin{aligned}
 i_1 &= U_3(t) / R_1 - U_1(t) / R_1; \\
 i_2 &= i_1 - i_3; \\
 i_3 &= U_3(t) / (R_3 + R_4); \\
 U_2(t) &= i_3 R_4; \\
 U_3(t) &= i_2 R_4.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Використовуючи цю систему алгебраїчних рівнянь побудуємо діаграму проходження сигналів (рис. 2.10, б). Для цього на полі розташовують довільно залежні змінні  $i_1, i_2, i_3, U_3(t)$  і незалежні змінні  $U_1(t), U_2(t)$  — вузли і зв'язують їх вітками з передачами, що відтворюють систему алгебраїчних рівнянь. Користуючись певними правилами, можна побудувати ДПС без попереднього складання системи алгебраїчних рівнянь.

Граф може утворювати контур. Контур сигнального графа — це замкнений шлях, який проходить по однаково направлених вітках графа, причому всі вузли, крім початкового, зустрічаються тільки один раз. Початковий вузол зустрічається на шляху двічі, оскільки він є кінцевим. Петля є частковим випадком контуру графа. Величина контуру — добуток передач віток графа, які входять до даного контуру. Шлях сигнального графа — сукупність односпрямованих віток між двома заданими вузлами графа. На шляху всі вітки та вузли графа зустрічаються тільки один раз. Величина шляху графа — добуток передач віток графа, які входять в даний граф. Для визначення функції передачі між вибраними входом та виходом ДПС необхідно знати основні правила перетворення.

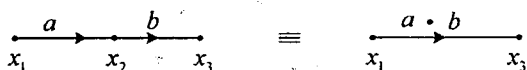
Розглянемо основні правила перетворення сигнальних графів.

1. Об'єднання паралельних односпрямованих віток в одну.



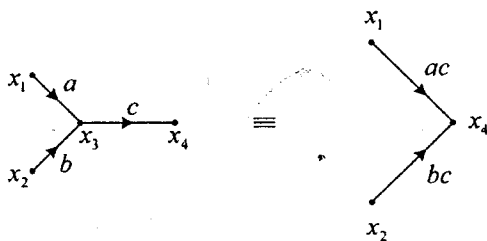
$$x_2 = ax_1 + bx_1 + cx_1; \quad x_2 = (a + b + c)x_1.$$

## 2. Об'єднання послідовних односпрямованих віток графа в одну

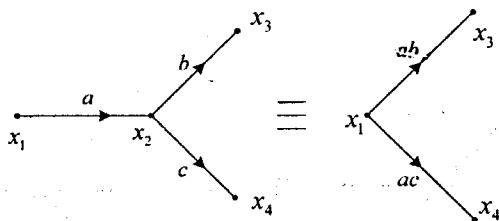


$$x_2 = x_1 \cdot a; \quad x_3 = x_2 \cdot b; \quad x_3 = abx_1.$$

## 3. Вилучення вузла графа

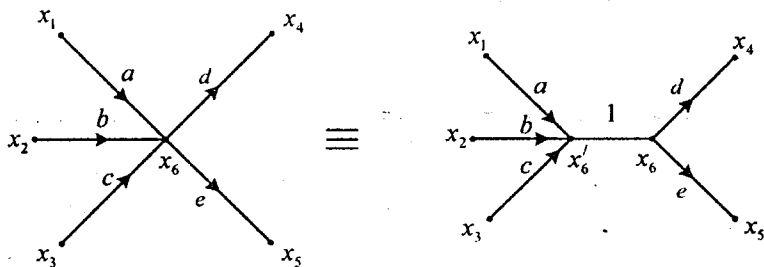


$$x_3 = x_1 a + x_2 b; \quad x_4 = x_3 c = x_1 ac + x_2 bc.$$

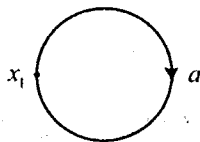


$$x_2 = ax_1; \quad x_3 = x_2 b = abx_1; \quad x_4 = x_2 c = acx_1.$$

## 4. Розтягування вузла

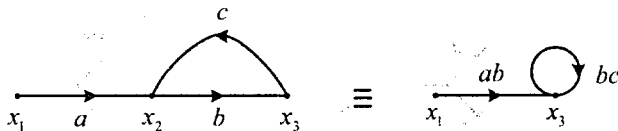


5. Передача від'єднаної петлі завжди дорівнює одиниці



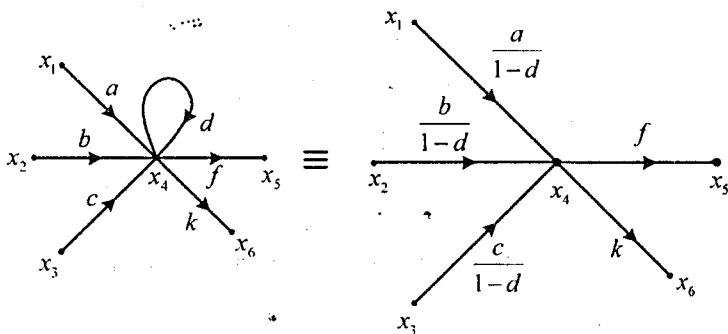
$$x_1 = ax_1, \text{ тому } a = 1.$$

6. Утворення петлі з двох паралельних різноспрямованих віток графа



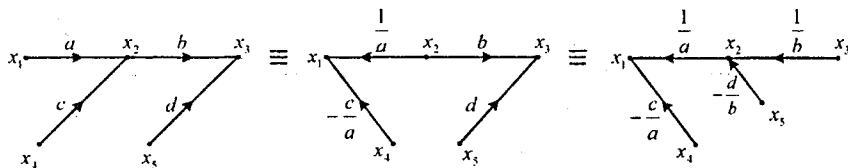
$$x_3 = x_2b; \quad x_2 = x_3c + x_1a; \quad x_3 = x_3bc + x_1ab.$$

7. Вилучення петлі у складному графі



$$x_4 = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4; \quad x_4 = \frac{a}{1-d}x_1 + \frac{b}{1-d}x_2 + \frac{c}{1-d}x_3.$$

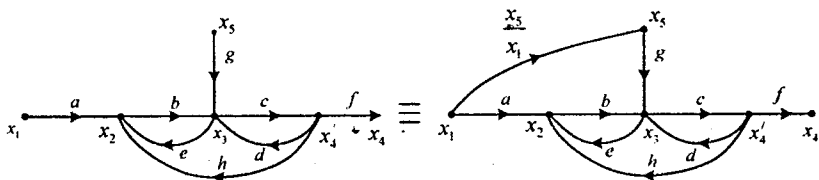
8. Інверсія вітки та шляху



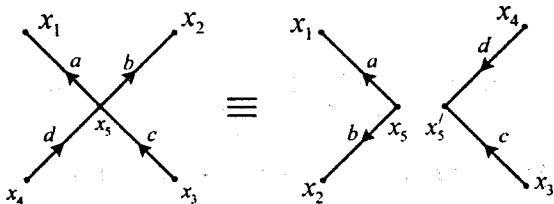
$$x_2 = ax_1 + cx_4; \quad x_1 = \frac{1}{a}x_2 - \frac{c}{a}x_4; \quad x_3 = bx_2 + dx_5; \quad x_2 = x_3 \frac{1}{b} - \frac{d}{b}x_5.$$

Тобто для інверсії вітки, наприклад, з передачею  $a$ , змінюють напрямок вітки на протилежний, передача вітки береться як обернена  $\left(\frac{1}{a}\right)$ , а вітка, що є в кінці шляху ( $c$ ) і направлена до нього (кінця шляху), переноситься на початок шляху, її передача визначається як  $-\frac{c}{a}$ .

### 9. Об'єднання декількох джерел в одне

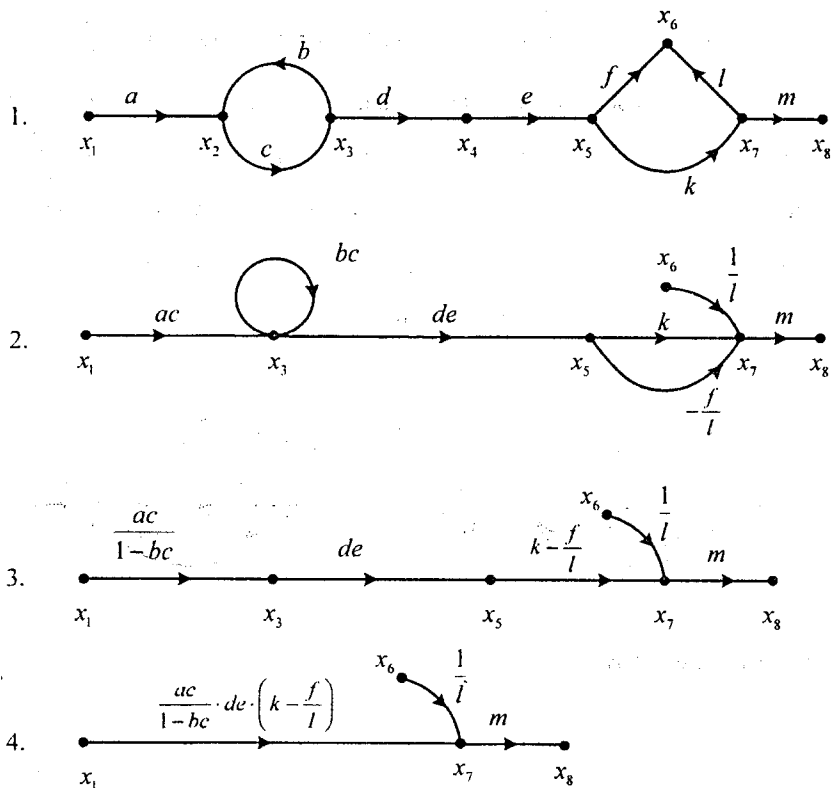


### 10. Розщеплення вузла



Операція розщеплення є операцією поділу вузла на дві частини, одна з яких має тільки вхідні вітки, а друга — вихідні. Оскільки величина змінної у вузлі визначається тільки вхідними вітками, то така операція для вузла допустима.

Розглянемо приклади розв'язання сигнальних графів за допомогою перетворень (рис. 2.11).



$$x_8 = \left( x_1 \cdot \left[ \frac{ac}{1-bc} \cdot de \cdot \left( k - \frac{f}{l} \right) \right] + x_6 \cdot \frac{1}{l} \right) \cdot m.$$

Рисунок 2.11 — Перетворення сигнального графа

Перевага використання сигнальних графів для визначення функції передачі (*transfer function*) ще більше очевидна, коли граф будується безпосередньо за схемою без складання та перетворення рівнянь. Алгоритм побудови покажемо на прикладі заступної схеми, зображеній на рис. 2.12. Задамо напрямки контурних струмів в схемі та визначимо кількість вузлів майбутнього графа. Кількість вузлів визначається кількістю контурних струмів ( $I_1, I_2$ ) та джерел електричної енергії в заступній схемі ( $E_1, E_2, E_3, I$ ), тому граф буде мати 6 вузлів. Для більшої зручності замінимо схему рис. 2.12, а) на схему рис. 2.12, б), щоб кожному

джерелу струму відповідав паралельно ввімкнутий опір.

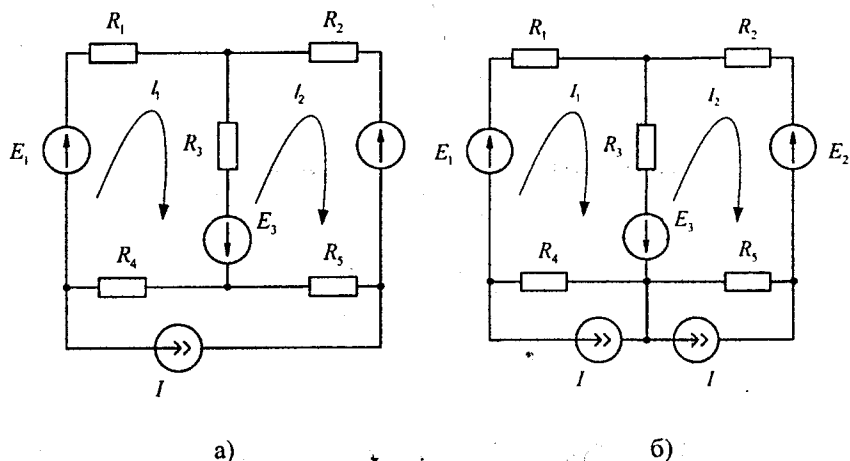


Рисунок 2.12 — Заступна схема

На полі графа (рис. 2.13) довільно розташуємо вузли, які відповідають змінним, що досліджуються, та джерелам схеми. Вузли змінних ( $I_1, I_2$ ) з'єднують двома паралельними протилежно спрямованими вітками, причому, якщо вітка спрямована від вузла  $j$  до вузла  $i$ , то передача цієї вітки визначається як  $R_{ij}/R_{ii}$ , де  $R_{ii}$  це сума опорів, які діють в  $i$ -му контурі, а  $R_{ij}$  — це загальний опір між  $i$  та  $j$  контурами.

Джерела ЕРС схеми з'єднують з вузлами — змінними ( $I_1, I_2$ ). Напрямок передачі завжди від джерела до відповідного вузла змінної, тобто до того струму в контурі, в якому знаходиться ЕРС (рис. 2.13).

Передача вітки  $\pm \frac{1}{R_{ij}}$  з  $i$ -им контуром. Знак “+” береться, якщо струм  $i$ -го контуру збігається за напрямком з ЕРС, що діє в контурі, в протилежному випадку беруть знак “-”.

Джерело струму схеми з'єднується з тими вузлами — змінними, в контурі яких знаходиться опір, підключений паралельно джерелу струму.

Передачі цих віток визначаються як  $\pm \frac{R_k}{R_{ii}}$ , де  $R_k$  опір, ввімкнений паралельно джерелу струму в  $i$ -му контурі. Знак “+” приймається тоді, коли напрямок струму в  $i$ -ому контурі збігається з напрямком джерела живлення в опорі  $R_k$ . Якщо не збігаються, беруть знак “-”.

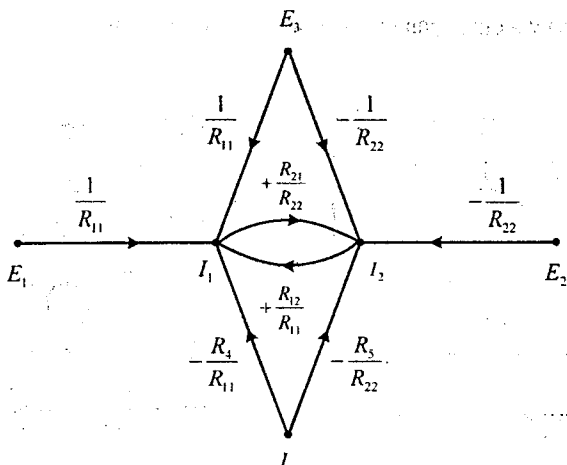


Рисунок 2.13 — Побудова сигнального графа за електричною схемою

## 2.4 Функціональні моделі

В деяких випадках існують технічні об'єкти, які можна поділити на декілька взаємопов'язаних частин, кожна з яких має своє самостійне значення. В цьому випадку як діагностичну можна використовувати так звану функціональну модель [16].

Функціональна модель є графічним зображенням об'єкта, в якому кожна виділена частина (функціональний елемент) позначається прямокутником  $a_j$  з декількома входами  $x_j$  і одним виходом  $y_k$ , показаними стрілками (рис. 2.14). Кількість входів відповідає кількості зовнішніх дій, які необхідно подати, щоб отримати реакцію на виході елемента. Зв'язки між елементами показані лініями зі стрілками, які позначають напрямок проходження сигналу. Стан елемента оцінюється 1, коли при поданні всіх допустимих входів на виході елемента виникає допустима реакція. Якщо реакція виявиться недопустимою, то його стан оцінюється як 0. Якщо хоча б на один із входів подана недопустима дія, то вихідна реакція елемента також повинна бути недопустимою.

Користуючись функціональною моделлю, можна задати всю множину можливих станів виробу. Потужність множини станів  $\{S_i\}$  визначається кількістю можливих станів функціональних елементів моделі. Кожну компоненту множини подають  $n_j$  - вимірним вектором, де  $n_j$  — кількість функціональних елементів моделі. В більшості випадків вважають, що одночасно може відмовити тільки один елемент. Елементу, що відмовив, у векторі станів відповідає 0. Наприклад, для функціональної моделі,

поданої на рис. 2.14, якщо відмовив перший елемент то  $S_1(011111)$ .

Якщо вважати перевірку за реакцію одного із функціональних елементів при подачі на модель всіх допустимих дій, то можна побудувати таблицю станів об'єкта. В таблиці станів кількість рядків буде відповідати числу станів об'єкта  $S_i$ , а кількість стовпців — числу перевірок  $\pi_j$ . Для об'єкта, поданого на рис. 2.14, була побудована таблиця станів (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 — Таблиця станів

$S_i \backslash \pi_j$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_6$
$S_0(111111)$	1	1	1	1	1	1
$S_1(011111)$	0	0	0	1	0	0
$S_2(101111)$	1	0	0	1	1	0
$S_3(110111)$	1	1	0	1	1	1
$S_4(111011)$	1	1	1	0	0	0
$S_5(111101)$	1	1	1	1	0	0
$S_6(111110)$	1	1	1	1	1	0

Функціональна модель і побудована на її основі таблиця станів дозволяє для розв'язання діагностичних задач використовувати формальний апарат для визначення оптимальної кількості необхідних перевірок. Але подання об'єкта функціональною моделлю не звільняє від необхідності розв'язання задач, пов'язаних з визначенням умов роботоздатності для кожного функціонального елемента.

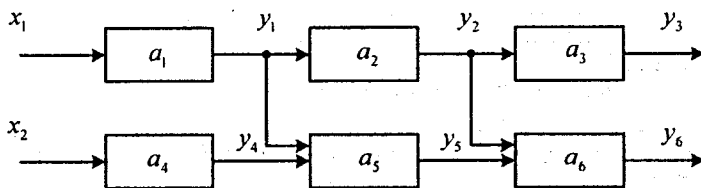


Рисунок 2.14 — Функціональна модель

## 2.5 Методика побудови діагностичної моделі об'єкта на основі теорії подібності

Побудову діагностичної моделі у вигляді рівняння зв'язку між зовнішніми показниками систем і внутрішніми показниками процесу з великою кількістю показників ( $m \geq 3$ ) [29] можна значно спростити шляхом застосування теорії подібності. Ця теорія [30, 31] дозволяє використати ту інформацію про взаємовплив показників, яка є в розмірностях показників системи і процесу, нормованих їх значеннях. Для отримання цільової функції об'єкта з визначеними вхідними даними скористаємося першою та другою теоремами подібності. Друга теорема подібності, або  $\pi$ -теорема, стверджує, що всяке повне рівняння фізичного процесу, записане у певній системі одиниць можна подати рівнянням, що пов'язує безрозмірні величини, отримані із показників, які беруть участь у фізичному процесі. Теорема дозволяє записати рівняння процесу у критеріальній формі, скоротивши число змінних з  $m$  розмірних величин до  $(m - k)$  безрозмірних. Визначивши перехід від критеріальних співвідношень до опису процесу в математичній формі, можна отримати цільову функцію.

Дійсно, якщо відомі показники системи і процесу, їх розмірності та між ними існує зв'язок, то його можна відобразити рівнянням

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_i, \dots, \Pi_k, \dots, \Pi_l, \dots, \Pi_m) = 0, \quad (2.7)$$

де  $\Pi_i$  — значення показника системи або процесу;  $1 \leq i \leq k$ ;  $k+1 \leq l \leq m$ .

Рівняння (1) є однорідним, а тому всі показники, що в нього входять, можна виразити у відносних одиницях

$$F\left(\frac{\Pi_1}{\Pi_{01}}, \frac{\Pi_2}{\Pi_{02}}, \dots, \frac{\Pi_i}{\Pi_{0i}}, \dots, \frac{\Pi_k}{\Pi_{0k}}, \frac{\Pi_m}{\Pi_{0m}}\right) = 0, \quad (2.8)$$

де  $\Pi_{0i}$  — вибране значення показника, який має ту ж розмірність, що показник системи або процесу.

Визначимо, яку кількість незалежних величин  $\Pi_{01}, \dots, \Pi_{0k}$  потрібно вибрати із загальної кількості величин  $\Pi_{01}, \dots, \Pi_{0m}$  і спосіб вибору інших величин. Для цього розглянемо формулу розмірностей всіх величин, що входять в рівняння (2.8).

Якщо у вибраній системі одиниць вимірювання є  $k = d$  основних одиниць вимірювання  $[a, b, c, d]$ , то формулу розмірностей всіх величин запишемо у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} [\Pi_1] = [a^\alpha b^\beta, \dots, d^\varepsilon] = [\Pi_{01}] \\ [\Pi_2] = [a^\alpha b^\beta, \dots, d^\varepsilon] = [\Pi_{02}] \\ \dots \\ [\Pi_k] = [a^\alpha b^{\beta k}, \dots, d^{\varepsilon k}] = [\Pi_{0k}] \\ [\Pi_1] = [a^\alpha b^\beta, \dots, d^\varepsilon] = [\Pi_{01}] \\ [\Pi_m] = [a^\alpha b^\beta, \dots, d^\varepsilon] = [\Pi_{0m}] \end{array} \right. \quad (2.9)$$

де  $\alpha, \beta, \dots, \varepsilon$  — деякі числа.

Оскільки  $k$  одиниць вимірювання незалежні, то  $m - k$  одиниць є їх функціями

$$\left. \begin{array}{l} |\Pi_{0k+1}| = f_{k+1}([\Pi_{01}], [\Pi_{02}], \dots, [\Pi_{0i}], \dots, [\Pi_{0k}]); \\ |\Pi_{01}| = f_1([\Pi_{01}], [\Pi_{02}], \dots, [\Pi_{0i}], \dots, [\Pi_{0k}]); \\ \dots \\ |\Pi_{0m}| = f_m([\Pi_{01}], [\Pi_{02}], \dots, [\Pi_{0i}], \dots, [\Pi_{0k}]). \end{array} \right\} \quad (2.10)$$

З урахуванням (2.10) рівняння (2.8) матиме вигляд

$$F \left( \frac{\Pi_1}{\Pi_{01}}, \frac{\Pi_2}{\Pi_{02}}, \dots, \frac{\Pi_i}{\Pi_{0i}}, \dots, \frac{\Pi_k}{\Pi_{0k}}, \dots, \frac{\Pi_{k+1}}{\Pi_{01}^{\alpha_{k+1}} \Pi_{02}^{\beta_{k+1}} \dots \Pi_{0k}^{\varepsilon_{k+1}}} \dots \frac{\Pi_m}{\Pi_{01}^{\alpha_m} \Pi_{02}^{\beta_m} \dots \Pi_{0k}^{\varepsilon_m}} \right) = 0 \quad (2.11)$$

Незалежні величини  $\Pi_{0i}$  вибирають довільно, тому можна вважати, що  $\Pi_{01} = \Pi_1, \Pi_{02} = \Pi_2, \Pi_{0k} = \Pi_k$  і рівняннями (2.11) набуде вигляду

$$F_1(1, 1, \dots, 1, \pi_1 \dots \pi_{1-k} \dots \pi_{m-k}) = 0, \quad (2.12)$$

де  $\pi_1, \dots, \pi_{m-k}$  — критерії подібності, наприклад  $\pi_1 = \Pi_{k+1} / (\Pi_1^\alpha \Pi_2^\beta \dots \Pi_k^\varepsilon)$ ,  $\alpha, \beta, \varepsilon$  — критеріальні показники, що входять до критерію подібності.

Рівняння (2.12) відображає взаємодію параметрів системи і процесу в критеріальній формі. Для переходу до параметричної форми потрібно використати першу теорему подібності і правило перетворення критеріїв. Згідно з першою теоремою подібності якщо процеси подібні, то і їх критерії подібності рівні між собою.

Побудовану діагностичну модель можна використати для дослідження номенклатури діагностичних параметрів чи ознак; визначення умов роботоздатності, вибору сукупності контрольованих показників, побудови програм пошуку пошкоджень та інше.

**Приклад.** Для контролю технічного стану електромагнітного сепаратора використовують інтегральний показник  $e$  — е. р. с., що виникає в рамці, яка обертається разом з валком сепаратора. Показниками системи і внутрішніми показниками є напруженість магнітного поля в щілині магнітного сепаратора  $H$ , довжина рамки  $l$ , швидкість обертання валка сепаратора  $v$ , магнітна проникність середовища зазору  $\mu$ . Якщо відомі показники системи і процесу ( $m=5$ ) та їх розмірності й між ними існує зв'язок, то його відобразимо рівнянням  $F(e, H, \mu, l, v) = 0$ .

За основні одиниці розмірності виберемо  $M$  — масу,  $L$  — довжину,  $\Theta$  — час,  $\mu$  — магнітну проникність ( $k=4$ ). Тоді формулу розмірностей всіх величин запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} [e] &= M^{1/2} L^{3/2} \Theta^{-2} \mu^{1/2}; \\ [H] &= M^{1/2} L^{-1/2} \Theta^{-1} \mu^{-1/2}; \\ [l] &= L; [v] = L \Theta^{-1}. \end{aligned}$$

Якщо вважати, що е. р. с. є основним показником, то справедливе рівняння розмірностей

$$M^{1/2} L^{3/2} \Theta^{-2} \mu^{1/2} = \left( M^{1/2} L^{-1/2} \Theta^{-1} \mu^{1/2} \right)^a (\mu)^b (L)^c (L \Theta^{-1})^d, \quad (2.13)$$

де  $a, b, c, d$  — критеріальні показники.

Оскільки незалежні показники вибираються довільно, то із рівняння (2.13) для

$$\begin{array}{l|l}
 M \rightarrow \frac{1}{2} = \frac{1}{2}a; & \alpha = 1; \\
 L \rightarrow \frac{3}{2} = -\frac{1}{2}a + c + d; & c = 1; \\
 \theta \rightarrow -2 = -a - d; & d = 1; \\
 \mu \rightarrow \frac{1}{2} = -\frac{1}{2}a + b. & b = 1,
 \end{array}$$

а тому  $e = H\mu lv$ ; і  $m - k = 5 - 4 = 1$ .

## 2.6 Ймовірнісні діагностичні моделі для опису процесів діагностування

Енергетичне обладнання є складною системою і характеризується випадковим характером функціонування, зумовленим виникненням різних дефектів. Для опису задач, які відображають важливі сторони їх функціонування, застосовують теорію стохастичних процесів.

Ймовірнісні моделі повинні бути адекватними реальним процесам і відповідати існуючій точності вхідних даних. Ймовірнісні моделі повинні бути простими, коректними і допускати необхідні перетворення без складних обчислень. Об'єднати ці вимоги в одній моделі складно, тому застосовують для розрахунку ЕОМ.

Ймовірнісні моделі поділяють на імітаційні і аналітичні. В разі використання імітаційної моделі (метод Монте-Карло) розглядають математичну модель системи у вигляді випадкового процесу, а на ЕОМ модулюється реалізація цього процесу, за результатами обробки якого отримують необхідні характеристики. При реалізації на ЕОМ потрібно менший об'єм пам'яті, але час обчислення збільшується. Цей метод широко застосовують для моделювання складних систем [33]. Аналітичні методи використовуються для розв'язання задач на основі чисельних методів теорії випадкових процесів. Останнім часом розроблено ряд моделей для ймовірнісного опису складних систем: метод малого параметра [34] і наполовину марковських процесів [35].

Розглянемо дві ймовірнісні моделі складних об'єктів: модель розладу для визначення несправності і модель, яка описує сумісну роботу системи і об'єкта діагностування.

При експлуатації електрообладнання відбуваються повільна і швидка деградації елементів, зміна технічного стану. В обох випадках виникає задача скорочення часу пошуку пошкодження.

Розглянемо варіанти формальної постановки задачі. Нехай маємо випадкову послідовність  $x_1, x_2, \dots, x_N, \{X_1^N\}$ , яка в момент  $t_0$  стрибкоподібно змінює свої властивості, що характеризуються вектором

параметрів  $\theta$ . Це означає, що до моменту,  $t_0 - 1$ ,  $\theta = \theta_1$ , а починаючи з моменту розладу  $t_0 \theta = \theta_2$ .

При розробці існуючих алгоритмів визначення моменту розпаду вважається, що  $t_0$  – ціле число і відомо нам його закон розподілу. Необхідно визначити правило подачі сигналу про розлад і мінімізуючий час  $\bar{\tau}$  запізнення у виявленні розладу

$$\bar{\tau} = M(\tau/t_0 \geq t_0), \quad (2.14)$$

де  $\tau = t_a - (t_0 - 1)$ ;  $t_a$  – момент подачі повідомлення про розлад;  $M$  – математичне сподівання.

Задану ймовірність  $\alpha$  хибної тривоги позначимо як

$$\alpha = P\{t_a < t_0\}, \quad (2.15)$$

Тоді критерій, який мінімізує величину ризику  $\pi$ , можна визначити як

$$\rho(\pi, t_a) = P_{\pi}\{t_a < t_0\} + cM_{\pi}(t_a - t_0/t_a \geq t_0)P_{\pi}(t_a \geq t_0), \quad (2.16)$$

де  $c$  – ваговий коефіцієнт.

Визначити алгоритм, який мінімізує верхню границю  $\bar{\tau}^*$  запізнення у виявленні моменту розладу

$$\bar{\tau}^* = \sup_{t > t_0} \bar{\tau}(t_0) \quad (2.17)$$

за всіма можливими моментами розладу при заданому середньому часі  $\bar{T} = M(t_0)t_a < t_0$  від початку спостереження до подачі хибної тривоги.

Розглянемо економічний аспект задачі. В даному випадку необхідно мінімізувати середній дохід від суміжного функціонування об'єкта і засобів контролю. При цьому вводиться ціна втрат при визначенні моменту розладу, вартість контролю та інше.

Методи визначення моменту розладу поділяють на дві групи: параметричні і непараметричні, а також такі, що використовують або не використовують апріорний розподіл моменту розладу.

Розглянемо один із методів першої групи – алгоритм кумулятивних сум (АКС).

Цей метод ґрунтується на послідовному аналізі А. Вальда. Згідно з яким розглядають дві гіпотези:  $H_1$  (розладу не маємо)  $\theta = \theta_1$  та  $H_2$  (є

розлад), де  $\theta$  – скалярний параметр щільності розподілу ймовірностей  $\omega(x_t/\theta)$  спостереження  $x_t$ .

В методі АКС обчислюється кумулятивна сума

$$S_t = S_{t-1} + \ln\{\omega(x_t/\theta_t)\}, \quad (2.18)$$

яка порівнюється на кожному кроці з двома порогами:  $\varepsilon$  і  $h$ ,  $(\varepsilon, h) > 0$ . Якщо на кроці  $t$  сума  $S_t \geq h$ , то приймають гіпотезу  $H_1$ , якщо  $S_t \leq -\varepsilon$ , то  $H_2$ ; а якщо  $-\varepsilon < S_t < h$ , то виконують  $t+1$  спостереження.

## 2.7 Модель витрати ресурсу

Розглянемо побудову адитивно-марковських моделей витрати ресурсу [36]. Будемо вважати, що об'єкт має деякий запас ресурсу, який він втрачає в процесі випробувань. Ресурс, витрачений об'єктом в режимі  $\xi(t)$  в інтервалі часу  $(\tau, t)$ , характеризується одновимірною (в загальному випадку багатовимірною) функцією  $R(\tau, t, \varepsilon)$ , яка задовольняє такі умови:

Умова адитивності, тобто при будь-якому значенні  $\theta$  з  $(\tau, t)$  інтервалом існує рівність

$$R(\tau, t, \varepsilon) = R(\tau, \theta, \varepsilon) + R(\theta, t, \varepsilon) \quad (2.19)$$

або більш загальне відношення

$$R(\theta, \theta_n - \varepsilon) = \sum_{i=1}^{n-1} R(\theta_i, \theta_{i-1}, \varepsilon) \quad (2.20)$$

при будь-якому  $0 < \theta_{i-1} \leq \theta_i$ .

Умова марковості, тобто функція  $R(\tau, t, \xi)$  залежить від величини спрацьованого ресурсу в минулому  $R(0, \tau, \xi)$  за час  $\tau$  і не залежить від того, в якому режимі він спрацьований.

Позначимо через  $\xi(t)$  параметри, які визначають режим роботи тоді, коли  $\xi_2(t+\theta) = \xi_1(t+\tau)$  при  $t \in (0, b)$  і  $R(0, \theta, \varepsilon_2) = R(0, \tau, \varepsilon_1)$ , то  $R(\theta, \theta+1, \varepsilon_2) = R(\tau, (\tau+t), \varepsilon_1)$  при будь-якому  $t \in (0, b)$ .

Умова незалежності і сумарного запасу ресурсу  $\bar{R}$  від режиму експлуатації, тобто в подальшому будемо вважати  $\bar{R} = 1$ , оскільки замість  $R(\tau, \theta, \varepsilon)$  можна ввести нову функцію  $R(\tau, t, \varepsilon)/\bar{R}$ .

Позначимо через  $r(t, \varepsilon)$  швидкість витрати ресурсу, тоді  $R(0, \tau, \varepsilon) = \int_0^{\tau} r(t, \varepsilon) dt$ . Якщо  $G(t, \varepsilon)$  – функція розподілу часу переходу із режиму  $\varepsilon$ , то

$$\int_0^{\infty} R(0, \eta, \varepsilon) dG(\eta, \varepsilon) = 1, \quad (2.21)$$

де  $\eta$  – випадкові моменти часу зміни режиму.

В загальному вигляді

$$\int_0^{\infty} R(0, \rho(\eta, \varepsilon), \xi(t)) dG(\eta, \varepsilon) = 1, \quad (2.22)$$

де  $\xi_t$  – режим  $\varepsilon$ , в якому об'єкт функціонує в момент  $t$ . Вираз (2.21) позначає, що сумарний ресурс (витрачений і той, що залишився) дорівнює одиниці незалежно від умов його витрачання. Із загального виразу (2.22) можна отримати частинний вираз, наприклад

$$\int_0^{\infty} \frac{d\tau}{\xi(\varepsilon)} = 1, \quad (2.23)$$

де  $\xi(\varepsilon) = \frac{1}{r(t, \varepsilon)}$ .

Розглянуті вирази відповідають умовам, коли ресурс об'єкта характеризується одновимірною величиною. В загальному випадку ресурс описується набором величин. Тоді використовують принцип «спадковості» [36]. Суть його зводиться до такого. Вважають, що існує набір таких конструктивних параметрів  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , задавши початкові значення  $\omega_0$  яких можна однозначно визначити моменти відмов  $\xi(\omega_0, \varepsilon)$  при заданому режимі.

## 2.8 Моделі дискретних об'єктів

До дискретних відносять: цифрові, імпульсні і деякі релейні системи. На відміну від ДМ неперервного об'єкта, ДМ дискретного повинна відображати не тільки залежність між вихідною і вхідними величинами, але і враховувати положення окремих елементів. Ця особливість

дискретного об'єкта накладає певні обмеження на вибір апарата, необхідного для проведення аналізу дискретних об'єктів. Деякі можливості з'являються при застосуванні теорії кінцевих автоматів [17].

Для того, щоб пояснити, що таке кінцевий автомат, розглянемо, наприклад, функціонування релейного пристрою. Релейний пристрій в момент часу  $t$  знаходиться в положенні  $S(t)$ , отримує сигнал  $x(t)$ , релейний пристрій видає на об'єкт, що захищає, сигнал управління  $y(t)$  і переходить в інше положення  $S(t+1)$ . Це нове положення релейного пристрою ми вже відносимо до моменту часу  $t+1$ , оскільки відбулось переключення якогось реле.

Величини  $x(t)$ ,  $S(t)$ ,  $y(t)$  безумовно мають векторний характер. Вхідний сигнал  $x(t)$  позначає комбінацію сигналів  $x_1, x_2 \dots x_n$ , що надходять по кожному входу в момент часу  $t$ , при цьому кожне  $x_i$  може бути нулем або одиницею;  $y(t)$  — це комбінація вихідних сигналів  $y_1(t) \dots y_m(t)$ , що видаються пристроєм по всіх каналах в момент часу  $t$ , а  $S(t)$  — комбінація положень окремих частин релейного пристрою:  $S_1, \dots, S_f$ .

Значення  $S(t+1)$  і  $y(t)$  визначають законом, за яким функціонує пристрій. Цей закон можна відобразити двома функціями:

$$\left. \begin{aligned} S(t+1) &= \Phi_1[S(t), x(t)]; \\ y(t) &= \Phi_2[S(t), x(t)]. \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

Перше рівняння системи (2.24) називають функцією переходів, а друге — функцією виходів. Якщо задано початковий стан пристрою, то функції переходів і виходів дозволяють однозначно визначити його роботу для будь-якої послідовності сигналів. Наприклад, знаючи  $x(0)$ ,  $S(0)$  можна визначити  $y(0)$  і  $S(1)$ ; знаючи  $S(1)$  і  $x(1)$  —  $y(1)$  і  $S(2)$  і т. п.

Характерною особливістю функцій, що розглядаються, є те, що як множина положень, так і множина вхідних сигналів можуть приймати лише кінцеву кількість значень, а тому ці функції можна задавати у вигляді таблиць.

Завдання множини вхідних сигналів, вихідних сигналів, положення релейного пристрою і його функцій переходів і виходів повністю описують математичну модель релейного пристрою, яка відома під назвою "кінцевий автомат з пам'яттю".

Розглянемо приклади побудови кінцевого автомата для електромеханічного реле (рис. 2.15).

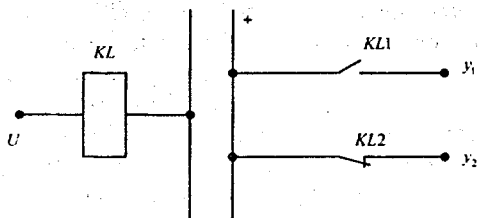


Рисунок 2.15 — Заступна схема релейного пристрою

В даному випадку  $U$  — вхідний сигнал  $U = \{0,1\}$ ;  $S=0$  — якор реле  $KL$  відпущено;  $S=1$  — якор реле  $KL$  підтягнуто;  $y_1 = KL1$  — перший вихід реле,  $KL1 = \{0,1\}$ ;  $y_2 = KL2$  — другий вихід реле,  $KL2 = \{1,0\}$ .

Задамо функцію переходів  $S(t+1) = \Phi_1\{S(t), U(t)\}$  у вигляді табл. 2.4, а виходів — у вигляді табл. 2.5.

Таблиця 2.4 — Таблиця функції переходів

	U	0	1
S		0	1
0		0	1
1		0	1

Таблиця 2.5 — Таблиця функції виходів

		y1		y2	
	U	0	1	0	1
S		0	1	1	0
0		0	1	1	0
1		1	1	0	0

$$y_1 = KL1 = \Phi_2[S(t), U(t)]; \quad y_2 = KL2 = \Phi_2'[S(t), U(t)].$$

Функцію переходів і виходів можна об'єднати в одну таблицю (табл. 2.6), оскільки функції виходів залежать тільки від положення реле.

Таблиця 2.6 — Сумісна таблиця

S \ U	0	1	KL1(y <sub>1</sub> )	KL2(y <sub>2</sub> )
0	[0]	1	0	1
1	0	[1]	1	0

Розглянемо принцип побудови функції переходів і виходів для реле часу (рис. 2.16).

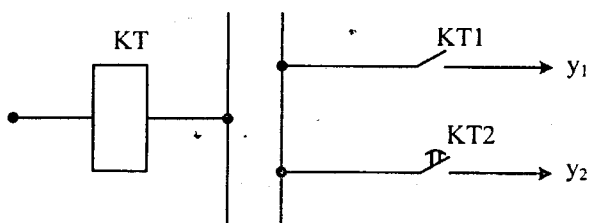


Рисунок 2.16 — Заступна схема реле часу

Для опису реле в даному випадку вводиться більша кількість станів  $S=0$ , коли якір відпущено;  $S=1$ , коли якір реле підтягнуто і замкнено миттєвий контакт;  $S=2$  – реле підтягнуто і замкнено всі контакти. Перехід із стану  $S=1$  в  $S=2$  визначається витримкою часу. Якщо реле має ще і контакт ковзання, то потрібно ще більше станів. Функцію переходів і виходів реле часу відображено у табл. 2.7.

Таблиця 2.7 — Таблиця переходів і виходів реле часу

S \ U	0	1	КТ1	КТ2
0	[0]	1	0	0
1	0	2	1	0
2	0	[2]	1	1

Розглянемо складний релейний пристрій (рис. 2.17). Виділимо в цьому пристрої поряд з входом і виходом ще й входи і виходи окремих реле. Тоді

релейний пристрій можна розбити на дві частини. Першу з них, яка включає в себе обмотки окремих реле, будемо називати “пам’ять”. Входи “пам’яті” це входи відповідних реле, а виходи — виходи цих реле. Друга частина уявляє собою схему, що об’єднує окремі реле в одне ціле; входами до неї є входи релейного пристрою і виходи “пам’яті”, а виходами — виходи релейного пристрою і входи “пам’яті”. Цю частину будемо називати комбінаційною частиною.



Рисунок 2.17 — Структура складного релейного пристрою

Виходячи із наведеної структури роботу релейного пристрою можна описати такою системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} S(t+1) &= \varphi_1[S(t), U(t)]; \\ U(t) &= \varphi_2[x(t), z(t)]; \\ y(t) &= \varphi_3[x(t), z(t)]; \\ z(t) &= \varphi_4[S(t)] \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Систему рівнянь (2.25) можна перетворити в систему рівнянь (2.24).

$$\left. \begin{aligned} S(t+1) &= \varphi_1[S(t), \varphi_2[x(t), z(t)]]; \\ y(t) &= \varphi_3[x(t), \varphi_4[S(t)]] \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

Систему рівнянь (2.25) теж можна задати таблицею, але вона буде занадто складною. Наприклад, якщо кількість входів буде сім  $U(t)=7$  і кількість реле  $n_p=5$  на два положення, то кількість положень входів буде  $2^7=128$ , а положень пристроїв  $2^5=32$ . Таблиця переходів і виходів буде мати  $32 \times 128 = 4096$  клітин. Таку таблицю важко побудувати і ще складніше аналізувати. Тому використовують комбінований метод. Перше і четверте рівняння системи (2.25) задають таблицями. Ці таблиці являють собою сукупність таблиць переходів і виходів окремих реле, які дуже прості, і ми їх уже будували. Друге і третє рівняння системи (2.25) можна

задати у вигляді булевих рівнянь. Дійсно,  $x, y, U, z$  є векторами, компоненти яких можуть приймати значення 0,1. Розпишемо ці рівняння для кожної із компонент

$$U_1(t) = \phi_2^{(1)} [x_1(t) \dots x_n(t); z_1(t) \dots z_k(t)],$$

$$U_p(t) = \phi_2^{(p)} [x_1(t) \dots x_n(t); z_1(t) \dots z_k(t)],$$

$$y_1(t) = \phi_3^{(1)} [x_1(t) \dots x_n(t); z_1(t) \dots z_k(t)],$$

$$y_m(t) = \phi_3^{(m)} [x_1(t) \dots x_n(t); z_1(t) \dots z_k(t)].$$

Відомо, що функції, які мають дві величини [0,1] і у яких аргументи також приймають два значення, можуть бути записані у вигляді формул булевої алгебри. Наприклад, для комбінованої частини релейного пристрою (рис. 2.18) складемо друге рівняння системи (2.25)

$$U_{KL} = \phi_2^{KL} [x(t), z(t)] = \phi_2^{KL} [a, b, \bar{c}, d, \bar{e}, f].$$

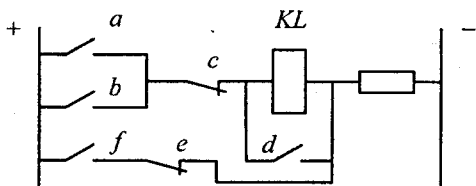


Рисунок 2.18 — Комбінована частина схеми релейного пристрою

Змінна  $U_{KL}(t) = 1$  в тому і тільки в тому випадку, якщо є хоча б одне коло із замкнених контактів від плюса джерела живлення схеми до мінуса і немає жодного кола, що її шунтує.

В загальному випадку може бути  $R_1 \dots R_n$  кіл, які проходять через обмотку реле і  $T_1 \dots T_m$  кіл, що шунтують обмотку реле, кожне із цих кіл може знаходитись в двох положеннях 1 — замкнений і 0 — розімкнений, тоді можна записати таке рівняння

$$U_{KL}(t) = (R_1 V R_2 \dots V R_n) \Lambda (\overline{T_1 V T_2, \dots, V T_m});$$

$$U_{KL}(t) = (1, V 0 \dots V 0) (\overline{0, V 0, \dots, V 0}) = 1 \cdot \bar{0} = 1 \cdot 1 = 1.$$

Для наведеної схеми

$$R_1 = a \cdot \bar{c}; R_2 = b\bar{c}; T_1 = f \bar{e}; T_2 = d.$$

$$U_{KL}(t) = (a\bar{c}Vb\bar{c}) \times \left( \overline{f \cdot eVd} \right) = 1.$$

**Приклад.** На рис. 2.19 зображена принципова схема максимального струмового спрямованого захисту з блокуванням за напругою. Побудувати діагностичну модель.

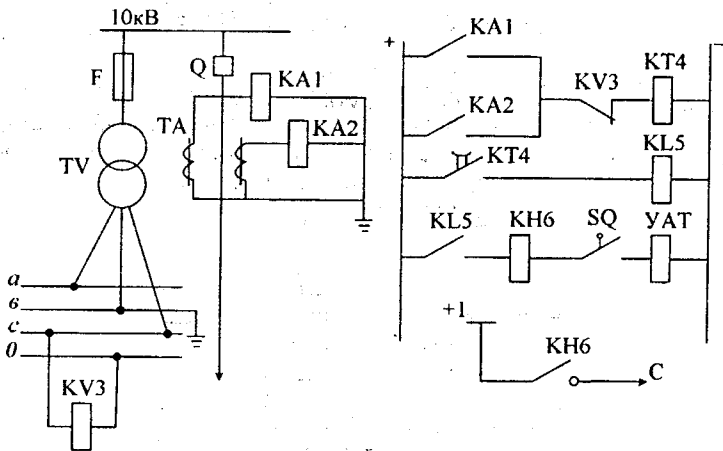


Рисунок 2.19 — Принципова схема максимального струмового спрямованого захисту

Функцію переходів для реле задамо у вигляді таблиць. Для реле KA1, KA2, KV3, KL5, KH6 вони будуть однакові (табл. 2.8), а для реле часу буде мати вигляд табл. 2.9

Таблиця 2.8 – Функція переходів і виходів часу

S \ V	0	1	KA1, KA2, KH6, KL5	KV3
0	0	1	0	1
1	0	1	0	0

Таблиця 2.9 – Таблиця переходів і виходів реле

S \ V	0	1	KT4
0	0	1	0
1	0	2	0
2	0	2	1

Для комбінованої частини релейного захисту запишемо функції виходів:

$$U_{KT4} = KA1 \wedge \overline{KV3} \vee KA2 \wedge \overline{KV3}; \quad U_{KL5} = KT4;$$
$$YAT = KL5 \wedge SQ.$$

## 2.9 Особливості діагностування пристроїв релейного захисту

Як об'єкт діагностування РЗА має вимірювальну і логічну частину, які можна реалізувати за допомогою міні-ЕОМ. Крім цього засоби РЗА облаштовують поблизу електрообладнання, а тому до них можна застосувати два способи перевірки: оперативний (безпосередньо на обладнанні) і в ремонтних підрозділах.

Характер пошкоджень РЗА різноманітний: відмова в дії, хибне спрацювання, зміна чутливості та інше, тому застосовують частинні або повні перевірки. Частинні перевірки здійснюють випробуванням захисту шляхом імітації основних режимів роботи об'єкта захисту (ОЗ). Для цього застосовують спеціальні апарати або програмні імітатори. Така перевірка потребує вимкнення РЗА від ОЗ і дозволяє визначити лише чи є пошкодження у вимірювальній або логічній частині. Вона потребує високого рівня кваліфікації персоналу та значного часу на реалізацію програми перевірки. У випадку повної перевірки перевіряють поелементно як вимірювальну, так і логічну частину за допомогою спеціальних тестових дій, при цьому знаходять і замінюють несправний елемент. Повні перевірки легше автоматизувати і вони потребують менше часу на підготовку.

Основною частиною імітаторів є осцилограми струмів і напруги в різних режимах роботи ОЗ: нормальному, при к.з., перевантаженні, асинхронному режимі тощо. Ці осцилограми записують на магнітну стрічку. Процес перевірки полягає в читанні характеристик з магнітної стрічки і перетворення їх у вхідні сигнали пристроїв РЗА, які попередньо вимикають від ОЗ. Якщо захист знаходиться в роботоздатному стані, то при подачі нормальних сигналів він не спрацює, а при наявності відхилень від режиму спрацює, що є ознакою правильного функціонування.

Відносно діагностичних описів. Існує два способи їх побудови, які можна реалізувати вручну або на ЕОМ.

Послідовність операцій першого методу:

1. Складають логічний опис схеми S;
2. Складають список F несправностей кожного елемента схеми S з несправністю  $f_i$ ; результати заносять до таблиці функцій несправностей. Цей етап повторюють для всіх несправностей і для всіх вхідних наборів;

3. Проводять моделювання (ручне або машинне) схеми  $S$  з несправністю  $f_i$ ; результати заносять до таблиці функцій несправностей. Цей етап повторюють для всіх несправностей і для всіх вхідних наборів;

4. Проводять обробку отриманої таблиці; складають форму  $\sum \pi$ , тобто складають диз'юнкцію номерів наборів, на яких реакція схеми з несправністю  $f_i$  відрізняється від справної;

5. Переходять до форми  $\prod \sum \pi$  тобто складають кон'юнкцію всіх диз'юнкцій, отриманих в п. 4 і виконують алгебраїчне перетворення;

6. З отриманих диз'юнкцій вибирають один вираз, що буде тестом.

Послідовність операцій другого методу:

1. Досліджувану схему  $S$  описують наявною моделлю у вигляді елементів і зв'язків між ними;

2. На  $i$ -му елементі задають пошкодження  $f_i$ , перевіряють, спотворює він сигнал елемента чи проводить його трансляцію на вихід схеми, доступний для спостережень;

3. Одночасно і по тактах до визначають вхідні набори таким чином, щоб створити умови для трансляції  $i$ -го пошкодження на вихід схеми.

Згідно із прийнятими загальними положеннями локальна автоматизована система РЗА складається на першому рівні з зовнішніх засобів автоматизації перевірок, які реалізуються на сучасній мікропроцесорній техніці, а на другому рівні — централізована система збору та обробки діагностичної інформації з пакетом програм і банком даних для забезпечення єдиної методики перевірки РЗА.

Для автоматизованого складання тестів логічної частини використовується пакет програм «АИСТ». В пакетах аналогової частини містяться стандартизовані програмні засоби для імітації режимів, зняття і обробки експериментальних характеристик для основного технологічного обладнання.

Підвищення надійності досягається шляхом використання самоперевірних тестів логічних частин, тобто застосовують паралельно два захисти. Сигнал на вимкнення об'єкта видається тільки тоді, коли спрацює одночасно два захисти (1,1), при сигналі (1,0) або (0,1) вважають, що один із захистів пошкоджений. Відповідальний захист може погрожувались і сигнал на вимкнення видається за правилом.  $S = S_1 S_2 \vee S_2 S_3 \vee S_1 S_3$  де  $S_1, S_2, S_3$  — сигнали відповідного захисту.

## 2.10 Контроль ТС сенсорів та аналогово-цифрових перетворювачів

При контролі давачів можна використати такі методи: мажорунання, порівняння з еталонним давачем, порівняння з заданою межею.

Метод мажорунання полягає в тому, що для вимірювання деякого

параметра використовують додаткові давачі, а результат вимірювання отримують шляхом присвоєння вимірювальному параметру значення за значенням більшості давачів. Наприклад, якщо вимірюється цифрова величина, то рішення приймаються за правилом  $R = XY \vee XZ \vee YZ$ . Мажорунання можна виконати як за рахунок апаратурної реалізації, так і за рахунок запасу часу.

Метод порівняння з еталонним давачем полягає в тому, що виміряне значення параметра порівнюють зі значенням еталонного давача. За результатами порівняння приймають рішення про пошкодження давача. Еталонний давач облаштовують поряд з основним, щоб їх показники не відрізнялись.

Метод порівняння з раніше визначеною межею передбачає перевірку давачів на грубі відхилення. Використовують особливості давача, коли він не видає сигнал або видає сигнал, що в декілька разів перевищує реальний. Для цього методу спочатку розраховують допустимі межі, а потім їх записують в пам'ять ЕОМ. Цей метод реалізується лише програмним шляхом.

Для контролю АЦП використовують мажорунання, або дублювання, а також метод еталонного каналу, які значно розширюють можливості з перевірки не тільки давачів, але і виконуючих пристроїв, а також елементів ЕОМ, безпосередньо пов'язаних з обробкою первинної інформації АЦП і ЦАП.

Перевірці повністю підлягає інформаційний канал, який включає датчик, лінію зв'язку, узгоджувальні пристрої, АЦП. Напрацювання на відмову для давача низьке, а час пошуку великий (до 1,5 год).

Наприклад, сучасна структурна схема діагностування енергоблока може бути подана як [18]

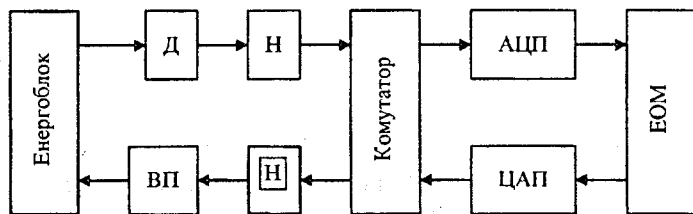


Рисунок 2.20 — Структурна схема діагностування енергоблока  
 Д — давач; Н — нормалізатор; АЦП, ЦАП — аналого-цифровий та цифро-аналоговий перетворювачі; ВП — виконавчий пристрій

В системі керування перспективним є використання ієрархічних структур. На першому рівні такої системи маємо місцеві системи діагностування блока МСД, на другому — центральну систему

діагностування. Ці системи на кожному рівні мають своє завдання, наприклад, на першому рівні – визначення пошкодження, на другому – їх локалізація.

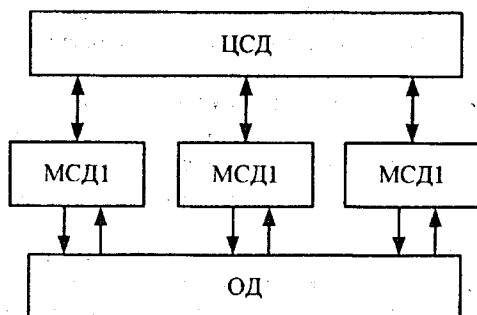


Рисунок 2.21 — Ієрархічна структура системи діагностування

Для вилучення похибок, зумовлених неправильними вимірюваннями датчиків, використовують додаткові датчі та середнє значення при обчисленні

$$y_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.27)$$

де  $x_i$  — виміряне значення  $i$ -го датча;  $n$  — кількість датчів.

Враховуючи те, що покази датчів відрізняються за часом, то використовують таке правило обробки:

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i g_i(t), \quad (2.28)$$

де  $g_i(t)$  — ймовірність відхилення  $i$ -го датча за точністю за час  $[0, t]$ .

Якщо датчі відрізняються за надійністю, що відповідає випадку, коли частина датчів замінена новими, то

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i p_i(t), \quad (2.29)$$

де  $p_i(t)$  — ймовірність безвідмовної роботи датча за час  $[0, t]$ .

## 2.11 Вибір умов роботоздатності об'єкта

Умови роботоздатності об'єкта можна сформулювати на основі аналізу моделі об'єкта діагностування або отримати експериментально при дослідженні реального об'єкта.

Умови роботоздатності можна визначити як обмеження на зміну динамічних, статичних характеристик, сукупності контрольованих показників або у вигляді вимоги виконання заданих функцій згідно з раніше визначеною логікою.

Якщо діагностична модель подана у вигляді диференційного рівняння і шляхом його розв'язання при ненульових початкових умовах визначена залежність контрольованої вихідної величини від вхідної та параметрів системи, то умови роботоздатності можна визначити у вигляді обмежень на зміну динамічної характеристики [14,19].

Наприклад, якщо контрольований параметр один, то діагностичну модель можна подати у вигляді рівняння

$$a_0(t, \lambda) \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_1(t, \lambda) \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n(t, \lambda) = F(x, \lambda),$$

його розв'язання при ненульових початкових умовах

$$x(t, \lambda) = x_0(t) + \sum_{K=1}^{\infty} x_K(t) \lambda^K,$$

де  $a_i(t, \lambda)$  коефіцієнти рівняння, які є неперервними функціями  $t$  і аналітичними функціями комплексного параметра  $\lambda$  (зміна контрольованого параметра);  $F(x, \lambda) = \sum_{K=0}^{\infty} b_K x^t \lambda^K$  — аналітична функція в деякій області параметрів  $x$  і  $\lambda$ .

Якщо як діагностична модель використовується характеристичне рівняння, то умови роботоздатності задають на комплексній площині у вигляді допустимого переміщення нулів та полюсів.

**Приклад.** Нехай передатна функція системи:

$$W(p) = \frac{k_0}{p^2 + 6p + 8 + k_0},$$

де  $k_0$  — контрольований параметр;  $k_0 = 10$ .

Визначити допустимі зміни  $\lambda$  коефіцієнта підсилення  $k = k_0 + \lambda$ , якщо

умови роботоzдатності задані у вигляді допустимого переміщення полюсів як

$$|P_j(0) - P_j(\lambda)| \leq \delta = 0,2; \quad j=1,2,$$

де  $P_j(0)$  — полюс, який характеризує початковий стан об'єкта.

Якщо в початковому стані  $p^2 + 6p + 18 = 0$  є характеристичним рівнянням, то  $p_1(0) = -3 + 3j$ ; а збурене характеристичне рівняння має вигляд

$$p^2 + 6p + [8 + (k_0 + \lambda)] = 0 \quad (2.30)$$

і корені збуреного рівняння (2.30) можна записати у вигляді

$$P_j(\lambda) = P_{j0} + P_{j1}\lambda + P_{j2}\lambda^2 + \dots \quad (2.31)$$

Обмежимося двома членами рівняння (2.31), оскільки  $\lambda$  має малу величину. Тоді після підстановки значення цього кореня в рівняння (2.30) маємо

$$(P_{j0} + P_{j1}\lambda + \dots)^2 + 6(P_{j0} + P_{j1}\lambda + \dots) + 18 + \lambda = 0,$$

$$P_{j0}^2 + 2P_{j0} \cdot P_{j1}\lambda + \dots + 6P_{j0} + P_{j1} \cdot \lambda + 18 + \lambda = 0;$$

або

$$\lambda(2P_{j0} \cdot P_{j1} + 6P_{j1} + 1) + P_{j0}^2 + 6P_{j0} + 18 = 0.$$

Прирівняємо коефіцієнти при змінних в правій і лівій частині, тоді

$$2P_{j0} \cdot P_{j1} + 6P_{j1} + 1 = 0,$$

звідки

$$P_{j1} = -\frac{1}{2P_{j0} + 6} = -\frac{1}{2(-3 + 3j) + 6} = -\frac{1}{6j} = \frac{1}{6}j,$$

тоді

$$|P_1(0) - P_{1\lambda}| = \left| -3 + 3j - (-3 + 3j) + \frac{1}{6}j\lambda \right| = 0,2,$$

$$\lambda = \left| \frac{0,2}{0,16} \right| = 1,25.$$

Розглянемо методику вибору умов роботоздатності об'єкта, якщо контрольованих параметрів декілька. Нехай характеристичне рівняння об'єкта має вигляд

$$f(x_0 \cdot \lambda_0, \lambda_1 \dots \lambda_{n-1}) = x^n + a_{n-1}(\lambda_{n-1}) \cdot x^{n-1} + \dots a_0(\lambda_0) = 0.$$

Розв'язання цього рівняння можна записати наближено так

$$x(\lambda_0, \lambda_1 \dots \lambda_{n-1}) = x(0, 0 \dots 0) + \sum_{j=0}^{n-1} \frac{\partial x}{\partial \lambda_j} \cdot \lambda_j.$$

Умови роботоздатності в області контрольованих параметрів  $\lambda_j$  можна визначити із виразу

$$\left| \sum \frac{\partial x(0 \cdot 00 \dots 0)}{\partial \lambda_j} \cdot \lambda_j \right| < \delta.$$

Отже, умови роботоздатності об'єкта, коли контрольованих параметрів декілька, можна розглядати як вимогу невиходу за межі  $n$ -вимірного багатокутника, тобто

$$|a_0 \cdot \lambda_0 + a_1 \cdot \lambda_1 + \dots a_{n-1} \cdot \lambda_{n-1}| < \delta.$$

**Приклад.** Модель об'єкта подана характеристичним рівнянням

$$p^2 + (a_1 + a)p + (b_1 + b) = 0.$$

Під дією зовнішніх факторів можуть змінюватись параметри  $a_1, b_1$ ; відомі параметри  $a=4; b=6$  та початкові значення змінних параметрів  $a_1=3; b_1=4$ ; тоді в початковому стані характеристичне рівняння має вигляд

$$p^2 + 7p + 10 = 0.$$

Корені характеристичного рівняння

$$p_{01} = -2; p_{02} = -5.$$

Умови роботоздатності задано на комплексній площині як

$|p_1 - p_{01}| \leq \delta \leq 1$ . Визначити умови роботоzдатності в області параметрів  $a_1, v_1$ , тобто допустиму зміну цих параметрів  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ .

Запишемо збурене рівняння  $p^2 + (7 + \lambda_1) \cdot p + (10 + \lambda_2) = f$  і визначимо нові величини коренів.

Виконуємо диференціювання:

$$\frac{\partial f}{\partial \lambda_1} = p; \quad \frac{\partial f}{\partial \lambda_2} = 1; \quad \frac{\partial f}{\partial p} = 2p + 7 + \lambda_1.$$

Для визначення коефіцієнтів при змінних, коли  $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0$ , початкові величини

$$\frac{\partial p_1}{\partial \lambda_1}(p_{01,0,0}) = -\frac{\partial f / \partial \lambda_1}{\partial f / \partial p}(p_{01,0,0}) = -\frac{-2}{-4 + 7} = 0,67;$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial \lambda_2}(p_{01,0,0}) = -\frac{\partial f / \partial \lambda_2}{\partial f / \partial p}(p_{01,0,0}) = -\frac{1}{3} = -0,33;$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial \lambda_1}(p_{02,0,0}) = -\frac{\partial f / \partial \lambda_1}{\partial f / \partial p}(p_{02,0,0}) = -\frac{-5}{-10 + 7} = -1,67;$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial \lambda_2}(p_{02,0,0}) = -\frac{\partial f / \partial \lambda_2}{\partial f / \partial p}(p_{02,0,0}) = \frac{1}{3} = 0,33.$$

Таким чином:  $p_1(\lambda_1, \lambda_2) = -2 + 0,67\lambda_1 - 0,33\lambda_2$ ;

$p_2(\lambda_1, \lambda_2) = -5 - 1,67\lambda_1 + 0,33\lambda_2$ .

Умови роботоzдатності на комплексній площині мають вигляд  $|p_1 - p_{01}| \leq 1$ , тому  $|0,67\lambda_1 - 0,33\lambda_2| \leq 1$  і якщо вважати, що  $\lambda_1 = 0,2$ , то  $3,1 \leq \lambda_2$ .

В тому випадку, коли діагностична модель задана у вигляді невизначеної матриці вузлових провідностей, то визначають функції передачі між вибраним входом та виходом і їх досліджують. Наприклад, якщо відома  $T_{12,34}$ , то  $U_{34} = T_{12,34} \cdot U_{12}$ , оскільки  $T_{12,34}$  є функцією параметрів, для яких задано допустимі зміни  $\lambda_1 \dots \lambda_2$ , то визначають допустимі зміни  $U_{34}$ .

Аналогічно визначають роботоzдатність при використанні діаграми проходження сигналу.

## 2.12 Вибір сукупності показників для оцінки роботоздатності об'єкта

Якщо умови роботоздатності задані в формі обмежень на переміщення полюсів і нулів передавальної функції, можна упорядкувати показники, які характеризують стан об'єкта за ступенем їх впливу на положення полюсів та нулів на комплексній площині.

Розглянемо процедуру вибору контрольованих показників для об'єкта, діагностична модель якого подана характеристичним рівнянням [14, 20]

$$F(x, \bar{\lambda}) = x^n + a_{n-1}(\lambda_{n-1}) \cdot x^{n-1} + \dots + a_1(\lambda_1)x + a_0(\lambda_0) = 0, \quad (2.32)$$

де  $\lambda = (\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1})$  —  $n$ -вимірний вектор показників.

Для упорядкування показників можна використати вектор відносних чутливостей  $T_{\lambda p} = (t_{1p}, t_{2p}, \dots, t_{np})$ . Його компоненти для простих векторів визначаються як [14]

$$t_{kp} = \left| \frac{1}{R_0 x_k^0} \cdot \frac{\partial F / \partial \lambda_p}{\partial F / \partial x_k} \cdot (x_k^0, \lambda_0) \right| \quad (k = 1 \dots n). \quad (2.33)$$

Упорядкування показників здійснюється за формулою норми векторів

$$\|T_{\lambda p}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2}. \quad (2.34)$$

При цьому вважається, що  $\lambda_p \geq \lambda_m$ , якщо  $T_{\lambda p} \geq T_{\lambda m}$ .

Здійснивши повне упорядкування показників можна вибрати сукупність контрольованих показників.

При оцінці роботоздатності об'єкта за його характеристиками або параметрами для вибору сукупності контрольованих показників можуть бути використані значення їх чутливостей до змін, які відбуваються в стані виробу.

**Приклад.** Діагностична модель об'єкта подана характеристичним рівнянням

$$F(x, \bar{\lambda}) = x^3 + a_2(\lambda_2) \cdot x^2 + a_1(\lambda_1)x + a_0(\lambda_0) = 0, \quad (2.35)$$

$\bar{\lambda} = (\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2)$  — вектор контрольованих показників:

$$a_0(\lambda_0) = 0,4 + \lambda_0; \quad a_1(\lambda_1) = 1,7 + \lambda_1; \quad a_2(\lambda_2) = 2,3 + \lambda_2.$$

Необхідно упорядкувати показники.

Розв'язання. Підставивши коефіцієнти в рівняння (2.35) отримаємо

$$x^3 + (2,3 + \lambda_2) \cdot x^2 + (1,7 + \lambda_1) \cdot x + 0,4 + \lambda_0 = 0.$$

В стані рівноваги  $\bar{\lambda} = (0,0,0)$  і корені характеристичного рівняння мають такі величини

$$x_1 = -0,5; \quad x_2 = -0,8; \quad x_3 = -1.$$

Оскільки корені прості, то вектор відносних чутливостей  $\bar{T}_{1p} = (\bar{t}_{0p}, \bar{t}_{1p}, \bar{t}_{2p})$  можна визначити за рівняннями:

$$\bar{t}_{01} = \left| \frac{1}{\text{Re} \cdot x_1^0} \cdot \frac{\partial F / \partial \lambda_0 \cdot (x_1, \lambda_0)}{\partial F / \partial x \cdot (x_1, \lambda_0)} \right| = \frac{1}{0,5 \cdot 4,75} = 0,42;$$

$$x_1 = -0,5; \partial F / \partial \lambda_0 = 1; (\partial F / \partial x)(x_1, \lambda_0) = 3x_1^2 + 4,6x_1 + 1,7 = 4,75;$$

$$\bar{t}_{11} = \left| \frac{1}{\text{Re} \cdot x_1^0} \cdot \frac{\partial F / \partial \lambda_1 \cdot (x_1, \lambda_1)}{\partial F / \partial x \cdot (x_1, \lambda_1)} \right| = \frac{0,5}{0,5 \cdot 4,75} = 0,21;$$

$$|x_1| = 0,5; \partial F / \partial \lambda_1 = 0,5; (\partial F / \partial x)(x_1, \lambda_1) = 4,75;$$

$$\bar{t}_{21} = \left| \frac{1}{\text{Re} \cdot x_1^0} \cdot \frac{\partial F / \partial \lambda_2 \cdot (x_1, \lambda_2)}{\partial F / \partial x \cdot (x_1, \lambda_2)} \right| = \frac{0,25}{0,5 \cdot 4,75} = 0,1;$$

оскільки  $\partial F / \partial \lambda_2 = x_1^2 = 0,25$ .

Аналогічно:

$$t_{02} = \frac{1}{0,8 \cdot 7,3} = 0,17; \quad t_{12} = \frac{0,8}{0,8 \cdot 7,3} = 0,14; \quad t_{22} = \frac{0,64}{0,8 \cdot 7,3} = 0,11; \quad t_{03} = 0,11;$$

$$t_{13} = 0,11; \quad t_{23} = 0,11.$$

Розрахуємо норму векторів відносних чутливостей:

$$T\lambda_0 = \sqrt{0,42^2 + 0,17^2 + 0,11^2} = 0,47; \quad T\lambda_1 = \sqrt{0,21^2 + 0,14^2 + 0,11^2} = 0,28;$$

$T\lambda_2 = \sqrt{0,11^2 + 0,11^2 + 0,11^2} = 0,18$ . Показники розташовуються в порядку  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ .

## 2.13 Інформаційна оцінка вибраної сукупності контрольованих показників

В загальному вигляді інформація визначається як відомості про фізичну систему, яка може бути об'єктом передачі, перетворення або пам'яті сигналу. Перед початком діагностування існує повна невизначеність про технічний стан об'єкта. Перевірка кожного показника зменшує ступінь невизначеності і дає певну інформацію про стан об'єкта. Оцінивши об'єм інформації, яку дає кожний показник, можна визначити ймовірність  $P(v)$  правильної оцінки дійсного стану об'єкта, яка досягається при здійсненні вибраної категорії перевірок. При визначенні  $P(v)$  враховують два фактори: вагу кожного показника в оцінці ТС (надають найбільшу вагу тому показнику, який найсуттєвіше впливає на роботоздатність об'єкта або навпаки, який є найбільш чутливим до змін, що відбуваються в об'єкті); технічну реалізацію об'єкта, тобто тип елементів, із яких складається об'єкт, та спосіб їх з'єднання. В останньому випадку кожен об'єкт може характеризуватись ймовірністю безвідмовної роботи  $P_i$  елементів вузлів, що визначають формування показників. Ймовірність можна визначити як [14]

$$P(v) = \frac{\sum_{i=1}^m k_i S_i z_i}{\sum_{i=1}^n k_i S_i z_i}, \quad (2.36)$$

де  $m, n$  — відповідно, кількість контрольованих показників та загальна кількість показників, які характеризують роботоздатність об'єкта;

$k_i = \frac{1}{P_i}$  — коефіцієнт, який враховує безвідмовність при технічній

реалізації  $i$ -го показника;

$S_i$  — чутливість  $i$ -го показника;

$z$  — індекс  $i$ -го показника.

Знаючи  $P(v)$  можна визначити міру невизначеності  $H(\alpha)$  стану об'єкта, яка залишається при контролі обмеженої сукупності показників, що характеризують технічний стан. Можна також визначити інформацію  $I(\alpha_i, \alpha)$  про дійсний стан об'єкта, яку ми отримуємо при здійсненні перевірки або сукупності перевірок та розрахувати її як середнє значення випадкової величини. Наприклад, перед початком оцінювання роботоздатності об'єкт характеризується невизначеністю (ентропією)

$$H = -\sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i = \log_2 n,$$

де  $n$  — загальна кількість показників, що визначають технічний стан об'єкта.

Використання  $m$  показників несе інформацію

$$I(m) = H - H(m),$$

де  $H(m) = P(v) \cdot \log_2 P(v) + (1 - P(v)) \cdot \log_2 (1 - P(v))$  — умовна ентропія після здійснення перевірки.

Рекомендується використовувати таку сукупність показників, яка має  $P(v) > 0,5$ .

**Приклад.** Діагностична модель об'єкта подана передатною функцією вигляду, типу

$$W(g) = \frac{10}{[0.01(g+2+9.8j)(g+2-9.8j)(g+5)(g+9)]},$$

де корені характеристичного рівняння:

$$g_1 = -2 - 9.8j; g_2 = -2 + 9.8j; g_3 = -5; g_4 = -9; (i = 1, 2, 3, 4).$$

Потрібно вибрати сукупність контрольованих показників для оцінювання роботоздатності об'єкта. Визначимо відносну чутливість передатної функції до коренів  $g_i$  характеристичного рівняння за формулою

$$S(g_i) = \frac{\partial \ln W}{\partial \ln g_i} = |S(g_i)| e^{j\phi_i}.$$

Підставивши величини коренів, отримаємо:

$$|S(g_1)| = 1.11; |S(g_2)| = 0.915; |S(g_3)| = 0.98; |S(g_4)| = 0.249.$$

Визначимо ймовірність правильної оцінки стану об'єкта при контролюванні положення кожного кореня  $g_i$ :

$$P(g_i) = \frac{Sg_i}{\sum_{i=1}^4 Sg_i}; P(g_1) = 0.278; P(g_2) = 0.228; P(g_3) = 0.245; P(g_4) = 0.249.$$

Розрахуємо невизначеність  $H$  та кількість інформації, яку можна отримати у випадку контролю положення кожного  $g_i$

$$I(g_1, g) = \log_2 n - \left[ P(g_1) \log P(g_1) + (1 - P(g_1)) \log_2 (1 - P(g_1)) \right] = 0.585.$$

Аналогічно:

$$I(g_2, g) = 0.510; I(g_3, g) = 0.5; I(g_4, g) = 0.49.$$

Відкинемо два найменш інформативні корені й спростимо діагностичну модель завдяки зниженню степеня характеристичного рівняння, тобто

$$W'(g) = \frac{k}{0,01_2(g-g_1)(g-g_2)} = \frac{k}{T^2 g^2 + 2\xi Tg + 1};$$

де  $T = 0,1$ ;

$\xi = 0,2$ ;

$k = 10$ .

Знайдемо втрату інформації за рахунок відсутності контролю положення коренів  $g_3$  і  $g_4$ .

$$P(g_{34}) = P(g_3) + P(g_4) = 0.494;$$

$$I(g_3, g_4) = P(g_{34}) \cdot \log_2 P(g_{34}) + (1 - P(g_{34})) \cdot \log_2 (1 - P(g_{34})) = 0.505.$$

Визначимо чутливість коренів  $g_i$  спрощеної моделі об'єкта до зміни параметрів, які передбачаються до контролю:  $d(p) = k; T; \xi$

$$t_{kg} = \left| \frac{1}{R_{e g_k^{(0)}}} \frac{\partial W / \partial \alpha_p}{\partial W / \partial g_k} \left( g_k^{(0)}, d_{(p)}^{(0)} \right) \right|,$$

$$t_{kg1} = t_{kg2} = 0.76; t_{Tg1} = t_{Tg2} = 165.8; t_{\xi g1} = t_{\xi g2} = 5.01.$$

Якщо відома ймовірність відмови, що враховує технічну реалізацію об'єкта:  $p_k = 0.99$ ;  $p_T = 0.95$ ;  $p_\xi = 0.9$ , то величини коефіцієнтів із (2.36)

$$k_k = 1/0,99 = 1,01; k_T = 1/0,95 = 1,05; k_\xi = 1/0,9 = 1,11.$$

Знайдемо величини ймовірностей правильної оцінки роботоздатності об'єкта при контролі кожного показника, при цьому як  $S_i$  будемо підставляти величини норми векторів  $T(t_{kg_1}, t_{kg_2})$ , тоді отримаємо:

$$P(k) = 0,761/180,823 = 0,0042; P(T) = 174,589/180,923 = 0,965; P(\xi) = 5,567/180,023 = 0,0308.$$

Оскільки  $P(k)$  і  $P(\xi)$  менше 0,5, то для оцінювання стану об'єкта необхідно використовувати не один показник, а їх сукупність.

## 3 ВИЗНАЧЕННЯ НЕСПРАВНОГО ЕЛЕМЕНТА В ОБ'ЄКТІ

### 3.1 Формування процедури і програми пошуку дефекту

Формування методу пошуку залежить від прийнятих обмежень відносно вхідних даних пошуку і вибору критерію оптимізації пошуку.

При визначенні вхідних даних вважається, що для досліджуваного об'єкта задано закон розподілу відмов його елементів та параметри розподілу випадкових величин; відомі контрольовані параметри і форми прояву відмов, відмова одного із елементів викликає втрату робоздатності об'єкта, що діагностується, відомі економічні характеристики об'єкта, які супроводжують пошук, відомі методи контролю параметрів, які можуть застосовуватись при пошуку.

При формуванні процедури пошуку застосовують економічні та інформаційні критерії, наприклад: вартість перевірки, час пошуку, недовідпуск електроенергії, кількість елементів, технічний стан яких одночасно контролюється, та інші [13, 21].

На наступному етапі здійснюють розбиття об'єкта на функціональні блоки, тракти, канали, тобто визначають глибину пошуку і функціональну вагу окремих елементів. Для визначення функціональної ваги необхідно виконати аналіз діагностичної моделі блоків, каналів і оцінити характер та ступінь впливу їх на робоздатність об'єкта. Вибір методики для отримання вагових характеристик залежить від вибору способу оцінки контрольованих елементів і від характеру потоку відмов. В більшості випадків потік вважають ординарним. При визначенні вагових характеристик використовують два методи: контроль динамічних або статичних характеристик. Контроль динамічних характеристик завжди має перевагу, але потребує додаткових капітальних витрат, а іноді просто не можна його здійснити. За допомогою статичних характеристик можна визначити коефіцієнти перетворення складових системи.

Програми пошуку дефекту можуть бути детермінованими або стохастичними. Методи побудови детермінованих програм пошуку ґрунтуються на використанні вагових співвідношень між контрольованими параметрами. Стохастичні програми пошуку ґрунтуються на використанні імовірнісних характеристик об'єкта. Можливі і комбіновані програми.

Незважаючи на структурні і конструктивні відмінності існуючих об'єктів, можна сформулювати загальний принцип побудови програм пошуку. Перш за все пошук дефекту потрібно подати як послідовність операцій для визначення несправностей системи, несправного каналу, тракту, блока і елемента. Це дозволяє наблизити систему діагностування до систем з високою організацією, які використовують при пошуку перехід від загальних категорій до частинних на основі результатів, отриманих на проміжних етапах пошуку. Система діагностування, побудована з

урахуванням даного принципу, виключає надлишковість в оберненні і скорочує час, необхідний на перевірку.

В загальному випадку задача пошуку полягає у виділенні з множини можливих програм програми  $U^* \in U$ , яка визначає перехід із множини початкових станів  $S_0 \in \bar{S}_0$  до множини кінцевих станів  $S_{\text{кінц}} \in \bar{S}_{\text{кінц}}$  (елементів, параметрів) так, що критерій  $f(U)$  перетворюється на  $\max$  ( $\min$ ). Стан системи, що діагностується, визначається вектором  $V(V_1, V_2, \dots, V_n)$ , фазовими змінними якого в момент пошуку є контрольовані параметри. На кожному кроці  $n$  - етапного пошуку вибраний розв'язок розглядає новий стан системи, що характеризується вектором  $V \leq g(V, U)$ . Такий перехід супроводжується приростом критерію  $f(V, U)$ , який залежить як від попереднього стану  $S$ , так і від прийнятого розв'язку.

Кінцевою метою алгоритмізації пошуку є максимізація повного приросту критерію (за  $n$  етапів розв'язання, які приймаються)  $F_N(V)$ , який залежить від початкового стану  $V$  і кількості кроків пошуку. Використовуючи принцип оптимальності, можна прийти до основного співвідношення детермінованої програми пошуку

$$F_N(V) = \max_U \{f(V, U) + F_{N-1}(g(V, U))\}, \quad U = \overline{1, N}. \quad (3.1)$$

При використанні одночасно  $g$  показників якості, оптимізація пошуку здійснюється шляхом визначення максимального значення  $\max F_{Nj} \in \bar{F}_N$ , при цьому

$$F_{Nj}(V) = \max_U \{f_j(V, U) + F_{N-1}(g_j(V, U))\}. \quad (3.2)$$

На відміну від критерію, який визначає вибір послідовності пошуку при оптимізації детермінованих програм пошуку, в стохастичних програмах пошуку оцінка послідовності перевірки елементів, що перевіряються, буде виконуватись знаходженням максимальних величин математичного сподівання критерію пошуку

$$F_N(S_N) = \max_{U_n} \left\{ \sum_{j=1}^N [f_N(V_{N-1}, U_{N-1}) + F_{N-1}(V_{N-1})] p_i \right\}, \quad (3.3)$$

де  $p_i$  — ймовірність можливих дискретних станів (ймовірність відмови

елемента).

В найпростішому випадку при стохастичній програмі схема алгоритмізації зводиться до вибору послідовності перевірок по елементах в порядку зменшення ймовірностей їх відмов. Можна використати і комбінацію ймовірностей відмов з часом пошуку або іншими показниками.

В практичних випадках широко застосовують програми, які будуються на висновку, що сигнал на виході будь-якого елемента системи залежить від справності самого елемента і від справності елементів, які передують тому, що перевіряється. В цьому випадку кожна з перевірок розбиває систему на дві незалежних одна від одної підмножини. Послідовне розбиття системи перевірками призводить до детермінованого розвитку послідовності пошуку. При рівноймовірній схемі відмов, оптимальним є послідовне половинне розбиття системи на складові. Ймовірний розподіл рішення на кожному кроці при такій стратегії пошуку залишається постійним і дорівнює 0,5:0,5.

### 3.2 Алгоритм пошуку несправностей за параметрами надійності

Надійність технічних об'єктів характеризує їх безвідмовність і ремонтпридатність (*serviceability*). Якщо об'єкт поділено на окремі елементи з урахуванням глибини пошуку, то для визначення послідовності перевірки окремих елементів за параметрами, які характеризують надійність, можна використати три простих принципи [16, 22]:

- 1) за величиною ймовірності відмови (безвідмовної роботи)  $g$ ;
- 2) за величиною часу  $t$ , необхідного на перевірку елемента;
- 3) за відношенням  $t/g$ .

Для побудови алгоритмів в цих випадках необхідно визначити компоненти множини  $\{g_i\}$  або  $\{t_i/g_i\}$  і повністю їх впорядкувати.

В тому випадку, коли час, що витрачається на перевірку елемента, однаковий ( $t_1 = t_2 = \dots = t_n = \text{const}$ ), використовують такий алгоритм:

- 1) всі елементи об'єкта розташовують в порядку зменшення  $g_i$ ;
- 2) два елементи, які мають найменшу величину  $g_i$ , об'єднують в один елемент,  $g = g_n + g_{n-1}$ ;
- 3) новий елемент за величиною  $g$  вставляють в існуючий ряд елементів;
- 4) процес повторюють до тих пір, поки всі елементи не об'єднаються в один.

**Приклад.** Об'єкт складається з десяти елементів. Задано ймовірність відмови кожного з елементів:  $g_1 = 0,01$ ;  $g_2 = 0,15$ ;  $g_3 = 0,1$ ;  $g_4 = 0,01$ ;  $g_5 = 0,05$ ;  $g_6 = 0,1$ ;  $g_7 = 0,25$ ;  $g_8 = 0,15$ ;  $g_9 = 0,12$ ;  $g_{10} = 0,06$ . Відомо також час, необхідний на перевірку, в годинах:  $t_1 = 0,1$ ;  $t_2 = 1,5$ ;  $t_3 = 0,5$ ;

$t_4 = 0,1$ ;  $t_5 = 0,3$ ;  $t_6 = 0,5$ ;  $t_7 = 2$ ;  $t_8 = 1,5$ ;  $t_9 = 1$ ;  $t_{10} = 0,2$ . Визначити послідовність перевірок елементів.

Розв'язання. Визначимо множину  $\{t_i / g_i\}$  і впорядкуємо її, починаючи з елемента, який має найменше відношення  $t_i / g_i$ :  $t_1 / g_1 = 10$ ;  $t_2 / g_2 = 10$ ;  $t_3 / g_3 = 5$ ;  $t_4 / g_4 = 10$ ;  $t_5 / g_5 = 6$ ;  $t_6 / g_6 = 5$ ;  $t_7 / g_7 = 8$ ;  $t_8 / g_8 = 10$ ;  $t_9 / g_9 = 8,3$ ;  $t_{10} / g_{10} = 3,3$ .

Послідовність перевірок буде такою:  $\pi_{10}$ ,  $\pi_3$ ,  $\pi_6$ ,  $\pi_5$ ,  $\pi_7$ ,  $\pi_9$ ,  $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ,  $\pi_4$ ,  $\pi_8$ . Розглянемо для даного прикладу випадок, коли час перевірки елементів однаковий. Послідовність розв'язання задачі показано на рис. 3.1.

Спочатку всі  $n$  елементів розташовуємо в ряд в порядку зменшення величини  $g_i$ ; два елементи, що мають найменшу величину  $g_i$  об'єднують в один елемент і  $g = g_n + g_{n-1}$ . Новий елемент за величиною  $g$  вставляють в існуючий ряд елементів. Процес повторюють до тих пір, поки всі елементи не об'єднують в один. Вибирають перевірки в порядку зменшення  $g$ .

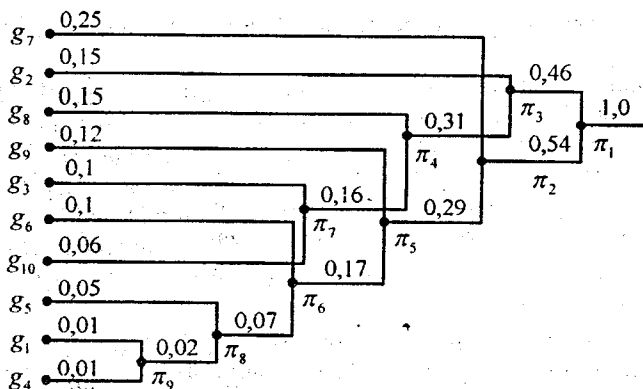


Рисунок 3.1 — Алгоритм пошуку несправностей

### 3.3 Інформаційний алгоритм пошуку пошкоджень

В деяких випадках існують технічні об'єкти, які можна поділити на декілька взаємопов'язаних частин, кожна з яких має своє самостійне значення. В цьому випадку як діагностична може використовуватись так звана функціональна модель [14].

Функціональна модель є графічним зображенням об'єкта, в якому кожна виділена частина (функціональний елемент) позначається прямокутником  $a_i$  з декількома входами  $x_j$  і одним виходом  $u_k$ , показаними стрілками (рис. 3.2). Кількість входів відповідає кількості

зовнішніх дій, які необхідно подати, щоб отримати реакцію на виході елемента. Зв'язки між елементами показані лініями зі стрілками, які позначають напрямок проходження сигналу. Стан елемента оцінюється 1, коли при поданні всіх допустимих входів на виході елемента виникає допустима реакція. Якщо реакція виявиться недопустимою, то його стан оцінюється як 0. Якщо хоча б на один із входів подана недопустима дія, то вихідна реакція елемента також повинна бути недопустимою.

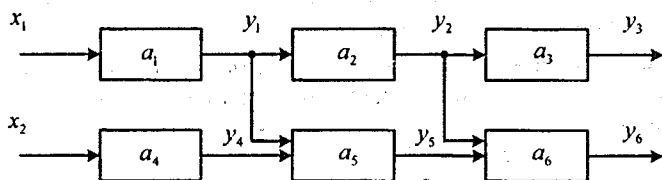


Рисунок 3.2 — Функціональна модель

Користуючись функціональною моделлю, можна задати всю множину можливих станів виробу. Потужність множини станів  $\{S_i\}$  визначається кількістю можливих станів функціональних елементів моделі. Кожну компоненту множини подають  $n$ -вимірним вектором, де  $n$  — кількість функціональних елементів моделі. В більшості випадків вважають, що одночасно може відмовити тільки один елемент. Елементу, що відмовив, у векторі станів відповідає 0. Наприклад, для функціональної моделі, поданої на рис. 3.2, якщо відмовив перший елемент, то  $S_1(011111)$ .

Якщо вважати перевірку реакцією одного із функціональних елементів при подачі на модель всіх допустимих дій, то можна побудувати таблицю станів об'єкта. В табл. 3.1 кількість рядків буде відповідати кількості станів об'єкта  $S_i$ , а кількість стовпців — кількості перевірок  $\pi_j$ .

Таблиця 3.1 — Таблиця станів об'єкта діагностування (рис. 3.2)

$\pi_j$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_6$
$S_i$						
$S_0(111111)$	1	1	1	1	1	1
$S_1(011111)$	0	0	0	1	0	0
$S_2(101111)$	1	0	0	1	1	0
$S_3(110111)$	1	1	0	1	1	1
$S_4(111011)$	1	1	1	0	0	0
$S_5(111101)$	1	1	1	1	0	0
$S_6(111110)$	1	1	1	1	1	0

Функціональна модель і побудована на її основі таблиця станів дозволяє для розв'язання діагностичних задач використовувати формальний апарат для визначення оптимальної кількості необхідних перевірок.

Інформаційний алгоритм пошуку виниклого пошкодження базується на інформаційній оцінці процесу діагностування. Одним із таких алгоритмів є алгоритм, який базується на аналізі таблиці станів. В таблиці стовпці відповідають всім можливим станам, а рядки — всім можливим перевіркам. Кожна перевірка має два результати  $A = \{0;1\}$  та вважається, що всі стани утворюють групу подій, які мають однакову ймовірність. В процесі пошуку об'єкт не переходить з одного стану в інший.

В цьому випадку перед початком пошуку об'єкт буде характеризуватись ентропією [14]

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i = \log_2 n, \quad (3.4)$$

де  $n$  — кількість станів;

$p_i$  — ймовірність  $i$ -го стану.

Кожна перевірка  $\pi_k$  несе певну інформацію про стан об'єкта

$$I(\pi_k) = H - H(\pi_k), \quad (3.5)$$

де  $H(\pi_k)$  — середня умовна ентропія стану об'єкта при умові виконання перевірки  $\pi_k$ .

$$H(\pi_k) = p_1(\pi_k) \cdot H_1(\pi_k) + p_2(\pi_k) \cdot H_2(\pi_k), \quad (3.6)$$

де  $H_1(\pi_k), H_2(\pi_k)$  — ентропії станів об'єкта після проведення перевірки  $\pi_k$ , відповідно, при результаті  $\pi_k = 1$  і  $\pi_k = 0$ ;

$p_1(\pi_k), p_2(\pi_k)$  — ймовірність отримання результату  $\pi_k = 1, \pi_k = 0$ ;

$$p_1(\pi_k) = 1/n; \quad p_2(\pi_k) = \frac{n-1}{n};$$

$l$  — кількість одиниць в  $k$ -ому стовпці таблиці станів;

$n-l$  — кількість нулів в  $k$ -ому стовпці таблиці станів. Тоді в загальному вигляді:

$$H(\pi_k) = \frac{1}{n} \log_2 l + \frac{n-1}{n} \log_2 (n-1); \quad (3.7)$$

$$I(\pi_k) = \log_2 n - \left[ \frac{1}{n} \log_2 1 + \frac{n-1}{n} \log_2 (n-1) \right]. \quad (3.8)$$

Пошук починають з перевірки, якій відповідає найбільша величина  $I(\pi_k)$ . Далі на кожному наступному кроці здійснюють перевірки, яким відповідає найбільша величина умовної інформації відносно стану, що визначається ентропією

$$I(\pi_i / \pi_k) = H(\pi_k) - H(\pi_i / \pi_k). \quad (3.9)$$

При цьому умовна ентропія

$$H(\pi_i / \pi_k) = p(\pi_i / \pi_k) \cdot H(\pi_i / \pi_k) + p(\bar{\pi}_i / \pi_k) \cdot H(\bar{\pi}_i / \pi_k) + p(\pi_i / \bar{\pi}_k) \cdot H(\pi_i / \bar{\pi}_k) + p(\bar{\pi}_i / \bar{\pi}_k) \cdot H(\bar{\pi}_i / \bar{\pi}_k). \quad (3.10)$$

Величини ймовірностей визначають відповідно:

$$p(\pi_i / \pi_k) = \frac{l_1}{n}; \quad p(\bar{\pi}_i / \pi_k) = (1 - l_1) / n; \quad (3.11)$$

$$p(\pi_i / \bar{\pi}_k) = l_2 / n; \quad p(\bar{\pi}_i / \bar{\pi}_k) = (n - 1 - l_2) / n; \quad (3.12)$$

$$H(\pi_i / \pi_k) = \frac{l_1}{n} \log_2 l_1 + \frac{1-l_1}{n} \log_2 (1-l_1) + \frac{l_2}{n} \log_2 l_2 + \frac{n-1-l_2}{n} \log_2 (n-1-l_2), \quad (3.13)$$

де  $l_1$  — кількість одиниць в  $i$ -ому рядку на одиниці в  $k$ -ому рядку таблиці станів;

$l_2$  — відповідно, кількість одиниць в  $i$ -ому рядку на нулі в  $k$ -ому рядку таблиці станів.

Пошук закінчують, коли величина умовної ентропії буде дорівнювати нулю. Кінцевим результатом є безумовний алгоритм перевірки, тобто послідовність перевірок.

**Приклад.** Об'єкт задано функціональною моделлю (рис. 3.3) і таблицею станів (табл. 3.2). Визначити інформаційну послідовність перевірок.

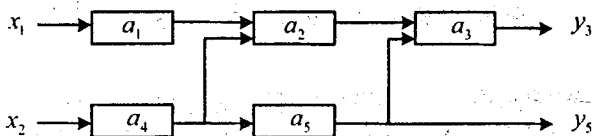


Рисунок 3.3 — Функціональна модель

Таблиця 3.2 — Таблиця станів об'єкта діагностування

$\pi_i$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$
$S_j$					
$S_1$	0	0	0	1	1
$S_2$	1	0	0	1	1
$S_3$	1	1	0	1	1
$S_4$	1	0	0	0	0
$S_5$	1	1	0	1	0
$I(\pi_i)$	0,72	0,969	0	0,72	0,969

Перед початком пошуку об'єкт характеризується ентропією

$$H = \log_2 n = \log_2 5 = 2.32.$$

Кожна перевірка несе інформацію

$$I(\pi_i) = \log_2 n - H(\pi_i) = \log_2 n - \left( \frac{1}{n} \log_2 1 + \frac{n-1}{n} \log_2 (n-1) \right).$$

Для перевірки  $\pi_1$ :  $l = 4$  — кількість одиниць в першому стовпці і  $n-l = 1$  — кількість нулів, тому  $I(\pi_1) = \log_2 5 - \left( \frac{4}{5} \log_2 4 + \frac{1}{5} \log_2 1 \right) = 0.72$ .

Аналогічно  $I(\pi_2) = \log_2 5 - \left[ \frac{2}{5} \log_2 2 + \frac{3}{5} \log_2 3 \right] = 0.969$ ;  $I(\pi_3) = 0$ , тому що  $l = 0$ ;

$$I(\pi_4) = I(\pi_1) = 0.72; I(\pi_5) = 2.32 - \left( \frac{3}{5} \log_2 3 + \frac{2}{5} \log_2 2 \right) = 0.969.$$

Запишемо отримані результати в останній рядок таблиці станів (табл. 3.2).

Перевірки  $\pi_2$  і  $\pi_5$  є найбільш інформативними і рівноцінними варіантами. При рівноцінних варіантах користуються функцією переваги, яка має декілька стадій. В даному випадку ми не маємо додаткової інформації про об'єкт, тому виберемо перевірку з меншим порядковим номером, тобто  $\pi_2$ .

Визначимо на другому кроці перевірку, яка несе найбільшу інформацію, за умови, що вже виконана перевірка  $\pi_2$ ,

$$I(\pi_1 / \pi_2) = H(\pi_2) - H(\pi_1 / \pi_2).$$

Для зручності побудуємо таблицю станів (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 — Таблиця станів після першої перевірки  $\pi_2$

$S_j$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$I$
$\pi_i$						
$\pi_2$	0	0	1	0	1	—
$\pi_1$	0	1	1	1	1	0,548
$\pi_4$	1	1	1	0	1	0,548
$\pi_5$	1	1	1	0	0	0,948

За табл. 3.3 визначасмо, що для перевірки  $\pi_1$   $l_1 = 2$ ;  $l_2 = 2$ ,  $l = 2$ , а тому:

$$I(\pi_1 / \pi_2) = H(\pi_2) - H(\pi_1 / \pi_2) = \frac{2}{5} \log_2 2 + \frac{3}{5} \log_2 3 - \left( \frac{2}{5} \log_2 2 + \frac{2-2}{5} \log_2 0 + \frac{2}{5} \log_2 2 + \frac{5-2-2}{5} \log(5-2-2) \right) = 1.35 - 0.799 = 0.548.$$

Для перевірки  $\pi_4$   $l_1 = 2$ ;  $l_2 = 2$ , а тому  $I(\pi_1 / \pi_2) = I(\pi_4 / \pi_2) = 0.548$ .

Для перевірки  $\pi_5$   $l_1 = 1$ ;  $l_2 = 2$ , і

$$H(\pi_5 / \pi_2) = \frac{1}{5} \log_2 1 + \frac{1}{5} \log_2 1 + \frac{2}{5} \log_2 2 + \frac{5-2-2}{5} \log_2 (5-2-2) = 0.399;$$

$$I(\pi_5 / \pi_2) = 1.35 - 0.399 = 0.948.$$

Отримані результати запишемо в табл. 3.3, звідки видно, що наступною буде перевірка  $\pi_5$ . Перебудуємо табл. 3.3 у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 — Таблиця станів після перевірок  $\pi_2$  і  $\pi_5$ 

$S_j$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$I$
$\pi_5$	1	1	1	0	0	—
$\pi_1$	0	1	1	1	1	0,152
$\pi_4$	1	1	1	0	1	0

Визначимо найбільш інформативну перевірку на третьому кроці. Оскільки для перевірки  $\pi_1$   $l_1 = 2$ ;  $l_2 = 2$ ;  $l = 3$ , то

$$I(\pi_1 / \pi_5 / \pi_2) = H(\pi_2) - H(\pi_5 / \pi_2) - H(\pi_1 / \pi_5 / \pi_2) = \\ = 1.35 - 0.399 - \left( \frac{2}{5} \log_2 2 + \frac{1}{5} \log_2 1 + \frac{2}{5} \log_2 2 + \frac{5-3-2}{5} \log_2 (5-3-2) \right) = 0.152.$$

Для перевірки  $\pi_4$   $l_1 = 3$ ;  $l_2 = 1$ ;  $l = 3$ , тому

$$H(\pi_4 / \pi_5 / \pi_2) = \frac{3}{5} \log_2 3 + 0 + \frac{1}{5} \log_2 1 + \frac{5-3-1}{5} \log_2 (5-3-1) = 0.95;$$

$$I(\pi_4 / \pi_5 / \pi_2) = 1.35 - 0.399 - 0.95 \approx 0.$$

В табл. 3.5 подано розрахунок кількості інформації після виконання перевірок  $\pi_2, \pi_5, \pi_1$ .

Таблиця 3.5 — Таблиця станів після перевірок  $\pi_2, \pi_5, \pi_1$ 

$S_i$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$I$
$\pi_j$						
$\pi_4$	1	1	1	0	1	0

Отже, для визначення несправності в об'єкті найбільш інформативною буде така послідовність перевірок:  $\pi_2, \pi_5, \pi_1, \pi_4$ .

### 3.4 Метод віток і границь

При пошуку пошкоджень в складному об'єкті, коли необхідно забезпечити мінімальну вартість реалізації алгоритму пошуку, використовують метод "віток і границь" [3].

Задача формування процедури пошуку здійснюється так.

Вважають, що об'єкт складається із  $N$  довільно з'єднаних елементів, кожен з яких може знаходитись в двох станах: справний і несправний. Задано множину станів  $\{S_i\}$ , кожен з яких характеризується  $N$ -вимірним вектором. Кожна  $V$ -а компонента вектора є 1, якщо відсутня несправність в  $V$ -ому елементі, і 0, якщо несправність є. Ймовірність знаходження об'єкта в стані  $S_i$  позначимо через  $p_i$ , при цьому  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ .

Задана кінцева множина перевірок  $\{\pi_j\}$ , які характеризуються константою типу 0 і 1. Вартість кожної перевірки  $\pi_j$  дорівнює  $B_j$ . Множина  $\{\pi_j\}$  повністю забезпечує пошук пошкодження. Вартість перевірки не залежить від послідовності їх виконання. При пошуку об'єкт не переходить з одного стану в інший. Необхідно вибрати таку послідовність перевірок, яка забезпечує найменшу вартість пошуку. Середня вартість визначення стану об'єкта

$$B(H) = \sum_{i=1}^n B_i \left( \sum_{S_i \in S_i} p_i \right), \quad (3.14)$$

де  $S_i \in S$  — множина станів, визначення яких здійснюється операціями, які створюють дерево  $H_j \in H$  з початковою вершиною  $\pi_j$ .

Застосування методу віток та границь передбачає подання об'єкта у вигляді таблиці станів. Обравши будь-яку перевірку з множини  $\{\pi_j\}$ ,  $j=1 \dots m$  і виконавши її, можна тим самим поділити множину можливих станів  $\{S_i\}$  на дві підмножини  $S_{j0}$  і  $S_{j1}$ , які відповідають константам 0 і 1 результату перевірки. Оскільки порядок отримання перевірок у вибраних підмножинах невідомий, то знайти середню вартість визначення будь-якого стану в підмножинах  $S_{j0}$  і  $S_{j1}$  не можна. У зв'язку з цим, середня вартість замінюється величиною її нижньої границі

$$B_{\min}(\pi_j, S) = B_j \sum_{S \in S} p_i + B_{\min}(S_{j0}) + B_{\min}(S_{j1}). \quad (3.15)$$

На першому кроці алгоритму пошуку розраховують нижню границю середньої вартості для всіх можливих послідовностей виконання перевірок і вибирають послідовність, яка відповідає мінімальній нижній границі вартості.

На другому кроці алгоритму розраховують нижню границю вартості

для кожної пари перевірок при визначенні станів із підмножин  $S_{j0}$  і  $S_{j1}$

$$B_{\min}(\pi_f, S_{j0}) = B_f \sum_{S_t \in S_{j0}} p_t + B_{\min}(S_{j00}) + B_{\min}(S_{j01}); \quad (3.16)$$

$$B_{\min}(\pi_g, S_{j1}) = B_g \sum_{S_t \in S_{j1}} p_t + B_{\min}(S_{j10}) + B_{\min}(S_{j11}), \quad (3.17)$$

де  $B_f, B_g$  — вартість фіксованих перевірок в підмножинах  $S_{j0}$  і  $S_{j1}$ ; подвійні цифрові індекси 00, 01, 10, 11 визначають відношення до підмножин  $S_{j0}$  та  $S_{j1}$  і відповідно результат (0 або 1) перевірок  $\pi_f$  і  $\pi_g$  в цих підмножинах. Значення нижніх границь середньої вартості кожної послідовності перевірок визначимо з виразу

$$B_{\min}(\pi_f, \pi_j, \pi_g, S) = B_f \sum_{S_t \in S} p_t + B_{\min}(\pi_f, S_{j0}) + B_{\min}(\pi_g, S_{j1}). \quad (3.18)$$

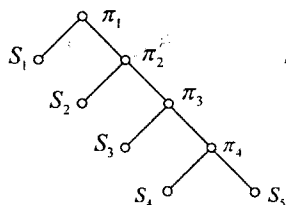
Виконуючи аналогічні дії на наступних кроках і вибираючи кожного разу найменшу з нижніх границь вартості, здійснюють поділ до тих пір, доки не будуть в множині  $S$  виділені всі підмножини, які мають не більше двох станів, і визначена послідовність перевірок. Якщо середня вартість вибраної послідовності перевірок перевищує нижню границю вартості будь-якої вартості з можливих послідовностей на будь-якому кроці, то процес повторюється.

**Приклад.** Об'єкт задано таблицею функцій станів (табл. 3.6). Задана вартість окремих перевірок:  $B_1 = 6$ ;  $B_2 = 4$ ;  $B_3 = 5$ ;  $B_4 = 7$ ;  $B_5 = 3$ , а також ймовірності станів:  $p_1 = 0,2$ ;  $p_2 = 0,1$ ;  $p_3 = 0,3$ ;  $p_4 = 0,15$ ;  $p_5 = 0,25$ . Користуючись методом “віток і границь”, визначити оптимальну, за критерієм мінімальної вартості, послідовність перевірок.

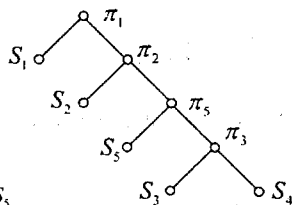
Таблиця 3.6 — Таблиця станів

$\pi_1$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$
$S_j$					
$S_1$	0	0	1	1	1
$S_2$	1	0	1	0	1
$S_3$	1	1	0	0	1
$S_4$	1	1	1	0	1
$S_5$	1	1	1	1	0

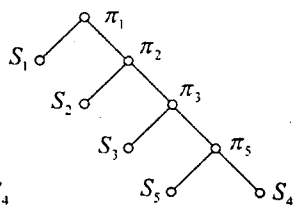
Оскільки послідовність перевірок невідома, то потрібно розглянути всі можливі варіанти, і вибрати такий, який має найменшу нижню границю вартості. Побудуємо дерево можливих розв'язків і підрахуємо середню нижню вартість розв'язку. Якщо першою буде перевірка  $\pi_1$ , то можливі варіанти 1 - 12:



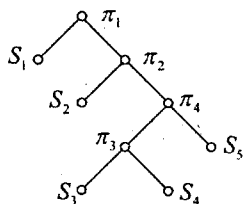
1.  $B_{\min 1} = 15,5$ .



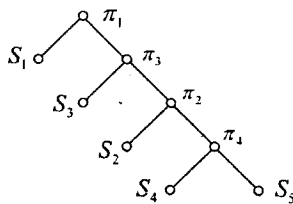
2.  $B_{\min 2} = 13,55$ .



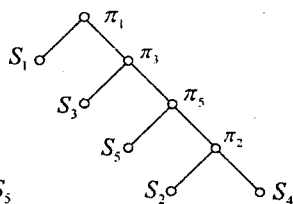
3.  $B_{\min 3} = 13,9$ .



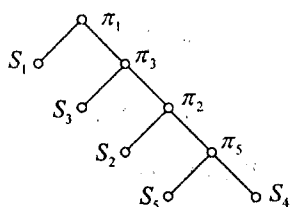
4.  $B_{\min 4} = 16,35$ .



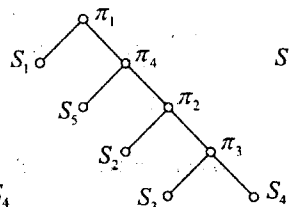
5.  $B_{\min 5} = 14,8$ .



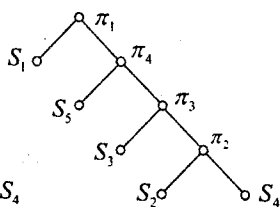
6.  $B_{\min 6} = 12,5$ .



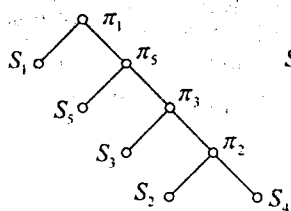
7.  $B_{\min 7} = 13,2$ .



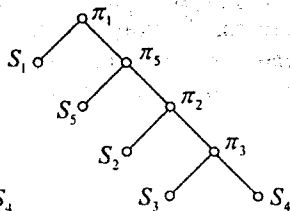
8.  $B_{\min 8} = 15,85$ .



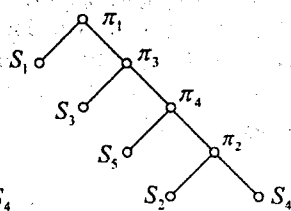
9.  $B_{\min 9} = 15,35$ .



10.  $B_{\min 10} = 12,15.$

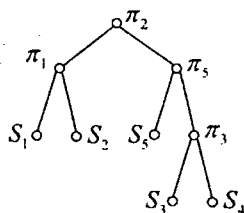


11.  $B_{\min 11} = 12,85.$

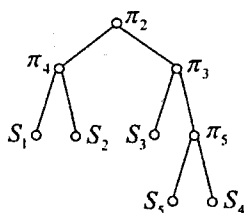


12.  $B_{\min 12} = 14,5.$

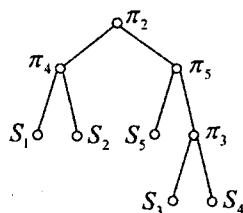
Якщо першою є перевірка  $\pi_2$ , то можливі варіанти 13 - 18:



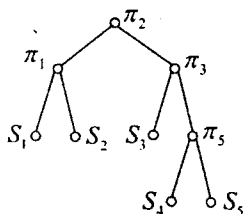
13.  $B_{\min 13} = 10,15.$



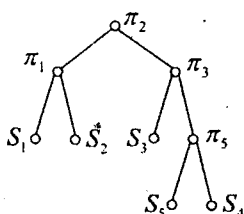
14.  $B_{\min 14} = 10,8.$



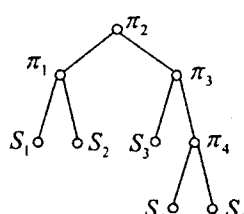
15.  $B_{\min 15} = 10,45.$



16.  $B_{\min 16} = 10,5.$

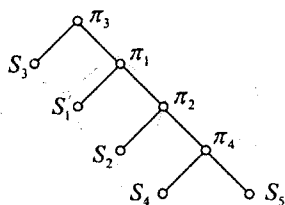


17.  $B_{\min 17} = 10,5.$

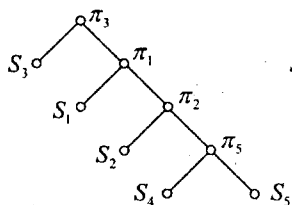


18.  $B_{\min 18} = 12,1.$

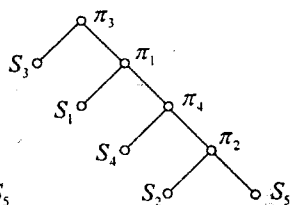
Якщо першою буде перевірка  $\pi_3$ , то можливі варіанти 19 - 30:



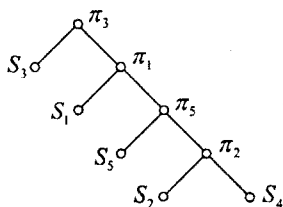
19.  $B_{\min 19} = 14.$



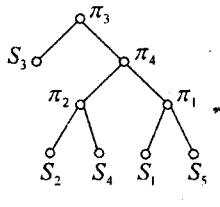
20.  $B_{\min 20} = 12,4.$



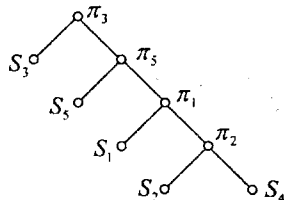
21.  $B_{\min 21} = 14,1.$



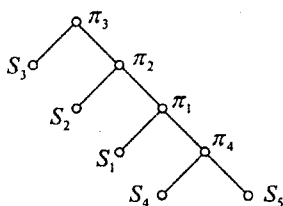
22.  $B_{\min 22} = 11,7.$



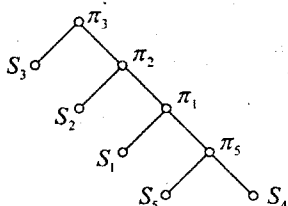
23.  $B_{\min 23} = 13,6.$



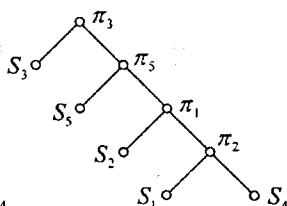
24.  $B_{\min 24} = 10,8.$



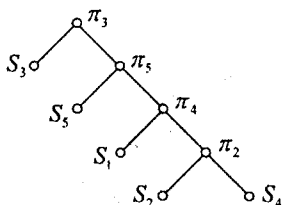
25.  $B_{\min 25} = 14,2.$



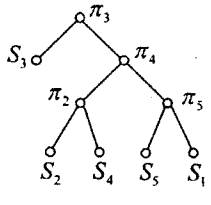
26.  $B_{\min 26} = 12,6.$



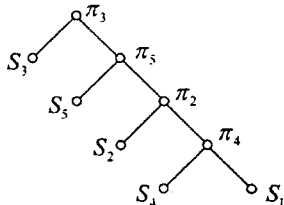
27.  $B_{\min 27} = 10,8.$



28.  $B_{\min 28} = 11,25.$

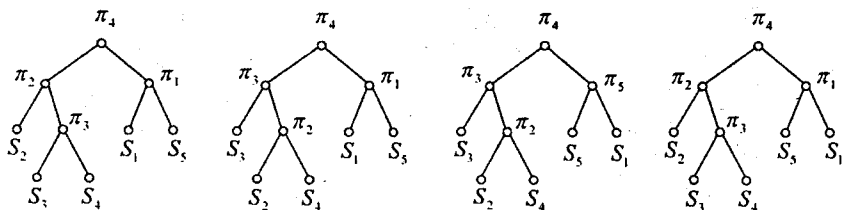


29.  $B_{\min 29} = 12,25.$



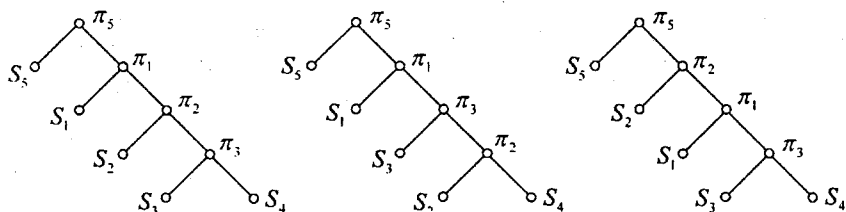
30.  $B_{\min 30} = 11,35.$

Для четвертої перевірки можливі варіанти 31 - 34:



31.  $V_{\min 31} = 14,15$ . 32.  $V_{\min 32} = 13,45$ . 33.  $V_{\min 33} = 12,1$ . 34.  $V_{\min 34} = 14,15$ .

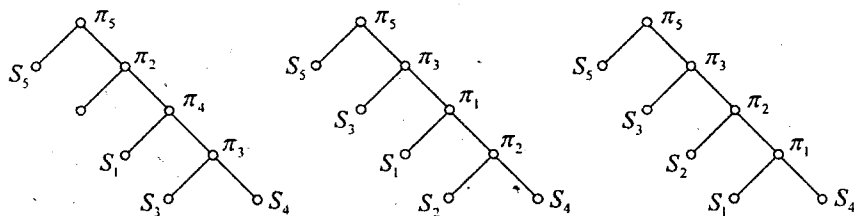
Для п'ятої перевірки можливі варіанти 35 - 44:



35.  $V_{\min 35} = 11,95$ .

36.  $V_{\min 36} = 11,25$ .

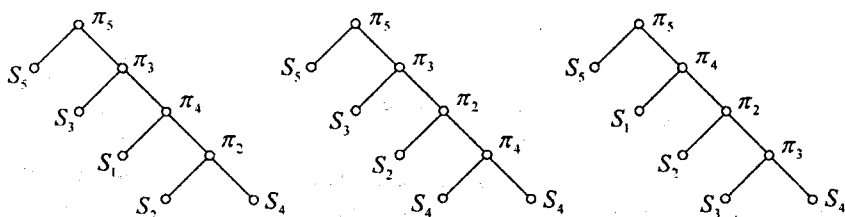
37.  $V_{\min 37} = 12,15$ .



38.  $V_{\min 38} = 12,8$ .

39.  $V_{\min 39} = 10,45$ .

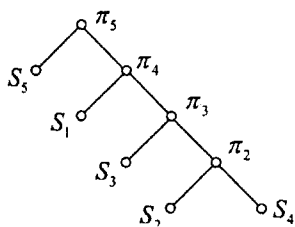
40.  $V_{\min 40} = 10,65$ .



41.  $V_{\min 41} = 10,9$ .

42.  $V_{\min 42} = 11$ .

43.  $V_{\min 43} = 12,7$ .



44.  $B_{\min 44} = 12.$

Визначимо середню нижню границю вартості для кожного із варіантів послідовності перевірок (1 - 44).

$$B_{\min 1} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_4 + p_5) = 15,5;$$

$$B_{\min 2} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_4 + p_3) = 13,55;$$

$$B_{\min 3} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_4 + p_5) = 13,9;$$

$$B_{\min 4} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_4 + p_3) = 16,35;$$

$$B_{\min 5} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_4 + p_5) = 14,8;$$

$$B_{\min 6} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_2 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_4 + p_2) = 12,5;$$

$$B_{\min 7} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_4 + p_5) = 13,2;$$

$$B_{\min 8} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_4 + p_3) = 15,85;$$

$$B_{\min 9} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_2 + p_4 + p_3) + B_2 \cdot (p_4 + p_2) = 15,35;$$

$$B_{\min 10} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_3 + p_4 + p_2) + B_2 \cdot (p_2 + p_4) = 12,15;$$

$$B_{\min 11} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_3 + p_4 + p_2) + B_3 \cdot (p_4 + p_3) = 12,85;$$

$$B_{\min 12} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_2 + p_4 + p_3) + B_2 \cdot (p_4 + p_2) = 14,5;$$

$$B_{\min 13} = B_2 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_1 + p_2) + B_5 \cdot (p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_4 + p_3) = 10,5;$$

$$B_{\min 14} = B_2 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_1 + p_2) + B_3 \cdot (p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_4 + p_5) = 10,8;$$

$$B_{\min 15} = B_2 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_1 + p_2) + B_5 \cdot (p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_4 + p_3) = 10,45;$$

$$B_{\min 16} = B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_1 + p_2) + B_3 \cdot (p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_4 + p_5) = 10,5;$$

$$B_{\min 17} = B_2 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_1 + p_2) + B_3 \cdot (p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_4 + p_5) = 10,5;$$

$$B_{\min 18} = B_2 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_1 + p_2) + B_3 \cdot (p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_4 + p_5) = 12,1;$$

$$B_{\min 19} = B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_4 + p_5) = 14;$$

$$B_{\min 20} = B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_4 + p_5) = 12,4;$$

$$B_{\min 21} = B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_2 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_5) = 14,1;$$

$$B_{\min 22} = B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_2 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_4 + p_2) = 11,7;$$

$$B_{\min 23} = B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_4) + B_1 \cdot (p_1 + p_5) = 13,6;$$

$$B_{\min 24} = B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_2 + p_4 + p_1) + B_2 \cdot (p_4 + p_2) = 10,8;$$

$$B_{\min 25} = B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_4 + p_5 + p_1) + B_4 \cdot (p_4 + p_5) = 14,2;$$

$$\begin{aligned}
B_{\min 26} &= B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + \\
&+ B_1 \cdot (p_4 + p_5 + p_1) + B_5 \cdot (p_4 + p_5) = 12,6; \\
B_{\min 27} &= B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + \\
&+ B_1 \cdot (p_2 + p_1 + p_4) + B_2 \cdot (p_2 + p_4) = 10,8; \\
B_{\min 28} &= B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + \\
&+ B_4 \cdot (p_2 + p_1 + p_4) + B_2 \cdot (p_4 + p_2) = 11,25; \\
B_{\min 29} &= B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + \\
&+ B_2 \cdot (p_2 + p_4) + B_5 \cdot (p_1 + p_5) = 12,25; \\
B_{\min 30} &= B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_2 + p_1 + p_4 + p_5) + \\
&+ B_2 \cdot (p_2 + p_1 + p_4) + B_4 \cdot (p_1 + p_4) = 11,35; \\
B_{\min 31} &= B_4 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_1 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_3 + p_4) + \\
&+ B_3 \cdot (p_4 + p_3) = 14,15; \\
B_{\min 32} &= B_4 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_1 + p_5) + B_3 \cdot (p_2 + p_3 + p_4) + \\
&+ B_2 \cdot (p_4 + p_2) = 13,45; \\
B_{\min 33} &= B_4 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_5 \cdot (p_1 + p_5) + B_3 \cdot (p_2 + p_3 + p_4) + \\
&+ B_2 \cdot (p_4 + p_2) = 12,1; \\
B_{\min 34} &= B_4 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_1 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_3 + p_4) + \\
&+ B_3 \cdot (p_4 + p_3) = 14,15; \\
B_{\min 35} &= B_5 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + \\
&+ B_2 \cdot (p_2 + p_3 + p_4) + B_3 \cdot (p_3 + p_4) = 11,95; \\
B_{\min 36} &= B_5 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + \\
&+ B_3 \cdot (p_2 + p_3 + p_4) + B_2 \cdot (p_2 + p_4) = 11,25; \\
B_{\min 37} &= B_5 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_2 + p_1 + p_3 + p_4) + \\
&+ B_1 \cdot (p_1 + p_3 + p_4) + B_3 \cdot (p_3 + p_4) = 12,15; \\
B_{\min 38} &= B_5 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_2 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + \\
&+ B_4 \cdot (p_1 + p_3 + p_4) + B_3 \cdot (p_4 + p_3) = 12,8; \\
B_{\min 39} &= B_5 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + \\
&+ B_1 \cdot (p_1 + p_2 + p_4) + B_2 \cdot (p_2 + p_4) = 10,45; \\
B_{\min 40} &= B_5 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + \\
&+ B_2 \cdot (p_1 + p_2 + p_4) + B_1 \cdot (p_1 + p_4) = 10,65;
\end{aligned}$$

$$V_{\min 41} = B_5 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + B_4 \cdot (p_1 + p_2 + p_4) + B_2 \cdot (p_4 + p_2) = 10,9;$$

$$V_{\min 42} = B_5 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_3 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + B_2 \cdot (p_1 + p_2 + p_4) + B_4 \cdot (p_4 + p_1) = 11;$$

$$V_{\min 43} = B_5 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + B_2 \cdot (p_2 + p_3 + p_4) + B_3 \cdot (p_3 + p_4) = 12,7;$$

$$V_{\min 44} = B_5 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) + B_4 \cdot (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + B_3 \cdot (p_2 + p_3 + p_4) + B_2 \cdot (p_2 + p_4) = 12.$$

Дослідження наведених варіантів показало, що оптимальним є варіант № 13, який має найменшу нижню границю вартості  $V_{\min 13} = 10,5$ .

### 3.5 Оптимізація процесу пошуку пошкоджень в розподільних мережах з повітряними лініями

Операції з відновлення електропостачання (*power supply*) у випадку аварійного змикнення здійснюються вручну за допомогою роз'єднувачів (*disconnector*) (вимикачів (*circuit breaker*) навантаження). Процес відновлення складається з ряду послідовних за часом підпроцесів [23]

$$t_B = t_{O.I} + t_{II} + t_{II.D} + t_{II.M} + t_P + t_{B.C}, \quad (3.19)$$

де  $t_{O.I}$  — час, через який одержують інформацію про спрацювання релейного захисту і вимкнення мережі на диспетчерському пункті та подання команди оперативно-виїзній бригаді (ОВБ) про початок пошуку пошкодження;

$t_{II}$  — час прибуття ОВБ із виробничої бази на підстанцію;

$t_{II.D}$  — час пошуку пошкодженої ділянки;

$t_{II.M}$  — час пошуку місця пошкодження на виділеній ділянці;

$t_P$  — час ремонту пошкодженої ділянки;

$t_{B.C}$  — час увімкнення споживачів.

За даними експлуатації  $t_{II.D} = (0,3 - 0,5)t_B$ . У реальних умовах скоротити складові  $t_{O.I}$ ,  $t_{II}$ ,  $t_P$  важко, тому що це потребує оснащення мережі й ОВБ дорогими пристроями і механізмами. Зменшити складову  $t_{II.D}$  можна без додаткових капітальних витрат за рахунок раціональної організації самого процесу пошуку і локалізації пошкодженої ділянки.

Організація процесу пошуку пошкодженої ділянки [21, 23, 24] залежить

від конфігурації розподільної мережі (*distributive power grid*), її довжини, кількості комутаційних апаратів, місця їх встановлення і виду пошкоджень. Наприклад, при відсутності на лінії секціонуючих роз'єднувачів, процес пошуку переходить в обхід лінії. При наявності роз'єднувачів процес пошуку пошкодження і його локалізація починається з поділу лінії на дві частини вимкненням однієї з них; далі виконується повторне ввімкнення (ПВ) вимикачів лінії на підстанції. За результатами ПВ роблять висновки про те, на якій з частин лінії є пошкодження. Аналогічні операції виконують доти, доки не буде виявлено пошкоджену ділянку. Далі проводиться увімкнення тих пошкоджених ділянок, на які можна подати напругу від джерел живлення.

При наявності на лінії резервних зв'язків пошук пошкодженої ділянки організують інакше, оскільки після виконання будь-якої операції, спрямованої на одержання інформації про місце пошкодження, з'являється можливість увімкнути резервне джерело живлення для навантажень непошкоджених ділянок.

Якщо схема оснащена пристроями секціонування (*sectionalization*) та автоматичного введення резерву, пошук пошкодження здійснюється в автоматично виділеній зоні так само, як і в попередньому випадку. Отже, у будь-якому випадку процес визначення пошкодженої ділянки є багатокроковим, і перед оперативним персоналом виникає задача вибору оптимальної стратегії пошуку та локалізації пошкодженої ділянки.

При пошуку місця міжфазного КЗ (*short circuit*) як критерій оптимальності (*optimum*) використовують мінімізацію недовідпуску електроенергії за час цього процесу

$$W = \sum_{j=1}^n W_j = \sum_{j=1}^n t_j P_{\text{вим}j} \rightarrow \min, \quad (3.20)$$

де  $t_j$ ,  $W_j$  — відповідно, тривалість вимкнення лінії та недовідпуск електроенергії на  $j$ -ому кроці пошуку і локалізації;

$P_{\text{вим}j}$  — величина навантаження, вимкнутого на  $j$ -ому кроці;

$n$  — кількість ділянок РМ.

Стратегія  $W \rightarrow \min$  формується шляхом розгляду й оцінення всіх можливих варіантів увімкнення навантажень при розподілі її  $r$ -м роз'єднувачем і ввімкненням  $R$ -го резерву. Для пар  $(r-R)$  ефективність операції повинна бути оцінена за зміною  $W$ , що досягається при виконанні цих операцій. Складність реалізації такої стратегії полягає в тому, що не відома оптимальна послідовність поділу мережі  $r$ -м роз'єднувачем.

У найпростішому випадку, коли розподільна мережа складається з послідовно з'єднаних ділянок, для її поділу використовують метод половинного розділення. Для складних мереж (з відгалуженнями і

резервними джерелами живлення) попередньо оптимізують процес керування за критерієм мінімуму сумарної тривалості часу пошуку і локалізації пошкодженої ділянки

$$t = \sum_{j=1} t_j \rightarrow \min. \quad (3.21)$$

Отже, вибір стратегії пошуку  $W \rightarrow \min$  формують вибором на кожному кроці процесу доцільних відхилень стратегії  $t \rightarrow \min$  і задовольняють умову

$$\Delta W = W_{(W \rightarrow \min)} - W_{t \rightarrow \min} > 0. \quad (3.22)$$

Оскільки стратегія  $t \rightarrow \min$  не є оптимальною, через те, що не враховується навантаження на ділянках, стратегія пошуку за  $W \rightarrow \min$  потребує перебору великої кількості варіантів.

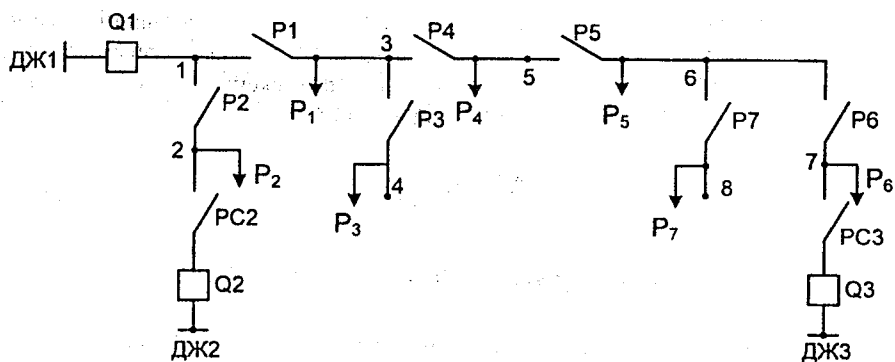
Запропоновано стратегію [21 - 23] керування процесом пошуку і локалізування пошкодженої ділянки з відновленням живлення на непошкодженій ділянці в процесі пошуку, при якому мінімізується недовідпуск електроенергії, спочатку при визначенні послідовності поділу мережі г-м роз'єднувачем, а потім при виборі пар (r-R).

Задача формулюється так. Розподільна мережа складається з N довільно з'єднаних ділянок, кожна з яких може знаходитися в двох станах: мати чи не мати пошкодження. Задано множину  $\{S_j\}$  станів, кожен з яких характеризується  $v_j$ -вимірним вектором, кожна компонента вектора є 0 при відсутності несправності на j-й ділянці, чи 1 при наявності несправності. Задано кінцеву множину  $\{P_j\}$  перевірок, що мають два результати: позитивний і негативний. Множина  $\{P_j\}$  цілком забезпечує можливість здійснення пошуку.

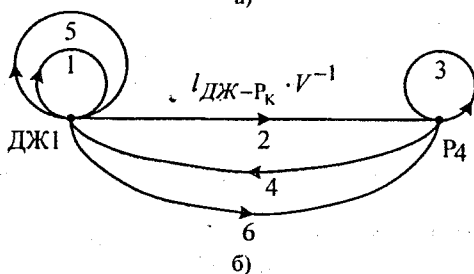
Недовідпуск електроенергії при перевірці  $P_j$  дорівнює  $W_j$  і не залежить від послідовності її виконання. При здійсненні пошуку розподільна мережа не переходить з одного стану в інший. Схема пошуку передбачає послідовність дій між диспетчером, що виконує функції чергового підстанції, й ОВБ, оснащеної транспортними засобами і радіозв'язком. Середня швидкість проїзду по трасі лінії —  $V_a$ , витрати часу на комутаційні операції —  $t_{оп}$ , на радіозв'язок —  $t_c$ .

Необхідно вибрати таку послідовність перевірок, щоб забезпечувався найменший недовідпуск електроенергії

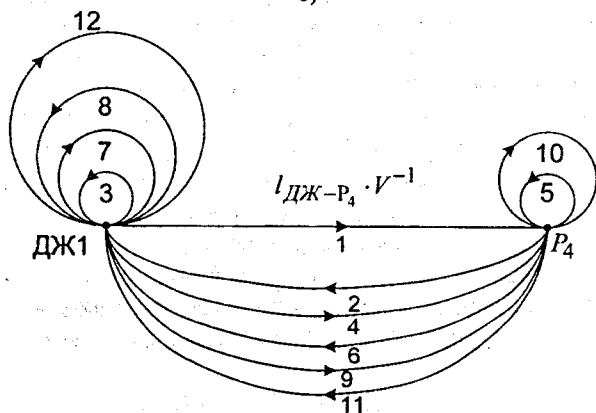
Визначимо недовідпуск електроенергії для кожного зі станів  $S_0 - S_7$  розподільної мережі (рис. 3.4, а). При цьому послідовність операцій (перевірок) повинна бути такою, щоб оперативний персонал міг переконатися в наявності пошкодження на цій ділянці, локалізувати його і подати напругу на непошкоджену частину схеми.



а)



б)



в)

Рисунок 3.4 — Розподільна мережа:

а — заступна схема; б — діаграма послідовності операцій перевірки ділянки мережі при міжфазному КЗ; в — діаграма послідовності операцій при однофазному замиканні на землю

Наприклад, при стані  $S_0$  перевірка  $\Pi_0$  полягає у виконанні однієї операції: ввімкнення вимикача  $Q_1$  за час  $t_{\text{оп}}$ , оскільки він не вимикається релейним захистом (*relay protection*), то пошкодження в розподільній мережі немає. Недовідпуск електроенергії для цієї перевірки:

$$W_0 = t_{\text{оп}} \sum_{i=1}^7 P_i, \quad (3.23)$$

де  $P_i$  — величина навантаження споживачів  $i$ -ої ділянки.

Для стану  $S_1$  перевірка  $\Pi_1$  буде полягати у виконанні значно більшої кількості операцій, послідовність яких зручно подати у вигляді діаграми (рис. 3.4, б, в). Діаграма має вузли, що відображають те місце, де виконується операція (ввімкнення, вимкнення, передача команди). Кожній вітці, тобто лінії, що з'єднує два вузли, відповідає свій оператор, який позначає час проїзду ОВБ, передачі сигналу чи виконання комутаційної операції. Напрямок вітки вказується стрілкою, а послідовність виконання операцій цифрою. Вітка, яка замикається на власний вузол (замкнений шлях), означає операцію увімкнення, якщо стрілка на ній спрямована за годинниковою стрілкою, вимкнення — проти годинникової стрілки.

Опишемо діаграму виконання операцій для перевірки  $\Pi_4$  (пошкоджена ділянка 3-5). Після вимкнення вимикача  $Q_1$  (рис. 3.4, а) релейним захистом, диспетчер дистанційно у вузлі ДЖ1 виконує операцію 1 — пробне увімкнення  $Q_1$  за час  $t_{\text{оп}}$  (рис. 3.4, б). Оскільки пошкодження стійке і вимикач вимкнувся релейним захистом, то диспетчер подає команду виконати операцію 2 — переїхати до вузла 3 (P4), що виконується протягом часу  $t_{\text{ДЖ1-P4}} = l_{\text{ДЖ1-P4}} / V_a$  ( $l_{\text{ДЖ1-P4}}$  — відстань між ДЖ і P4), і виконати операцію 3 — вимкнути роз'єднувач P4 за час  $t_{\text{оп}}$ . Після виконання цієї операції ОВБ повідомляє за допомогою радіозв'язку про вимкнення роз'єднувача P4, виконуючи операцію 4 за час  $t_c$ . Одержавши повідомлення, диспетчер повторно вмикає вимикач  $Q_1$  — операція 5. Оскільки пошкодження на ділянці ДЖ1-P4 немає, то пошкодження сталося за роз'єднувачем P4. За діаграмою легко визначити час перевірки:

$$t_{\text{пуз-5}} = l_{\text{ДЖ1-P4}} / V_a + 3t_{\text{оп}} + 2t_c. \quad (3.24)$$

Недовідпуск електроенергії при четвертій перевірці

$$W_4 = t_{\text{пуз-5}} \sum_{i=1}^7 P_i. \quad (3.25)$$

Для перевірки  $\Pi_j$  недовідпуск електроенергії можна визначити як

$$W_j = \left( I_{\text{ДЖ-Р}_j} / V_a + 3t_{\text{ОП}} + 2t_c \right) \sum_{i=1}^7 P_i. \quad (3.26)$$

Побудуємо безумовний алгоритм пошуку пошкодження. Необхідну глибину діагностування  $\lambda$  задамо поділом множини  $\{S_i\}$  на  $\lambda = 8$  непересічних підмножин, що не перетинаються:  $\{S_0\}$  і  $\{S_1\} - \{S_7\}$ . Таблицею покриття, яка відтворює ці умови побудови алгоритму пошуку пошкоджень є табл. 3.7. Ця таблиця побудована при такій відповідності між елементами множини  $U$  (стовпцями) і парами станів з множини  $\{S_1\} - \{S_7\}$ :

1 —  $(S_0, S_1)$ ; 2 —  $(S_0, S_2)$ ; 3 —  $(S_0, S_3)$ ; 4 —  $(S_0, S_4)$ ; 5 —  $(S_0, S_5)$ ; 6 —  $(S_0, S_6)$ ; 7 —  $(S_0, S_7)$ ; 8 —  $(S_1, S_2)$ ; 9 —  $(S_1, S_3)$ ; 10 —  $(S_1, S_4)$ ; 11 —  $(S_1, S_5)$ ; 12 —  $(S_1, S_6)$ ; 13 —  $(S_1, S_7)$ ; 14 —  $(S_2, S_3)$ ; 15 —  $(S_2, S_4)$ ; 16 —  $(S_2, S_5)$ ; 17 —  $(S_2, S_6)$ ; 18 —  $(S_2, S_7)$ ; 19 —  $(S_3, S_4)$ ; 20 —  $(S_3, S_5)$ ; 21 —  $(S_3, S_6)$ ; 22 —  $(S_3, S_7)$ ; 23 —  $(S_4, S_5)$ ; 24 —  $(S_4, S_6)$ ; 25 —  $(S_4, S_7)$ ; 26 —  $(S_5, S_6)$ ; 27 —  $(S_5, S_7)$ ; 28 —  $(S_6, S_7)$ .

Таблиця 3.7 — Таблиця покриття.

$\pi_j$	U																												$\pi_j$	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28		
0	1	1	1	1	1	1	1																							7
1	1	1	1	1	1	1	1						1	1	1	1	1													13
2	1	1	1	1	1	1	1						1	1	1	1	1													13
3	1	1	1	1	1	1	1	1					1						1	1	1	1	1							13
4	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							19
5	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1			1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1			19
6	1	1	1	1	1	1	1				1					1		1			1				1	1	1		1	13
7	1	1	1	1	1	1	1					1					1		1				1			1		1	1	13

У клітинці  $(\Pi_i, U_j)$  табл. 3.7 проставимо значення двійкової змінної  $a_{ij}$ , що визначається за правилом:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } R_j^i \neq R_j^n; \\ 0, & \text{в протилежному випадку,} \end{cases} \quad (3.27)$$

де  $R_j^i, R_j^n$  — результати елементарної перевірки об'єкта, який знаходиться в стані 0 чи 1.

Для спрощення побудованої таблиці не будемо проставляти в її клітинах 0. Відмовимося тепер від всіх оптимальних варіантів, а обмежимося визначенням одного з них. Для визначення оптимального покриття скористаємося методом "віток і границь" [3, 21, 23].

Оскільки розв'язання поставленої задачі є багатокроковою процедурою, то її можна подати орієнтованим графом типу дерева, яке будемо називати деревом розв'язку. Початкова і внутрішня вершини дерева розв'язку будуть показувати кроки процедури, а вихідні з цих вершин дуги — допустимі варіанти частинних розв'язків. Шлях дерева розв'язку подає послідовність частинних розв'язків задачі і відповідних їм кроків процедури. На кожному кроці процедури дерево розв'язків має певну множину висячих вершин. Будь-який шлях з початкової вершини дерева, що закінчується висячою вершиною, буде являти собою побудовану частину розв'язку. Відносно деяких висячих вершин можна продовжити розв'язання задачі, щодо інших — продовження розв'язання задачі або неможливе, або недоцільне. Будь-яке можливе чи те, що не має сенсу продовження, розв'язування аж до знаходження повного розв'язку, назовемо непобудованою частиною розв'язку.

Використовуючи дихотомічне дерево розв'язків (тобто дерево, усі невисячі вершини якого мають не більше двох вихідних дуг), множину допустимих на  $h$ -ому кроці частинних розв'язків  $b_h > 1$  можна поділити на дві підмножини. У першу з них включається один варіант  $j$ , а в другу всі інші ( $b_h - 1$ ) варіанти. Будемо називати такий поділ  $j$ -поділом. Першій і другій підмножинам поставимо, відповідно, дуги  $j$  і  $\bar{j}$ , які виходять з вершини  $h$  дерева розв'язків. Дуга  $\bar{j}$  є узагальненим допустимим варіантом частинного розв'язку, зумовленого тим, що в розв'язок, який ми шукаємо, не включається частинний розв'язок  $j$ .

Кожному повному розв'язку задачі буде відповідати певна вітка дерева розв'язків, тобто визначення одного, наприклад, оптимального розв'язку зводиться до знаходження однієї, що являє собою цей розв'язок, вітки дерева.

Для визначення повного розв'язку для кожної висячої вершини дерева визначають складність побудованої частини розв'язків і виділяють нижню границю складності непобудованої частини розв'язків  $\lim(W)$ , якою вважається складність, нижчу від якої не може мати жоден з допустимих розв'язків.

Сума складності побудованої частини і нижньої границі дає нижню границю складності відповідного повного розв'язку, яку будемо позначати  $\text{Lim}(W)$ . При обчисленні нижньої границі непобудованої частини розв'язку будемо виходити з того, що складність розв'язку і нижня границя

складності цільової функції визначаються кількістю елементарних перевірок чи рядків таблиці покриття. Розрахувавши кількість  $n_j$  стовпців, які покриваються рядком  $j$  таблиці, тобто кількість одиниць у цьому рядку для кожного  $j$ , і розташували їх у спадному порядку, отримаємо

$$n_{j1} \geq n_{j2} > \dots n_{jp} \geq \dots, \quad (3.28)$$

візьмемо перші  $\alpha$  чисел ряду (3.28), які задовольняють умови

$$\sum_{p=1}^{\alpha} n_{jp} \geq N \quad \text{і} \quad \sum_{p=1}^{\alpha-1} n_{jp} < N, \quad (3.29)$$

де  $N$  — кількість стовпців таблиці покриття. Число  $\alpha$  і є нижньою границею  $\lim(n)$  довжини непобудованого покриття заданої таблиці.

Далі розраховані значення недовідпуску електроенергії при кожній елементарній перевірці розташуємо в порядку зростання

$$W_{j1} \leq W_{j2} \dots \leq W_{jg} \leq \dots \quad (3.30)$$

З ряду (3.30) береться сума перших  $\alpha$  його членів  $\sum_{g=1}^{\alpha} W_{jg}$ , що і є нижньою границею  $\lim(W)$  непобудованої частини розв'язку.

Це видно з того, що будь-яке покриття має не менше  $\alpha$  рядків, а недовідпуск електроенергії для цих рядків мінімальний із усіх можливих.

Нижня границя складності повного розв'язку:

$$\text{Lim}(W) = W_{\text{ноб}} + \lim(W), \quad (3.31)$$

де  $W_{\text{ноб}}$  — недовідпуск електроенергії для побудованої частини розв'язку на даному кроці.

Стратегію вибору подальшого кроку процедури визначають шляхом виділення висячих вершин, які мають мінімальну повну нижню границю, такі вершини будемо називати оптимальними. Якщо на розглянутому кроці є нижні границі складності непобудованої частини розв'язків, які дорівнюють нулю, то їх побудовані частини розв'язків, очевидно, є повним розв'язком задачі, який ми шукаємо, і на цьому процедура закінчується. У протилежному випадку виконується наступний крок процедури, виходячи з будь-якої оптимальної вершини, і так до визначення оптимального повного розв'язку задачі.

Наведемо приклад побудови оптимального за невідпуском електроенергії покриття (табл. 3.7) методом "віток і границь" для схеми, поданої на рис. 3.4, а, яка містить основне джерело живлення ДЖ1, два резервних ДЖ2 і ДЖ3, роз'єднувачі P1-P7, задані довжини ділянок у кілометрах:  $l_{1-3} = l_{3-4} = 5,6$ ;  $l_{1-2} = 13,5$ ;  $l_{3-5} = 14,5$ ;  $l_{5-6} = 10,5$ ;  $l_{6-7} = 11,5$ ;  $l_{6-8} = 4,5$  і потужність під'єднаних споживачів до ділянок у кіловатах:  $P_1 = 90$ ;  $P_2 = 380$ ;  $P_3 = 300$ ;  $P_4 = 160$ ;  $P_5 = 240$ ;  $P_6 = 520$ ;  $P_7 = 310$ ,  $V_a = 20$  км/год;  $t_{он} = 0,1$  год.

Визначимо невідпуск електроенергії в кіловат-годинах для кожного зі станів  $S_0$ - $S_7$  розподільної мережі за рівнянням (3.26):

$W_0 = 200$ ;  $W_1 = 800$ ;  $W_2 = 800$ ;  $W_3 = 1360$ ;  $W_4 = 1360$ ;  $W_5 = 2810$ ;  $W_6 = 3860$ ;  $W_7 = 3860$  кВт·год.

Виберемо дихотомічну процедуру. Як функцію переваги використовуємо кількість стовпців, що покриває рядок  $j$  (табл. 3.7). Щоб поліпшити селективні властивості процесу зіставлення рівноцінних варіантів продовження розв'язування, у цьому прикладі застосуємо більш складну чотиристадійну функцію переваги. Спочатку відберемо з зазначених варіантів ті, які дають мінімум стовпців, що не покриваються, тобто рядок табл. 3.7 із найбільшою кількістю одиниць ( $n_j$ ). У випадку рівності цих показників ( $n_j$ ) вибирають варіант, який характеризується меншим невідпуском електроенергії. Якщо і ці показники однакові, вибирають варіант, що дозволяє при вдалому його результаті вмикати резервне джерело живлення.

Якщо всі показники однакові, з табл. 3.7 вибирають рядок з меншим порядковим номером.

Дерево розв'язків для розглянутого прикладу зображено на рис. 3.5.

**Крок 1.** Маємо два рівноцінних варіанти (табл. 3.7, стовпець  $n_j$ ) поділу  $\Pi_4$ ,  $\Pi_5$ . Мінімальним за втратами електроенергії є поділ  $\Pi_4$  ( $W_4 = 1360$  кВт·год). Викреслюємо з табл. 3.7 стовпці 1-7, 10-13, 15-22, які покриваються рядком  $\Pi_4$ , і видаляємо цей рядок. Для частини таблиці, що залишилася, кількість стовпців  $N_1 = 9$ ; рядок (3.28) має вигляд  $3 = 3 = 3 > 2 = 2 = 2 > 0$ , тому  $\alpha = 3$ ,  $\lim(n)_1 = 3$ . Рядок (3.30) має вигляд:

$W_0 = 200 < W_1 = W_2 = 800 < W_3 = W_4 = 1360 < W_5 = 2810 < W_6 = W_7 = 3860$  кВт·год і тому  $\lim(W)_1 = 200 + 800 + 800 = 1800$  (кВт·год);  $W_{\text{пос1}} = W_4 = 1360$  кВт·год, отже,  $\text{Lim}(W)_1 = 1360 + 1800 = 3160$  (кВт·год).

Цьому значенню відповідає вітка 4 дерева розв'язків (рис. 3.5). Вітка 4 дерева розв'язків відповідає виключенню поділу  $\Pi_4$  з табл. 3.7. Для цього випадку  $N_2 = 28$ ; рядок (3.28) має вигляд:  $19 > 13 = 13 = 13 = 13 > 7$ ;  $\lim(W)_2 = 200 + 800 = 1000$  (кВт·год). Для побудованої частини розв'язку  $W_{\text{пос2}} = 0$ , тому  $\text{Lim}(W)_2 = 1000$  (кВт·год). Оскільки  $\text{Lim}(W)_2 < \text{Lim}(W)_1$ , то

другий крок процедури потрібно виконувати для вітки ( $\bar{4}$ ). Для наступного кроку кращим варіантом є поділ  $\Pi_5$  ( $n_5 = 19$ ).

**Крок 2.** Для вітки ( $\bar{4}, 5$ ) нижня границя складності непобудованої частини розв'язків обчислюється за табл. 3.7 шляхом викреслювання стовпців: 1 - 7; 11 - 13; 16 - 18; 20 - 25 і поділу  $\Pi_4$ ,  $\Pi_5$ . Для частини таблиці, що залишилася:  $N_3 = 9$ , ряд (3.28) має вигляд  $3 = 3 = 3 = 3 > 2 = 2 > 1 > 0$ , звідки  $\alpha = 3$ ;  $\lim(n)_3 = 3$ ;  $\text{Lim}(W)_3 = 200 + 800 + 800 = 1800$  (кВт·год);  $W_{\text{поз3}} = 2810$  кВт·год, тому  $\text{Lim}(W)_3 = 1800 + 2810 = 4610$  (кВт·год).

Вітка ( $\bar{5}$ ) дерева зображує виключення з табл. 3.7 поділу  $\Pi_4$ ,  $\Pi_5$ . Тоді  $N_{4,5} = 28$ ; ряд (3.28) має вигляд  $13 = 13 = 13 = 13 = 13 > 7$  і  $\lim(n)_4 = 3$ ;  $\text{Lim}(W)_4 = 200 + 800 + 800 = 1800$  (кВт·год) і  $\text{Lim}(W)_4 = 0 + 1800$  (кВт·год). Оскільки  $\text{Lim}(W)_4 < \text{Lim}(W)_3$ , то третій крок процедури повинен виконуватися для вітки ( $\bar{5}$ ). Для вітки ( $\bar{4}$ ,  $\bar{5}$ ) кращим є поділ  $\Pi_2$ .

**Крок 3** показує розрахунок для вітки  $\bar{4}$ ,  $\bar{5}$ , 2, він аналогічний попередньому.

Отже, побудова дерева розв'язків зводиться до вибору вершини, яка має менший недовідпуск електроенергії, і до виконання наступного кроку процедури відносно цієї вершини. Критерієм закінчення процесу є рівність нулю граничного недовідпуску електроенергії.

Для розглянутого прикладу (рис. 3.5) оптимальною є послідовність перевірок  $\Pi_4$ ,  $\Pi_5$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_6$ ,  $\Pi_3$ ,  $\Pi_7$ . В цьому випадку перевіркою треба вважати вимкнення відповідного роз'єднувача і контролювання стану вимикача Q1 (рис. 3.4, а). Наприклад, перевірка  $\Pi_4$  полягає в тому, що при вимкненому Q1, ОВБ вимикає роз'єднувач Р4 і повідомляє про це диспетчера, який вмикає Q1 і фіксує результат перевірки (тобто вимкнувся чи не вимкнувся Q1).

Кінцевий результат подають у вигляді умовного алгоритму перевірок, сформованого з безумовної послідовності перевірок, із врахуванням можливості увімкнення резервного джерела живлення шляхом аналізу схеми. Наприклад, для розглянутої задачі умовний алгоритм показано на рис. 3.6.

На початку алгоритму вказується, звідки здійснюється керування процесом пошуку ("К", Q1). Перша перевірка  $\Pi_4$  означає, що при знеструмленій мережі потрібно вимкнути роз'єднувач Р4. Після повторного увімкнення вимикача Q1, результат перевірки може бути: "В" — вимикач Q1 вимикається чи "Н" — не вимикається.

При виконанні перевірки  $\Pi_4$  уся мережа розділилася на дві рівнозначні частини (рис. 3.4, а). Якщо результат перевірки "В", то необхідно ввімкнути резервне джерело живлення для непошкодженої частини схеми (Р, РС3, Q3) і виконати подальшу перевірку за безумовним алгоритмом;

для пошкодженої частини схеми виконати перевірку — П<sub>2</sub>, тобто вимкнути роз'єднувач Р<sub>2</sub>. Результат перевірки "Н" вказує на пошкоджену ділянку 1—2 (ПД1-2); при результаті "В", ОВБ повинна увімкнути резервне джерело живлення (Р, РСЗ, Q2) і перейти до подальшої перевірки П<sub>3</sub>, тобто вимкнути роз'єднувач Р<sub>3</sub>. При результаті "В" пошкоджена ділянка 1—3 (ПД1-3), а при результаті "Н" пошкоджена ділянка — ПД 3-4 (рис. 3.4, а).

Якщо на першому кроці пошуку (вимкнуто роз'єднувач Р<sub>4</sub>) вимикач Q1 не вимикається (права сторона алгоритму), то для пошуку пошкодження необхідно перейти на керування вимикачем Q3 ("К", РСЗ-Q3). Наступна за послідовністю перевірка П<sub>5</sub>, тому вимикається роз'єднувач Р<sub>5</sub> і повторно вмикається вимикач Q3. Якщо результат перевірки "Н", то пошкоджена ділянка 3—5 (ПД 3-5); якщо "В", то вимикається роз'єднувач Р<sub>6</sub> і т. д.

Замикання на землю (*earth-fault*) в розподільних мережах напругою 6 - 35 кВ хоча і не супроводжується значними за величиною струмами пошкодження, однак викликає небезпечний ненормальний режим, який необхідно швидко ліквідувати. Негайне вимкнення, при замиканнях на землю, застосовують лише в мережах, де робота з пошкодженою ізоляцією неприпустима за вимогами техніки безпеки. Це мережі вугільних, залізничних кар'єрів, торфозоробки, які живлять пересувні машини і механізми, розподільні мережі хімічних підприємств і т. п. В інших мережах застосовують тільки сигналізацію при замиканнях на землю. З надходженням сигналу черговий персонал повинен необхідними перемикальними вивести пошкоджену ділянку з роботи.

При дії захисту на сигнал від замикань на землю, місце замикання найчастіше знаходять шляхом послідовного обходу ділянок мережі і вимірюванням рівня тестового сигналу. Для пошуку використовують прилади типу "Поиск-1", "Волна", "ОМЗ-ЗВ", "Гармоника", "Зонд" і ряд інших [21]. Наприклад, процедура пошуку місця замикання на землю приладом "Поиск-1" полягає в такому. Біля виходів ліній з території підстанції прилад розташовують під однією з ліній на відстані до восьми метрів від осі лінії і підбирають чутливість приладу так, щоб вимірювана ним складова магнітної індукції від вищих гармонік у струмі замикання була максимальною. Аналогічні вимірювання роблять на інших лініях, які відходять від підстанції, на певній частоті (250 Гц).

Пошкоджену лінію визначають за максимальними показаннями результатів вимірювань на лініях. Оператор переміщується вздовж пошкодженої лінії і періодично вимірює рівень сигналу (особливо ретельно в місцях розгалуження пошкодженої лінії).

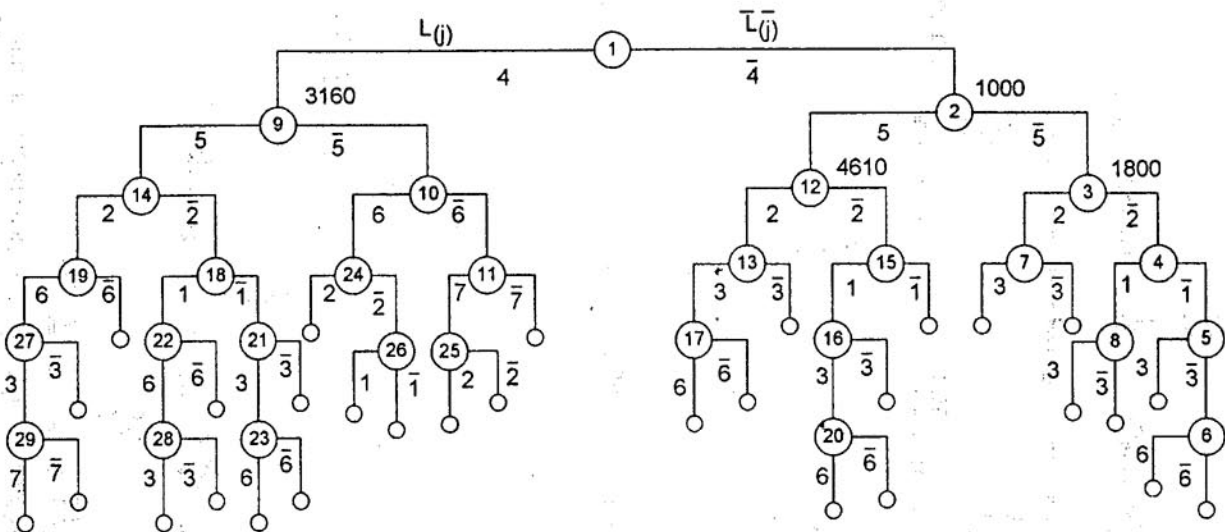


Рисунок 3.5 — Дерево розв'язків для розглянутого прикладу

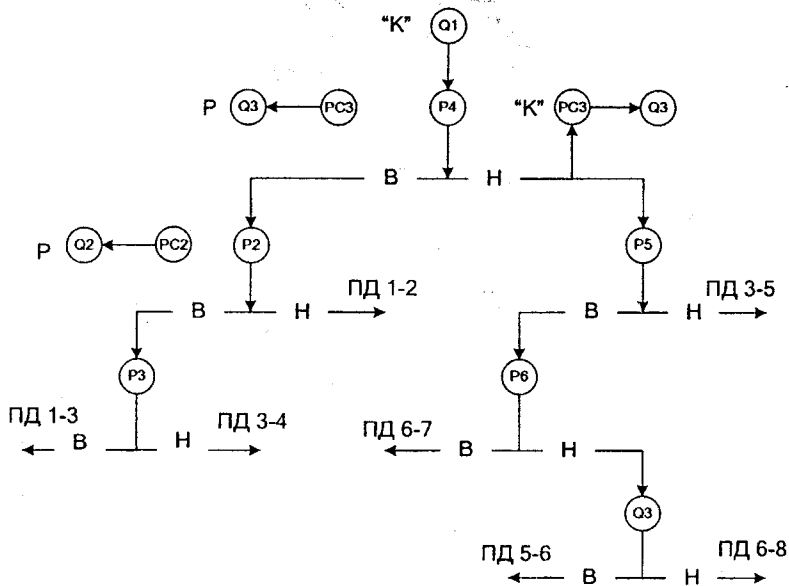


Рисунок 3.6 — Умовний алгоритм пошуку пошкодженої ділянки

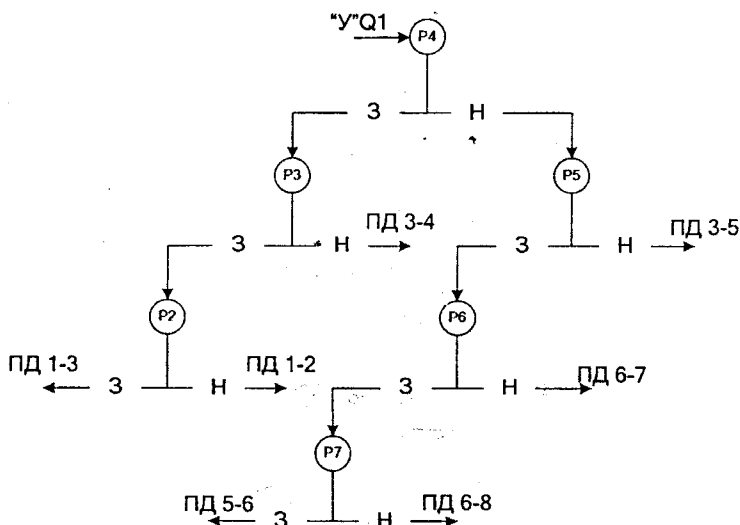


Рисунок 3.7 — Умовний алгоритм пошуку місця пошкодження при однофазному замиканні на землю: З — замикання на землю; Н — замикання на землю немає

Перехід через місце замикання визначається різким зниженням вимірюваної величини за приладом. При цьому не потрібно вимикати споживачів від джерел електричної енергії і це є основною перевагою, а основним недоліком — велика витрата часу на реалізацію цієї процедури. В окремих випадках вона взагалі не дозволяє визначити місце пошкодження. Наприклад, якщо від підстанції відходять всього дві лінії на даній напрузі, то при замиканні на одній з них струми нульової послідовності на початку ліній майже рівні між собою. Аналогічна ситуація фіксується і при великій кількості ліній, що відходять, якщо дві з них мають довжину, яка істотно перевищує довжину інших ліній. Рівень сигналу залежить також від величини перехідного опору в місці замикання, наприклад, якщо його значення перевищує 1 кОм, то розрізнити сигнал на лініях можна лише застосувавши додаткові засоби (спеціальний генератор високої частоти).

Ці недоліки можна усунути при реалізації процедури пошуку місця однофазного замикання на землю, яка передбачає попередньо визначену послідовність поділу мережі за допомогою роз'єднувачів. Задачу вибору послідовності перевірок формулюють так само, як і для випадку пошуку ділянки з міжфазним КЗ, але як критерій використовують мінімізацію часу пошуку пошкодженої ділянки лінії ( $t_{п.д} \rightarrow \min$ ) і іншу послідовність виконання операції при вимкненні роз'єднувача для кожної перевірки.

Так, для виконання будь-якої перевірки необхідно виконати 12 операцій (рис. 3.4, в), при цьому витрачається час:

$$t_j = K_{кр} I_{ДЖ-Р_j} / V_a + 6t_{оп} + 5t_c, \quad (3.32)$$

де  $I_{ДЖ-Р_j}$  відстань від джерела живлення до  $P_j$ -го роз'єднувача;

$K_{кр}$  — коефіцієнт, який враховує збільшення відстані  $I_{ДЖ-Р_j}$  порівняно з довжиною лінії.

Час пошуку місця пошкодження на виділеній ділянці:

$$t_{п.д} = 0,5 \cdot I_{діл} / V_a, \quad (3.33)$$

де  $I_{діл}$  — довжина виділеної ділянки. Недовідпуск електроенергії при виконанні перевірки  $P_j$ :

$$W_j = (I_{ДЖ-Р_j} / V_a + 6t_{оп} + 5t_c) \sum_{i=1}^{N'} P_i, \quad (3.34)$$

де  $N'$  — кількість ділянок на лінії, що від'єднуються від джерела роз'єднувачем  $P_j$ .

При виборі оптимальної послідовності перевірок безумовний алгоритм пошуку ділянки з однофазним замиканням на землю будують аналогічно, однак, для поліпшення селективних властивостей процесу зіставлення рівноцінних варіантів, використовують інші показники функції переваги. Спочатку, як і в попередньому випадку, з отриманих варіантів табл. 3.7 вибирають ті рядки, що мають найбільшу кількість одиниць (найбільш інформативні перевірки). Якщо кілька рядків мають рівні показники  $p_j$ , то виконують перевірку, на яку затрачається менше часу. Якщо і ці показники однакові, то виконують перевірку, яка характеризується меншим недовідпуском електроенергії. Коли ж і ці показники однакові, з табл. 3.7 вибирають рядок з меншим порядковим номером.

Вибір оптимальної стратегії пошуку однофазного замикання на землю розглянемо за даними прикладу рис. 3.4, а.

1. Визначимо час у годинах для виконання перевірок  $\Pi_0$ - $\Pi_7$  за (3.32):

$$t_{\Pi_0} = 0,1; \quad t_{\Pi_1} = 1,1; \quad t_{\Pi_2} = 1,1; \quad t_{\Pi_3} = t_{\Pi_4} = 1,46; \quad t_{\Pi_5} = 2,4; \\ t_{\Pi_6} = t_{\Pi_7} = 2,63.$$

2. Визначимо недовідпуск електроенергії в кіловат-годинах для кожного із станів  $S_0$ - $S_7$  розподільної мережі за рівнянням (3.34):

$$W_0 = 200; \quad W_1 = 1782; \quad W_2 = 418; \quad W_3 = 330; \quad W_4 = 1795; \quad W_5 = 2568; \\ W_6 = 1376; \quad W_7 = 815,3 \text{ кВт-год.}$$

Таблиця покриття буде мати такий самий вигляд, як і табл. 3.7, а дерево розв'язків будуватиметься відповідно до рис. 3.5. Оптимальною, в цьому випадку, буде послідовність  $\Pi_4, \Pi_5, \Pi_3, \Pi_6, \Pi_2, \Pi_7$ . Умовний алгоритм пошуку подано на рис. 3.7, він відрізняється від попереднього лише тим, що в процесі пошуку не потрібно вводити резервного джерела живлення.

Отже, запропонований метод пошуку дошкоджень у розподільних мережах можна використовувати при міжфазних КЗ і однофазних замиканнях на землю [25].

Оцінимо ефективність запропонованого методу пошуку порівняно з традиційною процедурою послідовного обходу ліній з індикацією рівня сигналу при однофазному замиканні на землю [22, 27].

Час пошуку місця пошкодження при послідовному обході в загальному випадку для  $k$ -ої ділянки можна визначити як

$$t_{\Pi, M_k} = t_{\text{ДЖ-}k} + t_{\text{від}} + t_{\text{об}k}, \quad (3.35)$$

де  $t_{\text{ДЖ-}k}$  — час, що витрачається на обхід лінії від джерела живлення до пошкодженої ділянки;

$t_{\text{від}}$  — час, який витрачається на вимірювання рівня сигналу на відгалуженнях при переміщенні від джерела живлення до пошкодженої ділянки;

$t_{об_k}$  — час обходу пошкодженої ділянки.

Значення цих величин можна обчислити за формулами:

$$t_{П.М_k} = l_{ДЖ-k} \left( V_X^{-1} + t_B / l' \right), \quad (3.36)$$

$$t_{від} = \sum_{j=1}^{n'} t_B m'_j, \quad (3.37)$$

$$t_{об_k} = 0,5 \cdot l_k \left( V_X^{-1} + t_B / l' \right), \quad (3.38)$$

де  $l_{ДЖ-k}$  — довжина шляху вздовж лінії;

$V_X$  — швидкість переміщення вздовж лінії при обході;

$t_B$  — час вимірювання рівня сигналу;

$n'$  — кількість вузлів розгалуженої лінії на довжині  $l_{ДЖ-k}$ ;

$m'$  — кількість відгалужень у вузлі ( $m' > 2$ );

$l'$  — довжина ділянки лінії, через яку здійснюється вимірювання;

$l_k$  — довжина пошкодженої ділянки.

Час пошуку місця пошкодження з урахуванням оптимальної стратегії пошуку

$$t'_{П.М_k} = t'_{П.П_k} + t_{об_k}, \quad (3.39)$$

де  $t'_{П.П_k}$  — час пошуку пошкодженої ділянки при оптимальній послідовності.

Коефіцієнт ефективності

$$K_e = \frac{\sum_{i=1}^N K_{e_i}}{N}, \quad (3.40)$$

де  $K_{e_i}$  — коефіцієнт ефективності при визначенні місця пошкодження  $i$ -ої ділянки,  $K_{e_i} = t_{П.М} / t'_{П.М}$ ;

$N$  — кількість ділянок на лінії.

Визначимо коефіцієнт ефективності (*effectiveness factor*) для розподільної мережі, зображеної на рис. 3.4, а. З урахуванням досвіду експлуатації можна прийняти  $V_X = 2,5$  км/год,  $t_B = 0,1$  год,  $l' = 0,5$  км. Тоді

при замиканні на землю на ділянці 1-3 ( $l_{1-3} = 5,6$  км,  $l_{дж-к} = 0$ )

$$t'_{П.М_{1-3}} = 0,5 \cdot 5,6 \cdot (1/2,5 + 0,1/0,5) = 1,68 \text{ год.}$$

Оптимальною є послідовність перевірок П<sub>4</sub>, П<sub>5</sub>, П<sub>3</sub>, П<sub>6</sub>, П<sub>2</sub>, П<sub>7</sub>. При пошкодженні на ділянці 1-3 необхідно виконати перевірки в такій послідовності: П<sub>4</sub>, П<sub>3</sub>, П<sub>2</sub> і здійснити обхід першої ділянки, тобто вимкнути і увімкнути роз'єднувач Р<sub>4</sub>, на це буде витрачено час  $t_{р4} = 1,46$ ; далі вимкнути і увімкнути роз'єднувач Р<sub>3</sub>, на це буде витрачено час  $t_{р3} = 6t_{от} + 5t_c = 1,1$  (год), переїхати до вузла 1 за час  $(l_{3-4}/V_x)$   $K = (5,6/20) \cdot 1,3 = 0,364$  год; вимкнути, а потім увімкнути роз'єднувач Р<sub>2</sub> за час  $t_{р2} = 1,1$  год і здійснити обхід та визначити місця пошкодження на ділянці 1-3 за час  $t_{П.М_{1-3}} = 1,68$  год, тобто  $t'_{П.М_{1-3}} = 5,704$  год. Коефіцієнт ефективності

$$K_{e_{1-3}} = \frac{t_{П.М_{1-3}}}{t'_{П.М_{1-3}}} = 0,294.$$

Аналогічно можна визначити  $K_{e_j}$  при пошуку пошкоджень на інших ділянках:

$$1-2 — K_{e_{1-2}} = 4,07/8,124 = 0,50;$$

$$3-4 — K_{e_{3-4}} = 5,44/4,24 = 1,283;$$

$$3-5 — K_{e_{3-5}} = 8,11/5,81 = 1,395;$$

$$5-6 — K_{e_{5-6}} = 15,61/6,65 = 2,34;$$

$$6-7 — K_{e_{6-7}} = 25,86/12,18 = 2,12;$$

$$7-8 — K_{e_{7-8}} = 20,31/7,33 = 2,62.$$

Коефіцієнт ефективності для лінії в цілому

$$K_e = 10,554/7 = 1,507.$$

Отже, запропонована стратегія дозволяє значно скоротити час пошуку, особливо при пошкодженні в середній частині лінії або в її кінці.

## 4 ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТА

### 4.1 Задачі прогнозування ТС об'єкта протягом його життєвого циклу

Ефективність програми діагностування суттєво зростає, коли додатково вирішується задача прогнозування зміни стану об'єкта в майбутній момент часу.

Необхідність передбачати зміну ТС об'єкта виникла тоді, коли суть складності об'єкта стала випереджати рівень якості елементів, на базі яких створювались об'єкти, а тому в більшості випадків об'єкт за часом функціонування не відповідав поставленим вимогам і необхідно було здійснювати профілактичні роботи з відновлення його роботоздатності, час проведення яких потрібно було визначити. Необхідність визначення часу безвідмовної роботи об'єкта стала особливо гострою, коли з'явились складні системи з високою вартістю відмови.

Проблеми прогнозування (*prognostication*) існують на всіх етапах життєвого циклу об'єкта: проектування, виготовлення, зберігання і експлуатації.

На стадії проектування необхідно врахувати вплив виробничих процесів і характеру деградації об'єкта в умовах експлуатації на його роботоздатність, створюючи структурні і принципіві схеми, які забезпечують задану довговічність.

На стадії виготовлення необхідно визначити якість виробу з врахуванням множини факторів і динаміки технологічних операцій.

На стадії випробування визначають час, через який виникає відмова технічного виробу за даними, отриманими за обмежений проміжок часу, значно менший нормативного часу випробування.

На стадії серійного виробництва, на основі інформації, отриманої на обмеженому інтервалі часу при випробуванні, приймають рішення про те, до якого класу належить виріб з точки зору його довговічності.

На стадії зберігання необхідно визначити зміну ступеня роботоздатності виробу, який знаходиться на зберіганні, щоб отримати інформацію про ступінь його готовності до використання.

На стадії експлуатації, прогнозуючи зміну його стану, необхідно визначити періодичність контролю його технічного стану, профілактичних робіт і відповідного регулювання і настроювання.

Проблема прогнозування має різні аспекти: філософський, фізичний, евристичний, математичний.

З погляду філософії будь-яке наукове передбачення є екстраполяцією відомих законів, матеріальних умов або типів взаємодії на область явищ, що розглядаються, які є недоступними з якихось причин для вивчення

експериментально. Точність передбачення залежить від того, який закон екстраполюється, і наскільки повно його досліджено.

В матеріальному світі існує три групи законів: 1) специфічні, або частинні, що визначають відношення між конкретними властивостями матерії, яка існує в локальних масштабах; 2) загальні, що характеризують великі групи якісно різнорідних явищ; 3) універсальні, що діють у всіх сферах матеріального світу.

До першої групи можна віднести закони фізики, хімії, біології і інших наук, які визначають порядок стійких зв'язків між конкретними властивостями тіл. До другої групи відносять, наприклад, закон збереження енергії, маси, електричного заряду і деяких інших загальних властивостей. До третьої групи входять закони причинності, єдності і боротьби протилежностей, взаємного переходу кількісних і якісних змін.

Всі ці закони мають зв'язок між собою. Залежно від типу закону, який підлягає екстраполяції, і повноти врахування конкретних умов, прогнозування може мати меншу або більшу ступінь точності. Так із закону переходу кількості в якість випливає, що на певному етапі кількісні зміни в стані і властивостях матеріальних об'єктів і явищ незворотно приведуть до корінних якісних змін. Але для того, щоб точно визначити, коли відбувається стрибкоподібна зміна і в якому вигляді вона буде здійснюватись, необхідно мати додаткову інформацію про характер розвитку процесу, його зовнішні умови, границі меж, в яких може існувати ця якість. Крім цього, результат прогнозу суттєво залежить від того, яка система розглядається — проста чи складна і до якого закону розвитку її можна віднести — однозначно детермінуючого її стан чи ймовірного закону.

З погляду фізики внутрішній механізм процесів, які передують втраті роботоздатності виробу, може бути достатньо проаналізований тільки в кожному конкретному випадку для даного типу об'єкта і його складових частин, заданих умов експлуатації і режимів роботи. Разом з тим конкретний механізм втрати роботоздатності визначається загальними фізико-хімічними процесами зміни структури, властивостей і параметрів елементів об'єкта, при цьому закономірності, які характеризують ці процеси, можуть безпосередньо слугувати моделями відмов або є основою для їх побудови.

До загальних фізичних моделей об'єкта відносять: деформацію і механічне руйнування, електричне руйнування діелектричних матеріалів, теплові руйнування елементів, електрохімічну корозію, електротермічну ерозію, радіаційні руйнування, знос поверхні виробів, забруднення (*contamination*) поверхні і матеріалів елементів.

Кожен з цих процесів окремо або разом є основою для зміни параметрів виробу, контроль і аналіз яких передус прогнозуванню.

Зрозуміло, що чим більше фізичних процесів є причиною деградації об'єкта, тим складніше буде здійснювати прогнозування.

Евристичне прогнозування є найбільш старим методом прогнозування і він застосовується повсякденно, наприклад, відома роль порад рідних, друзів і знайомих при рішенні різних проблем в нашому житті. Уже на цьому рівні процес прогнозування є складним, оскільки кінцеві рішення ми приймаємо не простим порівнянням кількості голосів "за" і "проти", а інтуїтивно враховуємо вагу кожного експерта залежно від нашого суб'єктивного уявлення про його життєвий досвід і його шляхетність по відношенню до нас.

Процеси евристичного прогнозування відносно технічних об'єктів можна поділити на декілька етапів:

- етап розробки прогнозу розвитку природничих наук, з допомогою яких складається огляд стану розробок, котрих можна здійснити за фіксований час;

- етап розробки прогнозу спеціалістами в галузі техніки, які після ознайомлення з попереднім прогнозом визначають можливі характеристики заданого технічного пристрою, які можна досягти за визначений фіксований час;

- етап обробки результатів, отриманих різними експертами незалежно один від одного.

Значною перевагою методу евристичного прогнозування є те, що він дозволяє виключити грубі помилки, особливо в області стрибкоподібної зміни величини, яка прогнозується. Разом з тим цей метод є суб'єктивним. Крім цього він є складним і трудомістким.

Математичні питання проблеми прогнозування є найбільш важливим і будуть в подальшому розглянуті більш детально.

## 4.2 Основні питання теорії прогнозування

Весь перелік питань, які розглядаються при комплексному вирішенні проблеми прогнозування, можна поділити на три групи.

До першої групи входять питання, пов'язані з аналізом та синтезом об'єкта прогнозування — визначення способу адекватного опису прогнозування і подання його у вигляді моделі, що найбільш відповідає вимогам задачі діагностики.

Основними питаннями тут є: аналіз характеру деградації об'єкта з часом, тобто аналіз деградаційних процесів; вибір простору опису зміни деградаційних процесів або інакше — вибір простору станів об'єкта і структуризація цього простору.

Для аналізу об'єкт діагностування розділяється на функціональні вузли, блоки, елементи і досліджується характер зміни їх стану (деградаційні процеси), тобто досліджуються причини, які впливають на деградацію

об'єкта, виявляються найбільш типові сторони деградаційних процесів, характер і закономірності їх зміни.

Деградаційний процес має дві основні складові — детерміновану і випадкову. Залежно від того, яка з них має перевагу, буде змінюватись характер контрольованого процесу, що буде впливати на розв'язання поставленої задачі.

Вибір простору опису зміни деградаційного процесу зводиться до вибору найбільш інформативної системи параметрів об'єкта. Критеріями вибору є такі: параметри повинні досить повно характеризувати процес, що прогнозується; сукупність вибраних величин повинна бути тісно пов'язана з характеристиками, які потрібно оцінити при прогнозуванні; параметри повинні мати необхідну чутливість до всіх змін процесу, змінюватись плавно і монотонно протягом всього періоду прогнозування. Параметри можуть бути вибрані в результаті активного чи пасивного експерименту.

Друга група розглядає питання, що пов'язані з розробкою математичних методів всіх напрямків прогнозування, оцінку їх точності і ефективності в застосуванні до об'єктів діагностування.

Основним змістом тут є математичний апарат трьох основних напрямків: аналітичного, ймовірного прогнозування і статистичної класифікації. Головне тут — вибір методу прогнозування, адекватного специфіці об'єкта, який задовольняє вимоги значення точності і ефективності.

Третя група питань пов'язана з технічною реалізацією методів прогнозування на різних стадіях створення об'єктів і автоматизації процесу прогнозування, яка може йти двома шляхами: створення спеціалізованих машин прогнозування і розробки алгоритмів прогнозування для ЕОМ.

Отже, другий напрям прогнозування складна, вона включає в себе низку різноманітних задач і потребує планування прогнозування.

Планування може бути виконане при чіткому і обґрунтованому формулюванні основних станів здійснення прогнозування: постановка задачі; уточнення об'єкта прогнозування; формулювання цілей і принципу прогнозування; визначення необхідних значень точності і ефективності прогнозу.

Дослідження об'єкта прогнозування згідно з поставленою задачею полягає у виявленні структури об'єкта, виділенні найбільш відповідальних і, в той же час, ненадійних вузлів, установлення функціональних залежностей.

Збір апріорної і поточної інформації про зміну роботоздатності об'єкта передбачає виявлення джерела інформації і оцінення його за різними критеріями. Формалізація задачі передбачає розробку методів формалізованого подання інформації. Вибір методу і розробка головного алгоритму полягає у виборі оптимального методу, який найбільш повно

задовольняє вимоги задачі, оцінення точності і ефективності методу. Розробка робочих алгоритмів передбачає розробку алгоритмів окремих елементів, навчання за апріорною інформацією. Проблема моделювання включає перевірку роботи всього прогнозувального алгоритму на основі моделювання відомих в минулому деградаційних процесів та коректування головного алгоритму. Далі здійснюється безпосередньо прогнозування і видача результатів. Визначають область використання результатів прогнозу для діагностики згідно з поставленою задачею, вводять корективи, приймають рішення про стан об'єкта і проведення повторних прогнозів.

Різноманіття об'єктів, що діагностуються, передбачає множини процесів, що діагностуються, характер яких можна визначити з різних точок зору, а їх прогнозування може ґрунтуватися на різних принципах і здійснюватися різними методами з використанням того чи іншого математичного апарату. Однак при всій множині підходів і методів здійснення прогнозування можна установити загальні принципи отримання результату, які будуть об'єднувати цілі групи можливих методів прогнозування:

- результат прогнозу отримують в тій же розмірності, що і контрольовані параметри, а прогнозування зміни процесу має мету отримати величину контрольованого параметра, який характеризує протікання процесу з часом;

- результат прогнозу визначається як ймовірність виходу (невиходу) характеристик контрольованого процесу за раніше визначені межі;

- в результаті прогнозу контрольований процес може бути віднесений до того чи іншого класу раніше охарактеризованих процесів за критерієм роботоздатності або довговічності.

У всіх цих випадках підхід до прогнозування буде принципово відрізнятися, причому кожний підхід являє собою цілий напрям.

Поставимо задачу прогнозування з позиції першого напряму. Нехай контрольований процес характеризує стан об'єкта діагностики, поданий у вигляді багатовимірної векторної функції  $\bar{\xi}(t) = \xi_1(t), \dots, \xi_k(t)$ , яка спостерігається (дискретного або неперервно) в період часу від  $t_0$  до  $t_n$  в області  $T_1$  (рис. 4.1) і відомі значення функцій  $\bar{\xi}(t_0), \bar{\xi}(t_1), \dots, \bar{\xi}(t_n)$  у відповідні моменти часу  $t_0, t_1, \dots, t_n \in T_1$ . Необхідно за відомими значеннями  $\bar{\xi}(t_i)$  визначити величину цієї функції  $\bar{\xi}(t_{n+1}), \dots, \bar{\xi}(t_{n+m})$  в моменти часу  $t_{n+1}, \dots, t_{n+m} \in T_2$ , де  $T_2$  — область майбутніх моментів часу. Ця задача може вирішуватися як для вектора  $\bar{\xi}(t)$ , так і для його координат ( $\xi_S(t)$ ).

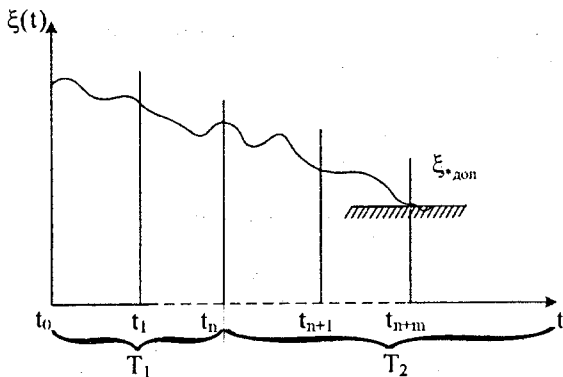


Рисунок 4.1 — Прогнозування зміни величини контрольованого параметра  $\bar{\xi}(t)$

Така постановка задачі буде допустима, якщо процес буде інерційний з часом і всі зміни, що були в минулому, поступово накопичуються, тобто існує незворотність процесу деградації.

Ідеальним випадком розв'язку поставленої задачі є адекватний опис зміни функції  $\bar{\xi}(t)$  аналітичним виразом. В цьому варіанті розглянута задача може бути розв'язана різними методами, які називають методами аналітичного прогнозування.

При визначенні ймовірності виходу (невиходу) контрольованого процесу за установлені межі задача прогнозування може бути сформульована так. Нехай отримані значення параметрів  $\xi_S$ ,  $S=1,2 \dots k$  в моменти часу  $t_i$ ,  $i=0,1 \dots n$  і в кожному часовому перерізі стан об'єкта повністю характеризується функцією розподілу  $F_i(\bar{\xi})$  за відомими значеннями  $\xi_S(t_i)$ ,  $\bar{\xi}(t_i)$ ,  $F_i(\bar{\xi}_i)$ ;  $t_i \in [t_0 - t_n]$ . Необхідно обчислити ймовірність збереження роботоздатності об'єкта

$$F_{n+j}(\bar{\xi}^*) = P\{\bar{\xi}(t_{n+j}) < \bar{\xi}^*\} = \int_{\bar{\xi}}^{\infty} f_{t_{n+j}}(\bar{\xi}) d\bar{\xi}, \quad (4.1)$$

де  $\bar{\xi}^*$  — допустиме значення функції  $\bar{\xi}(t)$ ;

$f_{t_{n+j}}(\bar{\xi})$  — щільність розподілу значення  $\bar{\xi}(t)$  в часовому перерізі  $t$  в області  $[t_{n+1} - t_{n+m}]$  для значень  $t_{n+j}$ ,  $j=1,2 \dots m$  (рис. 4.2) з математичним сподіванням  $m_{\xi}(t)$  і дисперсією  $\sigma_{\xi}^2(t)$ .

Подібна задача вирішується різноманітними методами, які називаються методами імовірнісного прогнозування.

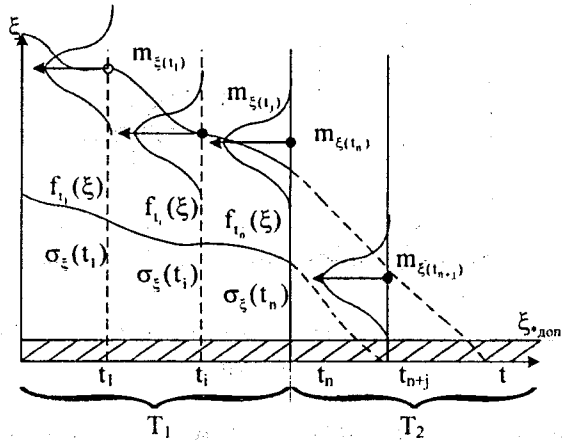


Рисунок 4.2 — Прогнозування ймовірності збереження роботоздатності об'єкта

Третій напрям в теорії прогнозування визначається як статистична класифікація (СК) і допускає таке формулювання задачі. Нехай в момент  $t_0$  або в обмежений початковий період часу отримані параметри контрольованого процесу  $\xi_1, \xi_2 \dots \xi_k$ , які характеризують функції  $\bar{\xi}_0$ . Необхідно за сукупністю параметрів  $\{\xi_S\}_0, S = 1, 2 \dots k$ , координат вектора функції  $\bar{\xi}_0$  прийняти рішення про належність процесу до того чи іншого класу  $R^\lambda, \lambda = 1, 2 \dots m$ ; де  $R^\lambda$  — може бути параметричним  $R_\xi^\lambda = \xi^0 \div \xi^1; R_\xi^2 = \xi^1 \div \xi^2$  або часовим  $R_T^1 = 0 \div T; R_T^2 = T \div 2T$ , де (рис. 4.3)  $[\xi^0 - \xi^1], [\xi^1 \div \xi^2] \dots i[0 - T], [T + 2T]$  вибрані інтервали в полі допуску і на часовій осі. Множина і розмір класів визначається специфічними особливостями об'єкта діагностування. Вони об'єднують об'єкти, які мають ідентичні показники станів, сукупність властивостей і таке інше (рис. 4.3). Класи  $R^\lambda$  є зразками, еталонами. Задача полягає в порівнянні об'єкта, що діагностується, з еталоном і прийнятті рішення.

В загальному випадку блок прогнозування може складатись із схеми розпізнавання (класифікації) СР (рис. 4.4) і схеми навчання (СН). Схема розпізнавання має змінні параметри і призначена для прийняття логічного розв'язку, який видається на виході схеми, відповідає вхідній інформації про роботоздатність конкретного об'єкта. Схема навчання змінює

параметри схеми розпізнавання згідно з відношенням між сукупністю параметрів, поданих на вхід схеми, і розв'язком, який бажано при цьому отримати. Процес навчання екстраполяційними зв'язками складається з оптимальної зміни цих параметрів.

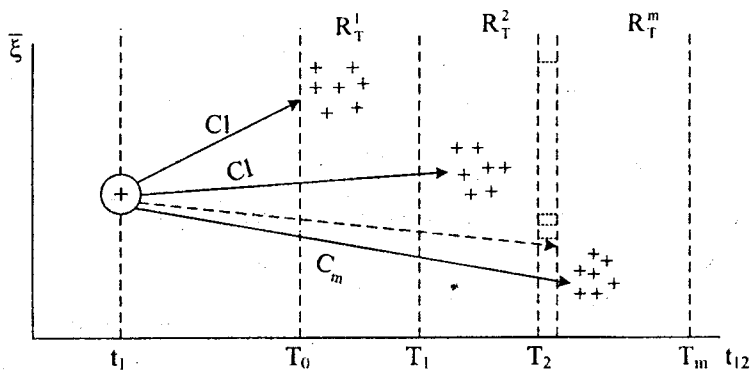


Рисунок 4.3 — Статистична класифікація контрольованих об'єктів

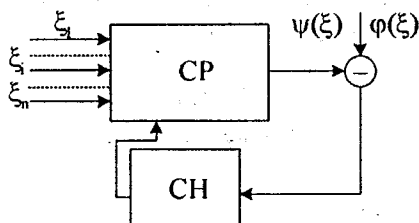


Рисунок 4.4 — Схема процесу класифікації

На основі наведеної схеми можна побудувати досить загальну модель прогнозування. Нехай необхідно класифікувати об'єкти на два класи  $R_T^1$  і  $R_T^2$ , які сформовані за критерієм довговічності або ступеня роботоздатності. Коли на вхід моделі потрапляє сукупність параметрів  $\{\xi\}$  об'єкта або, іншими словами, вектор стану об'єкта  $\bar{\xi}$ , на виході схеми розпізнавання утворюється  $\bar{Y} = \Psi(\bar{\xi})$ , який належить до  $R_T^1$  або  $R_T^2$ . Бажаний вихідний вектор, що відповідає  $\bar{\xi}$ , задається зовні "вчителем" і позначається як  $\bar{Z} = \Phi(\bar{\xi})$ . Схема навчання змінює параметри розпізнавання так, щоб  $\bar{Y}$  збігся з  $\bar{Z}$  максимальну кількість разів.

Процес завдання послідовності об'єктів прогнозування, що подаються на вхід моделі, і отримання відповідної відповіді на виході називають навчанням моделі або апіорним досвідом моделі. Апіорний досвід можна описати двома сумісними ймовірностями:

$$\left. \begin{aligned} P(\bar{\xi}_l; Z_l \in R_T^1) &= P(\bar{\xi}_l)P(Z_l = R_T^1 / \xi_l); \\ P(\bar{\xi}_l; \bar{Z}_l \in R_T^2) &= P(\bar{\xi}_l)P(Z_l = R_T^2 / \xi_l); \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

де  $(l = 1, 2, \dots, N)$ ;  $P(\bar{\xi}_l)$  — ймовірність появи  $\bar{\xi}_l$ ;

$P(\bar{\xi}_l; Z_l \in R_T^{1,2})$  — співпадіння ймовірності появи  $\bar{\xi}_l; Z_l \in R_T^{1,2}$ ;

$P(Z_l = R_T^{1,2} / \xi_l)$  — умовна ймовірність появи  $\bar{Z}_l \in R_T^{1,2}$ , якщо спостерігається об'єкт якому, належить  $\bar{\xi}_l$ .

Згідно з умовою (4.2) вхідному вектору  $\bar{\xi}_l$  на виході схеми розпізнавання буде відповідати ситуація  $\bar{\xi}_l \in R_T^1$  з ймовірністю похибки  $P(\bar{\xi}_l; Z_l \in R_T^2)$  або ситуація  $\bar{\xi}_l \in R_T^2$  з ймовірністю похибки  $P(\bar{\xi}_l; Z_l \in R_T^1)$ . Тоді вирішальне правило, яке забезпечує мінімум похибки розпізнавання для кожного об'єкта прогнозування, буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_l &\in R_T^1 \text{ для } \delta_l > 0; \\ \bar{Y}_l &\in R_T^2 \text{ для } \delta_l < 0, \end{aligned}$$

де  $\delta_l = P(\bar{\xi}_l; Z_l \in R_T^1) - P(\bar{\xi}_l; Z_l \in R_T^2)$ .

Коли  $\delta_l = 0$  приймають рішення  $Z_l \in R_T^1$  або відмовляються від розпізнавання. Вирішальне правило визначає алгоритм дій зі змінними параметрами об'єкта прогнозування, який дозволяє вирішувати, до якого класу образів він відноситься.

Вимога мінімуму похибки розпізнавання або мінімуму середнього ризику  $Q(g, \delta)$  при деяких допущеннях приводить до виразу, який називають відношенням правдоподібності

$$L(\bar{\xi}) = \frac{f(\bar{\xi} / R_T^1)}{f(\bar{\xi} / R_T^2)} = \frac{P(\bar{\xi}_l; Z_l \in R_T^1)}{P(\bar{\xi}_l; Z_l \in R_T^2)} < \varphi[\Theta(g_\lambda, \delta_l)], \quad (4.3)$$

де  $f(\bar{\xi} / R_T^{1,2})$  — умовна щільність розподілу ймовірності того, що  $\bar{\xi}$  відноситься до  $R_T^{1,2}$ ;

$g_{1,2}$  — апіорна ймовірність класів  $R_T^{1,2}$ .

Якщо аналітичний вигляд функції  $f(\bar{\xi}/R_T^{1,2})$  відомий, то вирішальне правило, має відносно простий вигляд. Величину  $\Theta(g, \delta)$  визначають як математичне сподівання функції втрат

$$\Theta(g, \delta) = \sum_{i=1}^m \sum_{\lambda=1}^m \int_{\bar{\xi}} \delta(d_i / \bar{\xi}) g_{i\lambda} W_{i\lambda} f(\xi / R^\lambda) d\bar{\xi}, \quad (4.4)$$

де  $d_i$  — рішення, яке визначає, що об'єкт належить до класу  $R_i$  і приймається воно із числа можливих  $D = (d_0, d_1, \dots, d_m)$ ;

$d_0$  — рішення, що позначає відмову від класифікації;

$W(d_i, R^\lambda) \equiv W_{i\lambda}$  — вагова функція (функція втрат), що являє собою втрати, викликані тим, що прийнято рішення  $d_i$ , в той час як дійсне рішення  $d_\lambda$  ( $W_{i\lambda} > W_{0\lambda}, W_{\lambda\lambda}, i \neq \lambda \neq 0$ ).

Залежно від способу опису об'єкта прогнозування, виду моделі прогнозування, складності вирішального правила і інших факторів, математичний апарат статистичної класифікації може бути дуже різноманітним.

#### 4.3 Методи математичного прогнозування

Математичне прогнозування полягає у використанні даних про деякі характеристики прогнозованого об'єкта, обробці цих даних математичними методами, отриманні залежностей, які пов'язують об'єкти з часом або з іншими змінними і обчисленні за допомогою знайдених залежностей характеристик об'єкта на даний момент часу.

Весь процес можна поділити на такі етапи:

- збір і підготовка вхідних даних (статистика);
- збір і обґрунтування математичної моделі об'єкта, що прогнозується;
- обробка статистичних даних для визначення невідомих параметрів моделі і залежностей зв'язку характеристик об'єкта, зміна яких прогнозується з часом;
- власне прогнозування, тобто обчислення значення характеристик об'єкта, які нас цікавлять в заданий момент часу.

Процеси, що досліджуються, можуть бути неперервними або дискретними, а тому і повинна бути відповідна оцінка.

Збір і підготовка вхідних даних супроводжуються впливом різних факторів, які спотворюють дійсну величину процесу, що прогнозується, тому дуже важливо забезпечити високу точність спостереження характеристик процесу. Математичні методи прогнозування являють

собою розімкнену систему, на вхід якої потрапляють статистичні дані щодо процесу, а на виході виявляється прогноз його параметрів. Оскільки система розімкнена, то всі похибки на її вході транслюються на вихід. В зв'язку з цим підготовка вхідних даних потребує високого рівня кваліфікації дослідника.

Важливим є і інтервал спостереження. Інтервал між спостереженням за процесом, що прогнозується, визначається залежно від характеру процесу та вартості інтервалу. Іноді оптимальну величину інтервалу можна знайти, використовуючи теорію дослідження операцій.

Другий етап процесу прогнозування полягає у виборі і обґрунтуванні моделі процесу, що прогнозується. Важливо в даному випадку щоб модель, прийнята на основі спостережень за цим явищем, не змінювалась на ділянці прогнозування.

Третій етап процесу прогнозування передбачає очищення статистичних даних від спотворюючих факторів і визначення залежностей, за допомогою яких здійснюється прогнозування характеристик.

При власному прогнозуванні важливою є форма прогнозу. Прогноз може бути у вигляді точки або інтервалу часу, на якому здійснюється прогноз, оскільки він визначає наші дії (наприклад, період проведення обслуговування).

Зупинимось більш детально на виборі математичної моделі. В загальному вигляді задача прогнозування формулюється так: маємо залежність  $y = f(\bar{x})$  деякої величини від вектора  $x$  (в яку входить і час  $t$ ) в області  $S = (\bar{x} \in S)$ . Потрібно визначити значення  $y$ , що відповідає вектору  $\bar{x}^*$  який не належить області  $S$ , тобто  $\bar{x}^* \notin S$ .

Найчастіше при математичному прогнозуванні використовують модель виду

$$y = f(\bar{a}, \bar{x}) + \varphi(\bar{b}, \bar{x}) \cdot \eta, \quad (4.5)$$

де  $f(\bar{a}, \bar{x})$  і  $\varphi(\bar{b}, \bar{x})$  деякі детерміновані функції;

$\bar{x}$  — вектор деяких відомих параметрів, в тому числі і  $t$ ;

$\bar{a}$  і  $\bar{b}$  — вектори невідомих параметрів, які необхідно визначити;

$\eta$  — випадковий процес з нульовим математичним сподіванням.

В різних практичних задачах для  $\eta$  можуть бути і додаткові умови:

- вважається що  $\eta$  завжди має дисперсію;

- вважають, що  $\eta$  має нормальний розподіл;

- вважають, що  $\eta$  — некорельований випадковий процес.

Функція  $y = f(\bar{a}, \bar{x})$  є детермінованою основою прогнозованої величини  $y$ ; функція  $\varphi(\bar{b}, \bar{x})$  характеризує обмеження, які накладаються на дію

перешкоди  $\eta$ . Якщо  $\varphi(\bar{b}, \bar{x}) \equiv 1$ , то такого роду дію перешкоди називають адитивною і перешкода складається з детермінованої основи

$$y = f(\bar{a}, \bar{x}) + \eta. \quad (4.6)$$

Остання модель є найбільш розповсюдженою при розв'язанні задач прогнозування в практичних задачах; якщо  $\varphi(\bar{b}, \bar{x}) \equiv 0$ , то модель стає детермінованою

$$y = f(\bar{a}, \bar{x}). \quad (4.7)$$

На практиці також зустрічаються моделі детерміновані, основа яких знаходиться під дією збурення

$$y = f(\bar{a}, \bar{x})\varphi(\bar{b}, \bar{x})^\eta. \quad (4.8)$$

В тих випадках, коли  $y^* = f(\bar{a}, \bar{x}) > 0$ ,  $\varphi(\bar{b}, \bar{x}) > 0$  модель (4.8) можна звести до моделі (4.5) логарифмуванням  $\ln y = \ln \varphi(\bar{a}, \bar{x}) + \eta \ln \varphi(\bar{b}, \bar{x})$  або

$$y^* = f^*(\bar{a}, \bar{x}) + \varphi^*(\bar{b}, \bar{x}) \cdot \eta. \quad (4.9)$$

В загальному випадку функцію  $y = f(\bar{a}, \bar{x})$ , яка характеризує детерміновану основу, можна подати у вигляді полінома  $n$ -го ступеня

$$f(\bar{a}, t) = \sum_{t=0}^n a_i t^i. \quad (4.10)$$

В даному поліномі необхідно визначити постійні коефіцієнти  $a_i$ , тобто ступінь свободи моделі, яка в даному випадку дорівнює  $n+1$ .

Оцінка детермінованої основи процесу запишеться у вигляді

$$f(a, t) = \sum_{t=0}^n (a_i t^i); \quad (4.11)$$

а з прогнозом в момент  $t_n + \Delta t$  у вигляді

$$f(a, (t_n + \Delta t)) = \sum_{i=0}^n a_i (t_n + \Delta t)^i. \quad (4.12)$$

В даному випадку важливим є вибір степеня полінома. В деяких випадках використовують результати аналізування фізики процесу. В тому

випадку, коли процес є детермінованим, степінь полінома можна визначити за різницями, наприклад, для полінома

$$y = f(\bar{a}, t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i \quad (4.13)$$

перша різниця  $\Delta_t y = y(t) - y(t-1)$ ; друга різниця

$$\begin{aligned} \Delta_t^2 y &= \Delta_t y(t) - \Delta_t y(t-1) = \\ &= y(t) - y(t-1) - y(t-1) + y(t-2) = y(t) - 2y(t-1) = y(t-2) \text{ і т. д.} \end{aligned}$$

Для полінома степеня  $n$  має місце рівність нулю  $(n+1)$ -ої різниці, тобто  $\Delta^{n+1} y = 0$ .

В більшості випадків детермінована основа спотворена перешкодою  $\eta$ , тому намагання вибрати степінь полінома таким чином, щоб крива

$$y = \sum_{t=0}^n a_t t^i \quad (4.14)$$

пройшла через всі точки, може призвести до незадовільних результатів прогнозу, оскільки ми не можемо послабити вплив перешкоди. Наприклад, на рис. 4.5 детермінована основа процесу є константа, що спотворена перешкодою  $\eta$ . Якщо ми за результатами спостережень в моменти часу  $t_1, t_2, t_3$  і значеннями  $y_1, y_2, y_3$  застосували поліном другого порядку

$$f(\bar{a}, t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2, \quad (4.15)$$

то із рисунка видно, до чого може призвести прогноз детермінованої основи, наприклад, в точці  $t_4$ .

Експоненційні моделі характеризують процеси, в яких швидкість зміни параметра, що прогнозується, пропорційна величині цього параметра  $f(\bar{a}, t) = a \cdot b^{et}$ .

Особливістю експоненційної моделі є те, що відношення будь-яких двох пар рівновіддалених відліків є постійною величиною, тобто  $ab^{e(t+1)} / ab^{et} = b^e$ , а тому наступне значення, яке описується попереднім виразом, буде дорівнювати попередньому, помноженому на деяку сталу величину.

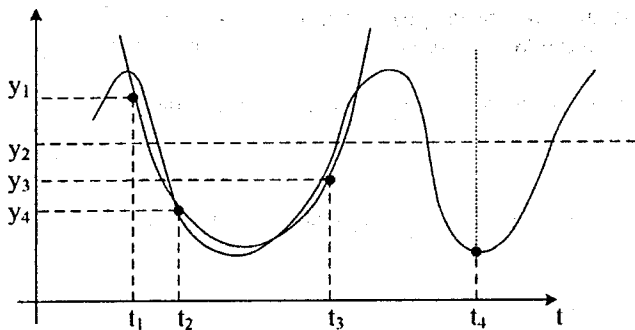


Рисунок 4.5 — До вибору апроксимувального полінома

Як точний прогноз значення детермінованої основи процесу в момент часу  $t_n + \Delta t$  в даному випадку можна використати таке рівняння

$$f(a, t_n + \Delta t) = a \cdot b^{e(t_n + \Delta t)} = a \cdot b^{e t_n} \cdot b^{e \Delta t}. \quad (4.16)$$

Процеси, для яких характерною є періодична зміна параметра, що прогнозується, можуть характеризуватись тригонометричними моделями. В загальному вигляді таку модель можна подати рядом Фур'є

$$f(\bar{a}, t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kt + b_k \sin kt), \quad (4.17)$$

якщо задано інтервал розкладення  $-\pi \leq t \leq \pi$  і для дійсної функції  $f(\bar{a}, t)$  існує інтеграл  $\int_{-\pi}^{\pi} |f(\bar{a}, \tau)| d\tau$ , то коефіцієнти розкладення визначають за формулами Ейлера - Фур'є

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\bar{a}, \tau) \cos k\tau d\tau; \\ b_k &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\bar{a}, \tau) \sin k\tau d\tau; K = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

Якщо задано інтервал розкладення  $-T/2 < t < T/2$ , то ряд Фур'є, створений дійсною функцією  $f(\bar{a}, t)$ , для якого існує інтеграл  $\int_{-T/2}^{T/2} |f(\bar{a}, \tau)| d\tau$ , є нескінченний тригонометричний ряд

$$f(\bar{a}, t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega_0 t + b_k \sin k\omega_0 t), \quad (4.19)$$

де  $\omega_0 = 2\pi/T$

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\bar{a}, \tau) \cos k\omega_0 \tau \cdot d\tau, \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\bar{a}, \tau) \sin k\omega_0 \tau \cdot d\tau; k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

Якщо вибрали інтервал розкладення  $(a, a+T)$ , то інтеграли (4.20) необхідно брати між  $a$  і  $a+T$ .

Отже, на ділянці спостереження буде стояти задача гармонічного аналізу — визначення коефіцієнтів  $a_k$  і  $b_k$ , а прогнозування — задача гармонічного синтезу, тобто визначення значення функцій за заданими коефіцієнтами.

Особливим видом моделей, що описують детерміновану основу процесу, є регресійні моделі, до яких невідомі коефіцієнти, які потрібно визначити, входять лінійно

$$f(\bar{a}, \bar{x}) = \sum_i a_i x_i. \quad (4.21)$$

Складовими вектора  $\bar{x}$  можуть бути не тільки відомі величини, але і різний набір невідомих функцій, значення яких нам відомі як на ділянці спостереження за процесом, що прогнозується, так і на ділянці прогнозу, тобто

$$f(\bar{a}, \bar{x}) = \sum_i a_i \varphi_i(\bar{x}). \quad (4.22)$$

Види функцій  $\varphi_i(\bar{x})$  можна визначити як на основі фізичного аналізування процесу, так і при використанні канонічних уявлень про випадкові процеси.

В тих випадках, коли в результаті спостережень отримано криву розподілу ймовірностей (рис. 4.6) і характеристики розподілу практично не змінюються в перерізах простору спостереження, доцільно використовувати ймовірнісні моделі. Характеристики процесу, яку ми хочемо спрогнозувати при використанні ймовірнісних моделей, можна описати деякою величиною, яка набуває значень, обмежених деякими межами. Наприклад, нехай задано інтегральний закон розподілу. Тоді можна за кривою визначити ймовірність того, що в результаті спостереження контрольована величина буде меншою раніше визначеного числа та ймовірність того що  $y < y_2$  дорівнює  $P_2$ ;  $P_2 = P(y < Y_2)$

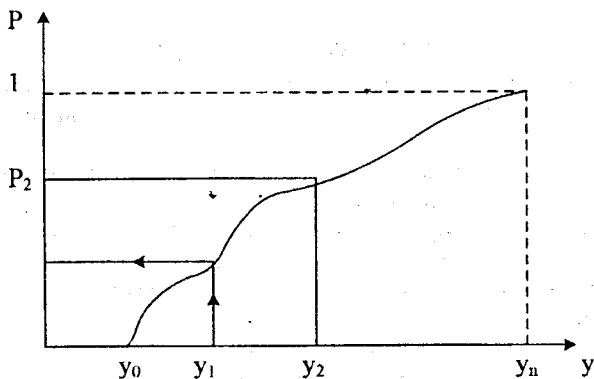


Рисунок 4.6 — Крива розподілу ймовірностей

Далі у можна охарактеризувати величиною, яка знаходиться в межах  $y_0 \leq y \leq y_2$  оскільки  $P(y_0 < y_2) = 0$  і  $P(y < y_n) = 1$ . В більшості випадків отримані в результаті спостереження результати стандартних математичних залежностей можна подати у вигляді диференційного закону розподілу. Серед них частіше використовують розподіли: нормальний, рівномірний, експоненційний, Пуассона та інші диференційні закони. Кожен з них характеризується певними параметрами.

Наприклад, нормальний закон характеризується такими параметрами як математичне сподівання та середньоквадратичне відхилення. Якщо емпіричний розподіл відрізняється від стандарту, то ймовірнісні моделі можна використовувати при таких допущеннях: розподіл ймовірностей прогнозованої події змінюється з часом, однак ця зміна така, що нею можна знехтувати на відрізку часу від моменту, коли прогнозування виконане, до моменту, коли його результати можна спостерігати; кореляція між величинами прогнозованої величини, що спостерігається або зовсім відсутня чи настільки мала, що дуже складно судити про

величину, яка прогнозується в момент часу  $(t+1)$ , спостерігаючи її в момент  $t$ .

#### 4.4 Оцінення точності і ефективності методів прогнозування

Питання точності прогнозування є специфічними, оскільки абсолютно точного прогнозу отримати не можна. Причиною цього є велика множина факторів, які впливають на процес. В загальному випадку величина похибки залежить від трьох основних причин:

- від глибини вивчення процесу діагностування;
- від кількості і якості апіорної і поточної інформації про об'єкт, який контролюється;
- від вибраного методу прогнозування.

У випадку розв'язання конкретних задач похибка визначається різними способами, але можна визначити її загальні ознаки. Похибку прогнозування можна оцінити як емпіричним, так і аналітичним шляхом.

Емпіричний шлях визначення можна здійснити двома методами:

- 1) за апіорною інформацією за сукупністю статистичних даних, отриманих в процесі лабораторних досліджень або експлуатації;
- 2) за поточною інформацією, яка передбачає обчислення попереднього прогнозу на кожному кроці контролю і екстраполювання отриманого ряду похибок на майбутнє.

Перший метод використовується при виконанні трьох умов:

- а) коли ми маємо інформацію про зміну функції роботоздатності з часом для більшої кількості виробів, які нас цікавлять;
- б) якщо наші виробы знаходяться досить довго в стані експлуатації або лабораторних досліджень, які визначають їх фактичну довговічність;
- в) наявність прогнозу зміни стану за параметрами в заданій області  $T_1$  до їх виходу за допустимі межі.

Отже, при прогнозуванні  $\xi(t)$  для заданої області  $T_1$  на  $j = 1, 2 \dots m$  кроків вперед і порівнянні дійсного  $\xi_g(t_{n+j})$  і прогнозованого  $\xi_{\Pi}(t_{n+j})$  значень отримаємо відносну величину похибки  $\xi_i$

$$\xi_i = \frac{[\xi_g(t_{n+j}) - \xi_{\Pi}(t_{n+j})]}{\xi_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (4.23)$$

де  $\xi_{\text{ном}}$  — номінальна або початкова величина параметра  $\xi(t)$ , що досліджується.

Дослідження множини кривих ідентичних параметрів дозволяє отримати найбільш стійкі (усереднені) величини похибок на кожному

інтервалі часу прогнозування, тобто отримати статистичну величину похибки.

Якщо отримано статистичні величини  $\xi_i$ , то можна одночасно вирішити питання визначення оптимальної кількості і якості поточної інформації при прогнозуванні індивідуальних кривих, а також вибору прогнозувального виразу, для якого виконується умова  $\varepsilon_1 = \min$ ,  $\varepsilon_2 = \min \dots \varepsilon_m = \min$ .

Другий метод використовують при відсутності даних про похибки на кожному кроці прогнозування. В цьому випадку відома область  $T_1$  розбивається на частини (більше трьох). Визначають компоненти прогнозувального виразу  $F(t)$ , а в наступній частині області, наприклад, в четвертій, за результатами прогнозу знаходять ряд похибок  $\varepsilon(t_n)$ ,  $\varepsilon(t_{n+1}) \dots$  і цей процес продовжують до моменту  $t_{(n+T)}$ . Це можна здійснити завдяки перенесенню початку прогнозування всередину області  $T_1$ , зокрема, в четверту частину області.

Для визначення похибки аналітичним шляхом можна дати тільки загальну ідею, оскільки для кожного конкретного випадку будуть свої методи визначення похибок. Цей шлях дозволяє отримати похибку методу прогнозування, яка залежить і від якості інформації. Ідея полягає в тому, що ряд значень параметрів  $\xi(t_0)$ ,  $\xi(t_1) \dots \xi(t_n)$ , отриманих за результатами контролю, подають як

$$\xi_0 + \Delta\xi_0, \xi_1 + \Delta\xi_1 \dots \xi_n + \Delta\xi_n + \Delta\xi_n, \quad (4.24)$$

де  $\Delta\xi_i$  — похибка контролю.

В результаті коефіцієнти виразу, що є прогнозувальними, будуть обчислені з похибкою  $a_p + \Delta a_p \dots$ , при цьому величину  $\xi(t_{n+j})$  також буде отримано з похибкою  $\Delta\xi_{n+j}$ , яка залежить від якості ряду (4.24) і вибраного методу прогнозування.

При прогнозуванні за допомогою ймовірнісних нерівностей точність результатів можна не оцінювати, оскільки вона є невисокою.

Нерівності можна використати для наближених розрахунків, оскільки вони дають нижню границю ймовірності, наприклад, границю втрати роботоздатності, якої не може бути ні при якому законі розподілу.

При прогнозуванні зміни відомої функції розподілу довірчі інтервали, що визначають точність розв'язку задачі, можуть бути визначені екстраполяцією функцій  $m_\xi(t)$  і  $\sigma_\xi(t)$ , де  $m_\xi(t)$  — прогноз середнього часу "життя" виробу (часу відмови або довговічності),  $\sigma_\xi(t)$  — прогноз міри розсіювання  $\sigma$ .

Для оцінення похибок прогнозування при використанні ймовірнісних методів можна рекомендувати таке. Нехай в перерізах  $t_{n-1}$  і  $t_n$  маємо величину контрольованого параметра  $\xi(t)$ , розподіл якого, що виникає за рахунок впливу випадкової складової, підпорядкований нормальному закону. Вимірюванням можна зареєструвати одну із величин  $\xi(t_{n-1})$  і  $\xi(t_n)$  (рис. 4.6), які розташовують в межах  $6\sigma_\xi$ . Виділимо декілька зон, що визначають величину похибки прогнозу. Як прогнозувальний вираз застосуємо лінійну залежність. При цьому можуть бути такі випадки.

1. Якщо в результаті вимірювання виявлено, що  $\xi(t_{n-1}) = m_\xi(t_{n-1})$ ;  $\xi(t_n) = m_\xi(t_n)$ , то вважають, що випадкова складова не впливає на результат контролю і, практично, похибкою, яка з'являється за рахунок випадкових змін, можна знехтувати; при цьому обчислене значення довговічності дорівнює  $T_{mo}^*$  (рис. 4.7).

2. При  $\xi(t_{n-1}) = m_\xi(t_{n-1}) + 3\sigma_\xi$ ;  $\xi(t_n) = m_\xi(t_n) - 3\sigma_\xi$  отримаємо максимальну від'ємну похибку  $(-\sigma_\tau^*)$  і довговічність дорівнюватиме  $T^* - \epsilon_{\tau^*}$ . Коли  $\xi(t_{n-1}) = m_\xi(t_{n-1}) - 3\sigma_\xi$ ;  $\xi(t_n) = m_\xi(t_n) + 3\sigma_\xi$ , отримаємо максимальну додатну похибку  $(+\sigma_\tau^*)$  і довговічність визначається як  $T^* + \epsilon_{\tau^*}$ . Зона  $(T^* - \epsilon_{\tau^*}^{3\sigma}) \div (T^* + \epsilon_{\tau^*}^{3\sigma})$  охоплює весь діапазон можливих максимальних похибок. Цей діапазон можна поділити на ряд інтервалів і оцінити ймовірність появи похибки тієї чи іншої величини. Так, наприклад, ймовірність появи похибки більшої або такої, що дорівнює  $\epsilon_{\tau^*}^{3\sigma}$ , дорівнює  $0,9 \cdot 10^{-5}$ .

3. При

$$\begin{cases} \xi(t_{n-1}) = m_\xi(t_{n-1}) \pm 2\sigma_\xi; \xi(t_n) = m_\xi(t_n) \mp 2\sigma_\xi; \\ \xi(t_{n-1}) = m_\xi(t_{n-1}) \pm \sigma_\xi; \xi(t_n) = m_\xi(t_n) \mp \sigma_\xi \end{cases} \quad (4.25)$$

похибка прогнозу відповідно буде такою:  $\mp \epsilon_{\tau^*}^{2\sigma}$  і  $\mp \epsilon_{\tau^*}^{2\sigma}$ . Ймовірність таких похибок відповідно буде 0,00208 і 0,1, тобто похибка  $\epsilon \geq \epsilon_{\tau^*}^{2\sigma}$  фактично виключається, а похибка  $\epsilon \geq \epsilon_{\tau^*}^{2\sigma}$  порівняно рідко виникає.

Запропонований підхід до оцінювання вірогідності можливий і при більш складних закономірностях зміни  $\xi(t)$  і інших законах розподілу  $f_1(\xi)$ , що дозволяє виділити найбільш ймовірні величини похибок прогнозу.

Основною характеристикою якості роботи розпізнавальної системи у випадку статистичної класифікації є ймовірність хибного розпізнавання,

або, якщо врахувати ціну похибки, ризик розпізнавання, який ми очікуємо.

При використанні байєсового правила розв'язання при розгляді двох класів очікуваного ризику  $R = W_{12}g_2P_{12} + W_{21}g_1P_{21} + W_0P_0$ , де  $W_{12}, W_{21}, W_0$  — "вартість" відповідної похибки;  $g_2, g_1$  — відповідно апіорна ймовірність для виробів, які належать до класів 1 і 2;  $g_2P_{12} = d_1$  — ймовірність похибки першого роду;  $g_1P_{21}$  — ймовірність похибки другого роду;  $P_0 = d_0$  — ймовірність відмови від розпізнавання;  $P_{12}, P_{21}$  — відповідно ймовірність помилкового розпізнавання для об'єктів, що належать до класу 2 або 1, які можна визначити як

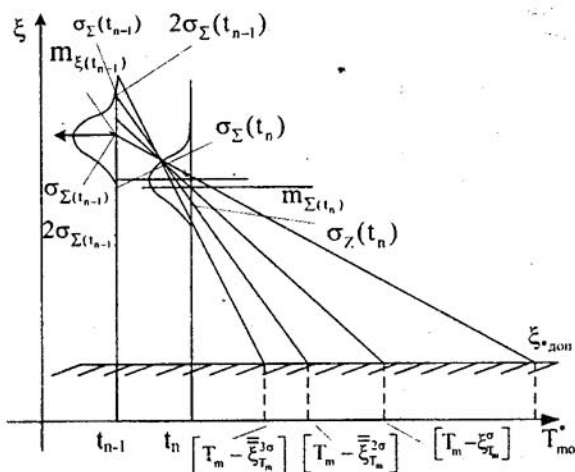


Рисунок 4.7 — Ймовірнісне оцінення точності прогнозування

$$\begin{cases} P_0 = \int_{S_0} f [g_1 f_1(\bar{\xi}) + g_2 f_2(\bar{\xi})] d\bar{\xi}, \\ P_{12} = \int_{S_1} f_2(\bar{\xi}) d\bar{\xi}; P_{21} = \int_{S_2} f_1(\bar{\xi}) d\bar{\xi}; \end{cases} \quad (4.26)$$

де  $f_\lambda(\bar{\xi})$  — щільність розподілу виробів при умові, що вони належать до класу  $\lambda (\lambda=1,2)$ ; відповідно рішення для класів 1 або 2 і відмову від розпізнавання позначимо як

$$\begin{cases} S_1 = (\bar{\xi}; L(\bar{\xi}) \geq \Pi_1); S_2 = [\bar{\xi}; L(\bar{\xi}) \leq \Pi_2]; \\ S_0 = (\bar{\xi}; \Pi_2 < L(\bar{\xi}) < \Pi_1), \end{cases} \quad (4.27)$$

де  $L(\bar{\xi}) = f_1(\bar{\xi}) / f_2(\bar{\xi})$  — відношення правдоподібності;

$\Pi_1$   $\Pi_2$  — деякі пороги, що визначаються апіорними ймовірностями класів  $g_1$  і  $g_2$ .

У випадку  $W_{12} = W_{21} = W_0$ , величина  $\overline{(1-R)}$  — це ймовірність правильного розпізнавання; коли  $W_{12} = W_{21}$  і  $\Pi_1 = \Pi_2$  (нульова зона відсутня), то  $R$  визначає ймовірність помилкового розпізнавання  $P$ .

При розв'язанні конкретних задач часто виникає запитання, наскільки метод прогнозування є ефективним. Визначення ефективності необхідно для оцінення методу, що використовується. Розглянемо деякі положення, які дозволяють оцінити ефективність прогнозування.

Для визначення оцінного критерію введено показник, величина якого залежить тільки від кількості інформації:

а) яка використовується при розв'язанні задачі прогнозування —  $I_{T_1}(\xi)$ ;

б) яку отримують в результаті прогнозування з заданою точністю —  $I_{T_2}(\xi)$ .

Як такий показник зручно використовувати співвідношення

$$E(\xi) = I_{T_2}(\xi) / I_{T_1}(\xi). \quad (4.28)$$

Для практичних цілей це співвідношення можна подати у вигляді

$$E(\xi) = m / n = m \cdot \Delta t' / n \cdot \Delta t = (t_n \div t_{n+m}) / (t_1 \div t_n), \quad (4.29)$$

де  $m$  — кількість кроків, на які здійснюється прогнозування з заданою похибкою;

$n$  — кількість величин  $\xi(t)$ , що використовуються для здійснення прогнозу;

$\Delta t'$  — інтервал контролю  $[t_n \div t_{n+m}] \in T_2$ ;  $\Delta t [t_1 \div t_2] \in T_1$  (див. рис. 4.2). Величина  $E(\xi)$  змінюється із зміною заданого рівня похибки розпізнавання. Для оцінення ефективності методу достатньо порівняти величину  $E(\xi)$  на однакових рівнях, наприклад,  $\epsilon = 5\%$  або  $\epsilon = 10\%$ ; при цьому вибирають більшу величину  $E(\xi)$ .

В деяких випадках достовірним критерієм ефективності є інформаційний критерій

$$E_H(\bar{\xi}) = \sum_{S=1}^k (H_{OS} - H_S) / \sum_{S=1}^k H_{OS}, \quad (4.30)$$

де  $H_{OS}, H_S$  — відповідно ентропія за  $S$ -им параметром виробу до і після здійснення прогнозування;

$$H_{OS} = -[P_{OS} \log_2 P_{OS} + (1 - P_{OS}) \log_2 (1 - P_{OS})];$$

$$H_S = -[P_S \log_2 P_S + (1 - P_S) \log_2 (1 - P_S)], \quad (4.31)$$

де  $P_S, P_{OS}$  — ймовірності роботоздатності об'єкта за  $S$ -м параметром відповідно до моменту початку і кінця прогнозування.

Останнім часом отримав розповсюдження інформаційно-вартісний критерій

$$E_{H-B} = \frac{I[(\bar{\xi})_{t \in T_1} - (\bar{\xi})_{t \in T_2}]}{C_{\Pi}}, \quad (4.32)$$

де  $I$  — інформація про стан об'єкта, яку ми отримали в результаті прогнозування;

$C_{\Pi}$  — вартість прогнозу.

Кількість інформації  $I$  залежить від декількох факторів: а) методу прогнозування; б) кількості контрольованих факторів в області  $T_1$ ; в) величини інтервалу прогнозування  $m\Delta t'$ ; г) автокореляційних властивостей процесу зміни параметрів; д) взаємної кореляції параметрів, що прогножуються.

Величина вартості прогнозу залежить від вартості: а) контролю; б) зберігання даних; в) здійснення прогнозування.

**Приклад 4.1.** Діагностується градієнтним методом система автоматичного керування (САР) зі зворотним зв'язком, передатна функція якої

$$W(p) = \frac{\bar{K}_{\Pi} \cdot \bar{K}_p / \bar{P}}{1 + (\bar{K}_{\Pi} \cdot \bar{K}_p / \bar{P}) \cdot \bar{K}_{33} (T_{33} p + 1)}; \quad (4.33)$$

а функціональна схема показана на рис. 4.8; відомі параметри ланок:  $p$  — оператор;  $\bar{K}_{\Pi} = 250$  — коефіцієнт підсилення ланки;  $\bar{K}_p = 25,6$  — коефіцієнт передачі регулятора;  $\bar{K}_{33} = 0,0033$ ;  $T_{33} = 0,025$  стала часу зворотного зв'язку.

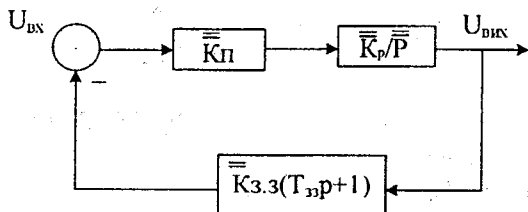


Рисунок 4.8 — Функціональна схема САР

В процесі контролювання виявилось, що похідна  $dT_{33}/dt$  мала і можна вважати  $T_{33} = \text{const}$ .

Умови роботоздатності задані як  $60 < W(p) < 435$ . Визначити градієнтний напрямок прогнозування зміни технічного стану.

Процес прогнозування можна описати за допомогою виразу [16]

$$Q[\xi(t_{n+1})] = Q[\bar{\xi}(t_n)] + \gamma_{n+1} \nabla QL[\bar{\xi}(t_n)]. \quad (4.34)$$

Суть градієнтного метода полягає в тому що екстраполюється функція роботоздатності  $Q[\xi(t_n)]$  в градієнтному напрямку — в напрямку, де вона найбільше змінюється (небезпечний напрямок). На першому етапі прогнозування визначають складові градієнта, тобто частинні похідні функції роботоздатності за координатами параметрів  $\partial Q / (\partial \xi)_S (S=1 \dots \bar{K})$ ; на другому етапі здійснюється прогнозування в градієнтному напрямку (4.34), де  $Q[\xi(t_n)]$  — функція стану у відповідні моменти часу;  $\gamma_{n+1} > 0$  — параметр, що характеризує довжину кроку прогнозування;  $\nabla QL[\bar{\xi}(t_n)]$  — вектор градієнта функції стану:

$$\nabla Q(\bar{\xi}) = [\partial Q(\bar{\xi}) / \partial \xi_1; \partial Q(\bar{\xi}) / \partial \xi_2 \dots \partial Q_n(\bar{\xi}) / \partial \xi_n].$$

Для зручності обчислення здійснюємо заміну змінних

$$W(x, y) = \frac{x}{30 + 1,75y},$$

де  $x = \bar{K}_\Pi \cdot \bar{K}_P$ ;

$y = \bar{K}_\Pi \cdot \bar{K}_P \bar{K}_{33}$ ,

тоді градієнт коефіцієнта передачі

$$\text{grad}W(x,y) = \frac{\partial W(x,y)}{\partial x} + \frac{\partial W(x,y)}{\partial y} = \frac{1}{(30+1,75y)^2} \cdot \bar{i} + \frac{-1,75x}{(30+1,75y)^2} \cdot \bar{j},$$

де  $\bar{i}, \bar{j}$  — одиничні вектори координатної осі.

Інтервал контролю для всіх параметрів вибираємо однаковий і він дорівнює 100 годин (час ввімкненого стану системи). Результати контролю в момент  $t_{(n-1)}$  і попередніх обчислень зводимо в табл. 4.1, де  $t'$  — початок контролю з метою прогнозування.

Таблиця 4.1 — Результати обчислень

t, год	$t_{n-1} = t'$ , год	$t_n = t'+100$ , год
x	6300	6400
y	11,12	21.12
W	127	95,5
gradW	0,021i -2,46j	0,015i-2,49j

Прогнозування здійснюється за виразом (4.34)

$$W_{n+1}(x,y) = W_n(x,y) + \gamma_{n+1} \text{grad}W_n(x,y).$$

За даними контролю в точках  $t_{n+1}$  і  $t_n$  оцінюємо крок  $\gamma$ , на який необхідно здійснити прогноз в градієнтному напрямку (на 100 годин функціонування)

$$|\gamma| = \frac{W_n(x,y) - W_{n-1}(x,y)}{\text{grad}W_{n-1}(x,y)} = \frac{95,5 - 127}{0,021i - 2,46j} = -7,03,$$

звідки  $W_{n+1}(x,y) = 95,5 - 7,03[0,015\bar{i} - 2,49\bar{j}] = 78$ .

Виявилось, що дійсна величина  $W(x,y)$  в момент  $t = t + 200$  дорівнює 77, тобто точність є достатньою. Повторюючи процедури обчислення для  $t = t'+300$  і враховуючи, що  $W_{t'+200}(x,y) = 0,021\bar{i} - 1,6\bar{j}$ , отримаємо  $\gamma_{t'+300} = 7,43$  та  $W_{t'+300}(x,y) = 65,1$ , в той час як дійсне значення коефіцієнта передачі виявилось 64,7.

**Приклад 4.2.** Зміна математичного сподівання і середньоквадратичного відхилення відносної магнітної проникності  $\Delta\mu/\mu\%$  в партії магнітом'яких феритів за 1000 годин випробувань наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 — Результати випробувань технічного стану феритів

Статистичні параметри	Час проведення випробувань t, год			
	1250	500	750	1000
$m_t(\Delta\mu/\mu)$	-3,23	-3,63	-4,17	-4,03
$\sigma(t)$	4,31	4,35	4,61	4,7

Визначити ймовірність виходу за допуск ( $\Delta\mu^*/\mu=15\%$ ) параметрів феритів, які досліджувались.

Розв'язання. В даному випадку експериментальний розподіл не відповідає жодному з відомих теоретичних законів, тому для розв'язання задачі використовуємо математичний апарат ймовірнісних нерівностей. Найбільш розповсюдженою є нерівність Чебишева, яка визначає ймовірність втрати роботоздатності і для цілей прогнозування набуває вигляду

$$P_t(\xi) \leq \left\{ \sigma_t(\xi) / [\xi^* - m_t(\xi)] \right\}^2, \quad (4.35)$$

де  $\xi^*$  — допустима величина  $\xi(t)$ .

Екстраполяція статистичних характеристик  $\sigma_t(\xi)$  і  $m_t(\xi)$  за допомогою розглянутих прогнозувальних виразів дозволяє визначити ймовірність на будь-який момент часу в майбутньому. Якщо експериментальний розподіл має одну основну моду, яка приблизно дорівнює математичному сподіванню, і частоти розподілу спадають неперервно, то можна використати більш точну нерівність Кемпа-Менделя

$$P_t(\xi) \leq \left\{ 2W(\sigma_t(\xi)) / 3[\xi^* - Wm(t)] \right\}^2, \quad (4.36)$$

де  $W_\sigma(t)$  і  $W_m(t)$  — прогнозувальні вирази для  $\sigma_t(\xi)$  і  $m_t(\xi)$ .

Для даної задачі як прогнозувальний вираз, як для екстраполяції  $m_t(\Delta\mu/\mu)$ , так і  $\sigma(t)$  візьмемо після попереднього аналізу функцію виду

$$F(t) = at^g, \quad (4.37)$$

де  $a, g = f(\Delta\mu/\mu)$ ;  $g < 1$ ;  $\tau = t/1000$ .

Для того, щоб підрахувати невідомі коефіцієнти, прологарифмуємо вираз (4.37)

$$\ln F(t) = \ln a + g \ln t.$$

Здійснюючи заміну логарифмів, отримаємо лінійний двочлен  $\varphi(t) = a_0 + g\theta$ , невідомі коефіцієнти якого в обох випадках визначалися методом найменших квадратів. В результаті прогнозувальні вирази набувають вигляду

$$F_m(\tau) = -4,12\tau^{0,545}; F_\sigma(\tau) = -4,57\tau^{0,213}.$$

Ймовірність, що визначається для майбутніх моментів часу, обчислюється за допомогою перетвореної нерівності Чебишева (4.35)

$$P(t) \leq \left[ -4,57\tau^{0,213} / \left[ (-\Delta\mu/\mu)^* + 4,12\tau^{0,545} \right] \right]^2.$$

Для  $\tau = 2(t = 2000 \text{ год})$  ймовірність, яка прогнозується  $P_\Pi(t) \leq 0,365$ , а дійсна ймовірність, обчислена за допомогою (4.35) при досягненні  $t = 2000 \text{ год}$ ,  $P_g(t) \leq 0,35$ .

До розподілу  $\Delta\mu/\mu$  в часових перерізах, що розглядаються з певним припущенням, можна застосувати нерівність Кемпа-Менделя, яка дозволяє використати формулу (4.36) і уточнити значення знайдених ймовірностей, які, як відомо із нерівності Чебишева, є граничними величинами. При цьому ймовірність, що прогнозується,

$$P_\Pi(t) \leq \left\{ \frac{2F\sigma(\tau)}{3[-(\Delta\mu/\mu)^* - F_m(\tau)]} \right\}^2 \leq 0,157;$$

$\sigma = 2$ , а дійсна ймовірність  $P_g \leq 0,151$ .

**Приклад 4.3.** Розглянемо застосування методу статистичних рішень для прогнозування періоду служби асинхронних двигунів (АД) середньої потужності.

При прогнозуванні необхідно визначити, чи належить двигун до першого класу, де термін служби не перевищує 6000 год, чи до другого класу, де період служби більше 6000.

Для реалізації методу прогнозування на експериментальному дослідному матеріалі із сукупності параметрів, які характеризують технічний стан асинхронних двигунів типу ДАЗО2 16-го і 18-го габаритів, було вибрано відносне значення струму зворотної послідовності, розраховане за виразом

$$K_2 = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100 \%,$$

де  $I_1, I_2$  — амплітудні величини складових струму відповідно прямої та зворотної послідовності; коефіцієнт, що характеризує крутість механічної характеристики АД в області робочих ковзань

$$K_P = \left( \frac{P}{P_{\text{НОМ}}} \right) \cdot \left( \frac{S}{S_{\text{НОМ}}} \right)^{-1} \cdot \left( \frac{U_{\text{НОМ}}}{U} \right)^2,$$

де  $P_{\text{НОМ}}, S_{\text{НОМ}}, U_{\text{НОМ}}$  — номінальні значення відповідно споживаної АД активної потужності, ковзання і напруги статора АД;  $P, S, U$  — розраховані за результатами контролю параметрів робочого режиму відповідно активна потужність АД, що споживається, ковзання і напруга статора АД. Комплексний параметр діагностування — критерій справного стану, що розраховують як

$$K_{\partial} = \frac{C_i K_i + C_p K_p}{C_i + C_p},$$

де  $K_i = \frac{I_1 - I_2}{I_1} = 1 - K_2$  — коефіцієнт несиметрії струмів;  $C_i, C_p$  — вагові

коефіцієнти, які знаходяться в межах  $1 \div 3$ . Для справного двигуна  $K_{\partial} = 1$ . Відхилення цього параметра в напрямку зниження від одиниці свідчить про наявність дефектів обмотки статора або ротора.

Вимірювання параметрів проводилось за часовими перерізами:

0 — 0 год; 1 — 0,5; 2 — 1,5 год; 3 — 2,5 год; 4 — 5,0 год; 5 — 10,0 год; 6 — 20,0 год; 7 — 30,0 год; 8 — 50,0 год; 9 — 75,0 год.

Перевірка методу прогнозування в створеному просторі діагностичних ознак проводилось на 39 двигунах. Слід зауважити, що попередньо виконувався пошук пари перерізів, для яких мали місце мінімальні похибки, тобто кількість параметрів розпізнавання подвоїлась і дорівнювала восьми. Для цього було визначено вибірку, яка навчає, і ту, що здає екзамен для двигунів (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 — Вибіркі двигунів

Клас	Підмножина		Всього
	що навчає	яка здає екзамен	
16	13	4	17
18	14	8	22

Для чотирьох варіантів пар часових перерізів було виконано такі операції:

- навчання на 27 екземплярах двигунів (гаусова апроксимація);
- екзамен за даними підмножини, що здає екзамен;
- екзамен за матеріалами множини, що навчає;
- екзамен за матеріалами підмножин, що здає екзамен і навчається.

Обчислення здійснюється в такій послідовності. На основі вибірки для навчання побудуємо правило, що вирішує, — функцію відношення правдоподібності

$$L'(\xi) = \ln L(\xi) = \frac{1}{2} \ln(|U_{18}|/|U_{16}|) + \frac{1}{2} L_1(\xi), \quad (4.38)$$

де  $L(\xi)$  — відношення правдоподібності;

$U_\lambda$  — коваріаційні матриці для об'єктів класів  $\lambda = 16; 18$ ;

$|U_\lambda|$  — визначник матриць  $Z$ .

Елементи коваріаційних матриць і вектори середніх значень для кожного класу ( $\lambda = 16; 18$ ) оцінюються із навчальної вибірки (за апіорною інформацією) двигунів

$$C_{Cr}^\lambda = \frac{N_\lambda}{N_{\lambda-1}} \left( \frac{1}{N_\lambda} \sum_{i=1}^{N_\lambda} \xi_{S_i}^\lambda \xi_r^\lambda - \mu_S^\lambda \cdot \mu_r^\lambda \right); \mu_S^\lambda = \frac{1}{N_\lambda} \sum_{i=1}^{N_\lambda} \xi_{S_i}^\lambda, \quad (4.39)$$

де  $S$  — стани;

$r = 1, 2$ ;

$k$  — кількість діагностичних ознак;

$N_\lambda$  — кількість апіорних двигунів для навчання в класі  $\lambda$ .

Апіорні ймовірності класів  $P_{16}$  і  $P_{18}$  обчислюються за формулою,

$$P_{16} = N_{16} / (N_{16} + N_{18});$$

$$P_{18} = N_{18} / (N_{16} + N_{18});$$

якщо навчальна вибірка сформована випадково.

Кількість двигунів  $N_\lambda$  у навчальній вибірці для кожного класу повинна бути не менше розмірності простору ознак, тобто  $N_\lambda > k$ . Це необхідно для того, щоб коваріаційна матриця  $U_\lambda$  не виявилась особливою.

В виразі (4.38)

$$L_1(\xi) = -(\xi - \mu_{16})' \cdot U_{16}^{-1}(\xi - \mu_1) + (\xi - \mu_{18})' \cdot U_{18}^{-1}(\xi - \mu_2),$$

де  $U_{16}^{-1}$ ,  $U_{18}^{-1}$  — обернені матриці;

$(\xi - \mu_\lambda)$  — вектор - стовпець.

Для кожного двигуна  $\xi^\ell$ , який подається із екзаменаційної послідовності, оцінюється величина  $L'(\xi^\ell)$ :

- якщо  $L'(\xi^\ell) \geq \Pi_{16}$ , то  $\xi^\ell \in R^{16} = 0 + 6000 \text{ год}$ ; якщо  $L'(\xi^\ell) \geq \Pi_{18}$ , то  $\xi^\ell \in R^{18} = 0 + 6000 + \infty \text{ год}$ ;

- якщо  $\Pi_{16} < L'(\xi^\ell) < \Pi_{18}$ , то здійснюється відмова від розпізнавання ( $\Pi_{16}$ ,  $\Pi_{18}$  — межі розпізнавання).

В прикладі, що розглядається, межі розпізнавання підбирались емпірично за обчисленими величинами  $L'(\xi^\ell)$  для двигунів навчальної підмножини. Межі визначались так, щоб на об'єктах навчання було досягнуто мінімального ризику (похибка першого роду —  $\alpha$  і другого роду —  $\beta$ ). Величина  $\alpha$  є ймовірністю того, що об'єкт, який належить до  $\lambda$ -го класу, не буде віднесений до нього. Величина  $\beta$  є ймовірністю того, що об'єкт, що не належить до  $\lambda$ -го класу, буде віднесений до нього.

Для всіх варіантів екзамену обчислювалась похибка першого роду  $\alpha$  і другого роду  $\beta$  та відсоток правильного розпізнавання  $\Pi_\xi$ . Результати обчислень зведені в табл. 4.4. Виявилось, що найбільший відсоток розпізнавання можна отримати за такими параметрами часових перерізів: 0 і 6; 2 і 7; 2 і 9; 3 і 5; 3 і 9, але при прогнозуванні за перерізами 0 і 6, 3 і 9 отримано більш високі похибки першого роду. Можна рекомендувати для технічних рішень пару часових перерізів з метою прогнозування, коли в результаті екзамену величина  $\Pi_\xi$  отримана на рівні 90 % при  $\alpha = 5\%$  і  $\beta = 0\%$ .

Таблиця 4.4 — Результати обчислень

Варіанти часових перерізів	Матеріали екзамену, %			Матеріали навчання, %		Матеріали екзамену і навчання, %		
	$\alpha$	$\beta$	$\Pi_{\xi}$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\Pi_{\xi}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0; 1	50	25	67	0	0	12	9	91
0; 2	100	0	67	0	0	24	0	91
0; 3	75	25	58	0	0	18	9	87
0; 4	50	25	67	0	0	12	9	90
0; 5	75	12,5	67	0	0	18	4,5	90
0; 6	50	12,5	75	0	0	12	4,5	92
0; 7	50	50	50	0	0	12	18	85
0; 8	75	38	50	8	0	24	14	82
0; 9	25	75	42	0	0	6	27	82
1; 3	100	12,5	58	30	0	47	4,5	77
1; 5	25	75	42	0	0	5,9	27	82
1; 7	75	12,5	67	0	0	18	4,5	90
1; 9	50	12,5	67	0	0	18	4,5	91
2; 5	50	50	50	0	0	12	18	85
2; 7	0	37	75	0	0	0	13	92
2; 9	0	25	83	0	0	0	9	95
3; 5	25	0	92	0	0	6	0	97
3; 7	100	0	67	0	0	24	0	91
3; 9	25	12,5	83	8	0	12	4,5	92
4; 7	0	50	67	0	0	0	18	80
4; 9	50	87	25	0	0	12	32	77
5; 7	50	63	42	0	0	12	23	82
5; 9	100	25	50	8	0	30	9	82

## 5 ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

### 5.1 Загальна характеристика та експлуатаційне забезпечення енергетичного обладнання

Енергетичне обладнання, призначене для вироблення теплової, механічної і електромагнітної енергії, постійно перебуває під впливом радіаційних, електромагнітних, теплових і механічних дій, які створюють тяжкі умови для функціонування цього обладнання. Технологічне обладнання умовно можна поділити на тепломеханічне – коли енергетичні та водопідігрівальні котлоагрегати, турбіни, насоси; електротехнічне – генератори (*generator*), двигуни, трансформатори (*transformer*), синхронні компенсатори, комутаційна апаратура; засоби керування, захисту і автоматики – технічний захист, лінійний захист, засоби обчислювальної техніки.

Допоміжне обладнання – обладнання паливо-транспортного цеху, цеху хімводопідготовки, розподільні мережі різних класів, теплові мережі. Необхідно відзначити специфічне обладнання атомних станцій – реактори.

Експлуатаційне забезпечення сучасних енергетичних установок передбачає розрахунок і визначення параметрів технічної експлуатації і підготовку необхідної технічної документації. Схема організації експлуатаційного забезпечення включає такі формалізовані постановки задач.

Перша задача – оцінення фактичного рівня надійності і прогнозування на його основі міжремонтного циклу. Використовують такі параметри: час між відмовами

$$T_{\text{М.В.}} = T_p / n, \quad (5.1)$$

де  $T_p$  - час роботи обладнання;

$n$  - кількість відмов;

$T_B$  - час відновлення.

Коефіцієнт готовності

$$K_G = \left( T_p / (T_p + T_a) \right) 100\%, \quad (5.2)$$

де  $T_a$  – сумарний час непланового простою (аварійного), год.

Коефіцієнт аварійності

$$K_{ав} = \left( T_a / (T_a + T_p) \right) 100\%. \quad (5.3)$$

Коефіцієнт оперативної готовності:

$$K_{ог} = \left( (T_{рез} + T_p) / T_k \right) 100\%, \quad (5.4)$$

де  $T_{рез}$  – сумарний час простою обладнання в резерві за диспетчерським графіком;

$T_k$  – календарний період (1 рік = 8760 год).

Коефіцієнт робочого часу:

$$K_p = \left( T_p / T_k \right) 100\%. \quad (5.5)$$

Коефіцієнти непланових  $K_{Н.П.}$  та планових  $K_{Пл}$  простоїв:

$$K_{Н.П.} = (T_{Н.П.} / T_k) 100\%; \quad K_{Пл} = (T_{Пл} / T_k) 100 \%;$$

Коефіцієнт використання усталеної потужності:

$$K_{уст} = \left( E / (N_{ном} T_k) \right) 100\%, \quad (5.6)$$

де  $E$  – вироблена електроенергія;

$N_{ном}$  – номінальна потужність.

Друга задача – планування технічного обслуговування. Використовують параметри: період  $T_{пр}$  і час  $T_{пр}$  перевірки і ремонту.

Вихідна документація – план-графік та інструкція з проведення перевірок.

Третя задача – планування запасних деталей, матеріалів, механізмів. Основні параметри: кількість  $Z_j$  елементів  $j$ -го, час ремонту  $T_p$ , кількість відновлених  $Z_j^B$  і невідновлених елементів  $Z_j^H$ . Вихідна документація – кошториси, маршрутні карти.

Четверта задача – розрахунок чисельності персоналу, визначення спеціалізації, розподіл на черговий і ремонтний.

Засоби технічної діагностики можна використати як під час ремонту, для перевірки його якості, так і в оперативному режимі, вони прогнозують виникнення відмови, дозволяють більш ефективно використовувати обладнання і зменшити витрати.

Ремонт сучасних енергоустановок характеризується великим обсягом підготовчих робіт. Планові ремонти проводять для відповідальних, складних блоків, які потребують значних трудових витрат.

## 5.2 Організація діагностичного забезпечення складних об'єктів

До складу системи технічного діагностування (СТД) входять: об'єкт діагностування (ОД), технічні засоби діагностування (ТЗД) і людина - оператор [37]. Діагностичне забезпечення містить в собі перелік показників, які потрібно оцінити, методи їх оцінення, умови роботоздатності, ознаки наявності дефектів і алгоритми, програми і ТЗД.

Методика, яка дозволяє отримати діагностичне забезпечення (ДЗ), передбачає декілька етапів: складання математичного опису об'єкта, побудову діагностичної моделі, аналіз діагностичної моделі, вибір сукупності контрольованих показників, розробку алгоритмів і програми тестування, розробку засобів для підготовки процесу діагностування, в тому числі вибір точок контролю і засобів зв'язку.

Кожний із перерахованих етапів складається із декількох операцій. Наприклад, при визначенні класифікації параметрів спочатку визначають суттєві і діагностичні параметри. Для цього використовують знання і досвід спеціалістів. Далі уточнюють попередньо вибрані параметри шляхом використання формальних методів. Якщо вибрано сукупність діагностичних параметрів, то складають і вибирають діагностичні моделі. За вибраними моделями визначають прямі і опосередковані показники, які необхідно оцінити за допомогою ТЗД. Після того, як вибрано діагностичну модель, використовують принципи ідентифікації – спостережність, керованість, відмінність.

Система повністю спостерігається в інтервалі  $(t_0, t_1)$ , якщо її початковий стан  $S(t_0)$  можна визначити за змінним на цьому інтервалі вектором  $S(t_1)$  [38]. Система повністю керована, якщо із початкового стану  $S(t_0)$  її можна привести в інший стан  $S(t_1)$  за кінцевий інтервал часу  $(t_0, t_1)$ , діючи на її систему керування  $G(t) \in G$ , де  $G$  – деякий заданий клас функцій. Ці властивості визначають ТС об'єкта і дозволяють сформувати умови роботоздатності і відмінності та оцінити можливість їх реалізації. Умови роботоздатності – це правила, які дозволяють кінцеву множину станів  $\{S\}$  розділити на дві підмножини  $\{S_1\}$  і  $\{S_2\}$  роботоздатних і нероботоздатних станів  $\{S\} = \{S_1\} \vee \{S_2\}$ . Ознакою наявності дефекту є відмінність кожного стану в підмножинах  $\{S_1\}$ ,  $\{S_2\}$ . Якщо позначити через  $\Delta W_i$  прирощування інформації, яке ми отримаємо

при спостереженні за  $i - m (i = \overline{1, n})$  параметром об'єкта чи за їх сукупністю, а через  $V_i$  – вартість такого спостереження, то відношення  $\Delta W_i / V_i$  можна використати як оцінку значимості і можливості реалізації спостереження за  $i - m$  параметром або за групою параметрів.

Інформація про технічний стан забезпечується відповідними обчислювальними пристроями, тому точність їх має важливе значення для побудови адекватних моделей. При цьому використовують прямі і опосередковані методи вимірювання.

Збір, накопичення, обробка і передача інформації про ТС електрообладнання потребує витрати часу, що призводить до запізнення у видачі керуючих рішень і до зниження їх ефективності. Існує два способи усунення цього недоліку: 1) збільшення швидкості проходження інформації; 2) використання прогнозування на основі необхідних даних.

Задача прогнозування передбачає реалізації таких етапів діагностування: вибір суттєвих параметрів для прогнозу; визначення технічних засобів, які забезпечують вимірювання і спостереження за вибраними показниками; оцінення ефективності вибраних засобів, коректування вибраних параметрів і складу технічних засобів.

### 5.3 Основні показники СТД

Під ефективністю СТД розуміють ступінь відповідності її цільовому призначенню. Автоматизована СТД призначена для визначення технічного стану і підвищення надійності основного та керуючого обладнання, тобто підвищення надійності і економічності електропостачання.

Розрізняють зовнішні і внутрішні характеристики СТД. Зовнішні характеристики відображають вплив СТД на ОД, а внутрішні – дають оцінку раціональності побудови самої системи діагностування. Ефективність системи в цілому відносно електрообладнання, що діагностується, можна оцінити коефіцієнтом готовності  $K_{\Gamma}$ . Наприклад, для енергоблока електричної станції:

$$K_{\Gamma} = W_0 / (W_0 + W_{II}), \quad (5.7)$$

де  $W_0$  – потужність, яку видає енергоблок за час  $0, t$ ;

$W_{II}$  – потужність, яка втрачається внаслідок простою блока.

Ефективність локальних систем діагностування енергоблоків можна оцінити цим же показником. Застосовують і інші показники, наприклад надійність роботи енергоблока в змінних режимах характеризується коефіцієнтом надійності:

$$K_H = (T_0 + T_{рез}) / (T_0 + T_{рез} + T_a), \quad (5.8)$$

де  $T_0$ ,  $T_{рез}$ ,  $T_a$  – відповідно час перебування блока в роботі, в резерві і в аварійному ремонті.

Показником надійності може служити коефіцієнт готовності:

$$K'_Г = (T_0 + T_{рез}) / (T_0 + T_{рез} + T_{П}), \quad (5.9)$$

де  $T_{П}$  – час простою в плановому ремонті.

Коефіцієнт готовності блоків сучасних теплових станцій складає 0,9-0,97, для АЕС – 0,6 - 0,7. Ефективність керувального обладнання можна оцінити за формулою [39]

$$E = K'_Г P(t), \quad (5.10)$$

де  $P(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи або вірогідність видачі правильної керувальної дії на об'єкт керування.

Якщо одночасно врахувати надійність функціонування об'єкта керування і засобів керування, то з врахуванням незалежності їх відмов надійність їх сумісного функціонування можна визначити як

$$\tilde{P}(t) = \tilde{P}_0(t) \wedge \tilde{P}_K(t), \quad (5.11)$$

де “ $\wedge$ ” – символ, який позначає, що змінна величина може набувати значення як одиниці, так і нуля.

Ймовірність безвідмовної роботи за час  $0, t$

$$P(t) = P_0(t) P_K(t), \quad (5.12)$$

де  $P_0(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи об'єкта діагностування.

Ймовірність безвідмовної роботи засобів керування можна розглядати як ймовірність виконання ними  $i$ -ої функції в певний момент часу

$$P_K(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (5.13)$$

де  $P_i(t)$  – враховує функції, які виконує персонал.

#### 5.4 Показники ефективності процесу діагностування

В процесі діагностування складного об'єкта враховують такі показники: вірогідність діагностування  $V$ , об'єм діагностування, під яким розуміють перелік діагностичних параметрів передбачених для контролю, повноту діагностування, тобто ступінь обмеження контролю вибраної сукупності показників, час діагностування, глибину діагностування, яка визначає точність визначення місця пошкодження, вартість діагностування, ступінь автоматизації операцій діагностування та інші. Частина цих показників є залежною і надлишковою в разі оцінення процесу діагностування.

Для того, щоб отримати аналітичні залежності показників ефективності діагностування, введемо поняття елементарних діагностичних операцій, під якими будемо розуміти елементарні дії  $D_j(t); j = \overline{1, K}$ ,  $\pi\{\pi_{j1} \dots \pi_{jr}\}$ , що здійснюються сукупністю перевірок персоналом певного об'єкта за деякий час. Ефективність використання елементарних операцій характеризується вірогідністю контролю, повнотою контролю, часом виявлення несправності, часом пошуку місця несправності, ліквідації пошкодження, вартістю та іншими показниками, які можна відображати через послідовність операцій. Наприклад, вірогідність контролю є функцією елементарних операцій.

$$V = f(D_1(t), D_2(t) \dots D_K(t)).$$

Аналогічно можна записати вираз для інших показників: вірогідність діагностування; якість роботи вимірювальних приладів; апаратура, яка виконує функцію прийняття рішень; правильної дії людини – оператора.

Всі ці фактори мають випадковий характер, врахувати їх складно. Розглянемо схему взаємодії ОД і засобів діагностування (ЗД). Якщо ЗД надійні, а ОД повністю описується сукупністю контрольованих параметрів, то схема прийняття рішення показана в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Схема прийняття рішення при діагностуванні

Дійсний стан ОД	Прийняття рішення	Умовне позначення подій	Ймовірність складної події
Справний $Q$	Справний $S$	$QS$	$P_1$
	Несправний $\bar{S}$	$Q\bar{S}$	$P_{\bar{1}}$
Несправний $\bar{Q}$	Справний $S$	$\bar{Q}S$	$P_{\bar{1}H}$
	Несправний $\bar{S}$	$\bar{Q}\bar{S}$	$P_2$

Ймовірності  $P_1, P_2$  відповідають правильному прийняттю рішення при контролі:  $P_{\bar{1}}, P_{\bar{1}H}$  – неправильному, яке виникає внаслідок неточності

вимірювальних пристроїв: Ймовірність хибної несправності  $P_L$  (похибка 1-го роду) і невизначеної несправності (похибка 2-го роду) може бути визначено як

$$\left. \begin{aligned} P_L &= \int_{G_0} W_c(x) dx, x \in G_0; \\ P_H &= \int_{G_1} W_c(x) dx, x \in G_1; \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

де  $W_c(x)$  – функція розподілу похибки вимірювання;

$G_0, G_1$  – область інтегрування, яка визначається вибраним допуском.

Вірогідність діагностування

$$V = 1 - (P_L + P_H). \quad (5.15)$$

Схема прийняття рішення з врахуванням відмови СД наведена в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Схема прийняття рішення при діагностуванні з врахуванням відмови СД

Дійсний стан		Прийняття рішення.	Умови позначення події	Ймовірність складної події
ОД	ЗД			
Справний Q	Справні K	Справний S Несправний $\bar{S}$	Q, K, S Q, K, $\bar{S}$	$P_1$ $P_L$
Несправний $\bar{Q}$		Справний S Несправний $\bar{S}$	$\bar{Q}$ , K, S $\bar{Q}$ , K, $\bar{S}$	$P_3$ $P_H$
Справний Q	Несправні $\bar{K}$	Справний S Несправний $\bar{S}$	Q, K, S Q, $\bar{K}$ , $\bar{S}$	$P_1$ $P_L$
Несправний $\bar{Q}$		Справний S Несправний $\bar{S}$	$\bar{Q}$ , $\bar{K}$ , S $\bar{Q}$ , $\bar{K}$ , $\bar{S}$	$P_H$ $P_2$

Для комплексного оцінення вірогідності ЗД необхідно врахувати ступінь повноти відображення параметрами, що контролюються, наявності дефектів (методична складова) і ступінь  $P_{IH}$  визначення діагностичних ознак контрольно-вимірювальною апаратурою (інструментальна складова)

$$P_K = P_d P_{iH}, \quad (5.16)$$

де  $P_d = P(x_i)P(K_i/x_i)/R$ ;

$P(x_i)$  – ймовірність виникнення відмови причини  $x_i$ ,

$P(K_i/x_i)$  – умовна ймовірність ознаки  $K_i$  за наявності причини відмови  $x_i$ ;

$$R = \sum_{i=1}^m P(x_i)P(K_i/x_i); m - \text{число ознак.}$$

Складова  $P_{iH}$  визначається точністю приладів, які використовують для вимірювання і прийняття рішення ( $P_H = B$ ).

### 5.5 Вибір раціональної структури системи діагностування

Проектування систем діагностування потребує визначення раціональних способів розташування в контрольованому об'єкті вузлів та пристроїв системи діагностування. Найефективнішими критеріями оцінення раціональності розташування комплексу вважають [13] коефіцієнт готовності діагностованої системи і обсяг необхідних запасних частин. Ці показники безпосередньо залежать від співвідношення між облаштованою і автономною частинами систем діагностування.

Для комбінованої системи діагностування систем електропостачання промисловості і агропромислового комплексу [40] найприйнятнішим є змішаний спосіб побудови. У цьому випадку на підстанції облаштовуються засоби релейного захисту, автоматичного контролю ізоляції, фіксатори параметрів аварійного режиму для визначення відстані до місця пошкодження, тобто давачі-перетворювачі. Останні групуються в окремі блоки. Центральна частина системи є автономною. Інформація про технічний стан об'єкта передається каналами телемеханіки на диспетчерський пункт, де оператором приймається рішення про виконання подальших операцій або про подальше використання об'єкта. Не виключена можливість дій з метою уточнення діагнозу або керування об'єктом в процесі діагностування. В процесі діагностування між технічними засобами та оператором розподіляються функції, виконання яких визначається програмою, побудованою на взаємопов'язаних математичних і логічних операціях, що утворюють окремі алгоритми [41].

Основними режимами роботи такої системи є: робочий режим (Р); режим перевірки об'єкта та пошуку місця пошкодження (ПО); режим перевірки системи діагностування. Кожен із режимів характеризується несумісними станами, що утворюють групу подій:  $s_0$  — непошкоджений комплекс;  $s_1$  — пошкоджена РМ;  $s_2$  — пошкоджена центральна частина

системи діагностування;  $S_3$  — пошкоджені давачі-перетворювачі;  $S_4$  — пошкоджені підкомутатори. Якщо через  $\lambda$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  позначити відповідно середню інтенсивність відмов РМ, центральної частини системи діагностування і системи телемеханіки, а через  $\mu$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\mu_3$  — середню інтенсивність відновлення відповідно РМ, централізованої частини системи діагностування, давачів-перетворювачів, каналу зв'язку; через  $\nu$ ,  $\eta$ ,  $\varepsilon$  — середню інтенсивність відповідно контролю, діагностичного циклу та циклів перевірки системи діагностування, то модель, що відповідає змішаній системі, може бути відображена графом, що зображений на рисунку 5.1. При сталому процесі для графа, що зображений на рисунку, можна отримати систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \eta A_{11} - (\nu + \lambda + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) A_1 &= 0; & \lambda A_1 - \nu A_2 &= 0; \\ \lambda_1 A_1 - \nu A_3 &= 0; & \lambda_2 A_1 - \nu A_4 &= 0; \\ \lambda_3 A_1 - \nu A_5 &= 0; \\ \nu A_1 + \mu_1 A_{13} + \mu_2 A_{14} + \mu_3 A_{15} - (\lambda + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \varepsilon) A_6 &= 0; \\ \nu A_2 + \lambda A_6 - \varepsilon A_7 &= 0; & \nu A_3 + \lambda_1 A_6 - \varepsilon A_8 &= 0; \\ \nu A_4 + \lambda_2 A_6 - \varepsilon A_9 &= 0; & \nu A_5 + \lambda_3 A_6 - \varepsilon A_{10} &= 0; \\ \varepsilon A_6 + \mu A_{12} - (\eta + \lambda + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) A_{11} &= 0; \\ \varepsilon A_7 + \lambda A_{11} - \mu A_{12} &= 0; & \varepsilon A_8 + \lambda_1 A_{11} - \mu_1 A_{13} &= 0; \\ \varepsilon A_9 + \lambda_2 A_{11} - \mu_2 A_{14} &= 0; & \varepsilon A_{10} + \lambda_3 A_{11} - \mu_3 A_{15} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

В системі (5.17) коефіцієнти  $A_i = f(\lambda, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \nu, \varepsilon, \eta)$  визначаються із системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} p_2 &= A_2 p_1; \\ p_3 &= A_3 p_1; \\ \dots\dots\dots \\ p_k &= A_k p_1. \end{aligned} \right\} \quad (5.18)$$

де  $p_i$  — ймовірність станів, що відповідають готовності відновлюваної РМ;

$p_1$  — сума ймовірностей всіх станів РМ.

Коефіцієнт готовності визначається як відношення суми ймовірностей станів, що відповідають готовності відновлюваної РМ, до суми ймовірностей всіх станів системи, тобто

$$K_{\Gamma} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5}{\sum_{i=1}^{15} A_i} \quad (5.19)$$

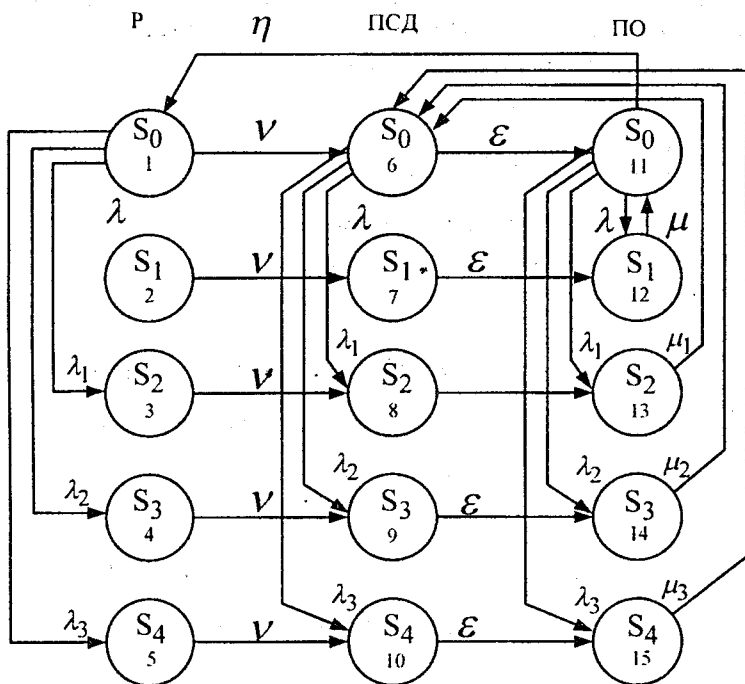


Рисунок 5.1 – Граф змішаного розміщення апаратури діагностування РМ

З виразу (5.19) випливає, що коефіцієнт готовності залежить від параметрів безвідмовності, ремонтоздатності і характеристик проведення діагностування. При проектуванні системи діагностування систем електропостачання параметри повинні бути заданими, тому методика, що пропонується, дозволяє вирішити задачу впливу змінних параметрів системи діагностування  $\epsilon, v$  на коефіцієнт готовності комплексу з різними способами його побудови.

Задача формування діагностичного комплексу зводиться до визначення оптимізованого способу розміщення апаратури діагностування для тієї чи іншої частини СЕП і знаходження оптимізованих співвідношень обсягу контрольних операцій, які виконуються вручну, та обсягу автоматизованих

операцій.

Якщо  $K_{\Gamma \min}$  — допустимий коефіцієнт готовності комплексу;  $\lambda_{\text{ідоп}}$  — мінімальний об'єм контрольованої системи, що допускає розміщення апаратури за  $i$ -м варіантом;  $C_i$  — витрати, пов'язані з використанням запасних частин у вибраному варіанті розміщення апаратури діагностування;  $C_{\max}$  — максимальні витрати, пов'язані з використанням запасних частин, то готовність в цілому в разі розміщення апаратури із  $n$  блоків можна визначити як

$$D_K = K_{\Gamma 1}(1-p_1) + K_{\Gamma 2}(1-p_2) + \dots + K_{\Gamma i}(1-p_i) + \dots + K_{\Gamma n}(1-p_n), \quad (5.20)$$

де  $p_i$  — ймовірність відсутності пошкодження в  $i$ -му блоці.

Коефіцієнт готовності кожного блока знаходиться відповідно до (5.19). Вважаючи, що

$$Q_i = 1 - p_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5.21)$$

можна знайти вираз, що визначає раціональність прийнятого способу формування кожного із блоків

$$g_i(x) = f(K_{\Gamma i} Q_i)(1 - C_i/C_{\max}). \quad (5.22)$$

Для комплексу в цілому

$$F_n(C, D_K) = g_1(x) + \dots + g_n(x) = \sum_{i=1}^n f(K_{\Gamma i} Q_i)(1 - C_i/C_{\max}). \quad (5.23)$$

Максимальна величина цільової функції знаходиться із рекурентного виразу

$$F_n(C, D_K) = \max_{C_n, D_{K_n}} \left\{ g_n(C_n, D_{K_n}, Q_n) + f_{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n (C_i - C_n); \sum_{i=1}^n (K_{\Gamma i}, Q_i - D_{K_n}, Q_n) \right] \right\} \quad (5.24)$$

з обмеженнями

$$\left. \begin{aligned} D_{K \min} &\leq \sum_{i=1}^n K_{\Gamma i} Q_i; \\ C_{\max} &\geq \sum_{i=1}^n C_i; \\ \lambda_{\text{ідоп}} &\geq \lambda_1; \\ \lambda_{\text{пдоп}} &\geq \lambda_n. \end{aligned} \right\} \quad (5.25)$$

Оптимізація цільової функції — трудомісткий процес, але його можна формалізувати. Розрахунки можна виконати за допомогою ЕОМ за спеціальною програмою.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Техническая диагностика. Термины и определения : ГОСТ 20911-86 — М. : Из-во стандартов, 1990. — 13 с.
2. Основы технической диагностики / [В. В. Карибский, П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян та ін.]. — М. : Энергия, 1976. — 464 с.
3. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. — М. : Энергия, 1981. — 320 с.
4. Энциклопедия кибернетики : в 2 т. — К. : Главная редакция. УСЭ, 1974 — 608 с.
5. Диагностирование изделий. Общие требования : ГОСТ 25518-87. — [Чинний від 2005-04-01]. — М. : Из-во стандартов, 1985. — 16 с.
6. Снягин Н. Н. Система планово-предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергетики / Снягин Н. Н., Афанасьев Н. А., Новиков С. А. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 448 с.
7. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. — К. : Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2003. — 329 с.
8. Справочник по ремонту и техническому обслуживанию электрических сетей / под ред. К. Антипова, И. Е. Бандуилова. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 560 с.
9. Кутін В. М. Вибір стратегії ремонтно-обслуговуючих дій систем електропостачання промисловості і агропромислового комплексу / В. М. Кутін // Енергетика і електрифікація. — 2003. — № 9. — С. 47 - 51.
10. Кутін В. М. Вибір стратегії відновлювальних дій складних електротехнічних систем / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко, В. О. Травінський, Ю. М. Питула // Вісник Керменчуцького державного політехнічного університету. — 2004. — № 2 (25). — С. 48 - 49.
11. Экономика и организация ремонта оборудования в США / под ред. М. Л. Шухгальтера. — М. : Прогрес, 1969. — 205 с.
12. Афанасьев Н. А. Система технического обслуживания и ремонта оборудования энергохозяйств промышленных предприятий (система ТОР ЭО) / Афанасьев Н. А. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
13. Глазунов Л. П. Проектирование технических систем диагностирования / Л. П. Глазунов, А. Н. Смирнов. — Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. — 168 с.
14. Кутин В. М. Диагностирование электрооборудования электрических систем / В. М. Кутин, В. И. Брейтбурд. — К. : УМКВО, 1991. — 104 с.
15. Чиженко И. М. Матрично-топологические методы анализа электрических цепей / Чиженко И. М., Терновой В. М. — Киев, КПИ, 1982.

— 107 с.

16. Мозгалеvский А. В. Техническая диагностика (непрерывные объекты) : учебное пособие для вузов / А. В. Мозгалеvский, Д. В. Гаскаров. — М. : Высш. школа, 1975. — 207 с.

17. Жуков С. Ф. Диагностика релейной защиты и автоматики электрических систем : учебное пособие / С. Ф. Жуков. — К. : Выща школа, 1989. — 71 с.

18. Складьяров В. Ф. Диагностическое обеспечение энергетического производства / В. Ф. Складьяров, В. А. Гуляев. — К. : Техніка, 1985. — 184 с.

19. Кутін В. М. Комбінований принцип діагностування технічного стану систем електропостачання / В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна // Наукові вісті інституту менеджменту та економіки «Галицька академія». — 2007. — № 1. — С. 62 - 66.

20. Кутін В. М. Вибір сукупності діагностичних показників для оцінки працездатності ізоляції відносно землі мережі 6-35 кВ / В. М. Кутін // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — 2006. — № 3 (38), Ч.1. — С. 96 - 100.

21. Кутін В. М. Поиск повреждений в распределительных электрических сетях / В. М. Кутін, П. К. Пискладьяров. — К. : Техніка, 1994. — 138 с.

22. Кутін В. М. Комбінована система пошуку пошкоджень в розподільних повітряних мережах / В. М. Кутін, В. В. Луцяк, С. В. Матвієнко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — 2005. — Вип. 3. — С. 169 - 172.

23. Кутін В. М. Оптимизация процесса поиска повреждений в воздушных распределительных сетях 6-10 кВ / В. М. Кутін // Электричество. — 1994. — № 3. — С. 56 - 64.

24. Надежность систем электроснабжения / В. В. Зорин, В. В. Тисленко, Ф. Клеппель, Г. Адлер. — К. : Вища шк., головное изд-во, 1984. — 192 с.

25. Кутін В. М. Комбінована система визначення місця пошкодження в повітряних розподільних мережах напругою 6-35 кВ / В. М. Кутін, В. В. Луцяк // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». — 2008. — Ч. 3. — С. 57 - 61.

26. Кутін В. М. Вибір діагностичних параметрів на основі топологічної моделі об'єкта / В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна // Вісник Кременчуцького державного технічного університету ім. М. Остроградського. — 2008. — № 4 (51), Ч. 2. — С. 70 - 74.

27. Кутін В. М. Оцінка ефективності системи діагностичного контролю електротехнічних комплексів / В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 3. — С. 51 - 54.

28. С. К. Chow. An optimum character recognition system using decision

functions / Chow C. K. // IRE Trans. on Electr. Comp. Dec. 1957.

29. Веников В. А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики / Веников В. А. — М. : Высш. шк., 1966. — 467 с.

30. Юргенсон В. Р. Построение и анализ диагностических моделей сложных объектов диагностирования / Юргенсон В. Р. — Ростов н/Д Ростов; инженерно-строит. ин-т, 1981. — С. 90 - 94. (В кн. Вопросы технической диагностики).

31. Кутін В. М. Методика побудови діагностичної моделі об'єкта на основі теорії подібності / В. М. Кутін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2003. — № 5. — С. 50 - 53.

32. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности / Сена Л. А. — М. : Наука, 1977. — 336 с.

33. Бусленко Н. П. Лекции по теории сложных систем / Бусленко Н. П., Коваленко И. Н., Калашников В. В., — М. : Сов. радио, 1973. — 438 с.

34. Коваленко И. Н. Расчет вероятностных характеристик систем / Коваленко И. Н. — К. : Техніка, 1982. — 95 с.

35. Королюк В. С. Полумарковские процессы и их приложения / В. С. Королюк, А. Ф. Турбин. — Киев : Наук. думка, 1976. — 181 с.

36. Карташев Г. Д. Модели расходования ресурса изделий электронной техники / Карташев Г. Д. — М. : ЦНИИ «Электроника», 1977. — 130 с.

37. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики / Пархоменко П. П. — М. : Знание, 1976. — 64 с.

38. Сейдж Э. П. Идентификация систем управления / Э. П. Сейдж, Д. Л. Мелса. — М. : Наука, 1974. — 420 с.

39. Контроль функционирования больших систем / под. ред. Шибанова А. И. — М. : Киев : Наук. думка, 1976. — 181 с.

40. Кутін В. М. Оптимізація системи керування технічним станом розподільної мережі змінного струму / В. М. Кутін // Вісник ВПІ. — 1999. — № 5. — С. 56 - 65.

41. Кутін В. М. Математичні моделі керування індивідуальною надійністю розподільної мережі змінного струму / В. М. Кутін // Вісник ВПІ. — 2002. — № 4. — С. 63 - 67.

42. Кутін В. М. Вибір діагностичних параметрів на основі топологічної моделі об'єкта / В. М. Кутін, М. О. Ілюхін // Вісник Кременчуцького державного технічного університету ім. М. Остроградського. — 2008. — № 4 (51), Ч. 2. — С. 70 - 74.

43. Кутін В. М. Стохастична модель робото здатності складних систем / В. М. Кутін, М. О. Ілюхін // Вісник Кременчуцького державного технічного університету ім. М. Остроградського. — 2009. — № 3, Ч. 2. — С. 97 - 99.

44. Кутін В. М. Комбінована система керування технічним станом розподільних мереж / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко, М. В. Кутіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 1. — С. 37 - 41.

45. Кутін В. М. Метод визначення залежності між параметрами структури та діагностичними ознаками складних об'єктів / В. М. Кутін, М. В. Кутіна // Вісник Кременчуцького державного технічного університету ім. М. Остроградського. — 2006. — № 3, Ч. 2. — С. 99 - 100.

46. Кутін В. М. Оцінка ефективності системи діагностичного контролю електротехнічних комплексів / В. М. Кутін, М. О. Ілюхін. М. В. Кутіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2005. — № 3. — С. 37 - 41.

## ГЛОСАРІЙ

безвідмовність	safety margin
вимикач	circuit breaker
генератор	generator
динамічна характеристика	dynamic characteristic
довговічність	durability
експлуатація	maintenance
електропостачання	power supply
замикання на землю	earth-fault
забруднення	contamination
к.з. (коротке замикання)	short circuit
надійність	reliability
однофазне замикання	one-phase earth fault
оптимальність	optimum
осцилограф	oscilloscope
постійний струм	direct current
прогнозування	prognostication
релейний захист	relay protection
ремонтпридатність	serviceability
роботоздатність	working capacity
роз'єднувач	disconnector
розподільна мережа	distributive power grid
секціонування	sectionalization
технічний стан	technical state
трансформатор	transformer
функція передачі	transfer function
чутливість	sensitivity

*Навчальне видання*

**Василь Михайлович Кутін  
Максим Олександрович Ілюхін  
Марина Василівна Кутіна**

# **ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ**

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек  
Оригінал-макет підготовлено В. Кутіним

Підписано до друку 11.04.2014 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 10,3.  
Наклад 75 прим. Зам. № 2014-012.

Вінницький національний технічний університет,  
навчально-методичний відділ ВНТУ.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, к. 2201.  
Тел. (0432) 59-87-36.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-87-38.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.