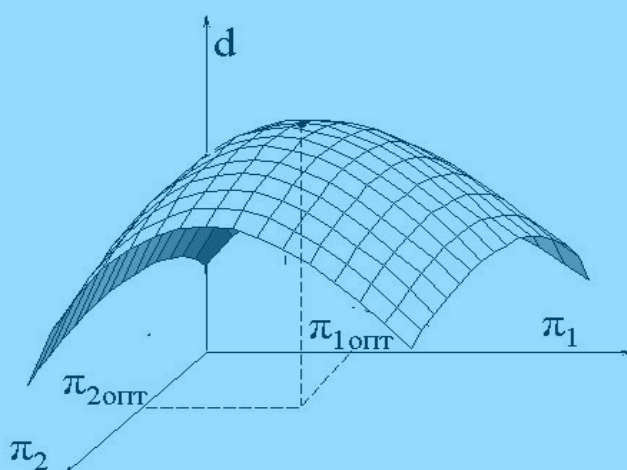


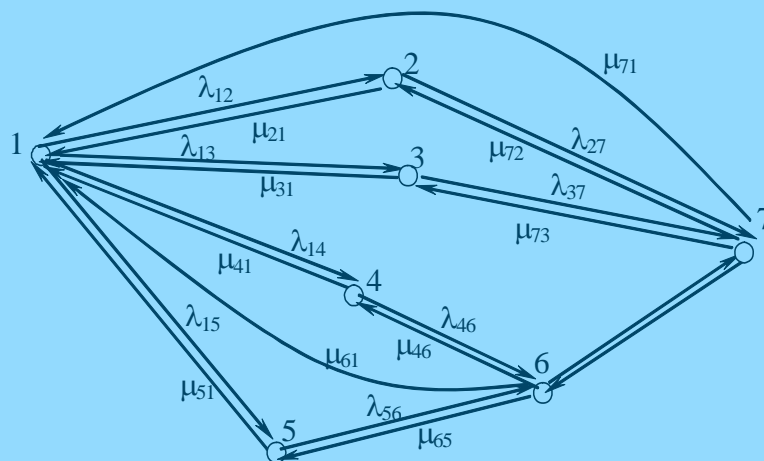
П. Д. Лежнюк, В. О. Комар

ОЦІНКА ЯКОСТІ ОПІМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ КРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ

$$\alpha \cdot \pi = b$$



$$v \cdot p = b$$



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

П. Д. Лежнюк, В. О. Комар

**ОЦІНКА ЯКОСТІ ОПТИМАЛЬНОГО
КЕРУВАННЯ КРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ**

УНІВЕРСУМ-Вінниця

2006

УДК 621.311

Л 40

Рецензенти:

Р. Н. Квстний, доктор технічних наук, професор

В. М. Лисогор, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 27.04.2006)

Лежнюк П. Д., Комар В. О.

Л 40 Оцінка якості оптимального керування критеріальним методом. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 107 с.

ISBN 966-641-201-2

Монографія присвячена розробці методів оцінки якості функціонування систем оптимального керування електроенергетичних систем шляхом поєднання теорії марковських процесів та критеріального методу. Запропоновано використання показника якості функціонування з метою оцінки готовності систем оптимального керування без визначення техніко-економічних показників системи.

Книга розрахована на фахівців з математичного моделювання електроенергетичних систем. Може використовуватися студентами і аспірантами відповідного спрямування.

УДК 621.311

ISBN 966-641-201-2

© П. Лежнюк , В. Комар, 2006

ЗМІСТ

Перелік скорочень	5
Вступ.....	6
1 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СКЛАДНИХ СИСТЕМ ЯК ОСНОВНОГО ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ.....	10
1.1 Задача визначення надійності як показника якості функціонування.....	10
1.2 Аналіз методів розрахунку надійності.....	16
1.2.1 Однорідні марковські моделі надійності.....	18
1.2.2 Неоднорідні марковські моделі надійності.....	19
1.2.3 Моделі надійності на основі методу Монте-Карло.....	20
1.2.4 Фазові моделі надійності.....	21
1.3 Поняття концепції простору станів.....	22
1.4 Диференціальні рівняння, які визначають імовірності станів.....	23
2 ВПЛИВ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НА ПРОЦЕС ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ.....	28
2.1 Аналіз факторів, які впливають на результати оптимізації станів динамічних систем.....	28
2.2 Аналіз задач оптимізації станів і їх реалізація.....	31
2.3 Аналіз якості функціонування регульовальних пристроїв і її математичне моделювання.....	34
2.4 Проблеми ефективності використання регульовальних пристроїв.....	38
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ЯК ОСНОВНОГО ФАКТОРА, ЩО ВПЛИВАЄ НА ЯКІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ РЕГУЛЬОВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ.....	42
3.1 Математичне моделювання як засіб підвищення ефективності використання регульовальних пристроїв в процесі реалізації оптимальних розрахунків.....	42
3.2 Критеріальне моделювання оцінки якості функціонування систем керування.....	44

3.2.1	Критеріальна модель функції відмов.....	44
3.2.2	Критеріальна модель якості функціонування.....	51
3.3	Визначення факторів, що впливають на якість функціонування регулювальних пристроїв.....	53
3.3.1	Показники надійності елементів регулювальних пристроїв	53
3.3.2	Використаний ресурс трансформаторів і показники надійності ..	61
4	СКЛАДНІ СИСТЕМИ ЯК ОБ'ЄКТ КОНТРОЛЮ.....	63
4.1	Визначення технічного стану складних систем.....	63
4.2	Математичне формулювання завдання контролю технічного стану об'єкта.....	69
4.3	Формалізація процесу функціонування складної системи як об'єкта контролю	70
4.4	Апроксимаційний метод визначення густин імовірностей	74
4.5	Оцінка інформативності ознак	81
5	АЛГОРИТМ ВРАХУВАННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СТАНІВ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ.....	83
5.1	Алгоритм збору даних для визначення показників надійності регулювальних пристроїв.....	83
5.2	Задача оперативної корекції режиму електроенергетичних систем з врахуванням якості функціонування систем керування.....	90
5.2.1	Формування складової якості функціонування регулювальних пристроїв в цільовій функції.....	90
5.2.2	Формування цільової функції оперативного керування станами динамічних систем.....	92
5.3	Аналіз чутливості оптимальних розв'язків	93
5.3.1	Пряма задача дослідження чутливості.....	93
5.3.2	Зворотна задача дослідження чутливості.....	96
	ПІДСУМОК.....	98
	ЛІТЕРАТУРА.....	100

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АКУФ – автоматизований контроль і управління функціонуванням
АРН – автоматичне регулювання напруги
АСДУ – автоматизована система диспетчерського управління
АТ – автотрансформатор
ВН – відхилення напруги
ВР – використаний ресурс
ДРП – джерело реактивної потужності
ЕЕС – електроенергетична система
ЕС – електрична система
ЕОМ – електронна обчислювальна машина
КА – критеріальний аналіз
КМ – критеріальне моделювання
КП – критеріальне програмування
КЗ – коротке замикання
НЛР – нелінійні рівняння
ННТ – найбільш нагріта точка
НР – нормальний режим
ОІКК – оперативний інформаційно-керуючий комплекс
ООА – об’єктно-орієнтований аналіз
ООМ – об’єктно-орієнтована методологія
ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина
ПК – програмний комплекс
ПКП – пункт контролю параметрів
ППК – пристрій поздовжньої компенсації
РПН – регулювання під навантаженням
РП – регулювальний пристрій
САК – система автоматичного керування
ТВ – телевімірювання

Вступ

В електроенергетичних системах (ЕЕС) України експлуатується багато обладнання з використаним технічним ресурсом. Причому ця тенденція набирає стійкості. За даними наведеними в [2] на 2000 рік на енергооб'єктах України експлуатувалося 42 % потужних трансформаторів, які вже відпрацювали нормативний ресурс. І, якщо ситуація не зміниться, то в 2010 році їх число зросте до 70 %. Ця обставина вимагає науково-обґрунтованого підходу під час подовження строку служби, тому що це напряму впливає на надійність роботи системи в цілому. Окрім оцінки стану об'єктів необхідно розробляти стратегію відновлювальних робіт, метою яких є покращення їх експлуатаційних параметрів. До речі стратегія відновлювальних робіт також має враховувати нестачу коштів на повноцінне відновлення. За вказаних обставин виникають дві задачі – визначення черговості відновлювальних робіт і оцінка техніко-економічної ефективності відновлювання роботоздатності елементів системи на кожному етапі. Ці задачі пов'язані з необхідністю оцінки якості функціонування системи. Це в свою чергу приводить до необхідності пошуку нових підходів в математичному моделюванні, які б надали можливість більш точного відтворення процесів та явищ, що відбуваються в об'єктах, що моделюються [3].

Тому виникла складна задача підтримання об'єктів системи в процесі їх експлуатації в роботоздатному стані в умовах обмеження ресурсів, яка може бути вирішена з використанням теорії надійності і її складових частин – теорії технічного обслуговування, або теорії нейронних мереж. Але для більшого ефекту від використання підходів перерахованих теорій необхідно перейти від узагальнюючих показників надійності систем до показників, які б дозволили враховувати індивідуальні моменти експлуатації того чи іншого об'єкта. Значний ефект може дати перехід від обслуговування за нормами до технічного обслуговування за станом. Цей метод може застосовуватись під час використання теорії технічної діагностики і широкому застосуванні засобів діагностики. Підтримання технічних засобів в роботоздатному стані забезпечується розв'язанням таких задач:

1. Прогнозування зміни параметрів і міцності об'єктів.
2. Призначення граничних полів допуску параметрів.

3. Визначення параметрів і закономірностей зміни навантаження і впливів, в тому числі зі сторони зовнішніх, по відношенню до об'єкта.
4. Розробка моделей надійності (відмов).
5. Збір інформації щодо поточного стану і щодо відмов об'єктів.
6. Аналіз причин відмов.
7. Розробка засобів і методів діагностики.
8. Вибір та розрахунок параметрів стратегії технічного обслуговування.
9. Організація робіт.

Розв'язання багатьох з цих задач може бути основою проекту системи технічного обслуговування або експертних систем [4]. Наявність таких проектів дозволило б більш ефективно забезпечувати високу надійність роботи пристроїв в умовах експлуатації.

Крім визначення поточного стану об'єтів системи необхідно розв'язати ще низку задач, на виконання яких безпосередньо впливає їх надійність. Одна з таких задач – оптимальне керування станами динамічної системи. Наприклад, для такої динамічної системи як електроенергетична ця задача одна з важливих особливо в умовах дефіциту пального, погіршення екологічного стану. Якщо оптимізаційна задача вирішується з метою зменшення втрат в мережі, то надійність регулювальних пристроїв безпосередньо впливає на ступінь досягнення системою стану з найменшими втратами, тобто на якісь функціонування системи керування.

Сучасний рівень обчислювальної техніки, системної автоматики, програмного та інформаційного забезпечення дозволяє розв'язати задачу врахування рівня надійності регулювальних пристроїв під час оптимального керування в умовах їх поетапного відновлення. Необхідно визначити критерій, за яким можна було б робити висновки про стан готовності системи до виконання визначених для неї задач і на основі якого можна було б обґрунтувати допустиму інтенсивність роботи регулювальних пристроїв під час практичної реалізації результатів оптимальних розрахунків. Таким критерієм може бути якість функціонування. Цей критерій характеризує готовність системи керування та імовірність виконання задачі [4].

Врахування якості функціонування регулювальних пристроїв під час розв'язання задачі оптимального керування дозволить зменшити вплив суб'єктивного фактора на рівень реалізації результатів оптимальних розрахунків. Згідно з практикою і принципами реалізації автоматичного

керування станами таких динамічних систем як електроенергетична, результати оптимальних розрахунків для неї передаються експлуатаційному персоналу в якості рекомендацій [5]. В результаті кінцеве рішення з впровадження результатів розрахунку залишається за спеціалістами, зайнятими в оперативному керуванні. Тобто диспетчер має приймати рішення з впровадження оптимального стану системи, користуючись лише набутим досвідом, що не завжди є коректним в конкретному випадку.

Для зменшення впливу людського фактора на процес реалізації рішень з оптимізації станів динамічних систем розробляються і вдосконалюються експертні системи інтелектуальної підтримки рішень оперативного персоналу [6]. Однією з найскладніших функцій експертної системи, яка має використовуватись в електроенергетичній системі, є процес пошуку і прийняття рішень з оптимізації режиму, який має здійснюватися в темпі процесу, що диктується її специфікою [7–9]. Специфіка ЕЕС полягає в тому, що в кожний момент часу має вироблятися стільки енергії, скільки може бути спожито. Тобто в будь-який момент часу повинен виконуватись баланс між електричною енергією, яка генерується, і енергією, яка споживається приймачами. Невиконання балансу веде до зміни частоти і напруги, що призводить до погіршення техніко-економічних показників системи. Наслідком погіршення якості електроенергії є ненормальна робота споживачів, а часом і вихід їх з ладу.

Для створення експертних систем і для підвищення ефективності оптимального керування необхідно використовувати єдину методологічну базу та системний підхід на всіх етапах розв'язання задачі оптимального керування, починаючи з складання математичної моделі і закінчуючи практичною реалізацією оптимальних рішень. Достатньо продуктивним у цьому плані виявляється застосування методів теорії подібності і моделювання, власне, на всіх рівнях вирішення даної проблеми [10, 11]. Ці методи дозволяють визначити стійкі зв'язки і закономірності в системі і подати їх у вигляді критеріальних співвідношень, яким властива достатня узагальненість [12]. За цих обставин деякі зміни розрахункових умов не вимагають багаторазових повторень розрахунків, що дозволяє суттєво зменшити час реалізації керуючих впливів і слугує одним з визначальних факторів під час розв'язання задач оперативного керування, яке здійснюється в темпі процесу.

Використання методів теорії подібності для моделювання складних технічних об'єктів та процесів забезпечує виконання однієї з умов, які висуваються до математичних моделей керованого процесу – наявності однозначного співвідношення подібності між системою-оригіналом і її моделлю [10 – 12]. Достатньо пристосованим для розв'язання перерахованих вище питань оптимізації і аналізу отриманих результатів є комплекс прийомів та принципів отримання наукових і практичних висновків – критеріальний метод.

1 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СКЛАДНИХ СИСТЕМ ЯК ОСНОВНОГО ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ ЇХ ФУНКЦІОНУВАННЯ

1.1 Задача визначення надійності як показника якості функціонування

Визначення показників надійності об'єкта (системи), яка складається з елементів, показники надійності яких відомі, можна виконувати двома шляхами – розраховуючи структурну та функціональну надійності системи. Поділ за підходами чисто умовний і відрізняється лише кількістю допущень і, відповідно, ступенем складності розрахунків. Під час розрахунків функціональної надійності вплив надійності кожного елемента на систему розглядається з врахуванням функцій, які він виконує. Тому відмова деяких елементів може призводити не до повної, а лише до часткових відмов систем. В станах часткових відмов система продовжує працювати з низькими показниками якості функціонування. Під час розрахунку структурної надійності відмова будь-якого елемента, якщо він хоч якось впливає на пропускну здатність системи, вважається відмовою всієї системи.

Під пропускну здатністю об'єкта розуміємо таке: будь-який технічний об'єкт можна розглядати як чорний ящик, що має вхід та вихід. В загальному випадку, якщо об'єкт справний, то під час подачі сигналу на вхід, на виході також виявиться сигнал. Наприклад, пристрій електрозабезпечення – трансформаторна підстанція. Сигнал в даному випадку – це електрична енергія. Якщо підстанція справна, то під час подачі напруги на шини вхідного розподільчого пристрою, на шинах вихідних розподільчих пристроїв також з'явиться напруга. Якщо всі елементи підстанції справні, то кількість електроенергії, яку може вона перетворити, буде відповідати паспортним (проектним) значенням. Відповідність паспортним значенням передбачає дотримання всіх показників якості функціонування. Тепер, якщо відмовить система регулювання напруги, то частина показників якості функціонування буде порушена. Буде порушена частково і пропускну здатність об'єкта “трансформаторна підстанція”. Тобто пропускну здатність системи залежить від стану елементів. Під час розрахунку функціональної надійності ця подія класифікується як часткова відмова, під час розрахунку структурної надійності – відмова всієї системи. Різну пропускну здатність

можуть мати і окремі елементи. Так, наприклад, нормальне електропостачання споживачів може бути забезпечене тільки під час паралельної роботи двох трансформаторів. Відмова будь-кого з них призведе до перегрузки трансформатора, який залишився в роботі. Перевантаження потребує або зниження навантаження, або обмеження часу живлення споживачів. В цьому випадку пропускна здатність одного елемента (трансформатора) менша одиниці.

Досить часто на практиці необхідно оцінити можливість виконання об'єктом заданих функцій. При чому окремий об'єкт може виконувати декілька функцій. Або, навпаки, декілька об'єктів можуть виконувати одну і ту ж функцію. Велика частина цих задач функціональної надійності потребують параметричного підходу. Часто приходится розглядати структурно складні об'єкти, коли вихідна функція визначається функціями великої кількості взаємозв'язаних і взаємозалежних елементів. Тому необхідні спеціальні методи розрахунків, наприклад метод Монте-Карло.

Розрахунок функціональної надійності включає в себе декілька окремих задач:

1. Розрахунок на етапі проектування. Відомі розподіли параметрів, необхідно знайти імовірність того, що значення вихідної функції об'єкта не вийде за задані межі.

2. Відомі параметри об'єкта і залежність значень вихідної функції від навантаження. Навантаження випадкове, потребує визначення імовірності того, що значення вихідної функції об'єкта не вийде за задані межі.

3. Розрахунок на етапі експлуатації. Відомі нестационарні процеси дрейфу параметрів елементів під дією навантаження. Навантаження детерміноване (або випадкове), стаціонарне (або ні). Необхідно знайти залежність від часу імовірності знаходження значень вихідної функції в заданих межах.

4. Відмова окремих елементів може призводити до погіршення якості функціонування.

5. Для пристроїв автоматики та релейного захисту має значення розрахунок імовірності динамічної стійкості під час спрацювання (нестійке коротке замикання, АПВ тощо).

Показники функціональної надійності тісно пов'язані з показниками якості функціонування об'єктів. Показники якості функціонування можуть бути дискретними та неперервними. Наприклад, дискретний показник – імовірність спрацювання роз'єднувачів під час подачі команди на

переключення. Неперервний показник – нерівномірність натискання в процесі струмозняття. Іноді показники ефективності функціонування бувають одновимірними, частіше багатовимірними. Наприклад, електроустановка характеризується рівнем напруги, її коливаннями і відхиленнями, а також допустимим струмом навантаження.

Можна перерахувати деякі показники функціональної надійності:

1. Імовірність виконання заданих функцій.
2. Густина розподілу вихідного параметра.
3. Математичне очікування часу спрацювання.
4. Імовірність селективного реагування на струми короткого замикання.

Розрахунок функціональної надійності для таких динамічних систем як електроенергетична досить складний. Пояснюється це значною кількістю взаємопов'язаних елементів. Складність технічної системи визначається числом зв'язків з її елементами. Під час відмови одного елемента система може переходити в стани зниження якості функціонування або відмови.

Під час функціонування технічної системи досягається певна мета. Кількісна міра, яка вимірює ступінь відповідності результатів функціонування меті, називається показником якості функціонування системи. Показник повинен:

- об'єктивно характеризувати систему,
- мати прямий зв'язок з цільовим призначення системи;
- бути чутливим до зміни основних параметрів системи;
- повинен бути достатньо простим і зручним для його обчислення, вимірювання і зображення.

Електроенергетична система працює в умовах впливу випадкових факторів, тому значення показника якості функціонування є випадковими величинами або випадковими функціями.

Часто у складної системи є декілька цілей функціонування, тому показник якості функціонування для таких систем буде векторною величиною.

Наявність декількох показників якості функціонування системи представляє собою одну з складностей її аналізу. Інша складність заключається в необхідності виразити показники якості функціонування системи через характеристики функціонування елементів. Ці характеристики є частковими показниками. Вони показують наскільки добре функціонує елемент, але не дають уявлення щодо вкладу, який

даний елемент вносить в досягнення мети, яка поставлена перед системою в цілому.

В динамічних системах, схожих до електроенергетичної, особливістю є те, що система змінює свій стан як за режимом роботи, так і за своїми показниками якості функціонування. Тобто надійність об'єктів системи змінюється в часі і змінюється надійність системи в цілому. Особливістю таких динамічних систем як електроенергетична є зміна надійнісних показників під час виходу з ладу або зміні показників надійності кожного з об'єктів системи. Крім того майже всі об'єкти таких систем є відновлюваними об'єктами.

Особливістю відновлюваних об'єктів є те, що їх експлуатація не завершується після відмови. Об'єкт, що відмовив, відновлюється і знову включається в роботу. Відмови та відновлення утворюють потік або послідовність подій, тому для описання об'єктів, що відновлюються, використовується математичний апарат потоків відмов.

Потоком подій називають послідовність однорідних подій, які відбуваються одна за одною у випадкові моменти часу.

Більшість об'єктів динамічних систем є об'єктами з кінцевим часом відновлення.

Для об'єктів з кінцевим часом відновлення велике значення має властивість готовності – здатності знаходитись в працездатному і готовому до застосування стані. Існує декілька показників готовності, розглянемо їх.

Функцією готовності називається залежність від часу імовірності знайти об'єкт працездатним в заданий момент. Іншими словами, функція готовності це імовірність того, що в заданий момент часу об'єкт буде працездатним. Об'єкт може знаходитись в момент часу t в працездатному стані для здійснення одної з двох несумісних подій:

- 1) об'єкт протягом часу від $(0, t)$ не відмовив;
- 2) об'єкт відмовляв, відновлювався і після останнього відновлення більше не відмовляв.

Функція готовності $\Gamma(t)$ дорівнює сумі імовірностей появи вказаних подій. Імовірність появи першої події дорівнює імовірності безвідмовної роботи $F(t)$ об'єкта протягом проміжку часу $(0, t)$. Для визначення імовірності появи другої події розглядається малий інтервал $(\tau, \tau+d\tau)$, що передує t . Імовірність того, що на цьому інтервалі закінчиться останнє, n -е відновлення і об'єкт більше не відмовить за решту часу $(t-\tau)$, дорівнює

$$q_{\text{кп}}(\tau) d\tau \cdot F(t - \tau),$$

де $q_{\text{кп}}(\tau)$ – густина розподілу часу до появи n -го відновлення (це час дорівнює $\sum_{i=1}^n t_i$).

Додавши по всіх $n=1, 2, \dots$, отримаємо

$$\sum_{n=1}^{\infty} q_{\text{кп}}(\tau) d\tau \cdot F(t - \tau) = \varpi_{\text{кп}}(\tau) d\tau \cdot F(t - \tau),$$

де $\varpi_{\text{кп}}(\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} q_{\text{кп}}(\tau)$ – параметр потоку відновлень.

Інтегруючи за τ від 0 до t , знаходимо імовірність другої події

$$\int_0^t F(t - \tau) \cdot \varpi_{\text{к}}(\tau) d\tau.$$

Таким чином, функція готовності

$$\Gamma(t) = F(t) + \int_0^t F(t - \tau) \cdot \varpi_{\text{к}}(\tau) d\tau.$$

Границя функції готовності для $t \rightarrow \infty$ буде мати такий вигляд:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Gamma(t) = \frac{1}{\mu_{\text{T0}} - \mu_{\text{TB}}} \cdot \int_0^{\infty} F(t) dt = \frac{\mu_{\text{T0}}}{\mu_{\text{T0}} + \mu_{\text{TB}}} = k_{\Gamma}.$$

Функція готовності для $t \rightarrow \infty$ прямує до усталеного значення, яке називається коефіцієнтом готовності k_{Γ} . Коефіцієнт готовності визначається імовірністю того, що об'єкт опиниться в працездатному стані в довільний момент часу, окрім періодів коли заплановано, що об'єкт працювати не буде. Коефіцієнт готовності можна розуміти як частку часу, протягом якого об'єкт працездатний, від загального часу експлуатації об'єкта. Важливо, що значення коефіцієнта готовності не залежить від законів розподілу випадкових величин напрацювання між відмовами і часом відновлення.

Аналогічно виводиться рівняння для функції оперативної готовності $\Gamma(t, t+x)$. Функція оперативної готовності визначає імовірність того, що об'єкт не тільки буде в працездатному стані в момент часу t , але й пропрацює безвідмовно на заданому інтервалі $(t, t+x)$.

$$\Gamma(t, t+x) = F(t+x) + \int_0^t F(t+x-\tau) \cdot \varpi_{\text{к}}(\tau) d\tau,$$

де x – оперативний час.

Застосування функції оперативної готовності як показника надійності можна показати на прикладі пристроїв захисту і автоматики. Такі пристрої мають черговий режим роботи і повинні не тільки бути працездатними в момент пошкодження або короткого замикання, але й пропрацювати безвідмовно до його усунення. Границею функції оперативної готовності для $t \rightarrow \infty$ є коефіцієнт оперативної готовності.

$$k_{\text{ОГ}}(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Gamma(t, t+x) = k_{\Gamma} \cdot \frac{1}{\mu_{\text{ТО}}} \cdot \int_x^{\infty} F(\tau) d\tau.$$

В загальному випадку, для знаходження значення функції готовності, оперативної готовності і коефіцієнта оперативної готовності може знадобитись чисельне інтегрування. Для випадку, коли час між відмовами і час відновлення мають експоненційний закон розподілу ці надійнісні характеристики будуть мати вигляд:

$$\Gamma(t) = \frac{\lambda_{\text{В}}}{\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{В}}} + \frac{\lambda_{\text{О}}}{\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{В}}} \cdot \exp[-(\lambda_{\text{В}} + \lambda_{\text{О}}) \cdot t];$$

$$k_{\Gamma} = \frac{\lambda_{\text{В}}}{\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{В}}};$$

$$\Gamma(t, t+x) = \left\{ \frac{\lambda_{\text{В}}}{\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{В}}} + \frac{\lambda_{\text{О}}}{\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{В}}} \cdot \exp[-(\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{В}}) \cdot t] \right\} \cdot \exp(-\lambda_{\text{О}} \cdot x);$$

$$k_{\text{ОГ}}(x) = \frac{\lambda_{\text{В}} \cdot \exp(-\lambda_{\text{О}} \cdot x)}{\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{В}}},$$

де $\lambda_{\text{О}}$ – параметр розподілу напрацювання між відмовами;

$\lambda_{\text{В}}$ – параметр розподілу часу відновлення.

Ці характеристики дозволяють оцінити загальний стан складної системи. А цього в більшості випадків не достатньо, особливо якщо необхідно врахувати етапність процесу відновлення, та індивідуальні особливості умов експлуатації. Крім того досить часто виникає необхідність визначати ефективність функціонування системи ще на етапі її конструювання. Тому необхідна розробка інтегральних показників якості функціонування системи, які б дозволили визначати ефективність функціонування технічних об'єктів та системи вцілому на будь-якому етапі їх життєвого циклу.

Життєвий цикл включає в себе такі етапи:

- 1) маркетинг;
- 2) проектування та розробка технічних вимог, розробка продукції;
- 3) матеріально-технічне постачання;
- 4) підготовка та розробка виробничих процесів;
- 5) виробництво;
- 6) контроль, проведення досліджень;
- 7) упаковка та зберігання;
- 8) реалізація та розподіл;
- 9) монтаж;
- 10) експлуатація, технічне обслуговування;
- 11) утилізація після використання.

У відповідності з ними розрізняють три етапи формування надійності об'єкта: проектування, виготовлення (монтаж) та експлуатація. За даними Консультативної групи з питань надійності радіоелектронних апаратів (AGREE) варієтує неусуненої помилки, яка на етапі дослідження складає 1 у.о., збільшується на етапі проектування до 10 у.о., виготовлення 100 у.о. і експлуатації 1000 у.о.

Під час проектування необхідно враховувати процеси виготовлення і монтажу. Обов'язково приділяти увагу контроле- та ремонтпридатності об'єктів. Наприклад під час розробки залізобетонних опор мало уваги було приділено їх контролепридатності. Наслідком стало те, що після початку корозійних процесів в арматурі знадобилась діагностика, виникли серйозні проблеми. Діагностика арматури розроблялась після встановлення великої кількості опор, які мали низьку контролепридатність. Це вимагало ускладнення апаратури і методів вимірювання, а також знизило достовірність контролю. Вірніше було б розглядати всі можливі способи діагностики, вибрати найбільш ефективні і внести зміни до конструкції опор.

Побудова раціональної системи діагностики є необхідною оскільки лише за її допомогою можна визначити параметри технічних об'єктів, які дозволять врахувати індивідуальні особливості під час визначення показників якості функціонування об'єкта і системи вцілому.

1.2 Аналіз методів розрахунку надійності

Сучасні методи розрахунку надійності поділяються в залежності від принципу обліку відмов на методи, що враховують момент появи відмов, і методи, що враховують процес появи відмов.

В залежності від обліку ремонту і відновлення вони поділяються на

методи, які не враховують ремонт і відновлення устаткування, і методи, що враховують ремонт і відновлення устаткування.

Розв'язання задачі розрахунку надійності установки можна виконувати п'ятьма способами:

- 1) за допомогою основних теорем теорії імовірностей;
- 2) шляхом складання і розв'язання системи диференціальних рівнянь марковського процесу переходу установки від стану до стану;
- 3) шляхом еквівалентних перетворень розрахункової схеми в поєднанні з першим і другим способами;
- 4) на основі застосування топологічних і логічних методів;
- 5) шляхом статистичного моделювання випадкового процесу переходу установки від стану до стану (метод Монте-Карло).

Перший спосіб у даний час одержав найбільше поширення. У ньому використовуються теореми додавання і множення імовірностей і формула повної імовірності [18, 23, 102, 140, 142].

Другий спосіб теж досить розповсюджений і припускає, що математична модель установки повинна враховувати як можливі стани окремих елементів і установки в цілому, так і перехід установки зі стану в стан [98, 101].

Аналітичний розрахунок по третьому способу полягає в поетапному розрахунку складних систем за допомогою ряду виразів, отриманих першим або другим способом для найпростіших з'єднань елементів, тобто шляхом послідовного еквівалентування елементів розрахункової схеми [23, 81, 109].

Топологічними називаються методи аналізу системи, засновані на понятті стану і переходів між станами.

Методи можуть бути реалізовані як за допомогою матриць (перехідних імовірностей або інтенсивностей переходу), так і за допомогою орієнтованих графів.

До чисто логічних методів входять: логіко-імовірнісний, логіко-аналітичний, логіко-статистичний, таблично-логічний.

Загальною частиною для всієї цієї групи методів є етап одержання логічної функції системи. Для простих систем логічна функція системи виходить безпосередньо за схемою [96], для складних випадків розроблені спеціальні методи [56, 57]. Другий етап у цих методів різний.

В логіко-імовірнісному методі цей етап полягає в безпосередньому обчисленні логічної функції. У найпростішому випадку це здійснюється

безпосередньою підстановкою показників надійності елементів у логічну функцію. Для більш складних випадків доцільно зробити попереднє спрощення логічної функції [57, 96]. Процес спрощення полягає в перетворенні логічної функції в систему незалежних у сукупності членів. В цілому цей метод знайшов досить широке застосування як у нас, так і за кордоном, при розрахунку надійності систем електропостачання.

Логіко-аналітичний метод полягає у визначенні показників надійності системи за її логічною функцією. Для невідновлюваних систем він відомий давно [86], а для відновлюваних вперше запропонований у [154].

Таблично-логічні методи полягають у записі логічних зв'язків між відмовами елементів, станами й аваріями в установці в формі таблиць або матриць з наступним обчисленням показників надійності за допомогою цих таблиць.

Метод статистичного моделювання одержав досить широке поширення головним чином за рахунок того, що дозволяє робити розрахунок надійності систем, не накладаючи ніяких обмежень на вигляд законів розподілу випадкових величин, їхнього числа способів резервування й обслуговування і т. п. [62, 89, 92, 117].

Логіко-статистичний метод полягає в статистичному моделюванні логічної функції системи для одержання аналізу станів роботи і відмови системи. За рахунок того, що час нормальної роботи досліджується аналітично і лише час відмови – методом Монте-Карло, досягається істотне прискорення процесу розв'язання. Один з можливих алгоритмів запропонований у [117], для систем електропостачання метод реалізований у [99].

Більшість дослідників надійності електроенергетичних установок бажає мати справу з аналітичними, логічними методами і методом статистичних випробувань. Вибір методу диктується потребами задачі.

1.2.1 Однорідні марковські моделі надійності

Для наближеного визначення коефіцієнта готовності застосовують метод, що ґрунтується на аналізі відповідної однорідної марковської моделі надійності досліджуваного об'єкта. Основна умова, що висувається під час синтезу однорідної марковської моделі надійності об'єкта, полягає в тому, щоб характеристики усіх процесів напрацювання та ремонту, що протікають в ньому, були апроксимовані тільки експоненціальним законом

розподілу. Така умова дозволяє розглядати потік без післядій. Потік подій називається потоком без післядії, якщо для будь-яких двох ділянок часу, що не перетинаються, число подій, які потрапляють на один з них, не залежало від того, скільки подій попало на інший. Це означає, що події, які утворюють потік, з'являються в той чи інший момент часу незалежно один від одного. Поширення однорідних марковських моделей надійності, як зазначають в [51], обумовлено їх зручністю для чисельного розрахунку. Також, користуючись експоненціальним законом розподілу, вдається легко апроксимувати експериментальні дані, а у разі їх обмеженого об'єму або низької достовірності, складніші закони розподілу ускладнюватимуть подальші дослідження без збільшення адекватності моделювання. У тій же роботі стосовно однорідних марковських моделей надійності стверджують, що вони відображають найгірший випадок, тобто нижню межу безвідмовності або готовності досліджуваного об'єкта.

1.2.2 Неоднорідні марковські моделі надійності

З метою підвищення точності розрахунку коефіцієнта готовності ремонтваних об'єктів, в яких протікають випадкові процеси з характеристиками, які відрізняються від характеристик відповідних експоненціальних законів розподілу, пропонують [53 – 69] застосовувати підхід, що ґрунтується на аналізі неоднорідної марковської моделі надійності досліджуваного об'єкта. Стани та переходи неоднорідної марковської моделі надійності згідно з таким підходом формуються аналогічно, як для однорідної марковської моделі надійності. Відмінність моделей надійності цього типу від попередніх полягає в тому, що функції інтенсивності переходів, які визначаються випадковими процесами, характеристики яких не описуються експоненціальним законом розподілу, залежать від часу. Недоліком неоднорідних марковських моделей надійності ремонтваних об'єктів є те, що невідомий зв'язок між функціями інтенсивності переходу таких моделей надійності та імовірнісними характеристиками процесів напрацювання та ремонту, що протікають у даному об'єкті. На сьогодні в літературних джерелах запропоновано кілька способів для наближеного визначення такого взаємозв'язку.

1.2.3 Моделі надійності на основі методу Монте-Карло

Для уточненого розрахунку коефіцієнта готовності ремонтваних електромеханічних об'єктів відомий підхід, який ґрунтується на аналізі моделі надійності на основі методу Монте-Карло. Хоча загальна концепція такого способу розрахунку коефіцієнта готовності розроблена ще в 50-х роках, проте поширення такі моделі надійності набули лише тепер, внаслідок досягнення обчислювальною технікою достатнього рівня продуктивності обчислень. В основу таких моделей надійності покладено багаторазове застосування генератора випадкових чисел для моделювання випадкової тривалості процесів напрацювання та ремонту. Докладно загальний спосіб синтезу моделей надійності на основі методу Монте-Карло подано в роботах [74 – 85]. Перевага таких моделей надійності полягає в тому, що вони не накладають жодних обмежень на закони розподілу випадкових процесів відмов та відновлення, що протікають в досліджуваному об'єкті. Метод Монте-Карло передбачає реалізацію кількох різних способів побудови моделей надійності, причому залежно від об'єкта та характеристик різні типи таких моделей надійності мають різну ефективність.

Моделі надійності ремонтваних об'єктів, реалізовані на основі методу Монте-Карло, мають низку недоліків, характерних лише їм. Вони мають нижчу ефективність порівняно із аналогічними однорідними марковськими моделями надійності, а тому, якщо апроксимація імовірнісних характеристик експоненціальними законами розподілу є прийнятною, то однозначно, що необхідно застосовувати однорідну марковську модель надійності об'єкта. Результати, отримані шляхом розрахунку моделі надійності, реалізованої на основі методу Монте-Карло, мають стохастичний характер. Це проявляється в тому, що отримана крива досліджуваного показника випадково коливається навколо дійсного результату, а тому важко встановити, чи вона дійсно має такий характер на досліджуваному відрізку часу, чи такий характер пояснюється стохастичною похибкою, що породжена генератором випадкових чисел. Одним із проявів такого недоліку є те, що для однієї і тієї ж моделі надійності об'єкта, в аналогічних умовах математичного експерименту кожне наступне моделювання даватиме результат, відмінний від попереднього, хоча загальний характер кривих, отриманих за різних реалізацій, буде однаковим. Тобто після кожного наступного моделювання отримуємо різні випадкові коливання навколо однієї і тієї ж середньої

кривої. Щоб зменшити стохастичну похибку, необхідно нарощувати кількість реалізацій, що погіршує ефективність цих моделей надійності, а тому такий спосіб зменшення стохастичної похибки обмежений для застосування.

1.2.4 Фазові моделі надійності

Зміст цього способу прогнозування полягає в тому, що на основі наперед заданого характеру зміни випадкової величини формується спеціальна однорідна марковська модель шляхом додавання фіктивних станів та утворення фіктивних переходів між такими станами. Оптимальну кількість фіктивних станів вибирають згідно з алгоритмом Вітербі, а параметри фіктивних переходів – на основі алгоритму Баума – Вечла. Таким чином, на основі дубльованої прихованої однорідної марковської моделі вдається прогнозувати випадкові явища, переходи між станами якого є нестационарними.

Безпосередньо поданий вище підхід застосувати для побудови моделей надійності ремонтованих об'єктів не можна. Побудова дубльованої прихованої марковської моделі передбачає аналіз усього сукупного випадкового процесу одразу, а при формування моделі надійності необхідно, виходячи із аналізу окремих випадкових процесів, сформуванню увесь сукупний випадковий процес

У науковій літературі описаний вище підхід для дослідження коефіцієнта готовності ремонтованих об'єктів називають методом фаз. Він ґрунтується на аналізі розширеної однорідної марковської моделі надійності об'єкта. Таку модель надійності, як вже було зазначено, формують на основі неоднорідної марковської моделі надійності об'єкта шляхом введення фіктивних станів та фіктивних однорідних переходів. Щоб принципово можна було сформуванню розширену однорідну марковську модель надійності об'єкта необхідно, щоб характеристики усіх випадкових процесів відмов та відновлення, що протікають в досліджуваному об'єкті, були апроксимовані фазовими законами розподілу. Цей підхід потенційно містить, як переваги неоднорідних марковських моделей надійності, що проявляється у можливості досліджувати характеристики, які відрізняються від характеристик експоненціального закону розподілу, так і переваги однорідних марковських моделей надійності, що проявляється у застосуванні високоефективного математичного апарату, який ґрунтується на

диференціальних рівняннях Колмогорова. Основна проблема, яка гальмує застосування цього способу для аналізу моделей надійності ремонтованих об'єктів, полягає в тому, що на основі відомих у літературі способів побудови, загалом не вдається досягти еквівалентної розширеної однорідної марковської моделі надійності стосовно вихідної неоднорідної марковської моделі надійності досліджуваного об'єкта.

1.3 Поняття концепції простору станів

Досліджувана проблема полягає в тому, щоб ефективно розрахувати коефіцієнт готовності $\Gamma(t)$ об'єкта, якщо відомі характеристики усіх випадкових процесів напрацювання, які задані функціями безвідмовності $F(t)$, та ремонту, які задані функціями відновлення $M(t)$. Найпродуктивнішою ідеєю для розв'язання даної задачі є застосування концепції простору станів для множини досліджуваних об'єктів. Ця концепція полягає в тому, що процеси напрацювання та ремонту об'єкта розбивають на множину станів, відповідно до станів в яких перебувають складові елементи. Зміст такого способу аналізу об'єкта ґрунтується на тому, що оскільки усі стани мають єдину стохастичну природу, то визначення їх імовірностей має здійснюватися за однаковими принципами. Стани з'єднують логічними зв'язками, згідно з якими об'єкт випадково може переходити із одного стану в інший внаслідок зміни стану складового елемента, що відповідає такому переходу. Графічне відображення станів об'єкта, які з'єднані орієнтованими переходами, що означають такі логічні зв'язки, отримало назву діаграми станів та переходів об'єкта. Виходячи із припущення, що характеристики усіх процесів напрацювання та ремонту означені експоненціальним законом розподілу, кожному переходу ставиться у відповідність сталий коефіцієнт, який є параметром експоненціального закону розподілу того випадкового процесу, який позначає цей перехід. За такою діаграмою станів та переходів на основі правил, що подані в [43, 45], записують систему диференціальних рівнянь Колмогорова, що і є однорідною марковською моделлю надійності об'єкта. Додавання імовірностей станів, що відповідають справності об'єкта, визначають його коефіцієнт готовності $\Gamma(t)$.

Зазначимо ще раз, що однорідні марковські моделі надійності для ремонтованих об'єктів довгий час були єдиним прийнятним способом розрахунку коефіцієнта готовності. Оскільки, як показали дослідження

багатьох авторів [1 – 16], характеристики досліджуваних об'єктів не можуть бути з високим ступенем точності апроксимовані експоненціальним законом розподілу, то результуючі однорідні марковські моделі надійності в загальному випадку мають низьку адекватність. Внаслідок такого недоліку спостерігається заміщення їх моделями надійності на основі методу Монте-Карло.

Виникає питання про принципову можливість застосування концепції простору станів для розрахунку коефіцієнта готовності об'єктів, в яких відбуваються процеси напрацювання та ремонту, характеристики яких не можна адекватно апроксимувати експоненціальним законом розподілу. Такі моделі надійності, де розглядається згадувана принципова можливість, у науковій літературі отримали назву неоднорідних марковських моделей надійності. Як показав огляд літератури, їх застосування для об'єктів обмежене, внаслідок низької адекватності або ефективності. Такий стан речей пояснюють тим, що досі залишається невідомим коректний спосіб їх синтезу, хоча дослідження в цьому напрямку тривають. Тому на першому кроці потрібно розглянути питання, в якому саме місці з переходом від однорідної марковської моделі надійності до неоднорідної виникають обмеження, які нівелюють подальше практичне застосування останніх. Розуміння такого джерела обмежень дозволить визначити шляхи його уникнення.

1.4 Диференціальні рівняння, які визначають імовірності станів

Подібні диференціальні рівняння в математичній літературі [143, 149] відомі як неоднорідні диференціальні рівняння Колмогорова. Для досліджуваних об'єктів такі рівняння є неоднорідною марковською моделлю надійності. Розглянемо формування диференціальних рівнянь, які визначають імовірності станів для загального випадку, коли об'єкт може як увійти в досліджуваний стан, так і вийти з нього. Нехай у просторі станів об'єкта існує стан S_k . У цей стан об'єкт може увійти з сусідніх станів S_{k-1} , S_{k-2} ... та вийти із нього в сусідні стани S_{k+1} , S_{k+2} ..., як це показано на рисунку 1.1.

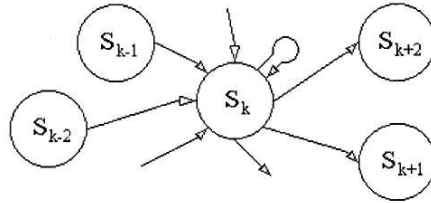


Рисунок 1.1 – Елемент діаграми станів та переходів, що відображає стан S_k

Розглянемо елементарний інтервал часу Δt , який починається в довільний момент часу t . Імовірність події, яка полягає в тому, що об'єкт перебуває в момент часу $t+\Delta t$ у стані S_k , визначається як

$$P_{r_k}(t + \Delta t) = P_r[A_1 \vee A_2 \vee A_3],$$

де A_1 – подія, коли об'єкт у момент часу перебував в стані S_k і за час Δt залишився в ньому, A_2 – подія, коли об'єкт у момент часу t перебував в одному із сусідніх стосовно стану S_k станах S_{k-1}, S_{k-2}, \dots і за час Δt перейшов у стан S_k , A_3 – подія, коли об'єкт у момент часу t перебував в одному з несусідніх до стану S_k станах $S_{k-m}, S_{k-m-1}, \dots$ і за час Δt перейшов у сусідні до досліджуваного стану S_k стани S_{k-1}, S_{k-2}, \dots

Означені події утворюють усі можливі способи попадання об'єкта в стані S_k у момент часу $t+\Delta t$. Оскільки події перебування об'єкта в різних станах є несумісними, то можна перейти від імовірності логічної суми подій A_1 та A_2 до суми імовірностей цих подій

$$P_{r_k}(t + \Delta t) = P_r[A_1 \vee A_2] = P_r[A_1] + P_r[A_2].$$

Імовірність події A_2 розкладемо на суму імовірностей несумісних подій перебування об'єкта в сусідніх щодо стану S_k станах. У свою чергу події A_1 та A_2 з логічним добутком таких залежних подій:

$$P_{r_k}(t + \Delta t) = P_r[B_k \vee B_{k_k}] + \sum_{j=N_m}^{k-1} P_r[B_j B_{j_k}] =$$

$$P_r[B_k] P_r[B_{kk} | B_k] + \sum_{j=0}^{k-1} P_r[B_j] P_r[B_{jk} | B_j],$$

де B_k – подія, яка полягає в тому, що в момент часу t об'єкт перебував у стані S_k ; B_{kk} – подія, яка полягає в тому, що за час Δt об'єкт залишиться у стані S_k ; N_m – номер першого сусіднього стану стосовно стану S_k із якого об'єкт може перейти в нього; B_j – подія, яка полягає в тому, що в момент

часу t об'єкт перебував у сусідньому стосовно стану S_k стані S_j ; V_{jk} – подія, яка полягає в тому, що за проміжок часу t об'єкт перейде із сусіднього стану S_j у стан S_k .

Загалом події V_{kk} та V_k і V_{jk} та V_j залежать одна від одної. Тобто імовірність того, що об'єкт залишиться в стані S_k залежить від того, чи перебував він саме в стані S_k на початку, а імовірність переходу із стану S_j у стан S_k залежить від того, чи об'єкт перебував до переходу в стані S_j . Ці твердження є очевидними, проте з них випливає цікавий наслідок. Перехідні імовірності, які відповідають закінченню одного і того ж випадкового процесу з довільною імовірнісною характеристикою, в загальному випадку залежать як від закону розподілу такого випадкового процесу, так і від стану, з якого такий перехід здійснюється. Це означає, що перехідні імовірності і, відповідно, похідні від них характеристики, які відповідають відмові або відновленню одного і того ж елемента, для різних попередніх станів загалом різняться.

Введемо такі позначення: імовірність перебування об'єкта в стані S_j у момент часу t позначимо як $P_r[B_j]=P_r[t]$, а імовірність його перебування в стані S_k у момент часу t – як $P_r[B_k]=P_{rk}[t]$. Позначимо умовну імовірність переходу об'єкта із стану S_j у стан S_k протягом часу Δt за умови, що він перебував у стані S_j у момент часу t , як $P_r[B_{jk}|B_j]=P_{ijk}[\Delta t, t|S_j]$. Аналогічно позначимо умовну імовірність того, що об'єкт залишиться в стані S_k протягом часу Δt , за умови, що він перебував у стані S_k у момент часу t , як $P_r[B_{kk}|B_k]=P_{rkk}[\Delta t, t|S_k]$. Перетворимо тепер вираз умовної імовірності $P_{rkk}[\Delta t, t|S_k]$ так. Оскільки він визначає імовірність відсутності подій відмов та відновлення протягом часу Δt , то скориставшись властивістю про імовірність відсутності подій, яка розглянута вище, отримаємо

$$P_{rk}(\Delta t, t|S_k) = 1 - \sum_{l=k+1}^{N_k} P_{r_{k+1}}[\Delta t, t|S_k],$$

де N_k – номер останнього сусіднього стосовно досліджуваного стану S_k стану, із якого об'єкт може перейти в нього; $P_{k1}(\Delta t, t|S_k)$ – імовірність переходу із стану k в сусідній стан l протягом часу Δt , за умови, що об'єкт перебував у стані S_k .

Цей вираз записаний із умови, відсутності переходу об'єкта із стану S_k , протягом проміжку часу Δt , утворює повну групу подій із незалежними

подіями, які полягають у переході об'єкта в стани $S_{k+1}, S_{k+2} \dots$, які є сусідніми, за умови, що в момент часу t об'єкт перебував у стані S_k . Враховуючи щойно введені позначення, отримаємо

$$P_{r_k}(t + \Delta t) = P_{r_k}(t) \left(1 - \sum_{l=k+1}^{N_k} Pr_{k+1}[\Delta t, t|S_k] \right) + \sum_{l=k+1}^{N_k} Pr_j(t) Pr_{jk}[\Delta t, t|S_j].$$

Виконаємо перетворення у виразах умовних ймовірностей переходів між станами. Відкинемо в них усі величини вищих порядків малості відносно елементарного проміжку часу Δt . Це можна зробити, наприклад, розкладанням таких виразів у ряд Тейлора з подальшим відкиданням усіх членів із $\Delta t_2, \Delta t_3, \dots$, або іншим зручнішим шляхом. Часову функцію, яка виявиться множником до Δt в результаті такого перетворення, назовемо функцією інтенсивності переходу

$$P_{r_k}(\Delta t, t|S_i) = h(t|S_i) = h(t|S_i)\Delta t + O_\zeta(\Delta t),$$

де $h(t | S_i)$ – функція інтенсивності переходу із стану S_i у S_j ; $O_\zeta(\Delta t)$ – величина вищого порядку малості порівняно із елементарним проміжком часу Δt , що пов'язана із доданками, які відкидаються.

Розділимо отриманий вираз на елементарний проміжок часу Δt та перейдемо до границі, за умови, що цей проміжок прямує до нуля $\Delta t \rightarrow 0$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Pr_k(t + \Delta t) - Pr_k(t)}{\Delta t} = -Pr_k(t) \sum_{l=k+1}^{N_n} h_{kl}(t|S_k) + \sum_{j=N_m}^{k-1} Pr_j(t) h_{jk}(t|S_j).$$

Отримане диференціальне рівняння визначає похідну імовірності перебування об'єкта в стані S_k . Неоднорідна марковська модель надійності об'єкта є системою диференціальних рівнянь для усієї множини його станів:

$$\frac{dPr_k(t)}{dt} = -Pr_k(t) \sum_{l=0}^{N_n} h_{kl}(t|S_k) + \sum_{j=0}^{N_S} Pr_j(t) h_{jk}(t|S_j), \quad (1.1)$$

де N – розмірність простору станів об'єкта.

Біжучий індекс "k" почергово набуває значень із діапазону $[0, N]$, тобто перебираємо всі можливі стани об'єкта. Рівняння (1.1) записане так, що перебір функцій інтенсивності переходу відбувається також за всіма станами. Там, де переходу між станами немає, вважаємо, що функція інтенсивності переходу рівна нулю. Приймаємо, що розмірність простору станів N збігається з значенням індексу початкового стану. Початковий стан, імовірність перебування об'єкта в такому стані S_N у нульовий момент часу $t = 0$ рівна одиниці, $P_{rN}(0)=1$, тобто є достовірною подією. Для решти станів, початкова імовірність є нульовою, тобто $P_{r0}(0)=P_{r1}(0)=\dots=P_{rN-1}(0)=0$.

При формуванні неоднорідних марковських моделей надійності багатоелементних об'єктів без відновлення, для їх вихідного та поглинальних станів, диференціальні рівняння (1.1) набудуть вигляду.

Систему рівнянь (1.1) можна звести до класичних однорідних диференціальних рівнянь Колмогорова, якщо прийняти, що характеристики випадкових процесів відмов та відновлення, що відбуваються в об'єкті, означаються тільки експоненціальним законом розподілу. Тоді функції інтенсивності переходів перетворюються на константи, які рівні параметрам відповідних експоненціальних законів розподілу, $h(t | S_j) = \lambda_{ij}$

$$\frac{dPr_k(t)}{dt} = -Pr_k(t) \sum_{l=0}^{N_n} \lambda_{kl} + \sum_{j=0}^{N_S} Pr_j(t) \lambda_{jk} , \quad (1.2)$$

для $k = 0 \dots N$, за початкових умов тобто $Pr_{i0}(0) = Pr_{r1}(0) = \dots = Pr_{rN}(0) = 1$.

Тобто система рівнянь (1.2) є загальнішою і від неї можна перейти до спрощеного однорідного варіанта. Таким чином, на основі поданого виведення рівняння (1.2) вдалось показати правомірність неоднорідної марковської моделі надійності для опису узагальненого багатоелементного ремонтваного об'єкта. Єдиний аспект, який залишається незрозумілим при формуванні неоднорідних марковських моделей надійності, полягає в тому, що невідомо як необхідно визначати залежні в часі функції інтенсивності переходу $h_{kj}(t|S_k)$. На це питання можна відповісти лише в окремих випадках.

2 ВПЛИВ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НА ПРОЦЕС ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

2.1 Аналіз факторів, які впливають на результати оптимізації станів динамічних систем

За сучасних можливостей обчислювальної техніки та методичної забезпеченості проблем з визначенням оптимальних станів динамічних систем не виникає [19]. Однак, не зважаючи на технічні можливості, реалізація оптимальних розрахунків залишається на досить низькому рівні, що не дозволяє досягти бажаний економічний ефект від оптимального керування [24, 25]. В залежності від рівня автоматизації систем управління, на ступінь реалізації оптимальних розрахунків впливають різні фактори. Так, наприклад, в такій динамічній системі як електроенергетична, за умов, що склались, оптимальні розрахунки оперативному персоналу передаються у вигляді рекомендацій і диспетчер, користуючись власним досвідом, приймає рішення з реалізації оптимальних режимів, що може супроводжуватися не тільки помилками але й продиктовано інтересами конкретної підсистеми зі шкодою загальносистемному ефекту [5]. Для усунення людського фактора необхідно збільшити ступінь автоматизації реалізації оптимальних розрахунків.

На реалізацію оптимальних розрахунків впливає значна кількість факторів, які не залежать від рівня технічного забезпечення. Серед них особливе місце займає надійність [4]. Практично важко назвати рішення по корекції стану, під час прийняття якого б не потрібно було б враховувати готовність регулювальних пристроїв. Це пояснюється досить просто: якщо рішення про впровадження оптимальних розрахунків залежить від оперативного персоналу, то розрахунки проведені без врахування якості функціонування регулювальних пристроїв не викликають достатньої довіри; якщо САК відпрацьовує закон керування, побудований без врахування якості функціонування, то інтенсивність роботи може зрости настільки, що призведе до виходу з ладу регулювальних пристроїв, при чому втрати зростуть настільки, що збитки будуть значно переважати економічний ефект від оптимізації станів динамічної системи.

Необхідність врахування якості функціонування регулювальних пристроїв проілюструємо на прикладі.

На рис. 2.1 зображено залежність $F(u) = f(u(t))$, $F(u)$ – критерій оптимальності, а $u(t)$ – функція управління. Будемо вважати, що область допустимих розв'язків \dot{I}_u знаходиться в межах діапазонів регулювання. Тобто,

$$\begin{aligned} u_1(t)_{\min} \leq u_1(t) \leq u_1(t)_{\max}; \\ u_2(t)_{\min} \leq u_2(t) \leq u_2(t)_{\max}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

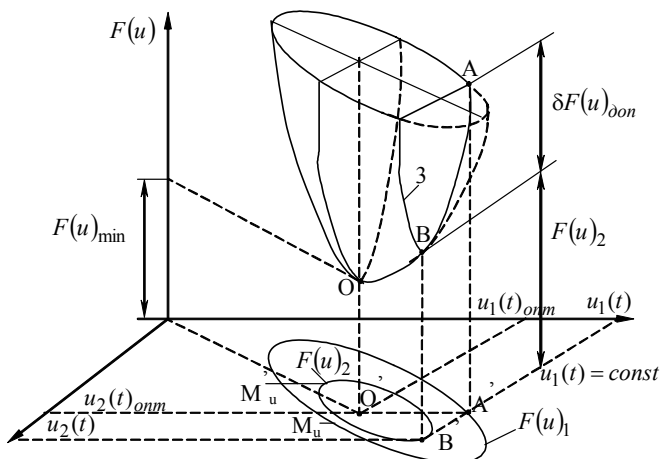


Рисунок 2.1 – Вплив надійності регулювальних пристроїв на реалізацію оптимальних розрахунків

Припустимо, що в оптимізаційній моделі відсутнє врахування технічного стану регулювальних пристроїв. В процесі розрахунку пошук оптимального розв'язку здійснюється в межах всього діапазону зміни функції управління u відповідно з (2.1). З рис. 2.1 випливає, що для досягнення мінімуму критерію оптимальності $F(u)_{\min}$ (відрізок OO') експлуатаційним персоналом у відповідності з результатами оптимізаційних розрахунків повинні бути реалізовані зміни функції управління $u_1(t)_{\text{опт}}$ і $u_2(t)_{\text{опт}}$.

Якщо оперативний персонал вважає регулювальний пристрій 1 ненадійним, то зміна функції управління $u_1(t)$ не здійснюється, залишаючись рівною $u_1'(t)$ (рис. 2.1) на тривалий час. Цьому стану

відповідає лінія 3, що визначає функцію $F(u) = f(u_1(t) = u'_1(t); u_2(t))$. Функція управління для пристрою 2 набуває оптимального значення $u_2(t)_{\text{опт}}$. Усталеному режиму роботи динамічної системи для $u_1(t) = u'_1(t)$ і $u_2(t)_{\text{опт}}$ відповідає точка А. Їй відповідає рівень критерію оптимальності, що визначається відрізком AA' , тобто $F(u)_1$. Крім того, як видно з приведеного рисунка, втрати можна зменшити на величину $\delta F(u)_{\text{доп}}$, встановивши для зафіксованого $u'_1(t)$ значення функції керування $u^{(0)2}(t)$, тобто пошук оптимального варіанту слід виконувати для умов, що $u_1(t) = u'_1(t)$; $u_2(t)_{\text{min}} \leq u_2(t) \leq u_2(t)_{\text{max}}$.

Таким чином, однією з причин неповної відповідності параметрів оптимальних і поточних станів є відсутність врахування рівня надійності регульованих пристроїв на стадії виконання оптимальних розрахунків.

Другою причиною низького ступеню реалізації результатів оптимізаційних розрахунків є відсутність повноцінного і всебічного аналізу оптимального розв'язку на чутливість [23].

Неповнота і невизначеність інформації щодо параметрів системи і режиму обумовлює зону невизначеності оптимальних розв'язків. Об'єктивне існування такої зони має принципове значення, оскільки визначає не один формально оптимальний розв'язок, а множину реально можливих оптимальних розв'язків, які утворюють інтервали невизначеності розрахункових значень втрат [23]. Аналіз втрат на чутливість до змін параметрів стану, системи і врахування зони невизначеності оптимальних розв'язків робить розрахунки більш об'єктивними [23]. Це підвищує довіру обслуговуючого персоналу до результатів оптимальних розрахунків, що сприяє зростанню ступеня їх практичної реалізації під час оперативного керування динамічними системами.

Не менш важливим, ніж аналіз на чутливість зміни критерію оптимальності до зміни керуючих параметрів, є оцінка чутливості до зміни критерію оптимальності в сенсі економічної доцільності. Як правило, оперативний персонал не задовольняють знання тільки тих значень змінних, для яких досягається екстремальне значення критерію оптимальності. Диспетчеру необхідно знати область зміни керуючих впливів, які відповідають незначним відхиленням стану від оптимального. Останнє дозволяє вирішити питання про обґрунтоване зниження

інтенсивності роботи регулювальних пристроїв. Так, якщо керуючий параметр належить вказаній області, то, очевидно, немає необхідності в зміні стану регулювальних пристроїв. Крім того, в таких динамічних системах як електроенергетична, в разі необхідності корекції режиму аналіз на чутливість дозволяє виділити ті регулювальні пристрої, зміна параметрів яких здійснює суттєвий вплив на величину втрат і рівні напруги. Очевидно, корекція коефіцієнтів трансформації саме цих трансформаторів дозволяє підвищити ефективність керування для досягнення мінімуму втрат електричної енергії.

Узагальнюючи проведений огляд процесу оперативного керування станами динамічних систем, можна виділити фактори, які в значній мірі визначають техніко-економічну ефективність оптимального керування. До них належать:

- врахування реального технічного стану регулювальних пристроїв;
- необхідність контролю та оцінки поточного стану динамічних систем в темпі процесу для зіставлення його з оптимальним;
- можливість аналізу оптимальних станів на чутливість;
- наочність результатів оптимальних розрахунків і можливість формування на їх основі законів оперативного керування станами динамічних систем.

2.2 Аналіз задач оптимізації станів і їх реалізація

Задача оптимального керування [17, 18] ставиться як задача визначення допустимого керування з квадратичним критерієм якості, що мінімізує функцію втрат

$$F(u) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} [x^T(t) \cdot Q \cdot x(t) + u^T(t) \cdot R \cdot u(t)] dt, \quad (2.2)$$

для процесу, який описується такою системою рівнянь станів:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + B \cdot u(t); \\ x(t_0) = x_0; \\ y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t), \end{cases} \quad (2.3)$$

де $x(t)$, $u(t)$, $y(t)$ – вектори стану, керування і спостереження, які мають відповідно розмірності $[1 \times 1]$, $[p \times 1]$, $[v \times 1]$; A , B , C , D – матриці постійних коефіцієнтів розмірністю $[1 \times 1]$, $[1 \times p]$, $[v \times 1]$, $[v \times p]$; Q , R – симетричні вагові, які можуть змінюватися в часі; t_0 , t_k – фіксовані моменти часу, відповідно початок і кінець інтервалу; x_0 – початкове значення вектора стану; l – кількість компонентів вектора стану; p – кількість керуючих змінних; v – кількість параметрів, які контролюються.

Ще на стадії формування цільової функції закладається можливість отримання результатів у тій чи іншій формі, зручній для подальшої практичної реалізації. Простежується два підходи до форми оптимальних розв'язків:

- у вигляді рекомендацій (графіка або чисел на екрані дисплея для подальшої реалізації в автоматизованій системі керування) [25, 27];

- доведення результатів розрахунку до законів керування (для реалізації в системах автоматичного керування) [17].

За можливості другому підходу надається більша перевага, оскільки він надає можливість уникнути впливу людського фактора на процес практичної реалізації оптимальних розрахунків.

Основною характеристикою динамічних систем є часта зміна станів, тому для адекватної реакції на зміну стану, тим більше для оптимізації, необхідні системи керування, які в темпі процесу здатні провести розрахунок оптимального режиму і провести корекцію критерію керування. В таких умовах найбільш ефективною схемою САК є схема показана на рисунку 2.2.

В даній САК закладена можливість вибіркового підходу до збору і обробки інформації, що значно спрощує задачу оптимального керування і дозволяє уникнути зайвих капітальних вкладень та експлуатаційних витрат. Спрощена задача оптимізації розв'язується після розв'язання повної задачі і виділення визначальних параметрів X' з ряду контрольованих X . Під час цього, керування в темпі процесу здійснюється лише у внутрішньому контурі. У зовнішньому контурі уточнюється

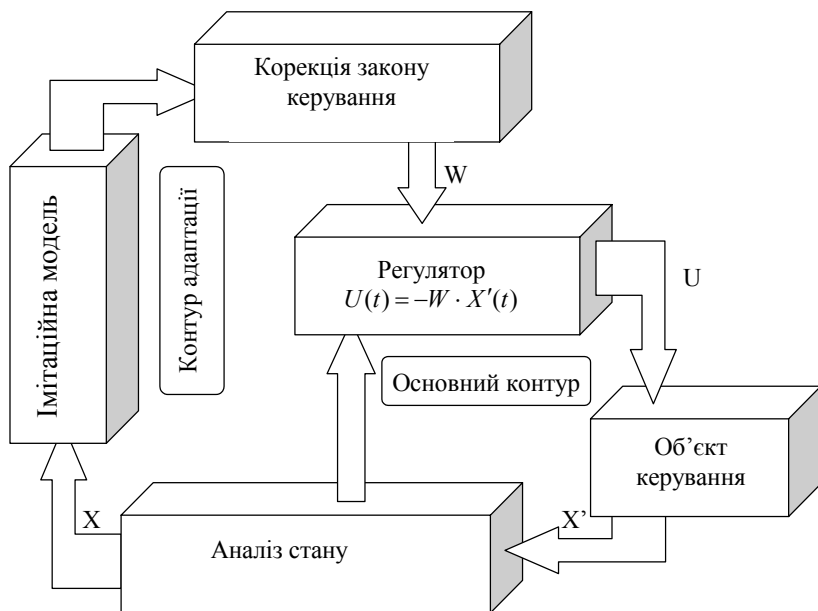


Рисунок 2.2 – Структурно-логічна схема двоконтурної САК

значення контрольованих параметрів для значних збурень у системі. Спрощена задача оптимального керування досить ефективно розв’язується за допомогою критеріального методу [28 – 32].

Критеріальне моделювання забезпечує перетворення вихідної математичної моделі в безрозмірну форму і за певних умов дозволяє отримати критеріальні рівняння, які перетворюються в критерії керування конкретними регульовальними пристроями (РП) [11, 29].

За допомогою критеріальних моделей аналізується чутливість і визначається допустима область оптимальних розв’язків, яка адекватна точності й повноті вихідної інформації [33]. Шляхом критеріального моделювання виділяються області (підсистеми) корекції, в яких досягається достатня спостережуваність і керованість процесу. У подальшому, за рахунок цілеспрямованого поетапного розвитку інформаційного забезпечення [34], підсистеми об’єднуються і спостережуваною та керованою стає вся система в цілому.

Критеріальний метод має ряд переваг перед іншими методами під час розв'язання задач чутливості [33]: аналіз чутливості оптимальних розв'язків виконується без обчислення оптимальних значень параметрів системи.

Отже врахування такого критерію як якість функціонування регулювальних пристроїв доцільно проводити використовуючи принципи критеріального моделювання. Це забезпечить єдність методологічного підходу, який є основною вимогою під час побудови експертних систем та систем керування.

2.3 Аналіз якості функціонування регулювальних пристроїв і її математичне моделювання

Від якості функціонування регулювальних пристроїв залежить не тільки реалізація оптимальних розрахунків але й нормальна робота системи взагалі. Оскільки динамічні системи характеризуються частими змінами станів, то і інтенсивність роботи регулювальних пристроїв має бути значною. Вихід з ладу системи керування веде до наслідків, які по різному відбиваються на нормальній роботі системи в цілому, наприклад, два крайні випадки: система приймає стан природного (не керованого) функціонування, або система переходить в стан повної відмови. Так для електроенергетичних систем відмова РПН тягне за собою від 2 до 24 % відмов силових трансформаторів [35], що викликає значні народногосподарські збитки. Таким чином, ефективність роботи динамічної системи буде визначатись, з одного боку, величиною додаткових втрат від невідповідності оптимальних та поточних станів $\delta F_{\text{дод}}$, а з іншого, ризиком відключення через відмову пристроїв регулювання, тобто зниженням надійності роботи системи в цілому.

При повній надійності системи автоматичного керування додаткові втрати в системі дорівнюють нулю, оскільки значення критерію керування підтримується оптимальним. Для цього пристрої регулювання виконують стільки спрацювань, скільки необхідно для встановлення оптимального його значення. З іншого боку, якщо регулювання відсутнє, то додаткові втрати максимальні. Отже величина додаткових втрат напряму залежить від інтенсивності роботи регулювальних пристроїв n .

Під час функціонування системи в оптимальному режимі інтенсивність роботи регулювальних пристроїв зростає, що призводить до

зниження надійності системи керування. Наслідком цього є зниження якості функціонування динамічної системи в цілому, оскільки зростає ризик виходу з ладу, тобто $\delta F_n = f(n)$, де δF_n – очікувана величина обмеження вихідного ефекту.

Таким чином, чим більша інтенсивність роботи регулювальних пристроїв, тим частіше система знаходиться в станах, які характеризуються низькими значеннями ефективності функціонування динамічної системи. Наведені міркування свідчать про необхідність знаходження компромісу між зростанням додаткових витрат і зниженням якості функціонування системи, оскільки ці фактори взаємно суперечливі (рис. 2.4). З врахуванням сказаного цільова функція оптимального керування станами динамічної системи в темпі процесу може бути записана [36, 37]

$$\delta F = \delta F_{\text{дод}} + \delta F_n, \quad (2.3)$$

де δF – мінімізуюча функція, яка визначає якість функціонування динамічної системи; $\delta F_{\text{дод}}$ – додаткові втрати за відсутності корекції стану динамічної системи з врахуванням оптимальних розрахунків; δF_n – очікувана величина обмеження вихідного ефекту.

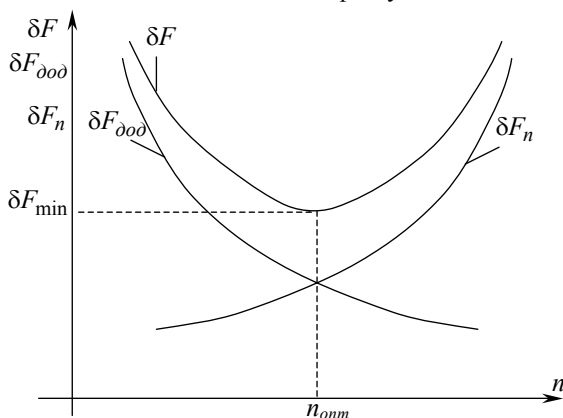


Рисунок 2.4 – Конкуруючий ефект між $\delta F_{\text{дод}}$ та δF_n

Для аналізу результатів оптимальних розрахунків і оцінки необхідних корегуючих дій і їх наслідків доцільно цільову функцію (2.3)

привести до критеріального виду

$$\delta F_* = \frac{\delta F}{\delta F_{\min}} = \delta F_{\text{дод}*} + \delta F_{\text{н}*}, \quad (2.4)$$

де δF_{\min} – мінімальні втрати, які відповідають оптимальному стану системи при абсолютній надійності систем регулювання.

Очевидно, що $\delta F_{\text{н}*}$ залежить від рівня надійності регулювальних пристроїв. Для визначення показників надійності, як основного фактора, що впливає на якість функціонування систем керування, будуються математичні моделі використовуючи різні методи та підходи.

Всі методи теорії надійності можна поділити таким чином [38, 39, 40]:

- аналітичні методи, до їх переваг можна віднести можливість отримати математичну модель, яка може врахувати вплив різних факторів на показники надійності системи. Але для побудови таких моделей необхідний значний об'єм початкових даних, які не завжди можна отримати. Це в свою чергу відбивається на адекватності моделі;

- методи статистичного моделювання, надають можливість отримати числові характеристики об'єкта. До недоліків належить: складні алгоритми, значні витрати машинного часу, неможливість визначення впливу на надійність системи конкретних факторів;

- експериментальні методи, надають можливість визначити надійнісні характеристики шляхом безпосереднього дослідження об'єкта. До недоліків належить досить значна вартість випробовувань (системи керування відносяться до досить дорогих виробів);

- окрему групу складають комбіновані методи (поєднання можливостей аналітичних та експериментальних методів).

Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки. Тому отримати необхідні результати з відповідною похибкою, використовуючи лише методи одної групи, досить важко. Для цього необхідно комбінувати методи таким чином, щоб отримати максимальний ефект. Перспективним є поєднання методів аналітичної та експериментальної груп. Пояснюється це можливістю отримати під час експлуатації необхідні параметри системи, статистичні данні, не ставлячи перед собою за мету досліджувати об'єкт. Це дозволить уточнювати математичні співвідношення отримані

аналітичним способом.

До аналітичних методів дослідження і оцінки надійності автоматичних систем висуваються вимоги простоти та невеликих затрат часу, що в свою чергу веде до зниження точності розрахунків. В зв'язку з цим не припиняються пошуки аналітичних методів, які дозволяють отримати більш точні оцінки показників і характеристик надійності складних систем при прийнятних витратах часу і праці. Недоцільно вимагати від цих методів абсолютної точності, оскільки вихідні дані, що використовуються в розрахунках, мають, як правило, обмежену точність і достовірність. В той же час приблизні методи повинні вносити до результату принципові риси розподілу випадкової величини x системи, що досліджується, які дозволяють відповісти на практичні питання, такі як вплив структурної надлишковості, ефективність профілактичного обслуговування тощо. В зв'язку з цим можна говорити щодо доцільності удосконалення, розробки ряду методів, які розрізняються за трудомісткістю обчислень і точністю розрахунків.

На різних етапах розвитку теорії надійності для оцінки показників безвідмовності і ремонтпридатності систем використовувався різний математичний апарат. Сформульовані таким чином методи можуть бути зведені в такі групи [38, 40]:

- методи, що базуються на апараті класичної теорії імовірностей;
- методи, що використовують апарат теорії марковських процесів;
- методи, які базуються на апараті функцій випадкових аргументів.

Апарат класичної теорії імовірностей дозволяє визначати як числові показники, так і характеристики (функції розподілу) безвідмовності і ремонтпридатності системи в цілому і окремих її функцій [38, 39, 40]. Однак складності виникають з ростом числа елементів системи і сеансів профілактичного обслуговування в інтервалі часу, що розглядається, з введенням позапланових відновлень, зі збільшенням різновиду використовуваних законів розподілу величини x .

Марковські процеси, завдяки простоті залежності між імовірностями станів і вихідними характеристиками системи, успішно використовуються для розв'язання різних задач, які виникають в теорії і практиці надійності [38, 39, 40]. Однак не дивлячись на те, що задача розрахунку показників надійності з допомогою апарату марковських процесів в літературі розв'язана, практично користуватись отриманими розв'язками часто не можливо. Це пояснюється неспроможністю отримати явні формули для

деяких характеристик (наприклад, функції часу безвідмовної роботи), складності розв'язання диференціальних рівнянь високого порядку, а також необхідності прийняття припущень про експоненціальний закон розподілу вихідних випадкових величин, які часто не виконуються на практиці [41].

Методи побудовані на основі апарату функції випадкового аргументу мають за мету досягнення високої швидкодії та не вимагають від інженера додаткових знань [38, 39, 40]. Але це призводить до зростання похибки розрахунків.

Огляд методів моделювання надійності, дозволяє зробити висновок про необхідність розробки методу, використовуючи принципи вже існуючих підходів, для отримання математичних моделей якості функціонування, який надав би можливість врахувати рівень надійності регульовальних пристроїв в критерії керування.

Найбільший інтерес під час досягнення поставленої мети становить теорія марковських процесів. Методи, побудовані на її основі, дозволяють врахувати поетапність відновлення регульовальних пристроїв, що необхідно для даної роботи. Допущення, які приймаються для моделювання марковських процесів, не вносять значної похибки. Це дозволяє використовувати теорію марковських процесів під час розв'язання практичних задач в таких динамічних системах як електроенергетична.

2.4 Проблеми ефективності використання регульовальних пристроїв

Ефективність оперативного керування станами динамічних систем суттєво залежить від достовірності результатів оптимальних розрахунків. На результат оптимального розрахунку значний вплив має коректне врахування рівня надійності регульовальних пристроїв. В наш час відсутні дані з надійності систем керування, що викликає необхідність створення інформаційної бази, яка б дозволила вирішувати задачі оцінки надійності. Інформаційне забезпечення вказаної задачі включає в себе класифікацію і оцінку можливостей отримання інформації про стан об'єктів, а також створення автоматизованої інформаційної системи, яка забезпечить збір, обробку і аналіз даних, отриманих за допомогою автоматизованих систем діагностики. Для отримання реальних показників надійності регульовальних пристроїв в процесі експлуатації необхідно контролювати

ряд параметрів, які впливають на знос елементів і системи регулювання, тобто характеризують швидкість наростання поступових відмов. Тому проблеми організації діагностичного і прогностичного контролю обладнання є одним з основних для автоматизації процесу керування станами [34].

Докладніше перераховані проблеми розглянемо на прикладі електроенергетичної системи. Сучасні електроенергетичні системи представляють собою складний комплекс взаємопов'язаних елементів, які мають певну структурну надмірність. Остання обставина полягає в наявності резервів потужності, запасів пропускну здатності, можливості роботи трансформаторів з перевантаженням тощо. Така надмірність дозволяє забезпечити функціонування системи після виходу з ладу окремих елементів, наприклад, пристроїв РПН деяких трансформаторів. Під час їх відмов система починає експлуатуватись з гіршими якісними показниками, а саме, з підвищеним рівнем втрат електроенергії.

Під час оперативного керування режимами ЕЕС пристрої регулювання напруги виконують задачі, тривалість вирішення яких така, що за цей час надійність системи практично не змінюється. Тому на стадії оперативного керування оцінку ефективності функціонування системи можна виконувати як для системи короточасної дії, без врахування траєкторії переходів системи з стану в стан за проміжок часу, який розглядається. Цю обставину необхідно враховувати під час довгострокового планування режимів. Система короточасної дії повністю характеризується тим, в якому стані вона знаходиться в момент часу, який розглядається. Результат її функціонування на період, необхідний для прийняття і реалізації керуючої дії, носить інтегральний характер і не залежить від його розподілу в часі [42, 43, 44].

Імовірність перебування системи в тому чи іншому стані залежить від показників надійності конкретних пристроїв регулювання. Визначити якісні характеристики надійності можливо двома шляхами. Перший шлях ґрунтується на вивченні фізико-хімічних властивостей і параметрів елементів перемикаючих пристроїв, фізико-хімічних процесів, які відбуваються в них, фізичної природи і механізму відмов. При цьому поточний стан елементів і систем описується рівняннями, які відображають фізичні закономірності процесів [45].

Другий шлях полягає у вивченні статистичних, імовірнісних закономірностей появи відмов багатьох однотипних пристроїв. При цьому

відмови розглядаються як деякі випадкові події і показники надійності не пов'язані безпосередньо з фізичними характеристиками елементів і пристроїв і з факторами, що впливають на них [46 – 51].

В наш час відмови обладнання в процесі його експлуатації вивчають на основі ретроспективної інформації щодо його пошкоджуваності. Недоліком такого підходу до визначення показників надійності є відсутність врахування процесів старіння і зносу обладнання. Встановлення безпосередньої залежності основних показників надійності, по-перше, від фізичних властивостей і параметрів матеріалів, від фізико-хімічних процесів зміни цих властивостей і параметрів, і, по-друге, від інтенсивності експлуатаційних впливів з врахуванням випадкового характеру величин і процесів, дозволить отримати більш достовірну інформацію щодо рівня надійності обладнання [45].

Існуюча система збору і обробки інформації щодо надійності регулювальних пристроїв призводить до знеособлювання обладнання, що бере участь в процесі керування режимами ЕЕС. В результаті всі трансформатори певного класу напруги мають однакові інтенсивності відмов [52, 53, 54], що не відповідає дійсності.

Недостатня достовірність інформації щодо надійності обладнання, яка отримується на основі експлуатаційного досвіду, визначається [45]: відсутністю старіння і зносу обладнання; недосконалістю систем збору і обробки ретроспективної інформації щодо надійності обладнання; запізненням в отриманні інформації щодо надійності пристроїв і систем; відсутністю даних заводу-виготовлювача про гарантійні показники надійності.

Таким чином, для підвищення достовірності показників надійності обладнання, які використовуються для формування рішення під час оперативного керування режимами електричних систем є необхідною розробка моделі, яка б дала можливість врахувати як фізико-хімічні процеси в пристроях регулювання напруги, так і імовірнісний характер впливів на якість функціонування регулювальних пристроїв. Для цього обов'язковим є дослідження умов і особливостей виникнення відмов в елементах регулювальних пристроїв. Це, в свою чергу, вимагає вдосконалення способу збору і обробки інформації щодо надійності обладнання.

Успішне розв'язання задач, що ставляться під час визначення якості функціонування складних динамічних систем, потребує розробки нових

підходів для побудови математичних моделей якості функціонування регульовальних пристроїв; для забезпечення єдності методологічного підходу необхідно побудувати математичні моделі, використовуючи принципи критеріального методу; необхідно розв'язати задачу об'єднання принципів теорії подібності та теорії марковських процесів, що дозволить побудувати критеріальні моделі якості функціонування, в яких можна буде врахувати фізичні характеристики і поетапний характер відновлювання регульовальних пристроїв; необхідна розробка нового або вдосконалення існуючого методу визначення вектора оптимальних критеріїв подібності. Розв'язання цих задач надасть можливість отримати математичні моделі якості функціонування, використовуючи які можна буде врахувати рівень надійності систем керування в оптимальних розрахунках і, зокрема, в критерії керування. Це підвищить ступінь реалізації оптимальних розрахунків станів динамічних системах, що приведе в таких системах як електроенергетична до покращення якості електропостачання споживачів і зниження втрат електроенергії.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ЯК ОСНОВНОГО ФАКТОРА, ЩО ВПЛИВАЄ НА ЯКІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Підвищення ефективності оперативного керування станами динамічних систем досягається відповідністю розрахованого оптимального і практично реалізованого станів, яка обумовлюється зростанням інтенсивності роботи регулювальних пристроїв. Збільшення інтенсивності керуючих впливів системи керування приводить до зміни фізико-хімічних властивостей матеріалів, з яких виготовлені елементи і вузли регулювальних пристроїв [44, 45]. Це відбивається на якості функціонування регулювальних пристроїв.

В моделі якості функціонування регулювальних пристроїв має враховуватись зміна фізико-хімічних характеристик їх елементів. Це можна зробити, якщо використати для побудови математичних моделей методи теорії марковських процесів. Такі моделі дозволять уникнути знеособлення регулювальних пристроїв під час визначення рівня їх надійності [52]. Крім цього модель має бути придатною для використання її під час отримання та реалізації результатів оптимальних розрахунків. Як зазначалось вище таку можливість надають моделі побудовані за критеріальним методом.

Отже, метою даного розділу є обґрунтування можливості використання теорії марковських процесів в поєднанні з принципами критеріального програмування для моделювання якості функціонування систем керування з врахуванням поетапності їх відновлення.

3.1 Математичне моделювання як засіб підвищення ефективності використання регулювальних пристроїв в процесі реалізації оптимальних розрахунків

Для обґрунтованого зростання інтенсивності роботи регулювальних пристроїв, продиктованого прагненням отримати більший техніко-економічний ефект, необхідно врахувати рівень надійності регулювальних пристроїв при поетапному їх відновленні. В сенсі поставленої задачі математичні моделі, отримані в [56 – 58], потребують вдосконалення. Використання математичних моделей якості функціонування систем керування в оптимальних розрахунках, забезпечить розв'язання таких задач, як збільшення довіри оперативного персоналу до результатів

розрахунків і, як наслідок, зростання ступеня реалізації оптимальних станів динамічних систем [39].

Для моделювання якості функціонування автоматизованих систем керування необхідно використовувати методи, які б надавали можливість отримати нескладну і адекватну модель, за якою можна було б оцінити рівень надійності регулювальних пристроїв.

Найбільшу цікавість, в сенсі поставлених задач мають методи, які ґрунтуються на теорії марковських процесів.

Методи побудовані на теорії марковських процесів надають можливість отримати нескладні математичні моделі. Це досягається завдяки основному припущенню – процес є марковським, якщо для кожного моменту часу імовірність будь-якого стану системи в майбутньому залежить тільки від стану, в якому система знаходиться зараз, і не залежить від того, яким чином система потрапила в цей стан [41]. Припущення, які ставляться під час побудови моделей, не ведуть до значних похибок, а тому є прийнятними для розв’язання практичних задач в таких динамічних системах як електроенергетична. За допомогою методів теорії марковських процесів можна моделювати лише період нормального режиму роботи регулювальних пристроїв (ділянка 2 рис. 3.1) [54].

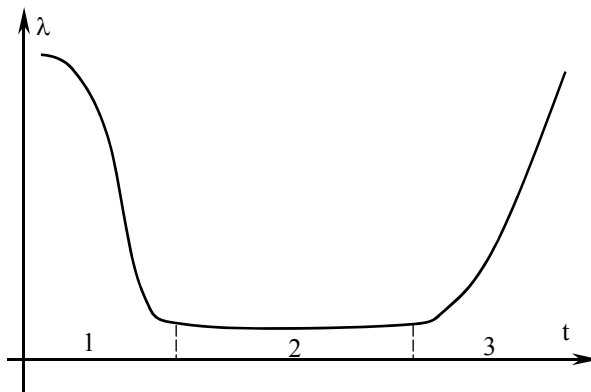


Рисунок 3.1 – Залежність інтенсивності відмов від часу експлуатації

Період нормальної роботи системи керування можна розбити на окремі стани. Ці стани є робочими, але параметри системи погіршуються від стану до стану наближаючись до повної відмови. Поетапне відновлення також переводить систему керування зі стану в стан, але в зворотному

напрямку. Якщо прийняти, що зміна станів підпадає під експоненціальний закон розподілу, то виконується головний принцип теорії марковських процесів – зміна станів відбувається без післядії. Інформацію для визначення таких станів дозволяють отримати сучасні системи діагностики. Визначення проміжних станів дозволяє оцінити готовність системи керування в довільний момент її експлуатації. Це дозволяє визначити рівень надійності системи керування і надати рекомендації ремонтному персоналу для побудови стратегії етапів відновлення.

Отже, для динамічних систем подібних до електричної, можливе використання теорії марковських процесів, якщо прийняти припущення: відсутність післядії та вибір станів, в яких виконується експоненціальний закон розподілу випадкової величини; відмови елементів системи не залежні; відновлена система має такі ж характеристики, як і нова; інтенсивність відмов та інтенсивність відновлень постійна [54]. Тому для побудови критеріальних моделей якості функціонування необхідно показати можливість перетворення матриці коефіцієнтів Колмогорова, використовуючи принципи критеріального програмування.

Поєднання принципів теорії марковських процесів та теорії подібності дозволить побудувати математичні моделі, які поєднують імовірнісний підхід під час визначення якості функціонування регульованих пристроїв і зміну фізико-хімічних характеристик в процесі їх поетапного відновлення [63].

3.2 Критеріальне моделювання оцінки якості функціонування систем керування

3.2.1 Критеріальна модель функції відмов

Як відомо, марковський процес описується системою диференціальних рівнянь Колмогорова [41]

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= vp; \\ \sum_{i=1}^m p_i &= 1, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де \mathbf{p} – вектор імовірностей станів досліджуваної системи; \mathbf{v} – матриця густин імовірностей переходів з одного стану в інший; m - кількість

можливих станів досліджуваної системи.

Для дослідження системи розглянемо модель, яка б відображала її функціонування і в подальшому дозволяла встановити ознаку (міру) ступеня виконання задачі. Зміна станів цієї моделі повинна належати до ергодичної множини [41], тобто система не може вийти з цієї множини станів (іншими словами передбачається, що під час попадання в непрацездатний стан система після закінчення відновлення повертається в працездатний стан). В теорії надійності така модель відповідає задачам відшукування коефіцієнтів готовності, коефіцієнтів простою тощо [59, 60]. Ця модель надасть можливість врахувати рівень надійності в задачі оптимізації станів динамічних систем і оцінити готовність досліджуваної системи до виконання визначених задач і визначити стратегію наступних етапів відновлення.

Критерієм оптимальності під час визначення стратегії відновлення якості функціонування системи є максимум знаходження її в станах, коли параметри знаходяться в межах допустимих. Такі стани відрізняються між собою техніко-економічним ефектом від виконання системою своїх функцій.

В задачах оптимального керування нормальними станами таких систем як електроенергетична можна не враховувати динаміку перехідних процесів між окремими станами. Тоді траєкторія руху системи в просторі станів є послідовністю квазістаціонарних станів ($\frac{dp_i}{dt} = 0$). В цьому випадку система рівнянь (3.1) може бути переписана

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m v_{ji} p_i = 0, \quad j = \overline{2, n} \\ \sum_{i=1}^m p_i = 1, \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

де v_{ji} – постійні величини (елементи матриці \mathbf{v}), що є алгебраїчними сумами величин інтенсивностей переходів з i -го в j -й стан; n – кількість напрямків зміни станів, що виходять з робочого стану 1 (рис. 3.2).

Для визначення імовірностей робочих станів і оцінки якості функціонування досліджуваної системи необхідно розв'язати алгебраїчну систему рівнянь (3.2), яка в більш загальному вигляді записується

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{b}, \quad (3.3)$$

де

$$\mathbf{v} = \begin{vmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & \dots & v_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{n1} & v_{n2} & v_{n3} & \dots & v_{nm} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}; \mathbf{p} = \begin{vmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \dots \\ p_m \end{vmatrix}; \mathbf{b} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{vmatrix}.$$

В критеріальному програмуванні систему рівнянь ортогональності та нормування можна записати [28, 32]

$$\boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{\pi} = \mathbf{b}, \quad (3.4)$$

де

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \dots & \alpha_{1m} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \dots & \alpha_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \alpha_{n3} & \dots & \alpha_{nm} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}; \boldsymbol{\pi} = \begin{vmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \dots \\ \pi_m \end{vmatrix}; \mathbf{b} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{vmatrix},$$

$\boldsymbol{\alpha}$ – матриця показників; $\boldsymbol{\pi}$ – вектор критеріїв подібності.

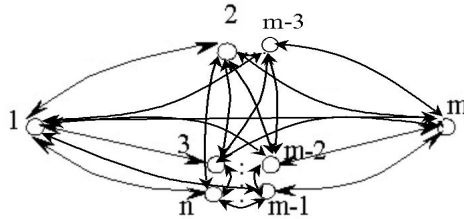


Рисунок 3.2 – Граф, що відповідає системі рівнянь Колмогорова

Проаналізувавши системи рівнянь (3.3) та (3.4), можна відмітити, що матриця коефіцієнтів \mathbf{v} системи рівнянь (3.3) є аналогічною до матриці розмірностей $\boldsymbol{\alpha}$ системи рівнянь (3.4), що застосовується в теорії подібності [31, 32, 61], а вектор \mathbf{p} , компоненти якого є по суті ваговими коефіцієнтами станів досліджуваного процесу, за своїм змістом відповідають вектору критеріїв подібності $\boldsymbol{\pi}$, елементи якого є безрозмірними співвідношеннями параметрів системи і в тому випадку,

коли вони визначаються методом інтегральних аналогів, також є ваговими коефіцієнтами складових цільової функції (пронормовані до одиниці) [32]. Отже можна провести аналогію між системою рівнянь (3.3) та (3.4). Подібність моделювання марковських процесів та критеріального моделювання дозволяє застосувати до системи рівнянь (3.3) принципи критеріального програмування.

Система рівнянь (3.4) в критеріальному програмуванні відповідає прямій задачі [32]

$$\min \left\{ y(x) = \sum_{i=1}^m a_i \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha_{ji}} \right\}, \quad (3.5)$$

де $y(x)$ – деякий узагальнюючий техніко-економічний показник, який характеризує процес, що досліджується; x_j – змінні параметри системи, значення яких оптимізуються; a_i, α_{ji} – постійні коефіцієнти, значення яких визначаються властивостями системи; m – кількість членів цільової функції; n – кількість змінних.

Графічно пряма задача проілюстрована на рисунку 3.3.

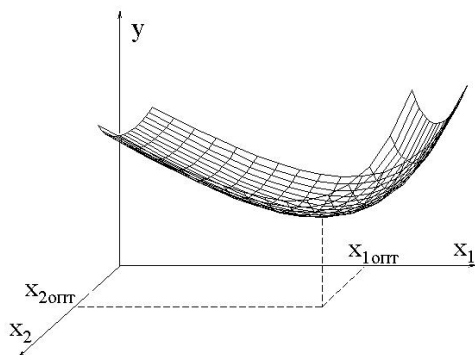


Рисунок 3.3 – Пряма задача критеріального програмування

За аналогією цільова функція критеріальної програми для системи рівнянь (3.3) запишеться

$$\min \left\{ f(x) = \sum_{i=1}^m c_i \prod_{j=1}^n x_j^{y_{ji}} \right\}, \quad (3.6)$$

де $f(x)$ – функція відмови, що відображає вплив елементів системи на здатність виконувати нею поставлену задачу; c_i – постійні коефіцієнти (в задачах розглядуваного типу $c_i=1$); x_j – незалежні параметри (змінні, що характеризують готовність елементів системи керування виконувати покладені на них функції).

Таким чином, отримано залежність (3.6) замість системи рівнянь, яка відображає функціонування системи керування, що досліджується.

Шляхом ділення рівняння (3.6) на базис (за базис вибрано оптимальне значення функції відмов $f(x)_{\text{опт}}$) отримується критеріальна модель відмов:

$$f_*(x_*) = \sum_{i=1}^m P_0(s_i) \prod_{j=1}^n x_{*j}^{y_{ji}}, \quad (3.7)$$

де $f_*(x_*)$ – відносне значення функції відмови; $P_0(s_i)$ – апіорна імовірність знаходження системи в певному стані; x_{*j} – відносне значення незалежних параметрів системи.

Однак апіорні імовірності $P_0(s_i)$ потребують уточнення для врахування інформації щодо реального стану об'єкта. Для цього можна використати теорему Байєса

$$P(s_i / x_1, \dots, x_n) = P_0(s_i) \frac{p(x_1, \dots, x_n / s_i)}{\sum_{j=1}^m P_0(s_j) p(x_1, \dots, x_n / s_j)}, \quad (3.8)$$

де $P(s_i / x_1, \dots, x_n)$ – апостеріорні ймовірності;

$$\frac{p(x_1, \dots, x_n / s_i)}{\sum_{j=1}^m P_0(s_j) p(x_1, \dots, x_n / s_j)}$$

– коефіцієнт уточнення,

$p(x_1, \dots, x_n / s_i)$ – густина імовірностей визначення стану s_i для визначених ознак (параметрів) системи x , якщо ознаки неперервні, і розподіл імовірностей, якщо ознаки дискретні.

З врахуванням (3.8) функція відмов перепишеться

$$f_*(x_*) = \sum_{i=1}^m P(s_i/x_1, \dots, x_n) \prod_{j=1}^n x_{*j}^{v_{ji}}. \quad (3.9)$$

Для побудови функції відмов імовірності $P_0(s_i)$ визначені з системи рівнянь Колмогорова приймаються як відлікові, тобто вважається, що система, яка вводиться в експлуатацію має максимальні показники якості функціонування. В процесі експлуатації звісно ці показники знижуються. Тобто система переходить в інші стани, які характеризуються нижчою готовністю системи до виконання визначених для неї задач. Тому для адекватної зміни (уточнення) функції відмов проводиться вимірювання параметрів x_1, \dots, x_n , за якими можна оцінити стан системи і визначити апостеріорні (після дослідні) імовірності $P(s_i/x_1, \dots, x_n)$.

Використовуючи рівняння (3.8) уточнюється значення імовірності перебування системи в тому чи іншому стані. Тобто розв'язання задач визначення готовності системи до виконання визначених для них задач зводиться до визначення апостеріорної імовірності належності об'єкта образу S_1 за умови, що ознаки цього об'єкта набули значень x_1, x_2, \dots, x_n .

В формулі Байєса $P_0(s_i)$ – апіорна імовірність, що відповідає розв'язку системи рівнянь Колмогорова

$$P_0(s_i) > 0, \sum_{i=1}^n P_0(s_i) = 1$$

Для кожного S_1

$$\int_{x_1} \dots \int_{x_n} p(x_1, \dots, x_n / s_i) dx_1 \dots dx_n = 1,$$

для ознак з неперервною шкалою вимірювань

$$\sum_{j_1=1}^{x_1} \dots \sum_{j_n=1}^{x_n} p(x_1^{j_1}, x_2^{j_2}, \dots, x_n^{j_n} / s_i) = 1,$$

для ознак з дискретною шкалою вимірювань

$$p(x_1, \dots, x_n / s_i) \geq 0.$$

Критеріальна модель (3.9) дозволяє врахувати якість функціонування системи керування в критерії керування у вигляді складової $P_*(\omega)$

$$F_* = \Delta P_*(x, u) + P_*(\omega), \quad (3.10)$$

де $P_*(\omega) = 1 - \frac{1}{f_*(x_*)}$,

за умови

$$V(x,u)=0 ; x \in M_x ; u \in M_u , \quad (3.11)$$

де $V(x,u)$ – рівняння зв'язку; M_x – область допустимих значень вектора змінних x , які регулюються; M_u – область можливих значень параметрів u регулювальних пристроїв.

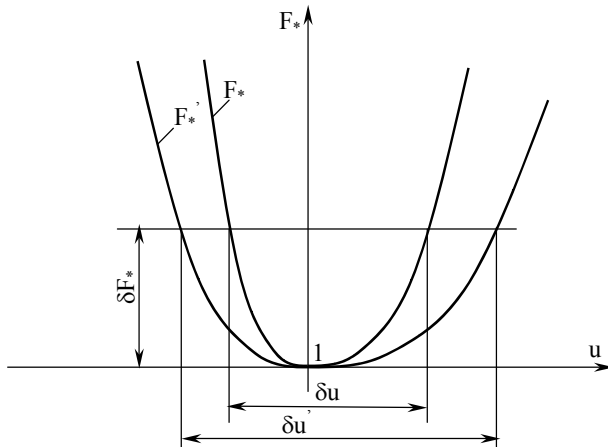


Рисунок 3.4 – Вплив складової надійності на реалізацію оптимальних станів

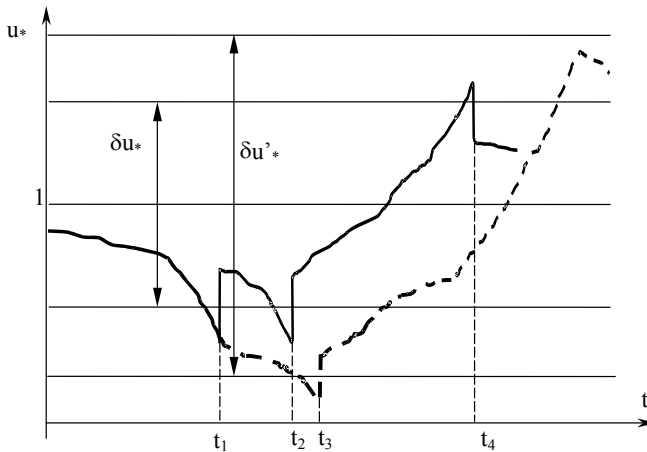


Рисунок 3.5 – Вплив зміни зони нечутливості на інтенсивність роботи регулювальних пристроїв

Таким чином функція відмов вносить поправку на функціональну готовність системи керування. Графічно це показано на рисунках 3.4 та 3.5. Для одного рівня надійності регулювальних пристроїв критерій керування буде відповідати функції F^* . Якщо якість функціонування погіршиться то функція F^* матиме вигляд F^* '. Відповідно зміниться зона нечутливості з δu на $\delta u'$, тобто інтенсивність роботи регулювальних пристроїв знизиться.

3.2.2 Критеріальна модель якості функціонування

У відповідності до прямої задачі критеріального програмування (3.5) двоїста задача має такий вигляд [32]:

$$\max \left\{ d(\pi) = \prod_{i=1}^m \left(\frac{a_i}{\pi_i} \right)^{\pi_i} \right\},$$

де $\pi_i = \beta_{0i} + \beta_{ij} \cdot \pi_j$ – критерії подібності; β_{0i}, β_{ij} – вектори нормалізації і нев'язки відповідно; π_j – базові критерії подібності.

Графічно двоїсту задачу критеріального програмування, яка відповідає прямій задачі (3.5), показано на рисунку 3.6.

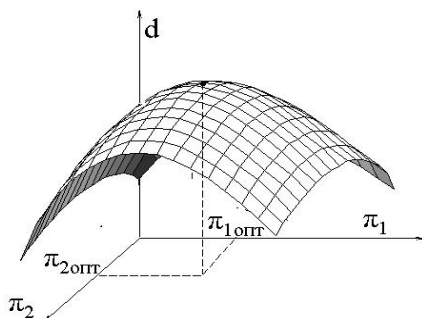


Рисунок 3.6 – Двоїста задача критеріального програмування

Можливість виразити двоїсту змінну π_i через вектори нев'язки,

нормалізації і базову двоїсту змінну π_j [32], за аналогією, дозволяє записати $P_0(s_i) = \beta_{0i} + \beta_{ij} \cdot P_0(s_j)$.

За аналогією до (3.6) запишемо двоїсту задачу:

$$\max \left\{ d(P_0) = \prod_{i=1}^m \left(\frac{c_i}{P_0(s_i)} \right)^{P_0(s_i)} \right\}. \quad (3.12)$$

Рівняння (3.10) зводиться до критеріального вигляду шляхом ділення на базис (за базис приймається $d(\pi)_{\text{опт}}$)

$$d_*(P_*) = \prod_{i=1}^m \frac{P_0(s_i)^{P_0(s_i)}}{P(s_i / x_1, \dots, x_n)^{P(s_i / x_1, \dots, x_n)}}, \quad (3.13)$$

де $P_0(s_i)$ – значення імовірності знаходження системи в стані i , що відповідає системі рівнянь Колмогорова.

Отримана критеріальна модель якості функціонування дозволяє оцінити реальний стан системи по відношенню до початкового (номінального) її стану. На рисунку 3.7 побудована залежність $d_*(P_*)$. Звичайно таких залежностей можна побудувати m (кількість станів), але достатньо побудувати одну відносно імовірності стану, в якому перебуває системи в даний час.

Для визначення стану, в якому перебуває системи використовується статистичний метод теорії розпізнання образів.

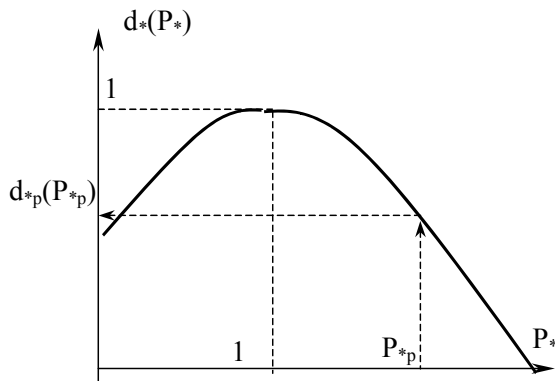


Рисунок 3.7 – Функція якості системи

Побудова критеріальної моделі якості функціонування розширює можливості під час визначення стану та рівня готовності систем, що функціонують, без врахування економічних показників за критерієм максимуму знаходження в станах задовільної підготовленості системи до виконання своїх функцій [63].

Отримані критеріальні моделі надають можливість визначити рівень надійності регулювальних пристроїв після чергового етапу відновлення та врахувати якість функціонування систем управління в задачі оптимального керування станами динамічних систем.

Однак для побудови матриці \mathbf{v} необхідно визначити її складові. Для цього під час введення системи в експлуатацію проводиться вимірювання її параметрів, за якими визначаються інтенсивності переходів між станами.

3.3 Визначення факторів, що впливають на якість функціонування регулювальних пристроїв

На якість функціонування систем керування впливає значна кількість факторів i , по можливості, вони мають бути враховані в критеріальних моделях. Використання принципів теорії марковських процесів вимагає врахування цих факторів через інтенсивність відмов. Тобто необхідно сформулювати залежності, які будуть об'єднувати фізичні величини, що характеризують функціональну готовність системи керування, та інтенсивності відмов елементів регулювальних пристроїв.

3.3.1 Показники надійності елементів регулювальних пристроїв

За фізичним характером відмови технічних пристроїв, в тому числі систем регулювання, поділяються на раптові (катастрофічні) та поступові (параметричні). Раптові відмови проявляються в результаті різкої стрибкоподібної зміни основних параметрів під дією одного або декількох випадкових факторів, пов'язаних або з несприятливими умовами навколишнього середовища, або з помилки експлуатаційного персоналу, або з порушенням робочих режимів, або умов роботи. Під час поступових відмов спостерігається поступова зміна параметрів в результаті старіння або зносу елементів. Появі раптових змін частіш за все також передують приховані зміни властивостей деталей і вузлів, які не завжди вдається визначити. Тому поділ відмов на раптові та поступові носить умовний характер [54, 60, 76].

Найбільш загальною причиною відмов пристроїв регулювання є зміна параметрів і характеристик елементів, обумовлених фізико-хімічними процесами, які відбуваються в них. До них можна віднести структурні перетворення сплавів металів, переміщення і накопичення точкових дефектів і дислокацій, дифузійні процеси в об'ємі і на поверхні твердих тіл, розрив хімічних зв'язків ланцюгів макромолекул полімерних матеріалів тощо. Закономірності, які характеризують ці процеси, служать основою для розробки моделей відмов і процесів їх виникнення. До числа таких моделей відносяться деформації і механічне руйнування різних матеріалів; порушення електричної міцності діелектриків; теплові руйнування елементів; електрична ерозія; зварювання контактних поверхонь та інше [79].

Конкретні механізми зниження надійності окремих вузлів визначаються загальними фізичними і фізико-хімічними процесами зміни структури, властивостей і параметрів елементів, а також їх видом, принципом дії, конструктивним виконанням. В процесі експлуатації в матеріалах, з яких виготовлені деталі перемикаючих пристроїв, накопичуються незворотні зміни, що знижують міцність та порушують координацію і взаємодію окремих вузлів. В результаті значення критичних параметрів, які характеризують запас міцності елементів, зменшуються. Під час досягнення діючими навантаженнями (електричними, механічними, тепловими) критичних значень, гранично допустимих для даного матеріалу, настає повна відмова елементів, що входять в склад регулювальних пристроїв.

Таким чином, імовірність відмов елементів може бути представлена як функція фізичних характеристик і параметрів елементів і швидкості їх зміни в залежності від різних факторів

$$q = \int_0^t \frac{\partial q}{\partial(\Delta x)} \cdot \frac{\partial(\Delta x)}{\partial t} \cdot dt, \quad (3.14)$$

де Δx визначає запас міцності за параметром x ; $\frac{\partial(\Delta x)}{\partial t}$ характеризує швидкість зміни запасу міцності внаслідок протікання фізико-хімічних процесів; $\frac{\partial q}{\partial(\Delta x)}$ характеризує імовірність характеристики міцності

матеріалу.

Покажемо, на прикладі регулювальних пристроїв, які використовуються в електроенергетичній системі, отримання залежностей, що об'єднують фізичні величини, які характеризують функціональну готовність системи керування, та інтенсивності відмов регулювальних пристроїв. Імовірність безвідмовної роботи пристроїв РПН залежить від надійності тих елементів, які визначають його безпосереднє функціонування. З точки зору фізики відмов, до них можна віднести регулювальну обмотку, обмотку контактора і обмотку струмообмежуючих пристроїв, контактну систему, механічні деталі та вузли. Для безвідмовної роботи пристрою регулювання напруги необхідно, щоб всі перераховані елементи знаходились в робочому стані, що з точки зору надійності відповідає їх послідовному з'єднанню. Тоді імовірність безвідмовної роботи регулювальних пристроїв $P_{РПН}$ на інтервалі часу, який розглядається, можна представити як добуток функцій надійності відповідних вузлів

$$P_{РПН} = P_{об} \cdot P_{конт} \cdot P_{мех}, \quad (3.15)$$

де $P_{об}$, $P_{конт}$, $P_{мех}$ – імовірності безвідмовної роботи обмоток, контактної системи і механічних деталей відповідно.

Для визначення показників надійності пристроїв РПН з метою врахування їх в моделі оперативної корекції режиму ЕЕС за напругою та реактивною потужністю необхідно встановити зв'язок між швидкістю зносу та фізичними характеристиками елементів, з одного боку, та режимами функціонування регулювальних пристроїв, з другого.

Надійність роботи як обмоток, так і всього пристрою регулювання, в значній мірі залежить від надійності ізоляції. Основною характеристикою ізоляції електротехнічних пристроїв є її електрична міцність, яка визначається величиною пробивної напруженості електричного поля $E_{пр}$ або величиною пробивної напруги $U_{пр}$. Якщо напруга електричного поля, яка діє на ізоляцію, перевищує $U_{пр}$, то відбувається пробій діелектрика [79].

Пробивна напруга $U_{пр}$ залежить від великої кількості конструктивних і технологічних факторів та зовнішніх умов і для ізоляції

даного типу в фіксований момент часу є випадковою величиною. Електрична міцність ізоляційних матеріалів в основному визначається наявністю в діелектрику випадково розподілених за величиною і за положенням забруднюючих часток, домішок, газових включень (для масла і вугільних) і дефектів, які підсилюють нерівномірність електричного поля і створюють слабкі місця в ізоляції. В зв'язку з цим доцільно застосовувати імовірнісні методи оцінки пробивної напруженості ізоляційних матеріалів з врахуванням їх старіння та зносу.

Приблизно, на основі результатів теоретичних і емпіричних досліджень [79, 80], можна вважати, що пробивна напруга змінюється в залежності від температури, відносного подовження, періоду експлуатації, тиску на ізоляцію

$$U_{np} = U_{np.o} \cdot G(1 - k_0 t^\chi) \exp[-(\alpha_1 \Delta\Theta + \eta \varepsilon)], \quad (3.16)$$

де

$$G = 1 - \frac{\alpha \cdot p_m^\beta}{U_{np.o}}$$

$U_{np.o}$ – початкова напруга пробою; α_1 – температурний коефіцієнт; t – період експлуатації; G – параметр, який залежить від радіального тиску p_m на ізоляцію; $\beta, \alpha, \eta, \chi$ – коефіцієнти, які залежать від матеріалу ізоляції;

ε – відносне подовження проводу; $\Delta\Theta$ – зміна температури; $k_0 = \frac{k_{p.o}}{U_{i0.i}}$,

$k_{p.o}$ – постійна хімічної реакції.

Виходячи з цього інтенсивність відмов буде визначатись наступним чином [76]:

$$\lambda_{np} = \frac{U_{np.o}}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} k_0 \cdot \chi \cdot t^{\chi-1} \cdot G \cdot \exp\left[-\frac{(U - \bar{U}_{np})^2}{2\sigma_U^2}\right] \cdot \exp[-(\alpha_1 \cdot \Delta\Theta + \eta \cdot \varepsilon)], \quad (3.17)$$

де \bar{U}_{i0} , σ_U – математичне очікування і середьоквадратичне відхилення напруги пробою.

Таким чином, інтенсивність відмов ізоляції по відношенню до пробою визначається як фізичними параметрами діелектрика, так і характеристиками режиму роботи пристроїв регулювання.

Якість функціонування пристроїв регулювання залежить від надійності контактної системи. Головна особливість режиму роботи контактів РПН – велика кількість перемикачів. За числом комутаційних операцій в одиницю часу пристрої РПН великих трансформаторів перевищують високовольтні вимикаючі апарати [81]. В той же час перемикаючі пристрої, які є частиною трансформатора, працюють без ревізії і ремонту більш тривалий час, ніж вимикачі. Тому виникає необхідність врахування якості контактної системи для визначення показників надійності пристроїв РПН. Найбільш важким режимом роботи контактів є процеси замикання та розмикання. Якщо прийняти, що процес окислення контактних поверхонь відсутній (контактна система розташована в маслі), то надійність роботи буде визначатись ступенем зносу контактів. Мірою зносу контактів можуть бути різні показники, в тому числі провал контактів і втрата кількості речовини (об'єму, маси) на одну операцію “включення-виключення”. Під провалом контактів розуміють шлях, який може пройти точка дотикання контактів (на рухомому контакті), якщо у ввімкненому стані забрати нерухомий контакт [81]. Із зменшенням провалу зменшується сила контактного натискання в замкненому стані, збільшується падіння напруги на контактах, зростає температура точки дотикання, що сприяє зварюванню контактів. Мінімальний зварювальний струм

$$I_{\text{св}} \leq C_{\text{св}} \sqrt{P_{\text{к}}}, \quad (3.18)$$

де $C_{\text{св}}$ – коефіцієнт [81,86]; $P_{\text{к}}$ – сила контактного навантаження.

З врахуванням викладених міркувань і даних, наведених в [81, 83, 84], інтенсивність відмов визначається таким чином:

$$\lambda_{\text{к}} = -\frac{a_0 \cdot v \cdot n}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(R - \bar{R})^2}{2\sigma_1^2} \right]; \quad (3.19)$$

$$v = \frac{\Delta P_{\text{к}}}{\Delta n}; \quad R = \ln \left(\frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{св}}} \right)^2,$$

де $\Delta P_{\text{к}}$ – зменшення контактного зусилля при кількості включень Δn ; a_0 – емпіричний коефіцієнт, який залежить від матеріалу і конструкції

контактів; n – загальна кількість включень; I_k – величина струму в момент замикання кола; σ_z , \bar{R} – параметри розподілу випадкової величини R .

Необхідно відмітити, що значення струму I_k залежить не тільки від величини навантаження трансформатора, але й від характеру навантаження і типу пристрою РПН [78].

Таким чином, надійність роботи контактних з'єднань під час замикання і розмикання кола залежить як від фізичних і фізико-хімічних характеристик матеріалу контактів, так і від режиму роботи пристрою РПН, в тому числі від числа перемикачів відгалужень обмотки. Остання обставина свідчить про необхідність врахування надійності контактної системи під час визначення оптимальних коефіцієнтів трансформації і відповідного числа перемикачів.

Особливу увагу при експлуатації пристроїв РПН приділяють його механічній системі як найменш надійній частині пристрою. В процесі експлуатації в матеріалі конструкції поступово накопичуються локальні дефекти, що пояснюється незворотністю кожного парціального впливу навантаження. Окремі локальні руйнування сумуються аж до граничного стану, коли відбуваються відмова елемента. Параметром зносу механічних вузлів служить кількість внутрішньої роботи W_0 , необхідної для переведення пристрою в неробочий стан [81, 82]

$$W_0 = \Delta W \cdot n_{\max}, \quad (3.20)$$

де ΔW – внутрішня робота, що виконується за одне перемикання, яка відповідає зміні коефіцієнта трансформації на один ступінь; n_{\max} – число перемикачів, за яке пристрій переходить в неробочий стан.

Якщо прийняти, що надійність пов'язана з величиною того залишкового запасу енергії $W_{\text{заль}}$, який можна ще витратити під час періодичних навантажень, то отримаємо, що інтенсивність відмов механічних вузлів [81]

$$\lambda_{\text{мех}} = \frac{\nu \cdot P_{\text{мех}}^2}{W_0 E}, \quad (3.21)$$

де $P_{\text{мех}}$ – величина механічного навантаження, яке діє на деталі конструкції під час виконанні перемикачів відгалужень обмотки; E – модуль пружності

матеріалу, з якого виготовлені елементи механічної системи; v – стала (3,14).

Для проведення оптимізаційних розрахунків з метою оперативної корекції стану електричної системи, інтенсивність відмов механічних вузлів можна вважати постійною.

Отже надійність пристроїв РПН в процесі експлуатації змінюється. На швидкість їх зміни здійснюють вплив як режим функціонування системи регулювання, так параметри режиму ЕЕС. На рис. 3.8 – 3.10 представлені залежності характеристик надійності пристроїв РПН при зміні різних параметрів, які входять до виразів (3.16) – (3.21). Необхідно відмітити, що для систем регулювання різних трансформаторів характеристики надійності змінюються в досить широких межах. Таким чином, з метою підвищення об'єктивності характеристик надійності регульованих пристроїв, які використовуються в моделях оперативного керування режимами електричних систем за напругою і реактивною потужністю, необхідно визначати показники надійності кожного з пристроїв РПН, які беруть участь в регулюванні напруги, і виконувати корекцію їх значень в процесі експлуатації за виразами (3.17), (3.19), (3.21). Для цього необхідно вдосконалити алгоритм збору і обробки даних щодо стану пристрою РПН в процесі експлуатації систем регулювання напруги.

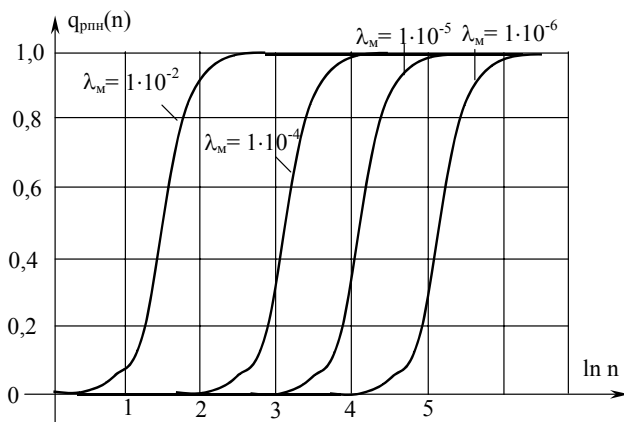


Рисунок 3.8 – Залежність імовірностей відмов пристрою РПН від кількості перемикачів n для $p_{об} = 1$ ($\lambda_k = 10^{-6}$ 1/цикл)

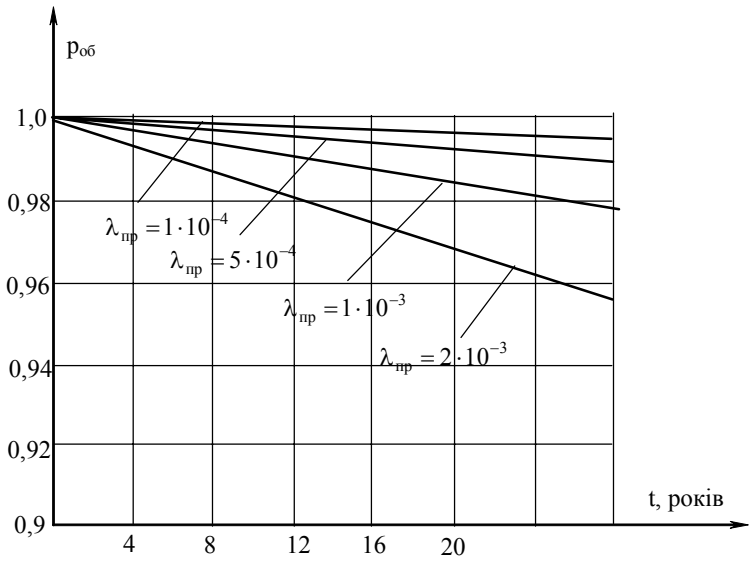


Рисунок 3.9 – Залежність $p_{об}=f(t)$ для $\mu = 0,9$

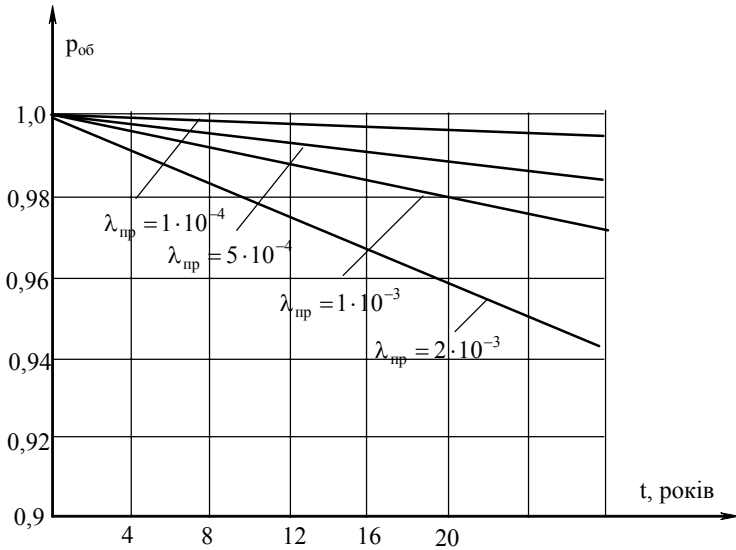


Рисунок 3.10 – Залежність $p_{об}=f(t)$ для $\mu = 1$

3.3.2 Використаний ресурс трансформаторів і показники надійності

Ефективність вирішення задач оптимального керування станами електричної системи багато в чому залежить від використаного ресурсу трансформаторів [87]. З цією метою розробляються системи діагностики, однією з задач яких є визначення використаного ресурсу трансформаторів [78, 87]. Визначене значення використаного ресурсу силових трансформаторів характеризує рівень їх надійності і дозволяє впевнено забезпечувати перевантаження трансформаторів в режимах передачі пікової потужності.

Спосіб визначення використаного ресурсу ізоляції, який розглядається в [87], базується на основних даних щодо температури ізоляції в стаціонарному та нестационарному режимах, пропрацьованому установкою часі, часі простоїв, кількості коротких замикань і вмикань [87 – 91]. Використаний ресурс визначається в частках від повного ресурсу, а за одиницю його вимірювання береться 1 доба – інтервал часу з замкненим циклом навантажувальної здатності трансформатора і зовнішньої температури.

За основу вимірювань використаного ресурсу береться певний інтеграл на базі формули Монтзингера, яка визначає відносний знос ізоляції за конкретний період часу

$$\begin{aligned} H_B &= \int_0^{t_p/c} L(t) \cdot dt = \frac{1}{n} \sum_0^{t_p/c} L_i \cdot \Delta t_i = \frac{1}{n} \sum_0^{t_p/c} 2 \frac{V_i - 98}{6} \cdot \Delta t_i = \\ &= \frac{1}{n} \sum_0^{t_p/c} \exp(0,1155(V_s - 98)) \cdot \Delta t_i, \end{aligned} \quad (3.22)$$

де L_i – відносний використаний ресурс за елементарний інтервал часу Δt_i ; t_p – відпрацьований установкою без простоїв час; c – одиниця вимірювання використаного ресурсу і часу, доба; n – число елементарних інтервали часу, на які розбивається доба; V_i – температура найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора при i -му замірюванні.

Виходячи з вище сказаного інтенсивність відмов буде визначатись з виразу

$$\lambda_{BP} = \frac{\Delta t_0}{\sigma_{\Delta t} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\Delta t - \overline{\Delta t})^2}{2\sigma_{\Delta t}^2}\right] \cdot \exp 0,1155(V_s - 98), \quad (3.23)$$

де $\overline{\Delta t}$, $\sigma_{\Delta t}$ – математичне очікування і середньоквадратичне відхилення інтервалу часу з певним температурним режимом; Δt_0 – початковий проміжок часу.

Сформульовані вирази для визначення інтенсивностей відмов елементів регулювальних пристроїв через фізичні величини, які характеризують стан систем керування, дозволять врахувати в критеріальних моделях зміну фізико-хімічних властивостей елементів регулювальних пристроїв і в подальшому проводити корекцію моделей.

4 СКЛАДНІ СИСТЕМИ ЯК ОБ'ЄКТ КОНТРОЛЮ

4.1 Визначення технічного стану складних систем

Контроль технічного стану систем будь-якого призначення є невід'ємною частиною процесу їх розробки, випробувань і експлуатації. Основним завданням контролю є отримання інформації для вироблення необхідних дій на контрольовану систему або умови її виробництва і експлуатації з метою забезпечення максимального ефекту від використання її за призначенням. У міру зростання складності контрольованих систем функції контролю також значно ускладнюються. При цьому виникають проблеми вибору раціональної сукупності контролюючих параметрів і організації самих процедур контролю відповідно до реально існуючих обмежень (обмежена точність вимірювань, обмежені можливості інформаційно-обчислювальних засобів, використовуваних для здійснення контролю, обмеженість тимчасових і матеріальних ресурсів і т. п.). Обумовлено це тим, що сучасні технічні об'єкти включають велике число компонентів, об'єднаних між собою складною системою функціонального зв'язку і інформаційного обміну, причому окремі компоненти можуть бути самі по собі достатньо складними динамічними системами. Очевидно, що робота кожного з вказаних компонентів в процесі цільового застосування об'єкта повинна бути строго узгоджена як за часом, так і за виконуваними функціями з роботою решти компонентів в рамках загального алгоритму функціонування всього об'єкта. Разом з тим відмова одного з компонентів може привести до відмови всього об'єкта і, як наслідок, – до невиконання покладеного на нього завдання.

Причинами відмов окремих компонентів об'єкта є, як правило, різного роду дефекти. У державному стандарті “Якість продукції. Терміни” (ГОСТ 15467–79) дефект визначається як будь-яка невідповідність того або іншого виробу вимогам, встановленим нормативно-технічною документацією. При цьому інтерпретується як деякий недолік виробу, що є результатом або помилок в процесі його конструкторської розробки і виготовлення, або використання початкових матеріалів і комплектуючих елементів, що не мають достатньо високої якості, або відхилення технологічного процесу виготовлення від заданого, або недотримання встановлених правил експлуатації і застосування, або різного роду пошкоджень через дію непередбачених дестабілізаційних

чинників (температурних, радіаційних, ударних, акустичних, кліматичних і т. п.).

При розробці і виготовленні конкретного об'єкта йому надається ряд властивостей, які в сукупності визначають якість об'єкта. Кожній з цих властивостей пред'являються певні вимоги, що впливають з умов цільового застосування об'єкта. Невідповідність хоч би однієї з цих властивостей встановленим вимогам свідчить про наявність в об'єкті дефекту. Таким чином, перш ніж допустити виготовлений об'єкт до використання за призначенням, необхідно перевірити в той або інший спосіб його відповідність встановленим вимогам з усієї розглянутої сукупності. Така перевірка здійснюється шляхом зіставлення вимірних значень тих або інших показників властивостей об'єкта з їх заданими (розрахунковими) значеннями. Надалі при роботі об'єкта теж необхідно здійснювати такого роду перевірки з тим, щоб своєчасно виявити дефект у разі його виникнення і вжити необхідні заходи до його усунення або, принаймні, зменшення його шкідливих наслідків.

Сукупність здатних до зміни в процесі виробництва, експлуатації властивостей об'єкта, що характеризують ступінь його функціональної придатності в заданих умовах цільового застосування або місце дефекту в ньому у разі невідповідності будь-якої з цих властивостей встановленим вимогам, назвемо технічним станом об'єкта. Визначити технічний стан об'єкта означає з'ясувати, чи має він набір необхідних властивостей, що забезпечують придатність його до застосування і правильність виконання ним своїх функцій, і якщо не має, — то внаслідок яких дефектів.

Всі можливі технічні стани об'єкта діляться на види технічного стану – це така його категорія, яка характеризується відповідністю (або невідповідністю) якості об'єкта певним вимогам (ГОСТ 20911-75 “Технічна діагностика. Терміни і визначення”). Визначення виду технічного стану об'єкта називається контролем його технічного стану (ГОСТ 19919—74 “Контроль автоматизований технічного стану виробів авіаційної техніки. Терміни і визначення”). Склад визначуваних видів технічного стану об'єкта залежить від цільового змісту і умов контролю. Наприклад, метою контролю можуть бути перевірки справності, працездатності і правильності функціонування об'єкта. Відповідно до цього розрізняють такі види його технічного стану: справність і несправність, працездатність і непрацездатність, правильне і неправильне функціонування.

У державному стандарті “Надійність в техніці. Терміни і визначення” (ГОСТ 27.002-83) справністю об’єкта називають такий його стан, при якому він повністю задовольняє вимоги, встановлені нормативно-технічною документацією. Подія, що полягає в порушенні справності об’єкта, називаються пошкодженням. Працездатністю об’єкта називають здатність його виконувати задані функції, зберігаючи задані параметри в межах, встановлених нормативно-технічною документацією. Властивість об’єкта безперервно зберігати працездатність протягом деякого часу називають його безвідмовністю. Подія, що полягає в порушенні працездатності об’єкта, називають його відмовою.

Як бачимо, поняття “справність” і “пошкодження” є ширшими, ніж поняття “працездатність” і “відмова” відповідно. Працездатний об’єкт на відміну від справного повинен задовольняти лише ті вимоги, які забезпечують його нормальне функціонування. Інші ж вимоги (наприклад, до зовнішнього вигляду, якості захисних покриттів, цілісності допоміжних пристосувань і т. д.) можуть не виконуватися. Очевидно, що справний об’єкт завжди працездатний, але працездатний об’єкт не завжди є справним. Слід відмітити, що багато дефектів хоч і не порушують працездатності об’єкта в даний момент часу, проте знижують його безвідмовність, а тому підлягають усуненню в міру їх виявлення.

Завдання виявлення дефектів (пошуку дефектів) відноситься до завдань технічної діагностики, яка відповідно до державного стандарту (ГОСТ 20911—75) вважається складовою частиною процесу контролю технічного стану об’єкта. Пошук дефекту – це визначення його місця з заданою глибиною. Глибина пошуку задається вказівкою складових частин об’єкта, з точністю до якої необхідно визначати місце дефекту.

Отже, процедура контролю полягає в перевірці відповідності об’єкта певним вимогам. Ці вимоги задаються у вигляді обмежень на показники властивостей об’єкта (останні в сукупності і визначають його якість). Показники властивостей об’єкта, доступні для спостереження, використовуються як ознаки для визначення виду його технічного стану. Назвемо їх контрольованими ознаками. Ними можуть бути різні параметри об’єкта або деякі функції їх, зокрема вихідні сигнали об’єкта або окремих його складових частин (блоків, модулів, приладів і т. п.). Як правило, ці ознаки мають цілком конкретний кількісний вираз і значення їх можна виміряти або обчислити. Тому такі ознаки називають кількісними. Разом з ними існують і якісні ознаки, які можна розрізнити за допомогою органів

чуття людини (незвичайний шум механізму, що працює, надмірний нагрів окремих елементів, запах горілої ізоляції і т. п.). При контролі технічного стану об'єктів, особливо дистанційно керованих, використовують переважно кількісні ознаки.

Для кожної такої ознаки задається інтервал, співвіднесений з певним видом технічного стану об'єкта. Якщо зміряне (або визначене яким-небудь чином) значення ознаки знаходиться в цьому інтервалі, то відповідний йому стан об'єкта слід віднести до даного виду технічного стану. Таким чином, поняття "вид технічного стану" має в деякому розумінні збірне значення: до даного виду технічного стану об'єкта відносяться всі його реальні стани, при яких спостережувані ознаки не виходять за межі встановлених для них інтервалів. Іншими словами, вид технічного стану об'єкта – множина таких його станів, про які може бути прийнято одне і теж рішення, узгоджене з метою контролю, що проводиться.

Процес контролю в загальному випадку є подачею на об'єкт певних дій (вхідних сигналів) і багатократне вимірювання і аналіз відповідних реакцій (вихідних сигналів) об'єкта на ці дії. Дії на об'єкт надходять від засобів контролю або є зовнішніми (по відношенню до системи контролю) сигналами, визначеними робочим алгоритмом функціонування об'єкта. У першому випадку дії називаються тестовими (стимулюючими), а в другому – робочими (контроль при цих діях називають відповідно тестовим і функціональним).

Тестові дії можуть подаватися як в процесі перевірки об'єкта, коли він не використовується за призначенням, так і при виконанні ним своїх робочих функцій. У другому випадку тестовими діями можуть бути лише сигнали, які не порушують нормальної роботи об'єкта. При контролі систем електроавтоматики такими діями можуть бути достатньо малі електричні сигнали (як періодичні, так і постійні), короткочасні імпульси і т. п.

Тестові дії можуть подаватися як на основні входи об'єкта, так і на додаткові, передбачені спеціально для контролю. Робочі дії надходять тільки на основні входи об'єкта. Вони забезпечують функціонування об'єкта відповідно до заданого алгоритму і попутно використовуються для контролю його технічного стану (зокрема, для контролю правильності його функціонування і пошуку дефектів в ньому). Робочі дії можуть цілеспрямовано змінюватися як за величиною, так і за складом для отримання бажаної якості функціонування об'єкта, але не для того, щоб

підвищити ефективність контролю його технічної стану. Цим вони відрізняються від тестових дій, які вибирають, виходячи з умов ефективної організації процесу контролю. Відзначимо, що функціональний контроль може здійснюватися не тільки в натурних умовах при цільовому використанні об'єкта але і при випробуваннях його в лабораторних умовах, і на спеціальних стендах, коли можлива імітація робочих дій.

У відповідь сигнали об'єкта на тестові або робочі дії можуть зніматися як з основних виходів об'єкта, так і з додаткових, введених спеціально для цілей контролю. Ці основні і додаткові виходи називають звичайно контрольними точками [32].

За будь-яких видів дій процес контролю є експериментом (пасивний або активний) над контрольованим об'єктом. Мінімальний, тобто що не підлягає розчленуванню в даних конкретних умовах експеримент, пов'язаний з вимірюванням сигналів у вибраних контрольних точках об'єкта, на які надходять робочі (тестові) дії, і з порівнянням вимірних значень із заданими (модельними) їх значеннями, назвемо, згідно з роботою [33], елементарною перевіркою.

Алгоритмом контролю назвемо сукупність формальних розпоряджень, що задають склад елементарних перевірок, їх послідовність і правила обробки і аналізу результатів цих перевірок з метою визначення виду технічного стану, в якому фактично знаходиться об'єкт. Алгоритм контролю, в якому результат чергової елементарної перевірки аналізується відразу ж після її виконання і кожна подальша перевірка вибирається залежно від результатів попередніх перевірок, називається умовним алгоритмом контролю. Алгоритм контролю, в якому послідовність елементарних перевірок не залежить від їх результатів, називається безумовним. У безумовних алгоритмах контролю аналіз результатів всіх елементарних перевірок робиться після їх виконання. Оскільки при цьому черговість елементарних перевірок не має істотного значення, то вона визначається в основному технічними можливостями системи контролю (зокрема, перевірки можуть виконуватися одночасно).

Коли склад контрольних точок фіксований і однаковий для всіх елементарних перевірок, алгоритм контролю характеризується сукупністю початкових дій і послідовністю їх подачі на контрольований об'єкт. Така сукупність вхідних дій називається тестом (від англійського слова *test*, що означає випробування, контроль). Оскільки елементарна

перевірка полягає у виконанні операцій, пов'язаних з подачею лише одної дії із заданого тесту і вимірюванням реакції об'єкта на цю дію, то тестом іноді називають множину елементарних перевірок, на якій всі види технічних станів об'єкта попарно помітні.

Сукупність елементарних перевірок, на яких працездатний стан об'єкта відрізняється від будь-якого його непрацездатного стану, називається перевірчим тестом. Сукупність елементарних перевірок, на яких попарно помітні всі несправні (непрацездатні) стани об'єкта, називаються тестом пошуку дефекту.

Тест називається тупиковим, якщо ніяка його власна множина не є тестом. Тест найменшої довжини називається мінімальним. Всякий мінімальний тест є тупиковим, але не навпаки.

У тих випадках, коли для всіх елементарних перевірок вхідні дії однакові або змінюються під дією зовнішніх по відношенню до системи контролю причин (наприклад, при функціональному контролі), алгоритм контролю характеризується складом тільки контрольованих точок і послідовністю звернень до них для отримання результатів відповідних елементарних перевірок. У цих випадках контроль здійснюється в умовах пасивного експерименту і елементарна перевірка полягає у вимірюванні реакції об'єкта на вхідну дію в одній контрольній точці і порівнянні результату вимірювання з заданим значенням. Сукупність вибраних контрольних точок дається множиною елементарних перевірок. При цьому передбачається, що сигнал в одній і тій же контрольній точці не залишається незмінним під час переходу об'єкта з одного виду технічного стану в інший. На далі елементарну перевірку скорочено називатимемо просто перевіркою, якщо з контексту ясно, що йдеться не про перевірку справності або працездатності об'єкта взагалі.

Ситуація, при якій подача тестових дій в об'єкт ускладнена, є найбільш характерною в разі контролю складних технічних систем, і особливо дистанційно керованих об'єктів, контроль стану яких здійснюється за допомогою системи телевимірювань. Тому в подальшому розгляді питань контролю матиметься на увазі саме така ситуація. Разом з слід відмітити, що при розробці методів вибору перевірок і оптимізації їх послідовності абсолютно байдуже, що це за перевірки: чи це вимірювання сигналів в різних контрольних точках при одній і тій же вхідній дії, чи навпаки, вимірювання сигналів в одних і тих же контрольних точках при різних вхідних діях. Тому методи, що розглядаються далі, у однаковій мірі

можуть бути застосовані як для тестового, так і для функціонального контролю. При пошуку дефектів нерідко тестові методи виявляються ефективнішими, хоч і не завжди їх можна практично реалізувати (наприклад, в дистанційно-керованих об'єктах). Тому важливо розробити єдиний методологічний підхід і вибрати відповідний математичний апарат, в рамках яких могли б розглядатися як той, так і інший вид контролю технічного стану об'єктів. Для цього перш за все потрібно математично сформулювати завдання контролю технічного стану об'єкта.

4.2 Математичне формулювання завдання контролю технічного стану об'єкта

Загальним завданням контролю є визначення виду технічного стану об'єкта. Розв'язання цієї задачі припускає наявність математичної моделі контрольованого об'єкта, яка залежить від властивостей об'єкта, цільового змісту контролю і умов його здійснення. У найзагальнішому вигляді модель будь-якого об'єкта може бути представлена впорядкованою множиною

$$A = \langle T, X, Y, Z, F, L \rangle, \quad (4.1)$$

де T – множина моментів часу, в які спостерігається об'єкт; Y, X – сукупність вхідних і вихідних сигналів відповідно; Z – множина станів об'єкта; F – оператор переходів, що відображає механізм зміни стану об'єкта під дією внутрішніх і зовнішніх збурень; L – оператор виходів, що описує механізм формування вихідного сигналу як реакції об'єкта на внутрішні і зовнішні збурення.

Оператори F і L реалізують відображення

$$F: T \times Y \times Z \rightarrow Z; \quad (4.2)$$

$$L: T \times Y \times Z \rightarrow X. \quad (4.3)$$

Всякий стан об'єкта $z \in Z$ характеризується в кожен момент часу $t \in T$ набором змінних z_r ($r = \overline{1, k}$), дій, що змінюються під впливом зовнішніх і внутрішніх збурень, наприклад, відмов окремих елементів об'єкта. Відмітимо, що стан об'єкта як динамічної системи і його технічний стан не є еквівалентними поняттями. Як випливає з наведеного вище визначення, технічний стан об'єкта – це сукупність таких ознак, за якими можна судити про функціональну придатність об'єкта, тобто встановити, чи є в даний момент об'єкт справним, працездатним, чи таким, що правильно функціонує і т. д. Стан же об'єкта це набір таких змінних

(змінних стану), які хоч і повністю визначають положення об'єкта як абстрактної динамічної системи в деякому просторі в даний момент часу, але самі по собі не дозволяють встановити, чи правильно функціонує об'єкт і чи справний він. Для того, щоб прийняти вірне рішення, необхідно зіставити кожен стан об'єкта з деяким конкретним значенням, що характеризує рівень працездатності (справність) об'єкта або вид спостережуваного в ньому дефекту. Тільки на підставі результатів зіставлення всіх змінних стану об'єкта з апіорі заданими їх значеннями можна віднести цей стан до того або іншого виду. Проте таке зіставлення не завжди виконуване, оскільки змінні стану z_r ($r = \overline{1, k}$) у загальному випадку є деякими абстрактними змінними, фізична природа яких не завжди відома, а їх вимірювання не завжди можливі. На відміну від них вихідні змінні x_j ($j = \overline{1, n}$) можна спостерігати і вимірювати, оскільки вони є цілком конкретними фізичними величинами (струми, напруги, кутові і лінійні переміщення і т. д.). В цьому відношенні вхідні сигнали зручніші для використання їх як ознаки при визначенні виду технічного стану об'єкта, тобто як контрольовані ознаки. Іншими словами визначення виду технічного стану об'єкта практично здійсненне в просторі змінних стану z_r ($r = \overline{1, k}$), а в просторі вихідних сигналів x_j ($j = \overline{1, n}$) або інших змінних, що є конкретними фізичними величинами (наприклад, параметрів об'єкта).

З математичної точки зору визначення будь-якого з станів об'єкта можливе тільки в тому випадку, якщо за результатами вимірювання вихідних сигналів x_j ($j = \overline{1, n}$) при відомих значеннях вхідних сигналів u_s ($s = \overline{1, l}$) може бути одержана оцінка будь-якої із змінних стану z_r ($r = \overline{1, k}$).

4.3 Формалізація процесу функціонування складної системи як об'єкта контролю

Під функціонуванням системи відповідно до державного стандарту (ГОСТ 20911—75) розуміється процес виконання нею заданого робочого алгоритму в разі використання системи за призначенням. Фізично функціонування системи за відсутності відмов в ній може бути інтерпретовано як процес безперервної або стрибкоподібної (залежно від типу системи і характеру виконуваних нею функцій) зміни її стану за заданим алгоритмом. Математична модель, в якій в тій або іншій формі розкриваються причинно-наслідкові зв'язки, що визначають процес

переходу системи з одного стану в інший, називається динамічною моделлю.

До складу сучасних складних систем входить значне число різноманітних за своїм призначенням функціональних частин, кожна з яких є також достатньо складною підсистемою. Окремі підсистеми об'єкта реалізують різні алгоритми функціонування і тому мають різну структуру і організацію функціонально-інформаційного обміну між елементами. Навіть в рамках однієї підсистеми її функціональні елементи часто відрізняються один від одного за принципом дії, конструктивним виконанням, надійністю і іншими характеристиками.

Таким чином, більшість підсистем складної системи є неоднорідним за своєю структурою і функціональними властивостями. Тому для опису різних компонентів складних систем потрібні різні математичні схеми (диференціальні або різницеві рівняння, алгебро-логічні і лінгвістичні форми, кінцеві і імовірнісні автомати і інші типи моделей). При цьому виникає проблема сполучення різномірних математичних моделей між собою. В результаті динамічна модель даної системи виходить дуже складною і громіздкою.

Не дивлячись на високу складність отримуваних моделей, вони часто виявляються малоприматними для вирішення завдань контролю, наприклад, в них не описується механізм відмов і їх вплив на працездатність контрольованих систем.

Відмічені обставини створюють певні труднощі практичного використання моделей, побудованих на основі відомих типових математичних схем, при контролі складних технічних систем. Для подолання цих труднощів необхідна розробка моделі з вищим рівнем абстракції, яка дозволяла б розглядати всі підсистеми об'єкта або хоч би більшість на основі єдиного методологічного підходу. Крім того, виходячи із загальної постановки завдання визначення виду технічного стану окремих систем і всього об'єкта в цілому, ми повинні мати таку модель, в якій враховувалася б можливість випадкових відмов в модельованому об'єкті. І, нарешті, модель повинна бути зручна для реалізації її на обчислювальних засобах, у тому числі і на універсальних ЕОМ, в сенсі прийнятної об'єму пам'яті і швидкодії.

Слід, проте, відзначити, що підвищення рівня абстракції моделі незмінно спричиняє певну ідеалізацію, при якій вилучаються з розгляду деякі неістотні сторони досліджуваного об'єкта (процесу), а основна увага

зосереджується на головних його властивостях. Позбавлена деяких деталей така модель неповно характеризує досліджуваний об'єкт, але, по-перше, саме тому його легше вивчати, і, по-друге, потрібно використовувати для цих цілей значно менше інформації. Це дає істотний вииграш в часі, який витрачається на отримання результатів дослідження. При контролі складних систем або окремих їх підсистем чинник часу часто грає визначальну роль, тому використання таких моделей стає найбільш доцільним.

Побудова функцій якості функціонування та відмов, використовуючи принципи теорії марковських процесів, значно спрощує математичну модель за рахунок допущення про експоненціальний закон розподілу імовірностей переходу системи зі стану в стан. Таке допущення звичайно абстрагує процеси, які насправді відбуваються в об'єкті. Цьому є раціональне пояснення:

- у самих критиків експоненціального закону ще немає єдиного погляду на дійсний закон розподілу часу виникнення відмов і часу відновлень;

- застосування експоненціального закону розподілу часу між відмовами призводить до похибки в сторону деякого зниження розрахункової імовірності безвідмовної роботи порівняно з фактичною [6], тобто не може бути причиною створення ненадійної системи;

- є роботи, наприклад [11], в яких розглянуті системи, що мають елементи, час відмов і відновлень яких є комбінацією експоненціального, вейбулівського і нормальнологігарифмічного розподілів, і показано що на достатньо великому проміжку часу ці системи ведуть себе так, ніби всі їх елементи мають експоненціальні розподіли часу відмов і відновлень.

Для зменшення ідеалізації отриманих моделей виконується уточнення імовірностей знаходження системи в тому чи іншому стані. Це уточнення здійснюється домноженням їх (так званих апіорних імовірностей, за які приймаються імовірності отримані під час розв'язання системи рівнянь Колмогорова) на уточнюючий коефіцієнт, використовуючи теорему Байєса.

Хоча тут виникають певні проблеми. По-перше, виникають складності у визначенні густин імовірностей $p(x_1, \dots, x_n / s_i)$, які характеризують імовірність стану s_i якщо показники x_1, \dots, x_n набудуть певних значень.

Ці густини імовірностей можна визначати виходячи з допущення про статистичну незалежність параметрів x_i . На це досить часто йдуть для спрощення розрахунків. Для статистично незалежних ознак суттєво спрощується розв'язання задач розпізнання. Зокрема, для оцінювання розподілів $p(x_1, \dots, x_n / s_i)$ замість багатовимірних густин імовірностей достатньо оцінити n одновимірних густин $p(x_j / s_i), j=1, 2, \dots, n$.

В зв'язку з цим приклади одновимірних розподілів можуть безпосередньо використовуватись для розв'язання практичних задач, якщо є впевненість вважати ознаки, що характеризують стан системи, статистично незалежними. Для цього

$$p(x_1, \dots, x_n / s_i) = \prod_{j=1}^n p(x_j / s_i)$$

і формула Байеса, яка використовується для визначення апостерорної імовірності приналежності системи з ознаками x стану s_i , набуває вигляду

$$P(s_i / x_1, \dots, x_n) = \frac{P_0(s_i) \prod_{j=1}^n p(x_j / s_i)}{\sum_{k=1}^M P_0(s_k) \prod_{j=1}^n p(x_j / s_k)}$$

Зустрічаються практичні додатки теорії розпізнання, коли ознаки вважають статистично незалежними без вагомих на те причин, а часом навіть знаючи, що насправді ознаки (хоча б частина з них) взаємозалежні. Це робиться для спрощення процедур навчання і розпізнавання за рахунок погіршення “якості” (імовірності помилок), якщо це погіршення можна визнати прийнятним. Особливо помітне спрощення процедури розпізнавання за методом Байеса, якщо ознаки набувають двійкових значень. У цьому випадку навчання складається з побудови таблиці:

Таблиця 4.1 – Таблиця навчань

		x_1	x_2	x_3	...	x_n
$P_0(s_1)$	s_1	P_{11}	P_{12}	P_{13}	...	P_{1n}
$P_0(s_2)$	s_2	P_{21}	P_{22}	P_{23}	...	P_{2n}
$P_0(s_3)$	s_3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	...	P_{3n}
.
.
$P_0(s_m)$	s_m	P_{m1}	P_{m2}	P_{m3}	...	P_{mn}

Тут $p_{ji} = p(x_j/s_i)$, $x_j = 0,1$.

Якщо n не дуже велике, то віднесення системи до того або іншого стану настільки спрощується, що досить часто немає необхідності використовувати комп'ютер, достатньо калькулятора. Лише необхідно мати наперед підготовлену таблицю зі значеннями p_{ji} (точніше, з їх оцінками). Якщо у системи виявлено наявність тих або інших ознак, то для кожного зі станів у відповідному рядку таблиці вибираються ті p_{ji} , які пов'язані з цими ознаками, і перемножуються. Об'єкт відносять до того класу, добуток для якого буде максимальним. При цьому, зазвичай, здійснюється домноження на апріорні імовірності.

Однак в більшості випадків таке припущення вносить суттєві помилки в розрахунки. В таких випадках для визначення апостеріорних імовірностей використовують рівняння (3.8) і густини імовірностей $p(x_1, \dots, x_n / s_i)$ визначаються за допомогою апроксимаційного методу.

Цей підхід досить універсальний. Окрім оцінки (відновлення) розподілів, він дозволяє розв'язати задачу таксонометрії, оптимізованого управління послідовною процедурою вимірювання ознак, навіть якщо вони статистично залежні, полегшує оцінку інформативності ознак і розв'язання деяких задач аналізу експериментальних даних.

4.4 Апроксимаційний метод визначення густин імовірностей

В основі методу лежить допущення про невідомий (відновлюваний) розподіл значень ознак кожного стану, що добре апроксимується сукупністю базових розподілів досить простого і зазделигіть відомого виду

$$p(\bar{x}) = \sum_{q=1}^Q \mu_q \varphi(\bar{x} / \bar{a}_q),$$

де \bar{a}_q – множина (вектор) параметрів q -го базового розподілу, $\mu_q > 0$ – вагові коефіцієнти, що задовольняють умову $\sum_{q=1}^Q \mu_q = 1$. Щоб не ускладнювати формулу, в ній неказано індекс номера стану, який описується даним розподілом значень ознак.

Представлення невідомого розподілу у вигляді ряду використовується, наприклад, в методі потенційних функцій. Однак там $\varphi_q(\bar{x})$ є елементами повної ортонормованої системи функцій. З одного

боку, це добре, тому що обчислення Q перших значень μ_q гарантує мінімум середньоквадратичного відхилення відновленого розподілу від істинного але з іншого $\varphi_q(x)$ не є розподілами, можуть бути знакозмінними, що для $Q < \infty$, як правило, призводить до небажаного ефекту, коли для деяких значень \bar{x} відновлений розподіл $p(\bar{x})$ є від'ємним. Намагання уникнути цього ефекту далеко не завжди є вдалим. Цього недоліку позбавлений підхід, що розглядається, коли шуканий розподіл представляє сукупність базових. При цьому $\varphi(\bar{x}/a_q)$ називають розподілами компонент сукупності, а a_q, μ_q і Q – її параметрами. У цього підходу крім переваг є і недоліки. Розв'язання задачі оцінки параметрів сукупності є, взагалі, багатоекстремальним, і не має гарантій, що знайдений розв'язок знаходиться в глобальному екстремумі, якщо виключити неприйнятний на практиці повний перебір варіантів розбиття сукупності на компоненти.

Такі поняття, як “сукупність”, “компонента” зазвичай використовуються для розв'язання задач таксономії, але це не є перешкодою для опису у вигляді сукупності достатньо загального виду розподілу значень ознак того або іншого образу. Апроксимаційний метод є нібито проміжним між параметричною та непараметричною оцінкою розподілу.

Дійсно, за вибіркою приходиться оцінювати значення параметрів a_q, μ_q і Q , і в той же час вид закону розподілу заделегіть не відомий, на нього наложені лише загальні обмеження. Наприклад, якщо компонента – нормальний закон, то густина імовірності $p(\bar{x})$ не повинна набувати значення нуль для всіх \bar{x} і бути досить гладкою. Якщо компонента – біноміальний закон, то $p(\bar{x})$ може бути практично будь-яким дискретним розподілом.

Разом з тим параметри сукупності визначити класичним методом параметричного оцінювання (наприклад, методом моментів або максимуму функції правдоподібності) не є можливим за декількома винятками (частинними випадками). В зв'язку з цим доцільно звернутись до методів, що використовуються під час розв'язування задач таксономії.

В якості компонент зручно використовувати біноміальні закони для дискретних ознак і нормальні густини імовірностей для неперервних ознак, оскільки властивості і теорія цих розподілів добре вивчені. До того

ж вони, як показують практичні приклади, в якості компонент достатньо адекватно описують досить широкий клас розподілів.

Нормальний закон, як відомо, характеризується вектором середніх значень ознак та матрицею коваріації. Особливе місце в ряді задач займають нормальні закони з діагональними коваріаційними матрицями (в компонентах ознаки статистично незалежні). При цьому вдається оптимізувати послідовну процедуру вимірювання ознак, навіть якщо у відновленому розподілі $p(\bar{x})$ ознаки залежні.

Наприклад, якщо розглядати одновимірні розподіли, то

$$p(x) = \sum_{q=1}^Q \mu_q \varphi(x/a_q),$$

де $\varphi(x/a_q) = \begin{cases} N(x/m_q, \sigma_q) & \text{— для неперервних ознак,} \\ B_i(x_j/n, p_q) & \text{— для дискретних ознак;} \end{cases}$ \bar{a}_q — вектор параметрів базового розподілу (компоненти); μ_q — ваговий коефіцієнт q -ї компоненти; m_q — математичне очікування q -ї нормальної компоненти; σ_q — середньоквадратичне відхилення q -ї нормальної компоненти; p_q — параметр q -ї біноміальної компоненти; $n+1$ — число градацій дискретної ознаки; $x_j = 0, 1, 2, \dots, n$;

$$N(x/m_q, \sigma_q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_q} \exp\left\{-\frac{(x-m_q)^2}{2\sigma_q^2}\right\};$$

$$B_i(x_j/n, p_q) = C_n^{x_j} p_q^{x_j} (1-p_q)^{n-x_j}; C_n^{x_j} \text{ — число поєднань з } n \text{ по } x_j.$$

Для достатньо великої n замість біноміального закону можна використовувати нормальний.

Тепер необхідно оцінити значення параметрів. Якщо розглядати сукупність нормальних законів, то слід відмітити, що метод максимуму правдоподібності неприйнятний, коли всі параметри сукупності невідомі. В такому випадку можна скористатись доцільно організованими ітераційними процедурами. Розглянемо одну з них.

Для початку зафікуємо Q , тобто будемо вважати його заданим. Кожному об'єкту x_i вибірки поставимо у відповідність апостерорну імовірність α_{iq} приналежності його q -й компоненті сукупності

$$\alpha_{iq} = \frac{\mu_q \varphi(x_i / \bar{a}_q)}{\sum_{j=1}^Q \mu_j \varphi(x_i / \bar{a}_j)}$$

Легко побачити, що для всіх $i=1, 2, \dots, N$ виконується умова $0 \leq \alpha_{iq} \leq 1$ і $\sum_{q=1}^Q \alpha_{iq} = 1$. Якщо відомі α_{iq} для всіх $i=1, 2, \dots, N$, то можна

визначити μ_q методом максимуму правдоподібності $\mu_q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{iq}$.

Функцію правдоподібності q -ї компоненти сукупності визначимо таким чином $l(\bar{a}_q) = \sum_{i=1}^N \alpha_{iq} \log \varphi(x_i / \bar{a}_q)$, і оцінки максимальної правдоподібності \bar{a}_q можна отримати з рівняння $\frac{\partial l(\bar{a}_q)}{\partial \bar{a}_q} = 0$.

Таким чином, знаючи \bar{a}_q і μ_q , можна визначити α_{iq} , і навпаки, знаючи α_{iq} , можна визначити \bar{a}_q і $\mu_q = 0$, тобто параметри сукупності. Але ні те не інше невідомі. В зв'язку з цим скористаємось такою процедурою послідовних перетворень:

$$A^0 \Rightarrow \{\alpha_{iq}^0\} \Rightarrow A^1 \Rightarrow \{\alpha_{iq}^1\} \Rightarrow \dots \Rightarrow A^t \Rightarrow \{\alpha_{iq}^t\} \Rightarrow A^{t+1} \Rightarrow \{\alpha_{iq}^{t+1}\} \Rightarrow \dots,$$

де $A = \{\mu_q, \bar{a}_q\}$, A^0 – довільно задані початкові значення параметрів сукупності, верхній індекс – номер ітерації в послідовній процедурі обчислень.

Відомо, що ця процедура є збіжною і при $t \rightarrow \infty$ границею є оцінка невідомих параметрів A сукупності, що дають максимум функції правдоподібності.

$$L(A) = \sum_{i=1}^N \log \sum_{q=1}^Q \mu_q \varphi(x_i / \bar{a}_q),$$

причому $L(A^{t+1}) \geq L(A^t)$ і $\{L(A^{t+1}) - L(A^t)\}$ наближається до нуля для $t \rightarrow \infty$.

Для одновимірного нормального закону

$$l(\bar{a}_q) = \sum_{i=1}^N \alpha_{iq} \ln \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_q}} \exp \left[-\frac{(x_i - m_q)^2}{2\sigma_q^2} \right] \right\}.$$

Розв'язуючи рівняння $\frac{\partial l(\bar{a}_q)}{\partial m_q} = 0$ і $\frac{\partial l(\bar{a}_q)}{\partial \sigma_q^2} = 0$, отримаємо для $(t+1)$ -

$$\text{го кроку } m_q(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_{iq}^t x_i}{\sum_{n=1}^N \alpha_{nq}^t}, q=1, 2, \dots, Q; \sigma_q^2(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_{iq}^t [x_i - m_q(t+1)]^2}{\sum_{n=1}^N \alpha_{nq}^t}$$

Після завершення послідовної процедури визначаються μ_q . Відповідні обчислювальні формули для багатовимірних нормальних розподілів можна знайти в роботі [2].

Отримані в результаті розглянутої послідовної процедури значення параметрів є оцінками максимальної правдоподібності як відносно кожної компоненти, так і відносно сукупності в цілому.

Якщо $L(A)$ має декілька максимумів, то ітераційний процес в залежності від заданих початкових значень A^0 сходиться до одного з них, не обов'язково глобального. Подолати цей недолік, притаманний практично всім методам оцінок параметрів багатовимірних розподілів (в крайньому разі, сукупностей) достатньо складно. Можна повторити послідовну процедуру декілька разів для різних A^0 і вибрати найкращий з розв'язків. Вибір різних A^0 здійснюють або випадковим чином, або за допомогою різного роду направлених процедур. Швидкість збіжності $L(A)$ до максимуму тим вища, чим сильніше рознесені компоненти в просторі показників і чим ближче вибрані A^0 до значення A , що відповідають максимуму функції правдоподібності.

Розглянутий метод оцінки параметрів сукупності для фіксованого числа компонент Q . Але в аппроксимаційному методі і Q необхідно визначати, оптимізуючи будь-який критерій. Пропонується такий підхід. Оцінюються послідовно параметри $A = \{\mu_q, \bar{a}_q\}$ для $Q=1, 2, 3, \dots$. З отриманого ряду Q_1, Q_2, Q_3, \dots вибираються в де-якому розумінні кращі значення Q_{opt} .

Для пошуку Q_{opt} користуються мірою невизначенності К. Шеннона $H[p(\bar{x})]$:

$$H[p(\bar{x})] = E[\log p(\bar{x})] = - \int_{\bar{x}} p(\bar{x}) \log p(\bar{x}) d\bar{x},$$

де $H[p(\bar{x})]$ – ентропія розподілу $p(\bar{x})$; $E[\cdot]$ – знак математичного очікування; $p(\bar{x})$ – густина імовірності значень неперервних ознак.

Для послідовного збільшення значень Q мають місце дві тенденції:

- зменшення ентропії за рахунок розподілу вибірки на частині з зменшенням розкиду значень величин \bar{x} , що спостерігаються, всередині підвбірок (компонент сукупності);

- збільшення ентропії за рахунок зменшення об'єму підвбірок і пов'язаних з цим збільшенням статистик, які характеризують розкид значень \bar{x} .

Наявність цих двох тенденцій обумовлюють існування Q_{opt} за критерієм найменшого значення диференціальної ентропії (рис. 4.1). Щоб використати на практиці цей критерій, необхідно в явному вигляді виразити оцінку компонент сукупності через об'єм підвбірки, що формують цю компоненту. Наприклад, для одновимірного нормального розподілу, користуючись його байсєвською оцінкою маємо

$$\tilde{\varphi}_s(x) = \iint_{(A)(B)} \varphi(x/m, \sigma) f(m, \sigma/m, \sigma) dm d\sigma,$$

де A – область визначення m ; B – область визначення σ ; m, σ – вибіркові оцінки m і σ .

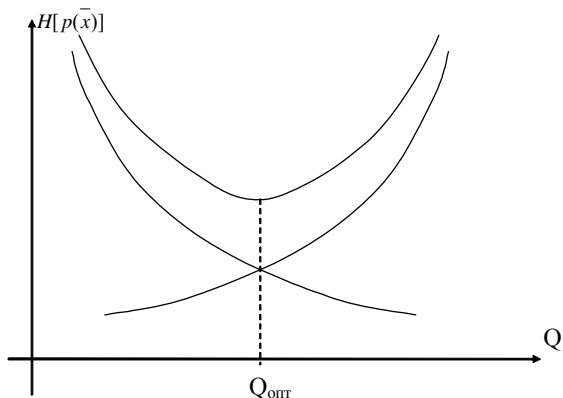


Рисунок 4.1 – Ілюструє тенденції до формування Q_{opt}

У відповідності з формулою Байєса

$$f(m, \sigma/m, \sigma) = \frac{P_0(m, \sigma) f(m, \sigma/m, \sigma)}{\iint_{(A)(B)} P_0(m, \sigma) f(m, \sigma/m, \sigma) dm d\sigma}.$$

Якщо апіорні розподіли $P_0(m, \sigma)$ невідомі, то доцільно використовувати рівномірний розподіл по всій області (A, B).

При цьому отримується розподіл, що не є гауссовим, але асимптотично наближається до нього (для $n \rightarrow \infty$). Сернє значення $\tilde{\varphi}_3(x)$ дорівнює середньому значенню, яке визначається за вибіркою, а дисперсія дорівнює вибірковій дисперсії σ^2 , помноженій на коефіцієнт $\beta = \frac{n^2 - 1}{n(n - 3)}$.

Можна показати, що $\tilde{\varphi}_3(x)$ добре апроксимується нормальним законом з математичним очікуванням, що дорівнює m – вибірковому середньому, і дисперсії, рівній вибірковій дисперсії σ^2 , помноженій на β . Як видно з формули, β наближається до одиниці для $n \rightarrow \infty$, збільшується зі зменшенням n і накладає обмеження на об'єм вибірки $n > 3$ (рис. 4.2).

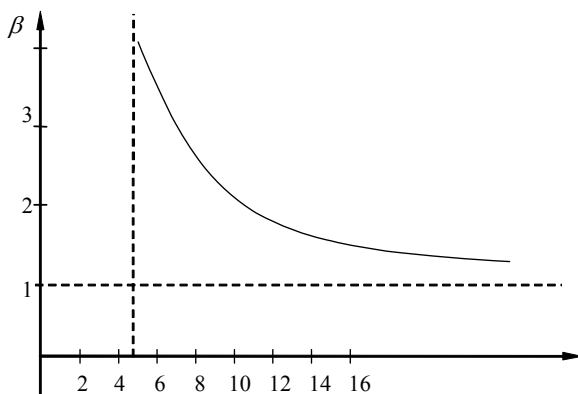


Рисунок 4.2 – Залежність поправочного коефіцієнта β від об'єму вибірки n

Таким чином, вдалось в явній формі виразити залежність параметрів компонент сукупності від об'єму підвибірки, що, в свою чергу, дозволяє реалізувати процедуру пошуку Q_{opt} .

Об'єм підвибірки для q -ї компоненти сукупності визначається за формулою $n_q = \mu_q n$.

Отже, розглянутий варіант оцінки параметрів сукупності не є статистично чітко обгрунтованим, але всі обчислювальні процедури опираються на критерії, прийняті в математичній статистиці.

Багаточисленні практичні додатки апроксимаційного методу в різних предметних областях показали його ефективність.

4.5 Оцінка інформативності ознак

Оцінка інформативності ознак необхідна для їх відборів для розв'язання задач розпізнавання станів. Сама процедура відбору практично не залежить від способу вимірювання інформативності. Важливо лише, щоб цей спосіб був однаковим для всіх ознак (груп ознак), що входять в вихідну їх множину і беруть участь в процедурі відбору.

Для розв'язування задач визначення стану вирішальним критерієм є ризик втрат і як окремий випадок – імовірність помилок розпізнавання. Для використання цього критерію необхідно для кожної ознаки (групи ознак) провести навчання і контроль, що є достатньо громіздким процесом, особливо для великих об'ємів вибірки. Саме це і характерно для статистичних методів. Добре, якщо навчання складається з побудови розподілу значень ознак для кожного стану $p(x_1, \dots, x_n/s_i)$. Тоді, якщо вдалось побудувати $p(x_1, \dots, x_n/s_i)$ у вихідному ознаковому просторі, розподіл за будь-якою ознакою (групою ознак) отримується як проекція $p(x_1, \dots, x_n/s_i)$ на відповідну вісь (у відповідний підпростір) вихідного ознакового простору (маргінальні розподіли). В цьому випадку повторних навчань виконувати не потрібно, необхідно лише оцінити імовірність помилок розпізнавання.

Так, якщо є навчаюча та контрольна вибірки, то перша з них використовується для побудови $p(x_1, \dots, x_n/s_i)$, а друга – для оцінки імовірності помилок розпізнавання. Недоліком цього підходу є великий об'єм розрахунків, оскільки приходиться значну кількість раз здійснювати розпізнавання станів системи, та необхідність для двох вибірок (навчаючої і контрольної) до кожної з яких пред'являти жорсткі вимоги за їх об'ємом. Сформувані на практиці вибірку великого об'єму є, як правило, складною задачею, а дві незалежні вибірки – тим більше.

Можна піти іншим шляхом, а саме: всю вибірку використовувати для навчання (побудови $p(x_1, \dots, x_n/s_i)$), а контрольну вибірку генерувати давачем випадкових векторів у відповідності з $p(x_1, \dots, x_n/s_i)$. Такий підхід покращує точність побудови $p(x_1, \dots, x_n/s_i)$ порівняно з попереднім випадком, але має інші недоліки. Зокрема, окрім великої кількості актів

розпізнавання необхідно згенерувати відповідне число потрібних для цього псевдооб'єктів, що само по собі пов'язано з певними затратами обчислювальних ресурсів, особливо якщо розподіл $p(x_1, \dots, x_n / s_i)$ має складний вигляд.

У зв'язку з цим представляють інтерес інші міри інформативності ознак, що обчислюються з меншими затратами обчислювальних ресурсів, ніж оцінка імовірності помилок розпізнавання. Такі міри можуть бути не пов'язані взаємооднозначно з імовірностями помилок, але для вибору найбільш інформативної підсистеми ознак це не суттєво, оскільки в даному випадку важливо не абсолютне значення ризику втрат, а порівняльна цінність різних ознак (груп ознак). Зміст критеріїв класифікаційної інформативності, як і для детерміністичного підходу, полягає в кількісній мірі "рознесеності" розподілів значень ознак різних станів системи. Зокрема, в математичній статистиці використовуються оцінки верхньої помилки класифікації Чернова (для двох класів) і пов'язані з нею відстані Бхатачарія, Махаланобіса. Для ілюстрації наведемо вираз відстані Махаланобіса для двох нормальних розподілів, що відрізняються тільки векторами середніх \bar{m}_1 і \bar{m}_2 :

$$d = (\bar{m}_1 - \bar{m}_2)^T \Sigma^{-1} (\bar{m}_1 - \bar{m}_2),$$

де Σ – матриця коваріацій; T – транспоновані матриці; -1 – обернені матриці.

В одновимірному випадку $d = \frac{(m_1 - m_2)^2}{\sigma^2}$, звідки видно, що d тим більше, чим віддаленіші один від одного m_1 і m_2 і компактніший розподіл (менше σ).

Крім цих оцінок можна також використати міру Кульбака та ряд інших.

5 АЛГОРИТМ ВРАХУВАННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СТАНІВ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

Адекватність математичних моделей багато в чому залежить від кількості, точності і коректності врахованих факторів [3]. Побудова адекватних критеріальних моделей для врахування надійності в задачах оптимального керування та визначення поточного стану системи керування потребує вдосконалення алгоритму збору необхідної інформації [92, 93]. Це дозволить створити інформаційну базу, використовуючи яку, можна як уточнювати критеріальні моделі в процесі експлуатації, так і робити висновки про поточний стан регулювальних пристроїв і визначати стратегію наступних етапів відновлювальних робіт.

Значна кількість факторів, що враховується для побудови критеріальних моделей, і недостатній об'єм інформації вимагає розв'язання задачі критеріального програмування великої розмірності [65]. Сформульовані в розділі 2 квазіумови оптимальності критеріального програмування надають можливість впорядкувати хід ітераційного процесу під час розв'язання багатопараметричних задач [64].

Коректні і адекватні моделі ще не є достатньою умовою успішного розв'язання задачі практичної реалізації результатів оптимальних розрахунків [13]. Дискретність функцій керування вимагає отримання обґрунтованої зони нечутливості. Це дозволить отримати область зміни величини функції керування, в якій критерій оптимальності знаходиться в області оптимальних значень. Отримати відповідь на це питання можна в результаті розв'язання задачі чутливості [23, 33].

Розв'язання поставлених задач показане на прикладі електричної системи.

5.1 Алгоритм збору даних для визначення показників надійності регулювальних пристроїв

Ефективність оперативного керування режимами роботи електричних систем за напругою і реактивною потужністю суттєво залежить від достовірності результатів оптимальних розрахунків [74, 87, 101]. Відсутність даних з надійності, як окремих трансформаторів, так і їх пристроїв РПН, що приводить до необхідності створення інформаційної бази. Це надало б можливість врахувати рівень надійності в задачі

оптимального керування. Інформаційне забезпечення вказаної задачі включає в себе класифікацію і оцінку можливостей отримання інформації щодо стану об'єктів; створення автоматизованої інформаційної системи, що забезпечує збір, обробку і аналіз даних; прогнозування зміни даних, що отримуються за допомогою автоматизованих систем.

Як впливає з рівнянь (2.16) – (2.23), для отримання реальних показників надійності регулювальних пристроїв в процесі експлуатації необхідно контролювати ряд параметрів, які характеризують знос елементів і системи регулювання в цілому. Тому проблеми організації діагностичного і прогностичного контролю обладнання є одними з основних для автоматизації процесу керування режимами ЕЕС [92, 93]. Система діагностики (СД) стану РПН розробляється у відповідності з схемою, яка показана на рис. 5.1.

Розв'язання задачі починається з вибору критерію організації системи діагностики. Оскільки СД у випадку, що розглядається, призначена для визначення якості функціонування пристрою регулювання напруги, то критерієм організації СД вибрана надійність пристрою РПН та трансформаторів.

Оскільки системи керування представляють собою об'єкт досить складної структури, то розв'язання задачі діагностування суттєво ускладнюється. Тому у відповідності з фізико-хімічними процесами, які протікають в матеріалах конструкції, пристрої РПН та трансформатори складаються з структурних одиниць, діагностування яких має свою специфіку (обмотки, контактна система, механічні вузли). В такому випадку структурна схема діагностування надійності дозволяє встановити ступінь впливу відмови кожної структурної одиниці на працездатність пристроїв регулювання.

Під час розгляду режимів використання перемикаючих пристроїв виявляються режими функціонування кожного елемента. Це пов'язано з тим, що в процесі роботи в різні моменти часу функціонують різні елементи. Тому необхідно виконати розподіл всього циклу функціонування на такти, які відповідають окремим робочим станам вузлів, і для кожного такту встановити елементи, які беруть участь в роботі і, у відповідності з цим, вибрати режим діагностування, що полягає в розробці алгоритму збору інформації. На основі вибраного режиму діагностування розробляються процедурна модель процесу збору і обробки інформації і структурна схема алгоритму оцінювання стану пристрою РПН

і трансформатора [95, 96]. У відповідності з специфікою структурних одиниць регулятора визначається найбільш доцільний вид технічних засобів діагностики. Розглянемо детальніше деякі етапи створення інформаційних баз для розв'язання задач визначення і врахування якості функціонування регулювальних пристроїв.



Рисунок 5.1 – Схема розробки системи діагностики стану пристроїв РПН та трансформаторів

Технічна діагностика трансформаторів і автотрансформаторів виконується за допомогою сучасної обчислювальної техніки на основі даних про температуру навколишнього середовища, струми в обмотках, положення пристрою регулювання напруги, стан масла, характеристики частинних розрядів [97]. Даний склад контрольованих параметрів визначив процедурну модель процесу збору і первинної обробки інформації. Слід відмітити, що ступінь достовірності вихідної інформації для розрахунку показників надійності знижується під час підвищенні рівня передчасності формування рішень. Тому отримувана інформація, яка обробляється і використовується в темпі процесу, достовірніша ніж та, яка отримується з певною передчасністю [97, 98]. Це означає, що під час створення системи діагностування необхідно враховувати, що вона повинна функціонувати в реальному часі.

Інформація щодо стану пристроїв регулювання напруги, що поступає в оперативний інформаційно-керуючий комплекс (ОІКК), для збереження масштабу часу повинна бути прийнята і оброблена за певний проміжок часу для того, щоб результат був отриманий до моменту видачі керуючої дії на виконавчий механізм. Деякі фізико-хімічні процеси, що протікають в елементах пристрою РПН, носять неперервний характер і потребують постійного контролю параметрів (знос за рахунок нагріву ізоляції, впливу електричного поля). Частина інформації, що поступає в ОІКК, носить імовірнісний характер, її поява потребує позачергових обчислень (зміна положення перемикача відпайок). У зв'язку з цим під час побудови процедурної моделі збору і первинної обробки інформації необхідно передбачити різні режими опитування давачів – циклічні і адресні.

Під час циклічного опитування виконується періодичне звертання до сенсорів, згладжування отриманих поточних значень параметрів і порівняння згладжених значень з допустимими (рис. 5.2). Згладжування поточних значень параметрів виконується для запобігання помилкового виходу параметрів за уставки, обумовленого наявністю випадкових завад

$$\tilde{y}_i^{(j+1)} = \xi \cdot \tilde{y}_i^{(j)} + (1 - \xi)y_i,$$

де $\tilde{y}_i^{(j+1)}$ – згладжене значення i -го параметра (температури, струму і т.п.); $\tilde{y}_i^{(j)}$ – згладжене значення i -го параметра на попередньому циклі

опитування; y_i – поточне значення параметра; ξ – коефіцієнт згладжування (число, яке визначається похибкою вимірювань).

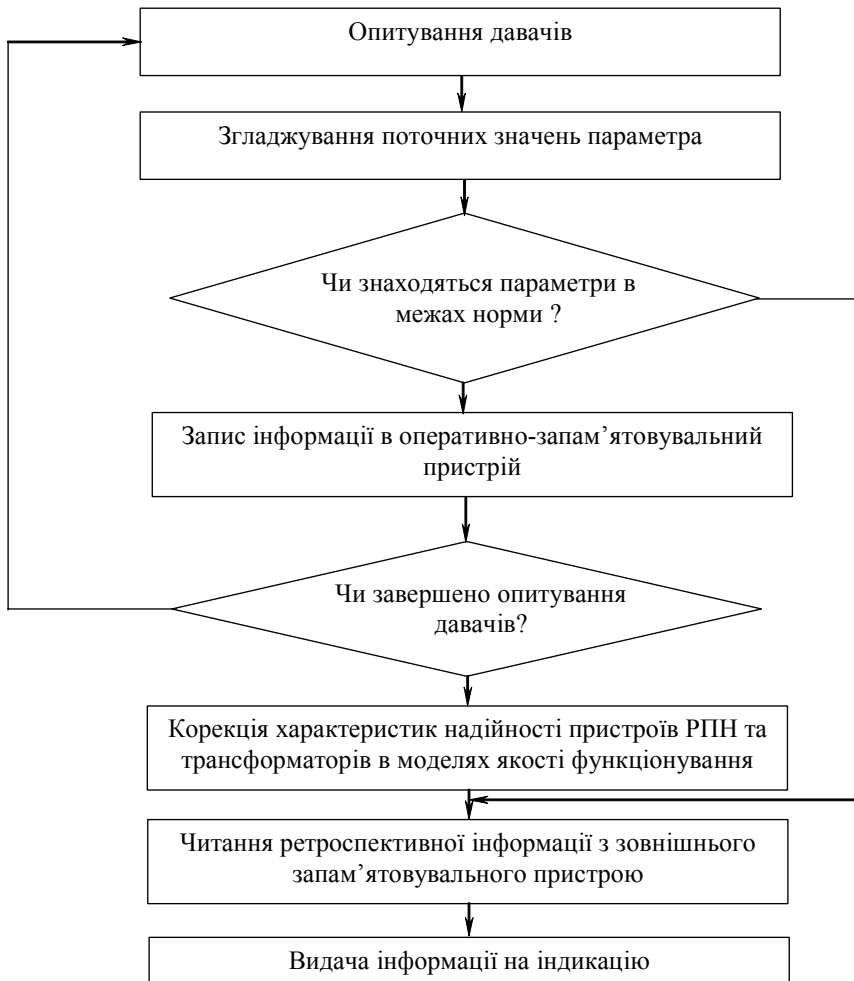


Рисунок 5.2 – Процедурна модель контролю надійності пристроїв РПН та трансформаторів

У випадку виходу параметра за уставки виконується запис інформації в оперативно-запам'ятовувальний пристрій (ОЗП). Після

закінчення збору інформації від усіх давачів виконується корекція характеристик надійності елементів пристрою РПН.

Під час адресного опитування виконується знімання параметрів з виходу давачів, номер якого задано в адресній частині команди його опитування. Тому алгоритм адресного опитування складається з команд, виконання яких обумовлене будь-якою умовою. Наприклад, під час виконання перемикачів відгалужень обмотки трансформатора виконується запуск алгоритму адресного опитування давача.

На основі процедурної моделі розроблено алгоритм корекції показників надійності пристрою РПН в процесі експлуатації. Структурна схема алгоритму показана на рис. 5.3. В комірці пам'яті зберігаються вихідні дані: число опитуваних давачів m , допустимі значення контрольованих параметрів $y_i^{(don)}$ і допустимий інтегральний показник якості функціонування системи керування $S^{(don)}$. Введемо позначення: l – порядковий номер параметра, який вийшов за межі норми; j – номер циклу опитування; i – порядковий номер контрольованого параметра.

Під час функціонування системи діагностування після опитування давачів і згладжування параметра $\tilde{y}_i^{(j)}$ виконується порівняння $\tilde{y}_i^{(j)}$ з допустимою для даного параметра величиною $y_i^{(don)}$. Якщо контрольована величина знаходиться в межах норми, виконується перевірка наступного параметра. При виході параметра за поле допуску відбувається звертання до лічильника реального часу, з якого знімається код, який визначає поточний час t , і записується у відповідну комірку пам'яті. Оскільки вихід параметра за поле допуску свідчить про зростання інтенсивності фізико-хімічних процесів зносу і зниження електричної, теплової, механічної міцності використовуваних матеріалів здійснюється корекція критичного значення i -го параметра.

Маючи відкориговані значення критичних параметрів і згладжені значення по всіх контрольованих величинах, визначають характеристики надійності пристроїв РПН. За результатами розраховується інтегральний показник якості функціонування системи керування $S^{(kp)}$. Після порівняння $S^{(kp)}$ з допустимим $S^{(don)}$ виконується видача рекомендацій експлуатаційному персоналу щодо доцільності подальшого використання

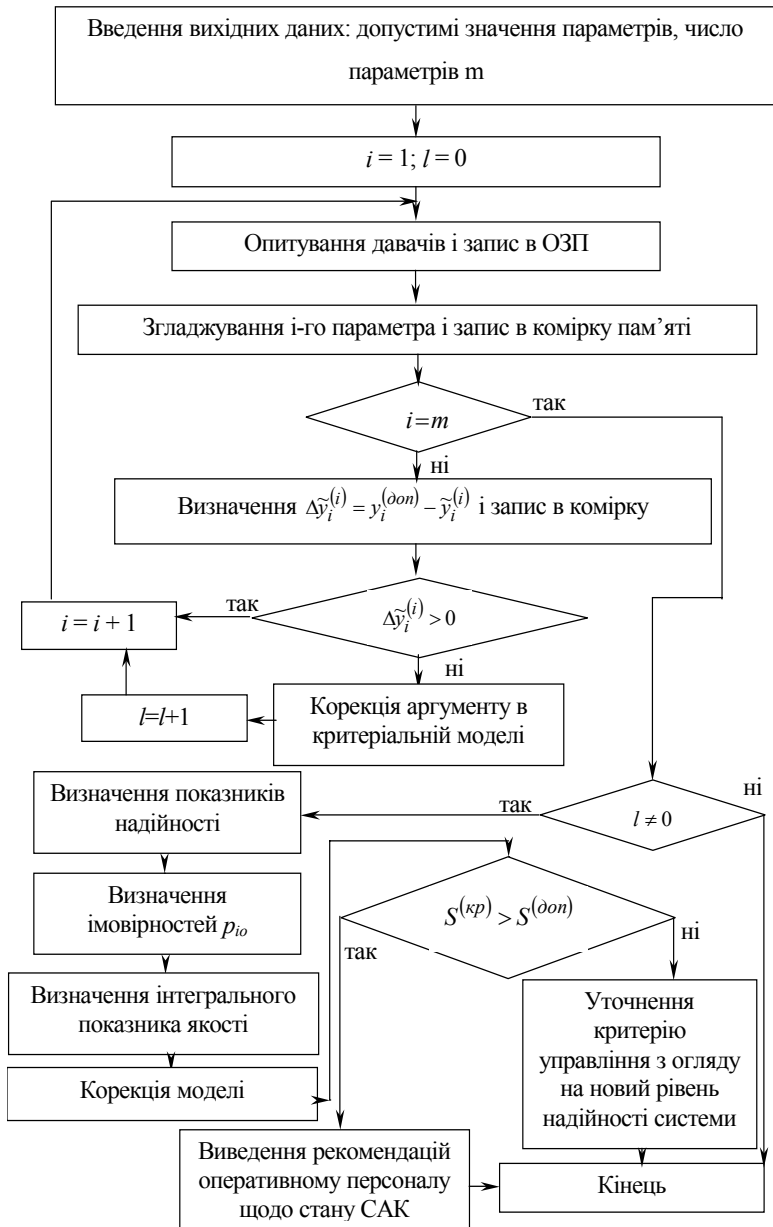


Рисунок 5.3 – Структурна схема алгоритму корекції показників надійності в моделі керування режимом

пристрою РПН даного трансформатора. Допустиме значення показника визначається за нормативною документацією і результатами досліджень.

Слід відмітити, що запропонований алгоритм збору інформації для корекції характеристик надійності пристроїв РПН використовує інформацію від створеної в ЕЕС системи діагностики стану електрообладнання. Система технічної діагностики орієнтована на використання мережі ПЕОМ, зв'язаних з обчислювальними центрами ЕЕС каналами міжмашинного обміну [93]. Для збору і передачі інформації використовуються засоби телеметрії.

Таким чином, для визначення характеристик надійності пристроїв РПН конкретних трансформаторів і врахування зміни цих показників в процесі експлуатації, з метою їх використання для вироблення керуючих дій під час оперативного керування ЕЕС, необхідно використовувати інформацію, отриману з допомогою системи технічної діагностики, яка створюється в рамках АСДУ.

Однак рівень існуючих систем діагностики не дозволяє отримати необхідний об'єм інформації щодо стану системи керування. Через це частина елементів матриці \mathbf{v} системи рівнянь (3.3) залишається не визначеною. Це приводить до зростання розмірності задачі критеріального програмування, яку необхідно розв'язувати для побудови критеріальних моделей якості функціонування. Тому необхідно, використовуючи сформульовані квазіумови оптимальності, вдосконалити метод розв'язання задач такого типу.

5.2 Задача оперативної корекції режиму електроенергетичної системи з врахуванням якості функціонування систем керування

5.2.1 Формування складової якості функціонування регульовальних пристроїв в цільовій функції

Реалізація керуючих дій для оперативного керування станами динамічних систем повинна здійснюватись з врахуванням рівня надійності регульовальних пристроїв [52, 80]. З цією метою в критерій керування (2.8) введено складову, яка враховує якість функціонування системи керування.

Рівень надійності визначається за критеріальною моделлю відмов. Розглянемо кроки її формування:

Крок 1 – вибираються параметри системи, які змінюються під впливом цих факторів і які характеризують стан системи керування. Так, наприклад, для систем керування ЕЕС це – пробивна напруга, притискаюче зусилля на контактну систему, зварювальний струм при розмиканні контактів та використаний ресурс силового трансформатора. Виконується аналіз параметрів та будується граф (рис. 3.2). За ним складається система рівнянь Колмогорова (3.2).

Крок 2 – за величинами параметрів системи керування визначаються інтенсивності відмов, для систем керування ЕЕС за рівняннями (3.17), (3.19), (3.21), (3.23), і вектора незалежних параметрів $\mathbf{x} = |x_1, x_2, x_3, \dots, x_n|$, члени якого визначаються як відношення між дійсним і нормованим значенням параметра системи.

Крок 3 – за алгоритмом запропонованим в [26] розв’язується система рівнянь Колмогорова і визначається вектор імовірностей знаходження системи в певному стані $\mathbf{p} = |p_{01}, p_{02}, p_{03}, \dots, p_{0m}|$.

Крок 4 – визначається значення вектора $\mathbf{x}_0 = |x_{01}, x_{02}, x_{03}, \dots, x_{0n}|$, який відповідає оптимальному значенню функції (2.6), з системи рівнянь складених з умов інтегральних аналогів та рівності $y_{\min}(x) = d_{\max}(p)$

$$\begin{cases} \prod_{j=1}^n x_j^{v_{ji}} \\ y_{\min}(x) \end{cases} = p_{0i}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (5.1)$$

Потім визначаються відносні значення компонентів вектора $\mathbf{x}_* = \frac{\mathbf{x}}{x_0}$.

Крок 5 – будується критеріальна модель відмов $f_{*k}(x_*) = \sum_{i=1}^m p_{ki} \prod_{j=1}^n x_{*kj}^{v_{ji}}$. В загальному випадку пристрій регулювання має конкретні фізичні та фізико-хімічні параметри і на момент оптимізаційних розрахунків ним виконується певна кількість перемикачів. Тоді функція відмов, що враховує якість функціонування систем керування, може бути представлена вектором $\mathbf{f}_*(x_*)$

$$f_*(x_*) = \begin{pmatrix} f_{1*}(x_*) \\ f_{2*}(x_*) \\ \dots \\ f_{j*}(x_*) \\ \dots \\ f_{h*}(x_*) \end{pmatrix}, \quad (5.2)$$

де h – кількість регулювальних пристроїв.

Таким чином, зміна якості функціонування системи керування в процесі оперативного керування режимами описується величиною $f_*(x_*)$, багатовимірною областю можливих значень вектора $f_*(x_*)$ утворює простір станів $\{f_*(x_*)\}$ систем регулювання.

5.2.2 Формування цільової функції оперативного керування станами динамічних систем

Сформулюємо поставлену в п. 2.2 задачу оперативної корекції стану динамічної системи з врахуванням отриманих аналітичних виразів. Так, з врахуванням (3.8) задача (2.2) запишеться таким чином:

мінімізувати

$$\delta F_* = \sum_{k=1}^h \sum_{l=0}^r \frac{\pi'_{kt}}{\sum_{i=1}^m p_{ki} \prod_{j=1}^n x_{*kj}^{v_{ji}}} \cdot u_{*uk}^t + \sum_{k=1}^h \left(1 - \frac{1}{\sum_{i=1}^m p_{ki} \prod_{j=1}^n x_{*kj}^{v_{ji}}} \right), \quad (5.3)$$

за умов

$$u \in M_u; \delta F_* \in M_{\delta F_*}, \quad (5.4)$$

де π'_{kt} – критерій подібності цільової функції; $u_{u,k}$ – число спрацювань в циклі керування; h – кількість регулювальних пристроїв; r – порядок полінома; M_u – область допустимих значень функції керування u ; $M_{\delta F_*}$ – область допустимих значень техніко-економічного показника δF_* .

Область допустимих значень M_u формується нерівностями виду

$$0 \leq u_{ik} \leq u_{i, \max k}, \quad k = \overline{1, h},$$

де $u_{i, \max k}$ – максимальне число спрацювань в даному циклі керування.

Врахування якості функціонування в критерії керування приводить до зміни крутизни характеристики $\delta F_* = f(u_{i*})$. Це вимагає формування області $M_{\delta F}$.

Під час формування області нечутливості втрат потужності $M_{\delta F}$ можна виділити два випадки.

1. Область $M_{\delta F}$ невідома і необхідно визначити її, виходячи з відомих величин похибки вихідної інформації і допустимих значень коефіцієнтів трансформації або числа перемикачів відгалужень обмоток трансформаторів.

2. Область $M_{\delta F}$ приймається як відома, виходячи з заданої зони нечутливості втрат активної потужності. Необхідно визначити допустимі зміни коефіцієнтів трансформації або числа перемикачів відгалужень обмоток. Сформульована задача (5.4) є задачею нелінійного програмування. В даній роботі її вирішення здійснюється методом критеріального програмування. Це пояснюється рядом переваг під час реалізації оптимальних розрахунків [31] та необхідністю проведення аналізу оптимального розв'язку на чутливість. Виконання такого аналізу розширює, як показано в [33], можливості оперативного персоналу з оптимального ведення режиму електричної системи.

5.3 Аналіз чутливості оптимальних розв'язків

5.3.1 Пряма задача дослідження чутливості

Врахування в критерії керування якості функціонування регулювальних пристроїв знижує крутизну характеристики $\delta P_* = f(k_{T*})$, тому необхідно проводити дослідження на чутливість. Розв'язання прямої задачі чутливості оптимального розв'язку дозволяє оцінити ефективність кожного переключення регулювального пристрою і переформувати сформовані групи трансформаторів, які розрізняються за впливом зміни їх коефіцієнта трансформації на втрати потужності в електричних системах [33].

Аналіз на чутливість доцільно проводити користуючись критеріальним методом [33]. Маючи аналітичний вираз (5.4), можна оцінити відносний вплив того чи іншого регульовального пристрою на процес оптимізації режиму і визначити порядок їх впливу на систему.

Наприклад, в мережі, критеріальні співвідношення для трансформаторів якої показані на рис. 5.4, трансформатор 4 не значно впливає на величину втрат потужності. Зміна його коефіцієнта трансформації практично не змінює втрат мережі, оскільки зменшення втрат ΔP_{*4} незначне. Разом з тим його інтенсивне функціонування буде приводити до зносу пристроїв регулювання без збільшення ефективності функціонування системи за прийнятим критерієм оптимізації. Таким чином трансформатор 4 доцільно виділити в групу, основним завданням якої є введення системи в допустиму область за напругою. Завдання з оптимального керування втратами потужності повинно бути реалізоване за допомогою зміни положення перемикачів відгалужень обмоток трансформаторів 1, 2, 3.

Отже, якщо не враховувати якість функціонування (див. рис. 5.4 – суцільна лінія) і за вихідний прийняти режим, що відповідає коефіцієнтам трансформації $k_{T*(0)}$, то перед усім необхідно здійснювати зміну коефіцієнта трансформації першого трансформатора, потім другого. Здійснення оперативної корекції саме цими трансформаторами найбільш ефективно як з точки зору максимальної швидкості наближення режиму до оптимального, так і з позиції мінімального зносу обладнання. Після того, як пристроями РПН трансформаторів 1 та 2 буде виконано необхідне число перемикачів (в даному випадку по три: $k_{T*(0)} \rightarrow k_{T*(1)} \rightarrow k_{T*(2)} \rightarrow k_{T*(3)}$), можна здійснювати подальше зниження втрат потужності за допомогою зміни коефіцієнта трансформації трансформатора 3. Але, якщо врахувати рівень надійності регульовальних пристроїв (див. рис. 5.4 – пунктирна лінія), то відбувається зміна крутизни характеристики $\delta P_* = f(k_{T*})$ і необхідно уточнювати групи трансформаторів за впливом на величину втрат активної потужності в електричній системі. Так на прикладі показана зміна впливу на режим електричної системи трансформаторів 2 та 3. Врахувавши це спочатку необхідно змінювати коефіцієнти трансформації трансформаторів 1 та 3 для введення режиму в оптимальну область, а якщо цих дій не достатньо, то змінювати коефіцієнт трансформації трансформатора 2.

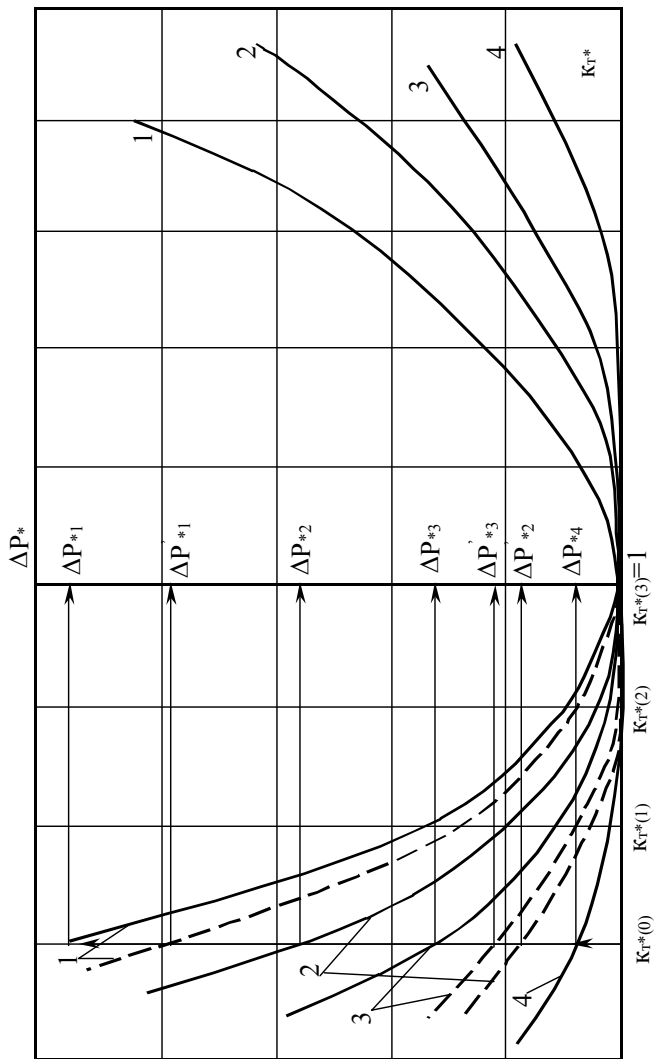


Рисунок 5.4 – Залежність втрат активної потужності від коефіцієнтів трансформації трансформаторів без врахування якості функціонування (суцільна лінія) та з врахуванням (пунктирна лінія)

Необхідно врахувати, що для оперативного керування режимом електричних систем для забезпечення мінімуму втрат, перш за все має значення регулювання коефіцієнтів трансформаторів зв'язку електричних мереж різної напруги. Останні значно віддалені один від одного, що приводить до незначного взаємовпливу (в межах точності вихідної інформації) регулювальних пристроїв.

Тобто, маючи аналітичний вираз для втрат потужності, в темпі процесу легко визначити ефективність впливу кожного регулювального пристрою на процес оптимізації режиму за напругою і реактивною потужністю.

Пряма задача дослідження оптимального розв'язку дозволяє координувати роботу регулювальних пристроїв. Під час розробки програми їх функціонування, задається пріоритет на спрацювання пристроїв АРН трансформаторів за допомогою встановлення різних витримок часу у відповідності з ефективністю їх впливу на додаткові втрати активної потужності.

5.3.2 Зворотна задача дослідження чутливості

Після врахування якості функціонування необхідно уточнити зони нечутливості критерію оптимальності до відхилення керуючих змінних від їх оптимальних значень. Регулювання без такого уточнення зони нечутливості призводять до значного збільшення інтенсивності роботи регулювальних пристроїв. Уточнення зони нечутливості вимагає розв'язання зворотної задачі чутливості оптимального розв'язку (рис. 5.5).

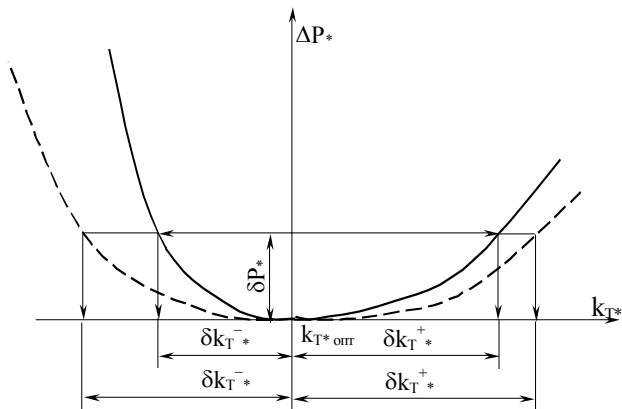


Рисунок 5.5 – Зворотна задача чутливості

Зворотні задачі чутливості, що розв'язуються для керування станами систем, відносяться до некоректних. Причиною некоректності є нелінійність цільової функції відносно зміни параметрів регулювальних пристроїв. Це приводить до неоднозначності розв'язку зворотної задачі [104], що може стати причиною неправильної настройки автоматичних регуляторів напруги. Розв'язання цієї задачі доцільно виконувати з використанням принципів критеріального програмування [33].

ПІДСУМОК

В роботі виконано теоретичні узагальнення та подано нові вирішення наукової задачі, яка полягає в розробці методу оцінки якості функціонування регульовальних пристроїв, для врахування її під час розв'язання задач оптимального керування станами динамічних систем. Запропонований метод ґрунтується на подібності математичного моделювання марковських процесів та критеріального моделювання, що відрізняє його від існуючих методів. Така подібність дозволяє побудувати критеріальні моделі, які надають можливість оцінити якість функціонування систем автоматичного керування.

Основні результати роботи такі:

1. Показано можливість використання подібності математичного моделювання марковських процесів та критеріального моделювання для побудови нового методу математичного моделювання якості функціонування регульовальних пристроїв.

2. Запропоновано метод математичного моделювання якості функціонування систем автоматичного керування, в якому використовується подібність моделювання марковських процесів та критеріального моделювання. Це дозволяє отримати критеріальні моделі відмов та якості функціонування регульовальних пристроїв.

3. Показано можливість і доцільність використання критеріальних моделей відмов для врахування надійності регульовальних пристроїв під час оптимального керування, що дозволяє обґрунтувати доцільну інтенсивність їх роботи на певному етапі експлуатації.

4. Запропоновано метод оцінки якості функціонування системи керування, який дозволяє уточнити зміну рівня надійності під час поетапного відновлення і оцінити ефективність відновлювальних робіт за максимумом знаходження системи в станах, коли параметри лежать в межах допустимих значень, і вона здатна виконувати визначені для неї функції.

5. Показано, що врахування якості функціонування систем керування під час розв'язання задач оптимального керування станами електроенергетичної системи дозволяє збільшити об'єктивність результатів оптимізаційних розрахунків. Це приводить до збільшення ступеня відповідності оптимального та практично реалізованого стану системи, що сприяє зниженню втрат електроенергії.

6. Працездатність і ефективність запропонованого в роботі методу перевірено в процесі дослідно-промислової експлуатації в Південно-західних електричних системах (ПЗЕС). За рахунок підвищення достовірності результатів розрахунків оптимальних режимів і, як наслідок, підвищення ступеня їх реалізації під час оперативної корекції режиму втрати в електричних мережах ПЗЕС зменшуються на 0,4 – 0,8 % по відношенню до існуючих.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тимошик А. М. Індивідуальна надійність турбогенераторів у період "інтенсивного старіння" // *Енергетика и электрификация*. – 2003. – № 8. – С. 2 – 7.
2. Растворов І. С. Невідкладна проблема електроенергетики України. // *Енергетична політика України*. – 2001. – № 3 – С. 62 – 65.
3. Лебедев А.Н, Моделирование в научно-технических исследованиях. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.
4. Кузьмін І. В. Критерії оцінки ефективності, якості та оптимальності складних систем. // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – №1(2). – 1994. – С. 5 – 10.
5. Маркушевич Н. С. Принципы реализации автоматизированного управления режимами электрических сетей. // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1980. – №4. – С. 41–49.
6. Джексон П. Введение в экспертные системы. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2001. – 624 с.
7. Автоматизированные системы диспетчерского управления в энергетике и пути их совершенствования / Мамиконянц Л. Г., Митюшкин К. Г., Орнов В. Г. и др. // *Электричество*, 1987. – N 3. – С. 1–5.
8. Маркушевич Н. С. Автоматизированная система диспетчерского управления. Из опыта Латвийской энергосистемы. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
9. Сулейманов В. Н., Котов И. А., Кацадзе Т. Л. Оценка надежности схем электрических как процесс принятия решения в экспертной системе // *Энергетика и электрификация*. – 1998. – №2. – С. 38 – 41.
10. Клайн С. Дж. Подобие и приближенные методы. – М.: Мир, 1968. – 304 с.
11. Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.
12. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1963. – 254 с.
13. Основы теории оптимального управления / Под ред. Кротова. – М.: Высшая школа, 1990. – 429 с.
14. Кузнецов В. Г., Тугай Ю. И., Баженов В. А. Оптимизация режимов электрических сетей. – К.: Наукова думка, 1992. – 216 с.

15. Мелентьев Л. А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. – М.: Высш. шк., 1982, – 319 с.
16. Основы моделирования сложных систем / Под ред. И.В. Кузьмина. – К.: Вища школа, 1981. — 360 с.
17. Остром К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ: Пер. с англ. – М.: Мир. – 1987. – 480 с.
18. Алексеев В. М., Тихомиров В. М., Фомин С. В. Оптимальное управление. – М.: Наука. 1979. – 336 с.
19. Основы теории оптимального управления / Под ред. Кротова. – М.: Высшая школа, 1990. – 429 с.
20. Снапелев Ю. М., Старосельский В. А. Моделирование и управление в сложных системах. – М.: Советское радио, 1974. – 264 с.
21. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. — 399 с.
22. Мокін Б. І., Юхимчук С. В. Математичні моделі робастної стійкості та чутливості нелінійних систем. Монографія – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 122 с.
23. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
24. Исследование операций. Методологические основы и математические методы: Пер. с англ.: В 2 т./ Под ред. Дж. Моудера, С. Алмаграбли. – М.: Мир, 1981. – Т. 1. – 712 с.
25. Арзамасцев Д. А., Холен А. Н., Бартоломей П. И. АСУ и оптимизация режимов энергосистем. – М.: Наука, 1983. – 256 с.
26. Лежнюк П. Д., Остапчук Ж. И., Улитич Н. В. Влияние показателей надежности трансформаторов с РПН на принятие решений по оптимизации режимов электрических сетей. Деп. рукопись. Информэнерго, 1986, № 2140-эн. – 9 с.
27. Горский Ю. М. Системно-информационный анализ процессов управления. Новосибирск: Наука, 1988. – 327 с.
28. Астахов Ю. Н. Критериальный метод и его применение в энергетике: Автореф. дис. докт. техн. наук. – М. – Моск. энерг. ин-т, 1986. – 38с.
29. Лежнюк П. Д. Методы и средства критериального моделирования в задачах автоматизации оптимального управления электрических систем. Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.13.02. ВГТИ – Винниця, 1996. – 28 с.

30. Черемисин М. Н. Критериальный анализ систем с/х электроснабжения: Автореф. дис... к-та техн. наук / Институт механизации и электрификации. – Харьков, 1978. – 16 с.

31. Астахов Ю. Н., Лежнюк П. Д., Нагул В. И. Использование критериальных моделей при оптимизации режимов электроэнергетических систем // Электронное моделирование. – 1981. – № 4. – С. 80 – 86.

32. Астахов Ю. Н., Лежнюк П. Д. Применение критериального метода в электроэнергетике. – К.: УМК ВО, 1989. – 137 с.

33. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом. – Вінниця: УНІВЕРСУМ - Вінниця, 2003. – 131 с.

34. Блюмберг В. А., Синягин Н. И. Основные принципы системы технического обслуживания и ремонта электрооборудования по техническому состоянию // Промышленная энергетика. – 1977. – № 7. – С. 22 – 25.

35. Ванин Б. В., Львов Ю. Н., Львов М.Ю. и др. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ в эксплуатации // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 53 – 58.

36. Пуятин Е. В., Остапчук Ж. И., Улитич Н. В. Учет надежности регулирующих устройств при оптимизации режимов электрических сетей // Современные проблемы энергетики. Преобразование, стабилизация параметров и транспорт электроэнергии. – К.: 1985. – С. 118 – 119.

37. Лежнюк П. Д., Остапчук Ж. И., Улитич Н. В. Координация работы регулирующих устройств при оптимизации режимов электрических систем // Перспективы и опыт внедрения статистических методов в АСУ ТП. Тр. III Всесоюз. науч. конф. – Тула, 1987. – С. 214.

38. Барлоу Р., Прошан Т. Математическая теория надежности. – М.: Советское радио, 1971.

39. Заренин Ю. Г. и др. Надежность и эффективность АСУ. – К.: Техніка, 1975. – С. 368.

40. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 480.

41. Майн Х., Осаки С. Марковские процессы принятия решений. – М.: Наука, 1977. – 176 с.

42. Руденко Ю. Н., Ушаков И. А. Надежность систем энергетики. – М.: Наука, 1986. – 252 с.

43. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Сов. Радио, 1975. – 472 с.
44. Фокин Ю. А., Третьяков Н. В. О функциональной надежности силовых трансформаторов в системах электроснабжения // Электричество. – 1979. – № 2. – С. 26 – 31.
45. Меламедов И. М. Физические основы надежности. М.: Энергия, 1970. – 152 с.
46. Туфанов В. А. Характеристики эксплуатационной надежности силовых трансформаторов 110 кВ // Электричество. – 1971. – № 12. – С. 33 – 37.
47. Поспелов Г. Е., Гурский С. К., Шур Е. В. Структурный анализ методов оценки надежности сложных систем электроснабжения // Электричество. – 1975. – № 2. – С. 85 – 91.
48. Фокин Ю. А. Методы расчета надежности сложных схем систем электроснабжения // Труды МЭИ, вып. 242. – 1975. – С. 145 – 147.
49. Dodu I. C., Merlin A. New probabilistic approach taking into account reliability and operation security in EHV power system planning at EDF // IEEE Transactions on Power Systems. – 1986. – PWRs – 1. №3. – P. 175 – 181.
50. Гук Ю. Б., Лосев Э. А., Мясков А. В. Оценка надежности электроустановок. – М.: Энергия, 1974. – 200 с.
51. Розанов М. Н. Надежность электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 200 с.
52. Путятин Е. В., Остапчук Ж. И., Улитич Н. В. Учет надежности регулирующих устройств при оптимизации режимов электрических сетей // Современные проблемы энергетики. Преобразование, стабилизация параметров и транспорт электроэнергии. – К.: 1985. – С. 118–119.
53. Фокин Ю. А. Вероятностные методы в расчетах надежности электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.
54. Фокин Ю. А., Туфанов В. А. Оценка надежности систем электроснабжения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.
55. Б. Диллон, Ч. Сингх. Инженерные методы обеспечения надежности систем. // Под ред. Е. Г. Коваленко. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
56. Головатюк Н. А. Законы и устройства регулирования уровня и гармонического состава напряжения в электрической сети: Автореф. дис.канд. техн. наук: 05.14.02. Киевский политехнический институт – К., 1989. – 16 с.

57. Мокин Б. И., Юхимчук С. В. Математические модели процессов регулирования технологических объектов электрической сети // Труды III польско-советской научно-техн. конф. “Комплексная автоматизация промышленности” – Часть III. – Вроцлав. – 1988 – С. 410 – 415.

58. Мокин Б. И., Юхимчук С. В. Об одном способе определения оптимальных параметров настройки регуляторов напряжения силовых трансформаторов с устройством РПН // Известия вузов. Сер. Энергетика. 1990. – № 11. – С. 26 – 29.

59. Елизаров А. И. Проблема точности в исследовании надежности больших и сложных технических систем марковскими процессами // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Мурманск: ИФТПЭ КНЦ РАН. 1996. Вып. 48. – С. 174 – 177.

60. Гук Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. – Л.: Энергоатомиздат. 1988. – 224 с.

61. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука, 1977. — 440 с.

62. Хантли Г. Анализ размерностей: Пер. с англ. — М.: Мир, 1970. — 175 с.

63. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Томашевский Ю. В. Критеріальне моделювання в задачах оцінки якості функціонування систем // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – №3. – С.48–52.

64. Комар В. О., Лежнюк П. Д., Гель П. В. Алгоритм використання квазіумов оптимальності в задачах критеріального програмування // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. – №4. – Ч.1. – С. 105–108.

65. Лежнюк П. Д., Гайдамака В. М., Бевз С. В. Критеріальне програмування в задачах великої розмірності // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – №2. – 1996. – С. 58 – 62.

66. Веников В. А., Идельчик В. И., Лисеев М. С. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.

67. Даффин Р., Питерсон Э., Зенер К.: Геометрическое программирование.– М.: Мир, 1972.

68. Duffin R. J. Linearizing geometric programs // SIAM Rev. – 1970. – № 12. P. 211 – 217.

69. Falk J. E. Global solutions of signomial programs. Technical report №T-274, George Washington Univ. Prog. in Logistics, Washington, D.C., June, 1973.

70. Rijcaert M. J. Bibliographical note on geometric programming, // Optimization theory apply – 1978. – № 26. – P 325–337.

71. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1988. – 552 с.

72. Бевз С. В. Розробка засобів критеріального моделювання для задач оптимального керування. Автореф. дис. к-та техн. наук: 01.05.02 ВДТУ. – Вінниця, 1999. – 19 с.

73. Надежность систем энергетики и их оборудования. – Т. 1: Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.

74. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 356 с.

75. Щербина Ю. В., Снежко А. Г., Качанова Н. А. Моделирование режимов сложных энергосистем при оптимальном управлении по данным телеметрии. // Проблемы моделирования динамических систем. - Кишинев: Штиница, 1990. - С. 167–176.

76. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. – М.: Высш. шк., 1970. – 270 с.

77. М. Аоки. Введение в методы оптимизации. – М.: Высш. шк., 1970. – 270 с.

78. Порудоминский В. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. – М.: Энергия, 1974. – 287 с.

79. Основы теории электрических аппаратов / Под ред. Г. В. Буткевича. – М.: Высш. шк., 1970. – 600 с.

80. Улитич Н. В. Оптимизация режимов электрических систем с учетом надежности регулирующих устройств. Автореф. дис. к-та техн. наук. 05.14.02 МЭИ. – М., 1988. – 20 с.

81. Таев И. С. Электрические аппараты. Общая теория. – М.: Энергия, 1977. – 272 с.

82. Елизаветин М. А. Повышение надежности машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 144 с.

83. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. – М.: Высшая школа, 1975. – 360 с.

84. Мельников Н. А. Электрические сети и системы. – М.: Энергия, 1975. – 462 с.

85. Блок В. М. Электрические сети и системы. – М.: Высш. школа, 1986. – 430 с.

86. Савельев Г. С., Гостев А. П., Кузнецов В. П., Гриценко Н. П. Опыт наладки и ввода в эксплуатацию системы продольно-поперечного регулирования напряжения автотрансформаторов // Электрические станции. – 1983. – №8. – С. 67-69.

87. Лагутин В. М. Повышение эффективности использования средств регулирования в процессе оптимизации режимов электрических сетей. Автореф. дис. канд. техн. наук. МЭИ. – М., 1988. – 19 с.

88. Калюжный А. Х., Заикина М. М., Струкова Л.В. Эффективность применения фазопоротных трансформаторов для снижения потерь в электрических сетях // VII Всесоюзное совещание работников служб электрических режимов ОДУ и энергосистем. – Дивногорск, – 1986. – С. 59–60.

89. Лыско Ю. И., Арутюнян А. А., Сааков В. И. и др. Вопросы уменьшения технологического расхода энергии в электрических сетях при ограничениях по переключению РПН трансформаторов. – Ленинград. – 1984. – С. 31–34.

90. Астахов Ю. Н., Веников В. А., Горский Ю. М. и др. Электрические системы. Кибернетика электрических систем. – М.: Высшая школа, 1974. – 328 с.

91. Лежнюк П. Д., Лагутін В. М., Комар В. О. Врахування технічного стану трансформаторів зв'язку в процесі оптимізації режимів електричних мереж // Проблеми створення нових машин і технологій. Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного інституту. Вип 8. – 2000. – С. 195–197.

92. Складов В. Ф., Гуляев В. А. Диагностическое обеспечение энергетического производства. – К.: Техника, 1985. – 184 с.

93. Мозгалевский А. В., Койда А. Н. Вопросы проектирования систем диагностирования. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.

94. Лежнюк П. Д., Комар В. О. Квазіумови оптимальності задач критеріального програмування // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – №2. – С.50–54.

95. ГОСТ 27518-87. Диагностирование изделия. Общие требования. – Введ. 01.01.89. – М.: Изд-во стандартов. 1988. – 6 с.

96. Афанасьев Н. А., Юсупов Т. А. Система технического обслуживания и ремонтов оборудования энергохозяйств промышленных предприятий (система ТОРЭО). – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

97. Блюмберг В. А., Синягин Н. И. Основные принципы системы технического обслуживания и ремонта электрооборудования по техническому состоянию // Промышленная энергетика. – 1977. – № 7. – С. 22–25.

98. Кутін В. М., Вашковський В. В. Аналіз наявної системи діагностики електричних розподільчих мереж і шляхи її вдосконалення. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – № 4. – С. 31 – 35.

99. Лежнюк П. Д., Лук'яненко Ю. В. Принципи формування умов оптимальності нормальних режимів електроенергетичних систем // Збірник наук. праць Дон. держ. техн. ун-ту: серія “Електротехніка і енергетика”. Вип. 21. – 2000. – С. 73–76.

100. Лежнюк П. Д., Кравцов К. И., Комар В. А. Подобное моделирование характеристик устройств автоматического регулирования при оптимальном управлении // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2001. – №2. – С.134–136.

101. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера. – К.: Техника, 1977. – 768 с.

102. Рейклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. – М.: Мир, 1986. – 320 с.

103. Астахов Ю. Н., Лежнюк П. Д., Остапчук Ж. И., Улитич Н. В. Определение области допустимых отклонений оптимальных параметров режима электрических сетей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1986. – №5. – С. 8–15.

104. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я., Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986, – 288 с.

Наукове видання

**Лежнюк Петро Дем'янович
Комар Вячеслав Олександрович**

ОЦІНКА ЯКОСТІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ КРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ

Монографія

Редактор Малішевська С. А.

Оригінал-макет підготовлено Комаром В. О.

Видавництво ВНТУ “УНІВЕРСУМ-Вінниця”

Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-85-32

Підписано до друку 16.11.2006

Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,24

Наклад 100 прим. Зам. № 2006-190

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-85-32