

ISBN 978-83-66216-76-1

Т.М. Берідзе, І.О. Сінчук,
В.О. Федотов, М.Л. Барановська,
І.І. Пересунько

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Підручник. Курс лекцій.

Під редакцією доктора технічних наук, професора О.М. Сінчука

 **iScience**

Варшава, Польща - 2023

**Т.М. Берідзе, І.О. Сінчук, В.О. Федотов,
М.Л. Барановська, І.І. Пересунько**

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Підручник. Курс лекцій.

За редакцією
доктора технічних наук,
професора Сінчука О.М.

Варшава – 2023

УДК 681.518.54:621.31.031

Авторський колектив:

Т.М. Берідзе, І.О. Сінчук, В.О. Федотов, М.Л. Барановська,
І.І. Пересунько

Рекомендовано до друку Вченою радою Криворізького національного
університету Міністерства освіти та науки України
(протокол № 5 від 28 листопада 2022 р.)

Рецензенти:

В.В. Грабко, доктор технічних наук, професор, (Вінницький
національний технічний університет, м. Вінниця)

В.П. Розен, доктор технічних наук, професор, (Національний технічний
університет України «Київський політехнічний інститут» ім. Ігоря
Сікорського, м. Київ)

Прогнозування терміну служби електрообладнання. Підручник. Курс
лекцій. / Т.М. Берідзе, І.О. Сінчук, В.О. Федотов, М.Л. Барановська,
І.І. Пересунько. – Warsaw: iScience Sp. z.o.o. – 2023. – 254 с.

В підручнику поруч з основними теоретичними результатами, що
традиційно викладаються в курсі, розглянуто ряд питань, які мають прикладний
інтерес. Посібник містить прикладні задачі та приклади їх вирішення.
Прогнозування терміну служби електрообладнання являє собою прикладну
технічну дисципліну, що вивчає кількісні та якісні методи і засоби аналізу
закономірностей складних технічних систем.

Підручник рекомендовано для здобувачів II-го та III-го рівнів вищої
освіти, які навчаються за спеціальностями 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка» та 144 «Теплоенергетика», а також для
спеціалістів з енергетики.

УДК 681.518.54:621.31.031

ISBN 978-83-66216-76-1

© Т.М. Берідзе, І.О. Сінчук,
В.О. Федотов, М.Л. Барановська,
І.І. Пересунько 2023
© iScience Sp. z o. o.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
ЛЕКЦІЯ 1. ЗМІСТ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ЕНЕРГООБЛАДНАННЯ ЯК НАУКИ	8
1.1 Необхідність та сутність прогнозування.....	8
1.2 Історія розвитку прогнозування.....	9
1.3 Класифікація прогнозів	12
1.4 Основні напрями прогнозування терміну служби електрообладнання.....	14
Контрольні запитання за лекцією 1	25
ЛЕКЦІЯ 2. ПОСЛІДОВНІСТЬ РОЗРОБКИ ПРОГНОЗІВ..	26
2.1 Основні етапи та організація прогнозування	26
2.2 Необхідність та основні принципи аналізу об'єкта прогнозування	28
2.3 Класифікація об'єктів прогнозування.....	29
2.4 Вибір методу прогнозування.....	31
Контрольні запитання за лекцією 2	33
ЛЕКЦІЯ 3. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	34
3.1 Події, стани та процеси в об'єктах	34
3.2 Надійність як комплексна властивість.....	39
Контрольні запитання за лекцією 3	44
ЛЕКЦІЯ 4. СИСТЕМА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ	46
4.1 Показники безвідмовності.....	46
4.2 Показники відновлюваності.....	52
4.3 Комплексні показники.....	54
4.4 Система електропостачання.....	56
Контрольні запитання за лекцією 4	60
ЛЕКЦІЯ 5. МЕТОДИ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК	61
5.1 Підготовка експертних оцінок	61
5.2 Загальна характеристика методів.....	63
5.3 Метод експертних оцінок Дельфі	68
5.4 Аналіз впливу факторів методами експертного опитування та рангової кореляції.....	72
Контрольні запитання за лекцією 5	82
ЛЕКЦІЯ 6. РЯДИ ДИНАМІКИ. АНАЛІЗ ІНТЕНСИВНОСТІ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ	83
6.1 Суть і складові елементи динамічного ряду	83
6.2 Характеристики інтенсивності динаміки.....	85
6.3 Середня абсолютна та відносна швидкість розвитку	88

6.4 Характеристика основної тенденції розвитку.....	91
6.5 Оцінка коливань та сталості динаміки.....	95
Контрольні запитання за лекцією 6	99
ЛЕКЦІЯ 7. МОДЕЛІ ДИНАМІКИ	100
7.1 Методи моделювання часових рядів.....	100
7.2 Перевірка гіпотези про існування тренда	102
7.3 Моделювання тенденції часового ряду: згладжування та аналітичне вирівнювання.....	104
7.4 Моделювання сезонних коливань	107
Контрольні запитання за лекцією 7	108
ЛЕКЦІЯ 8. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ СИСТЕМ	109
8.1 Базові положення теорії моделювання	109
8.2 Елементи динаміки електромехатронних пристроїв	112
8.3 Динамічні характеристики нелінійних елементів.....	120
8.4 Автоматизація моделювання динаміки електромехатронної системи	127
Контрольні запитання за лекцією 8	132
ЛЕКЦІЯ 9. БАЗОВІ ЗАСАДИ ЩОДО ПІДТРИМАННЯ РІВНЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК	133
9.1 Загальні положення	133
9.2 Види ремонтів, їх характеристика, етапи розвитку систем ремонту.....	135
9.3 Планово-попереджувальні ремонти електрообладнання.....	138
9.4 Технічне обслуговування та ремонт електрообладнання з урахуванням технічного стану.....	141
9.5 Класифікація засобів діагностування.....	142
9.6 Методи діагностування електроустаткування	148
9.7 Прогнозування технічного стану електрообладнання	155
Контрольні запитання за лекцією 9	167
ЛЕКЦІЯ 10. МОНІТОРИНГ В СИСТЕМІ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	169
10.1 Критерії оцінки якості функціонування системи моніторингу.....	169
10.2 Оцінка точності в системах моніторингу.....	186
10.3 Дискретність спостережень у системі моніторингу.....	193
Контрольні запитання за лекцією 10	201

ЛЕКЦІЯ 11. СУЧАСНІ ПІДХОДИ З УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ.....	202
11.1 Наукові рішення побудови інтелектуальних систем технічної діагностики на основі SMART-технологій.....	202
11.2 Аналіз засобів контролю технічного стану та сучасні методи діагностування електрообладнання.....	215
11.3 Розробка процесно-орієнтованого підходу діагностування та прогнозування технічного стану електрообладнання.....	219
11.4 Подальший розвиток інтелектуальних систем безперервного контролю та діагностування силового електрообладнання.....	224
11.5 Наукове обґрунтування та розробка методу підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання.....	233
Контрольні запитання за лекцією 11	250
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	251

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ППР	– планово-попереджувальні роботи;
КЗ	– коротке замикання;
ЛЕП	– лінія електропередач;
АПВ	– автоматичне повторне включення;
ДП	– діагностичний пристрій;
ЕМС	– електромехатронна система;
САПР	– система автоматизованого проєктування;
АСК	– автоматизована система керування;
АЦП	– аналогово-цифровий перетворювач;
ВДЖ	– вторинне джерело живлення;
ВМЛ	– вихідна механічна ланка;
АЛП	– арифметико-логічний пристрій;
АД	– асинхронний двигун;
ЕМЕП	– електромехатронна енергетична підсистема;
ЕМК	– електромехатронний комплекс;
АРС	– автоматична регульовальна система;
АЛП	– арифметико-логічний пристрій;
АРС	– автоматична регульовальна система;
ЕС	– експертна система;
СМ	– система моніторингу;
ВВ	– вимірювальна величина;
НЕ	– нелінійний елемент;
ЧПК	– числове програмне керування;
ТОР	– технічне обслуговування та ремонт;
ТО	– технічний об'єкт;
СКТО	– система керування технічним об'єктом;
БУСМ	– блок управління системи моніторингу;
ІМ	– інформаційна міра;
СИНА	– синтаксичний аспект;
СЕМА	– семантичний аспект;
ТІВ	– теоретико-інформаційна вага;
ТП	– тягова підстанція;
Р	– ремонт;
ПЗР	– планово-запобіжний ремонт;
ТС	– технічний стан;
АРМ	– автоматизоване робоче місце;
ІСМД	– інтелектуальна система моніторингу та діагностування;
ДПТС	– діагностичні показники технічного стану.

ВСТУП

В даний час у різних галузях науки і техніки існує досить багато методів прогнозування показників надійності, що відрізняються сукупністю розв'язуваних завдань та особливостями математичного апарату, що застосовується.

За обсягом інформації, яка використовується під час прогнозу, ці методи можна розділити на три групи:

- методи експертних оцінок, що застосовуються у тих випадках, коли відсутня достовірна інформація про об'єкт та дані про зміни його стану за час експлуатації;

- методи, засновані на екстраполяції і використовувані у випадках, коли є досить повні дані, але невідомі загальні закономірності зміни стану об'єкта під час експлуатації;

- методи моделювання, які використовуються за наявності достатнього обсягу статистичних даних про зміну стану однотипних об'єктів у процесі експлуатації.

В даний час найбільшого поширення при прогнозуванні технічного стану об'єктів набули методи другої групи.

Основою для прогнозування технічного стану у цих методах є аналітичне прогнозування.

Надійність електричної машини – властивість машини виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників у заданих межах, що відповідають заданим режимам та умовам використання, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання та транспортування. Надійність є комплексною властивістю, яка в залежності від призначення машини та умов її експлуатації може включати безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збереження. Термін служби – це показник довговічності, яке прогнозування зводиться до розрахунку надійності електричної машини (аналітичне прогнозування).

Фахівець у галузі електромеханіки повинен вміти прогнозувати якість електричної машини на будь-якому відрізку її «життя» – від етапу проектування до безпосереднього застосування за призначенням, тобто. у період експлуатації.

Майбутній фахівець повинен знати сучасні методи визначення прогнозування терміну служби електрообладнання, вміти застосовувати їх на практиці, мати уявлення про перспективні напрямки розвитку даної галузі знань.

Теоретичною базою курсу є спеціальні розділи вищої математики (теорія ймовірності та математична статистика), курс електричних машин, технологія виробництва електричних машин та їх випробування.

ЛЕКЦІЯ 1

ЗМІСТ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЯК НАУКИ

План

- 1.1 Необхідність та сутність прогнозування.*
- 1.2 Історія розвитку прогнозування.*
- 1.3 Класифікація прогнозів*
- 1.4 Основні напрями прогнозування терміну служби електрообладнання.*

1.1 Необхідність та сутність прогнозування

Поняття прогноз, передбачення стосуються майбутніх, тобто невідомих подій. Інтерес до майбутнього впливає із практичної потреби сьогодення. Існують явища, майбутнє яких ми не знаємо, але вони мають важливе значення для прийняття рішень у сьогоденні. Отже, виникає необхідність прогнозувати ці явища.

Наприклад: керівник підприємства прогнозує обсяги діяльності на майбутній місяць, тому що йому сьогодні треба приймати рішення про обсяги постачання сировини та ін.

Суб'єкти, які приймають рішення, завжди зіштовхується із проблемою невизначеності. Невизначеність існує, з нею пов'язані ускладнення в виборі найкращої лінії поведінки суб'єктів. Приймаються деякі припущення, враховуючи, що дійсність буде в майбутньому відповідати їм.

Повністю усунути невизначеність неможливо. При ухваленні рішення завдання зводять до того, щоб знайти найкраще рішення в умовах невизначеності й мінімізувати саму невизначеність. Прогнозування виступає як один з інструментів процесу мінімізації ступеню невизначеності. Дослідження служби електрообладнання в ринкових умовах має потребу в прийнятті оптимальних рішень, тому що ціна потенційного збитку для підприємства від прийняття необґрунтованих рішень зростає. Чим вище рівень прогнозів, тим ефективніше прийняті рішення. Прогноз надає інформацію для вибору оптимального рішення.

Таким чином, ПРОГНОЗ – науково обґрунтоване судження про можливі варіанти стану об'єкта в майбутньому, про альтернативні шляхи і терміни здійснення яких-небудь результатів.

ПРОГНОСТИКА – наукова дисципліна про закономірності розробки прогнозів.

ПРОГНОЗУВАННЯ – процес розробки прогнозів.

У прогнозуванні розрізняють два аспекти: теоретико-пізнавальний і управлінський, що пов'язаний з можливістю прийняття управлінських рішень.

Прогнозування пов'язане з більш широким поняттям – «передбачення».

ПЕРЕДБАЧЕННЯ – випереджальне відображення дійсності, засноване на пізнанні законів природи, суспільства і мислення. Розрізняють наукове і ненаукове передбачення.

Ненаукове передбачення поділяють на три види:

- інтуїтивне (базується на передчуттях людини);
- повсякденне (спирається на життєвий досвід, пов'язаних з ним аналогіях, на прикметах тощо);
- релігійне (на вірі в надприродні сили, тобто ті, що визначають майбутнє, на марновірствах тощо).

Така класифікація не є остаточною та безперечною.

Наукове передбачення має три форми: гіпотеза, прогноз і план. Гіпотеза являє собою наукове передбачення на рівні загальної теорії. Вихідною базою побудови гіпотези є теорія і відкриті на її основі закономірності та причинно-наслідкові зв'язки функціонування і розвитку досліджуваних об'єктів. На рівні гіпотези виконують якісну характеристику об'єктів, що виражає загальні закономірності їхньої поведінки.

Прогноз у порівнянні з гіпотезою має значно велику визначеність, тому що ґрунтується не тільки на якісних, але і на кількісних параметрах, а тому дозволяє характеризувати майбутній стан об'єкта також і кількісно. Таким чином, прогноз відрізняється від гіпотези меншим ступенем невизначеності та більшою вірогідністю. Але прогноз носить імовірний характер.

План являє собою постановку точно визначеної мети і передбачення конкретних, детальних подій досліджуваного об'єкта. У ньому фіксують шляхи і засоби розвитку відповідно до поставлених задач, обґрунтовують прийняті управлінські рішення. Його головна відмітна риса - визначеність завдань. Таким чином, передбачення у плані одержало найбільшу конкретність і визначеність.

1.2 Історія розвитку прогнозування

На ранніх стадіях розвитку людського суспільства проблема тривалості часу, мабуть, взагалі не усвідомлювалася: час існував тільки один – сьогодні. Потім до нього додався інший час – не минуле або майбутнє, а просто «інше», відмінне від сьогодні.

Цей процес йшов по трьох напрямках: релігійний, утопічний та філолофсько-історичний.

Релігійний напрямок припадає на 1-ше тисячоліття до н.е. – 1-ше тисячоліття н.е. Існувало дві його концепції:

– індуїстсько-буддистсько-джайнистська – історію представляють у вигляді постійної зміни циклів регресу, що охоплюють мільйони років, тобто від «золотого століття» до «кінця світу», потім «створення миру», знову регрес тощо без кінця (зараз ці погляди є в релігії Південно-Східної Азії);

– індуїстсько-християнсько-мусульманська концепція – історію представляють у вигляді приходу «рятівника», настання «кінця світу», «страшного суду», устанавлення «вічного блаженства» для праведників і «вічних мук» для грішників.

Утопічне – розвивається в тісному зв'язку з релігійним з 1 тис. н.е. У його концепціях майбутнє розглядають як щось, обумовлене не надприродними силами, а самими людьми, їхнім розумом і діями. Стосувалися ці утопії не тільки соціальних проблем майбутнього, а й проблем науки, техніки, технічних питань містобудування, охорони здоров'я тощо, але у своїх надуманих технічних конструкціях ці утопії виявлялися в непримиренному протиріччі з дійсністю.

Потім настає перелом в еволюції утопізму: у Західній Європі – у середині XIX століття, у Росії – у 80-тих роках XIX, у Китаї, Індії та інших країнах Азії – пізніше. З розвитком людського суспільства передбачення починає орієнтуватися на наукове обґрунтування відповідно до законів розвитку суспільства. Це – продовження, але вже на іншій основі – науково - обґрунтований утопічний напрямок. Утопічний напрямок розвивається в науково обґрунтоване утопічне прогнозування й зароджується наука «прогностика».

У нашій країні в становленні ранньої футурології, як науки про майбутнє, зіграли основоположники сучасної космонавтики та перш за все К. Цюлковський. Розвиток науки в суспільстві й величезному бажанні заглянути в майбутнє породило й новий жанр у художній літературі – наукову фантастику в другій половині 19 ст. (Жюль Верн, Уельс та ін.). Автори цього жанру виступали у всеозброєнні засобів сучасної їм науки, екстраполюючи тенденції розвитку науки, техніки, культури за допомогою художніх прийомів на порівняно віддалене майбутнє. Наукову фантастику можна вважати початком розвитку науково-технічного прогнозування. Поява наукової фантастики знаменувала важливе зрушення в розвитку подань про майбутнє. Та й сучасна наукова фантастика вносить свої технічні прийоми до методики сучасного прогнозування (прогнозні сценарії). А з іншої сторони вона

знайомить широке коло читачів із проблематикою прогнозування. Але треба пам'ятати, що наукова фантастика - це напрямок художньої літератури й вирішити проблеми прогнозування вона сама не покликана.

Бажання міркувати про майбутнє викликає активну публікацію більш ніж 100 брошур на Заході в 20-тих роках ХХ століття. Саме в цей час з'являються серйозні монографії Б. Рассела, А.М. Лоу («Наука дивиться вперед», «Майбутнє»), Эрла Биркенхеда («Світ в 2030 році»), виходять роботи з перспективних проблем містобудування Н. Мещерякова, Л.М. Сабсовича. Друга світова війна загальмувала розвиток концепцій майбутнього.

Новий етап розвитку прогнозування припадає на період 40-х – 50-х років: концепції науково-технічної революції у працях Дж. Бернала, Н. Вінера та ін. Інтенсивна розробка нової технології прогнозування проводиться на Заході на 50-ті – 60-ті роки, а середина 60-тих років – це пік «буму прогнозів».

Саме в цей час виходять такі праці: М. Тейл – «Економічні прогнози прийняття рішень», «Прикладне економічне прогнозування», Б. де Жувенель – «Мистецтво припущення», Д. Белл – «12 способів пророкування» та ін.

Провідним прогностичним центром у США стає Гудзоновський інститут, де розвивалася теоретична концепція індустріалізма.

У 70-тих роках виникають проблеми екології навколишнього середовища, а тому розвивається прогнозування екології; проведення футурологічних форумів: конференція Міжнародної федерації досліджень майбутнього (74 – 79 р.р.), конгреси Міжнародної соціологічної асоціації (70 – 78 р.р.), з'їзди американського футурологічного суспільства «Світ майбутнього» (71 – 80 р.р.). Цей період – період екологічної й технологічної хвилі в прогнозуванні. Створюють Римський клуб (з ініціативи італійського промисловця) для обговорення цих проблем, де будують різні моделі майбутнього людства Землі. Поступово змінюють тематику доповідей Римського клубу: 1979 р. – 6-а доповідь із проблем народного утворення, усуненню його розходження в рівнях по країнах світу; 1980 р. – 7-а доповідь про благополуччя людства, ревізія всіх раніше створених економічних теорій. Прогнозування подальшого розвитку економіки в найтіснішому зв'язку з екологією й т.д.

У цей час у світі «бум прогнозів» пройшов, а сама теорія прогнозування збагатилася новими методами, методиками; прогностика як наука стабілізувалася й міцно ввійшла в усі сфери

життєдіяльності людини. Зараз працюють у світі спеціальні організації по прогнозуванню: приватні консультативно-дослідницькі центри (фірми), розробляють прогнози для інших установ в основному по контрактах; урядові заклади або відділи – займаються розробкою прогнозів, але частіше зайняті збором і систематизацією готової прогнозовної інформації, підготовленої спеціалізованими центрами; прогнозні групи або окремі дослідники - прогнозисти в складі установ або відділів (планових, маркетингу та ін.); громадські організації (наукові суспільства, асоціації), здійснюють систематичний обмін досвідом, інформацією між розроблювачами прогнозів шляхом організації нарад, публікацій та ін., але нерідко беруть самостійний підряд на розробку прогнозів.

З кінця 60-х років на Заході поступово прогнозування втрачає свою ізолюваність, і прогнози стали органічно входити в систему планування, проєктування, програмування, тобто взагалі керування. Вже розроблено більше 200 методів прогнозування. Але застосовують широко 15 - 20 методів. Подальший розвиток прогнозування можливий при розвитку його теорії, методології, наукових основ методики.

У розвиток прогностики внесли істотний вклад І.В. Бестужев-Лада, В.А. Лисичкин, С.А. Саркисян, В.Г. Гмошинський, Т.І. Заславська, А.Г. Аганбегян та ін. В 1976 р. було створено Наукову раду з комплексних проблем науково-технічного й соціально-економічного прогнозування, очолював її А.В. Котельніков. Прогнозисти входять у Міжнародну федерацію дослідників майбутнього.

Питаннями прогнозування в Україні займаються у всіх областях діяльності та на всіх рівнях виробництва.

1.3 Класифікація прогнозів

В сучасний період прогнозування все ширше входить практично в усі області розвитку суспільства.

Головні напрямки прогнозування:

- економічне;
- демографічне;
- соціальне;
- науково-технічне;
- освоєння природних ресурсів;
- зовнішньополітичне.

Науково-технічне прогнози включають прогнози основних показників відтворення, галузевої структури виробництва, відтворення

трудовах ресурсів, основних фондів й капіталовкладень, розвитку світового господарства та зовнішньоекономічних зв'язків.

Прогнози розвитку науки та техніки групують за трьома напрямками:

– прогнози розвитку науки як однієї з важливих сфер діяльності людини, основних фундаментальних, прикладних досліджень, які можуть бути найбільш прогресивними на перспективний період;

– прогнози розвитку та впровадження науково-технічного прогресу в галузях економіки країни;

– визначення соціальних наслідків науково-технічного прогресу в різних галузях наукового життя.

Прогнозування розвитку науки та техніки виявляє зміни характеру праці в умовах розвитку науково-технічного прогресу. Прогнози освоєння природних ресурсів, економічних та соціальних його наслідків.

Демографічні прогнози охоплюють рух народонаселення та відтворення трудових ресурсів, рівень зайнятості працездатного населення, його кваліфікаційний та професійний склад. Демографічне прогнозування розглядає динаміку народонаселення на основі аналізу його структури за статтю та віком, даних з народжуваності та смертності. Це прогнозування дозволяє отримати прогнозну інформацію щодо чисельності сімей, їх середньої величини, напрямку та інтенсивності міграційних потоків населення, тривалості активної трудової діяльності, середнього віку, початку та закінчення трудової діяльності, виходу на пенсію, середній тривалості життя. На основі демографічних прогнозів плануються обсяги та структура суспільних потреб населення, виробництва предметів особистого споживання, розвитку освіти, охорони здоров'я та ін. Таким чином, демографічні прогнози тісно пов'язані з прогнозами соціального розвитку та підвищення рівня життя.

Соціальні прогнози розглядають структуру населення, відносин власності, змін у суспільній, груповій та індивідуальній психології, суспільній свідомості та побуту.

Методологічною основою прогнозування є теорія пізнання, а також визнання загального зв'язку і взаємозалежності явищ природи і суспільства.

Основними принципами прогнозування виступають:

– системний підхід;

– вивчення процесу розвитку об'єкта в динаміці;

– аналіз і узагальнення нових перспективних явищ у розвитку об'єкта;

- облік специфіки об'єкта;
- складання альтернатив вирішення завдань для виявлення оптимальної;
- застосування математичних методів для вирішення прогнозних завдань.

ПРИНЦИП СИСТЕМНОСТІ – принцип прогнозування, що вимагає взаємоув'язки і супідрядності прогнозів, об'єкта прогнозування і прогнозного фону та їхніх елементів.

Одним зі шляхів реалізації системного підходу при прогнозуванні є облік зовнішніх умов прогнозного фону.

ПРОГНОЗНИЙ ФОН – сукупність об'єктів і зв'язків між ними, що визначає умови існування і функціонування об'єкта дослідження.

Залежно від природи розрізняють: соціально-політичний, економічний, науково-технічний фон.

За ступенем впливу на об'єкт дослідження розрізняють активний і пасивний прогнозний фон.

1.4 Основні напрями прогнозування терміну служби електрообладнання

Останнім часом у всіх областях техніки велика увага приділяється питанню діагностики технічного стану різних машин, механізмів, виробів.

При діагностуванні визначають, яким впливам необхідно піддати електрообладнання для запобігання відмов і відновлення рівня його працездатності. До таких дій відносять регулювання, ремонт або заміну деталей та вузлів, просочення обмоток, сушіння ізоляції, забарвлення поверхонь, обкатку, тобто операції, спрямовані на підвищення або відновлення ресурсу окремих деталей і вузлів та електрообладнання в цілому. Крім того, для управління технічним станом електрообладнання необхідно знати динаміку зміни параметрів стану елементів, зв'язок між показниками швидкості зміни параметрів та ймовірністю відмов, середнім ресурсом елемента по контрольованому параметру та інші показники.

При управлінні технічним станом за допомогою діагностування отримують інформацію про технічний стан електрообладнання, проводять обробку і аналіз інформації та готують рішення. Основна інформація про технічний стан електрообладнання надходить при вимірюванні діагностичних параметрів. Обробку і аналіз інформації проводять перетворенням отриманих при діагностуванні сигналів і величин, а також їх порівнянням з допустимими та номінальними значеннями. Прийняття рішення про впливи на електрообладнання

проводять на підставі порівняння результатів вимірювання діагностичних сигналів з їх допустимими значеннями. За цими даними визначають, яким конкретним ремонтним чи іншим діям необхідно піддати електрообладнання і в які терміни.

Таким чином, питання прогнозування тісно пов'язані з діагностикою, критеріями працездатності вузлів електричних машин. На підставі виміру цих критеріїв формується прогноз про технічний стан машини. Для процесу діагностики електрообладнання необхідно виявити найбільш інформативні параметри з ряду критеріїв працездатності таких величин, як напруга, струми, моменти і інші електромагнітні та електромеханічні параметри електричних машин. Для кожного класу електричних машин, а також залежно від напруги і потужностей інформативність тих або інших параметрів міняється і повинна визначатися у кожному конкретному випадку спеціально.

Для підвищення ефективності як тестового, так і функціонального діагностування, доводиться пристосовувати електрообладнання до діагностування, роблячи додаткові висновки. На практиці до таких додаткових висновків відносяться зроблені спеціально для цілей діагностування електричні висновки з певних точок електричної схеми електрообладнання. Крім того, застосовують додаткові спеціально встановлені пристрої (датчики вібрації, лінійного переміщення, температури та ін.).

Виходячи з вимог до діагностування і досвіду його впровадження, основними етапами розробок з діагностування електрообладнання є:

- визначення вузлів і деталей, що обмежують ресурс роботи електроустановки і підлягають діагностуванню;
- вибір параметрів і розробка методів діагностування електрообладнання;
- вибір і розробка засобів для діагностування електрообладнання;
- розробка технологій діагностування електрообладнання;
- пошук несправностей електрообладнання.

Також слід враховувати, що деталі й вузли електрообладнання при експлуатації зношуються і старіють, причому інтенсивність зношування і старіння залежить від багатьох факторів. Так, інтенсивність зносу і старіння ізоляційних конструкцій електричних машин залежать не тільки від тривалості роботи і властивостей застосовуваних матеріалів, але і від механічних впливів, температури, впливів зовнішнього середовища та ін.

Знос та старіння – це процеси, що характеризують зміну технічного стану електрообладнання в часі. Вони відображають зміни, що відбуваються в електрообладнанні і призводять до погіршення його властивостей. Таке погіршення властивостей при експлуатації обумовлює наявність детермінованої (визначальної) складової у процесах зносу і старіння деталей та вузлів. Вплив великої кількості різних чинників призводить до прискорення або до уповільнення процесів зносу або старіння в часі, тобто накладає на процес випадкову складову. Тому приймають, що процеси зносу і старіння деталей і вузлів в основному містять детерміновану і випадкову складові. Вплив кожної з них для кожного конкретного випадку може бути переважаючим, що відбивається на характері процесу зносу або старіння.

Незважаючи на те, що на кожну окрему електричну машину або апарат впливає певне, притаманне тільки даній машині або апарату поєднання факторів, що обумовлюють ту чи іншу швидкість втрати експлуатаційних властивостей, результати впливу кожного фактору на втрату властивостей підкоряються певним законам.

Механічні напруги, яким піддаються матеріали ізоляційної конструкції електрообладнання як у процесі виготовлення, так і при експлуатації, також приводять до старіння ізоляції. Зменшення терміну служби ізоляції під дією механічних напруг і при зміні структури матеріалу підпорядковується певному закону. Слід зазначити, що термін служби ізоляції може значно змінюватися не тільки під впливом механічних напруг і температури, але і під впливом інших факторів. Таким чином, фізичні та хімічні процеси, що відбуваються в ізоляції електроустановки, підпорядковані певним законам, що обумовлює можливість з певним ступенем точності заздалегідь передбачати (прогнозувати) на підставі даних відповідних вимірів технічний стан ізоляції в майбутньому.

У роботах багатьох дослідників показано, що знос деталей в сполученнях машин і механізмів пропорційний роботі сил тертя, тобто добуток сил нормального тиску на коефіцієнт тертя і шлях дії сил тертя. У свою чергу, кожен з множників залежить від ряду чинників. Сила нормального тиску залежить в основному від навантаження машини або від режиму її роботи, коефіцієнт тертя – від стану поверхонь тертя і якості мастила, шлях дії сил тертя – в основному від тривалості роботи при заданих режимах. Це положення поширюється і на деталі механічної частини електроустановки.

Таким чином, можна зробити висновок, що фізико-хімічні процеси зміни властивостей і розмірів деталей і вузлів механічної частини електричних машин і апаратів також підкоряються певним

законам і їх технічний стан з певним ступенем точності можна прогнозувати.

Прогнозування технічного стану електрообладнання, тобто процес передбачення зміни параметрів в майбутньому, є порівняно важким технічним завданням. Це пов'язано з тим, що на технічний стан навіть однотипних деталей та вузлів електрообладнання впливає поєднання великого числа факторів, частину з яких важко врахувати.

За умовами технології виробництва деталі і вузли електричних машин і апаратів, як і інших технічних пристроїв, виготовляються з певними допусками за розмірами, хімічному та структурному складовими матеріалів. Це також впливає на інтенсивність зносу або старіння деталей та вузлів.

Крім того, на інтенсивність зносу деталей та вузлів електрообладнання суттєво впливає організація і періодичність технічного обслуговування та поточного ремонту. Якщо технічне обслуговування та ремонт проводять нерегулярно або взагалі не проводять, швидкість зносу вузлів і деталей значно збільшується і знос швидко досягає своїх граничних значень.

В результаті всі перераховані вище фактори впливають на достовірність прогнозування роботи електрообладнання.

Прогнозування технічного стану виробу може здійснюватися як у процесі його розробки, так і в період експлуатації. В останньому випадку метою прогнозування є своєчасне виявлення несприятливого стану виробу та розробка рекомендацій щодо підвищення його надійності.

Слід зазначити, що розроблені до цього часу методи прогнозування не дають можливості передбачити раптові відмови, тобто відмови, що характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів стану деталі або вузла електрообладнання до граничного значення. Прогнозувати з певним ступенем точності можна поступові відмови, що характеризуються поступовою зміною параметрів технічного стану і обумовлені зносом або старінням матеріалу деталей або вузлів електрообладнання.

Основним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу елементів електричних машин і апаратів. Завданнями прогнозування в процесі експлуатації електрообладнання є: скорочення трудомісткості і вартості робіт, які виконуються при поточних ремонтах, тому що вони проводяться лише за необхідності, тобто за повного вичерпання ресурсу деталей та вузлів.

Слід також мати на увазі, що вивчення питань прогнозування і оцінки працездатності технічного стану електричних машин вказує на

існування взаємозв'язків між якістю перетворення енергії, станом ізоляції, підшипників і довговічністю електричної машини в цілому. Особливо це актуально для електромеханічних систем, що використовують електричну енергію змінного струму, яка визначається якістю електричної енергії в мережах живлення. Якість використовуваної електроенергії регламентується існуючим міждержавним стандартом ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності». Як показує аналіз, якість електроенергії впливає на нагрів струмоведучих частин і ізоляції електрообладнання, тому результати розрахунків по класичним співвідношенням будуть завжди надмірно завищеними. Зниження якості електроенергії в порівнянні з діючими нормативами на станції є причиною появи в струмоведучих частинах і ізоляції електрообладнання додаткових втрат активної потужності, які є джерелом додаткового нагрівання як ізоляції, так і машини в цілому. Тому реальний строк служби ізоляції електрообладнання буде зменшеним.

У зв'язку з тим, що діагностування є складовою частиною системи ППР (планово-попереджувальних робіт) електрообладнання, при розробці методів та засобів для діагностування потрібно послідовно вирішувати технічні та організаційні питання, що забезпечують не тільки отримання достовірних результатів і створюють можливість прогнозування технічного стану, але й високу ефективність застосування діагностування.

Система ППР передбачає регламентний режим експлуатації, коли проводиться періодичне технічне обслуговування, встановлення видів ремонту, їх послідовності та періодів між ремонтами.

Основним недоліком системи ППР є велика трудомісткість робіт, пов'язана з тим, що розбирання електрообладнання є регламентною операцією, що виконується найчастіше для визначення технічного стану вузлів і деталей, тому що після розбирання нерідко виявляється, що електрообладнання знаходиться в задовільному стані і проводити ремонт немає необхідності. Крім того, відповідно до системи ППР трудомісткість ремонту пропорційна кількості обслуговуваного електроустаткування, що вимагає при збільшенні кількості електрообладнання пропорційного зростання чисельності ремонтного персоналу.

В даний час із збільшенням кількості, удосконалюванням конструкції електрообладнання, а також з урахуванням останніх досягнень вимірювальної техніки настав час переходу від регламентної форми системи ППР за періодичністю до нової форми – за технічним

станом. Це дозволить більш повно використовувати технічний ресурс в цілому і забезпечити надійну роботу електрообладнання при мінімальних витратах.

Можливість рішення задачі прогнозування стану виробів обумовлюється тією обставиною, що в більшості випадків їх відмови є наслідком поступового накопичення пошкоджень, поступового старіння і зношування. Вказане відноситься як до поступових відмов, так і до раптових. Поняття «раптова відмова» відносне, так як стрибкоподібної зміни параметрів технічних пристроїв передують поступова зміна будь-яких фізичних величин, про які відсутня інформація.

Обчисленню прогнозованої характеристики завжди повинні передувати дослід, експеримент, дані якого використовуються спільно з інформацією. Саме ця особливість відрізняє прогноз від розрахунку.

У теорії надійності є два напрямки кількісної оцінки надійності виробів на основі результатів їх випробувань і експлуатації: констатація рівня надійності і проектування надійності. Констатація рівня надійності ґрунтується на результатах досвіду (визначальні і контрольні випробування на надійність, дані експлуатації). Для групи однотипних виробів може бути оцінена «вірогідність безвідмовної роботи», «середній час напрацювання повністю» і так далі.

Оцінка надійності стає такою, що прогнозує, коли на основі аналізу фізичних процесів, вивчення закономірностей, яким підпорядковується процес формування показників надійності, робиться припущення про майбутній стан надійності виробу.

Зазвичай розрізняють процедури прогнозування надійності і технічного стану. Завданням прогнозування технічного стану є передбачення технічних параметрів або віднесення цих параметрів до якогось класу, а також визначення вірогідності виходу цих параметрів за межі допуску, тобто прогнозування відмов. Завданням прогнозування надійності є прогноз кількісних показників надійності виробу на основі прогнозування поступових і раптових відмов.

Прогнозування може бути груповим і індивідуальним. При груповому прогнозуванні вивчається сукупність виробів. При індивідуальному – у якомусь інтервалі часу спостерігається зміна параметра одного конкретного виробу з даної сукупності. Використовуючи отримані дані, визначають вірогідність безвідмовної роботи до якогось моменту часу в майбутньому. До методів групового прогнозування можна віднести статистичну оцінку терміну служби однотипних виробів на основі результатів випробувань. В цьому випадку шляхом обробки результатів випробувань на термін служби

деякого числа виробів обчислюється кількісна середньоквадратична оцінка терміну служби всієї партії в цілому. Перевагою методу індивідуального прогнозування є можливість оцінки надійності (технічного стану) кожного конкретного виробу.

В електричних машинах найбільш детально досліджені і мають ряд практичних співвідношень для прогнозування відмов наступні важливі питання – розрахунок довговічності ізоляції обмотки і стану підшипників.

Далі розглянемо послідовно деякі сучасні дослідження з питань розрахунку ресурсу та прогнозування відмов цих основних та відповідальних за працездатність електричної машини елементів.

За умовами технології виробництва ізоляційні конструкції електрообладнання виготовляються з певними допусками за розмірами, хімічному і структурному складу матеріалів ізоляції. Це впливає на інтенсивність зносу або старіння ізоляції електрообладнання. Крім того, на інтенсивність зносу ізоляції електрообладнання суттєво впливає організація і періодичність технічного обслуговування та поточного ремонту. Якщо технічне обслуговування і ремонти проводять нерегулярно або взагалі не проводять, швидкість зносу ізоляції вузлів значно збільшується і зноси швидко досягають своїх граничних значень. Тому всі переховані вище фактори впливають на достовірність прогнозування роботи електрообладнання.

Слід відзначити, що розроблені до теперішнього часу методи прогнозування не дають можливості передбачати раптові відмови, тобто відмови, які характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів стану ізоляції електрообладнання до межового значення. Прогнозувати з певним ступенем точності можна поступові відмови, які характеризуються поступовою зміною параметрів технічного стану і обумовлені зносом або старінням матеріалу ізоляції електрообладнання. Вплив багатьох різних факторів призводить до прискорення або уповільнення процесів зносу та старіння ізоляції у часі, тобто накладає на процес випадкову складову. Тому приймають, що процеси зносу та старіння ізоляції в основному містять детерміновану і випадкову складові. Вплив кожної з цих складових для кожного конкретного випадку може бути переважаючим, що відображається на характері і процесу зносу.

Основним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу ізоляції електрообладнання, що дає можливість скоротити трудомісткість й вартість робіт, які виконуються при поточних ремонтах, встановлених лише за необхідністю, встановити терміни (періодичність) проведення діагностування. Визначення залишкового

ресурсу ізоляції електрообладнання дозволяє об'єктивно визначити момент необхідності ремонтного впливу, який відповідає найповнішому використанню її ресурсу. При цьому можна користуватися поняттям коефіцієнту технічного ресурсу. За допомогою цього коефіцієнта оцінюють залишковий ресурс ізоляції електрообладнання. Для параметрів, абсолютні значення яких збільшуються в процесі експлуатації електрообладнання, коефіцієнт технічного ресурсу підраховується за формулою:

$$k_{\text{зал}} = (P_{\text{гр}} - P_{\text{в}}) / (P_{\text{гр}} - P_{\text{н}}), \quad (1.1)$$

де $P_{\text{гр}}$ – граничне значення параметра;

$P_{\text{н}}$ – номінальне значення параметра;

$P_{\text{в}}$ – вимірне значення параметра.

Якщо у процесі експлуатації значення параметра зменшується, то коефіцієнт залишкового ресурсу визначається виразом:

$$k_{\text{зал}} = (P_{\text{в}} - P_{\text{гр}}) / (P_{\text{н}} - P_{\text{гр}}). \quad (1.2)$$

Для нової ізоляції електрообладнання $k_{\text{зал}}=1$, а для тої, що повністю вичерпала свій ресурс $k_{\text{зал}} = 0$.

Доцільно виділити три методи прогнозування: аналітичного прогнозування, імовірнісного прогнозування та статистичної класифікації, які повністю охоплюють означені вище підходи щодо прогнозування технічного стану ізоляції електрообладнання.

Метод аналітичного прогнозування доцільно використовувати для завдань, коли зміна параметра, який контролюється, інерційна у часі і всі зміни поступово накопичуються. Таку зміну параметру P , який контролюється, можна представити функцією $P(t)$. При цьому потрібно використовувати вимірювання деяких значень функцій $P(t_0)$, $P(t_1)$ і $P(t_2)$ відповідно в моменти часу t_0 , t_1 і t_2 . Завданням прогнозування є визначення за відомими значеннями функції $P(t)$ у минулому і у теперішньому часі величини функції у майбутньому, тобто в моменти часу t , а також визначення моменту часу, коли параметр досягне свого припустимого значення $P_{\text{пр}}$.

Метод імовірнісного прогнозування застосовують для завдань, де необхідно визначити ймовірність виходу або невиходу діагностичного параметру P , який діагностується, за встановлені межі. Задача формулюється наступним чином. Є значення параметра P у моменти часу t_0 , t_1 , t_2 , у яких стани елемента, який прогнозується, характеризуються відповідними функціями розподілу $F_i(P)$. За цими відомими значеннями необхідно визначити ймовірність збереження ізоляції працездатності у майбутньому, тобто що функція $P(t)$ не вийде за своє припустиме значення $P_{\text{пр}}$.

При вирішенні завдань прогнозування методами статистичної класифікації відомі значення параметру в певні моменти часу відносять до одного із класів, тобто до свого роду еталону, а потім, виходячи із закономірності зміни параметрів даного класу, вирішують, як буде змінюватися даний параметр у майбутньому. При цьому поділ значень параметрів на класи може бути тимчасовим (за часом або напрацюванням) або параметричним (за величинами параметрів, які контролюються). Число і діапазон зміни параметрів у кожному класі залежить від особливостей конструкції та умов роботи елемента електрообладнання, який діагностується.

Метод лінійного прогнозування. В його основу покладено припущення, що у процесі експлуатації зовнішні впливи на ізоляцію електрообладнання, яка діагностується, є незмінними, а залежність зміни величини діагностичного параметру від часу – лінійна. Для застосування методу необхідно мати дані про напрацювання об'єкта з початку експлуатації до момента діагностування, а також про межове і номінальне значення параметра.

Метод доцільно використовувати для орієнтовного визначення залишкового ресурсу вузлів електрообладнання (в першу чергу електричних машин).

Метод багатоступінчатого лінійного прогнозування. Метод базується на даних вимірювань, які проводяться при систематичних діагностуваннях через будь-які проміжки часу. Визначення терміну безвідмовної роботи ізоляції електрообладнання, яка діагностується, за цим методом проводиться до наступного діагностування. Метод багатоступеневого лінійного прогнозування враховує дійсну закономірність зношування або старіння об'єкта діагностування у даних конкретних умовах експлуатації. Крім того, при прогнозуванні на період до наступного діагностування приймається, що об'єкт діагностування буде працювати у більш несприятливих умовах, у зв'язку з чим ресурс безвідмовної роботи визначається за максимально можливою середньою інтенсивністю зміни параметра за період між двома останніми діагностуваннями. Після наступного діагностування знову встановлюють гарантований ресурс безвідмовної роботи ізоляції електрообладнання.

Діагностування проводять таким чином до повного вичерпання ресурсу об'єкта. Метод багатоступінчатого лінійного прогнозування не потребує даних про напрацювання і зміну величини параметрів з початку експлуатації електричної машини або апарату. В результаті лінійної апроксимації і екстраполяції зміни параметрів на деякий проміжок часу отримують величину періоду безвідмовної роботи

завжди меншу дійсного, тобто завжди резервується певний запас надійності результатів прогнозу.

Гарантований ресурс безвідмовної роботи деталей, вузлів і сполучень, технічний стан яких характеризується параметрами, що мають лінійні або криволінійні залежності від часу роботи, визначається із виразу:

$$t_{\text{гар}} = (П_{\text{гр}} - П_{\text{в}}) / (П_{\text{в}} - П_{\text{в}-1}) \cdot t_0 \cdot k_0, \quad (1.3)$$

де $t_{\text{гар}}$ – гарантований ресурс безвідмовної роботи,

$П_{\text{гр}}$ – граничне значення параметра;

$П_{\text{в}}, П_{\text{в}-1}$ – виміряна величина параметра відповідно при даному і попередньому діагностуванні;

t_0 – період між даними і попередніми діагностуванням, од. напрацювання;

k_0 – коригувальний коефіцієнт.

Якщо, наприклад, діагностування проводилося у моменти часу t_1, t_2, t_3 і при цьому отримані значення параметра відповідно $П_1, П_2, П_3$, то середня інтенсивність зміни параметру за відрізок часу між 1- м і 2- м, 2-м і 3-м діагностуваннями складає:

$$t_{\text{ср}1-2} = (П_2 - П_1) / (t_2 - t_1); \quad (1.4)$$

$$t_{\text{ср}2-3} = (П_3 - П_2) / (t_3 - t_2). \quad (1.5)$$

Після кожного діагностування коректують результат прогнозування з урахуванням середньої інтенсивності зміни параметру за час між останнім і попереднім діагностуванням. При цьому припускається, що за період часу, який прогнозується, до наступного діагностування інтенсивність зміни параметра не може перевищити інтенсивність, яка була у попередньому періоді. У іншому випадку закономірність зміни параметра повинна змінитися, тобто спадна інтенсивність повинна змінитися на зростаючу. Якщо діагностичний параметр змінюється за зростаючою криволінійною залежністю зі зростаючою інтенсивністю, то коригувальний коефіцієнт визначається як відношення значень параметра при попередньому і даному діагностуванні, тобто:

$$k_0 = (П_{\text{в}} - 1) / П_{\text{в}}. \quad (1.6)$$

У випадках зменшення параметра при роботі об'єкта діагностування зі зростаючою інтенсивністю, коригуючий коефіцієнт визначають за формулою:

$$k_0 = (П_{\text{поч}} + П_{\text{гр}} - П_{\text{в}} - 1) / П_{\text{поч}}, \quad (1.7)$$

де $П_{\text{поч}}$ – початкове значення параметру.

Таким чином, для підвищення достовірності даних при прогнозуванні ресурсу ізоляції електрообладнання за допомогою

багатоступінчатого лінійного методу прогнозування необхідно попередньо знати загальну закономірність зміни діагностичних параметрів. Якщо загальна закономірність параметрів невідома, то розрахунок гарантованого ресурсу безвідмовної роботи проводиться з урахуванням коригувального коефіцієнта, обчисленого за формулою, яка відповідає закономірності зі зростаючою інтенсивністю зміни параметра. При цьому гарантований ресурс роботи до наступного діагностування буде скоригований у бік зменшення.

Розглядаючи питання ресурсу ізоляції, необхідно відмітити, що також досить часто відбуваються пошкодження ізоляції не пов'язані зі зносом та старінням, а має місце бути продавлювання, прорізання її гострими крайками сердечника статора, біля виходу провідника з паза, утворення тріщин внаслідок напруг при розтягуванні ізоляції внаслідок вигину тощо. Такі місцеві дефекти часто розвиваються порівняно швидко і призводять до пробою ізоляції задовго до істотного погіршення її властивостей внаслідок процесів перегріву та природного старіння. Ізоляція пазової частини обмотки випробовує стиснення під дією електродинамічних зусиль, при наявності зазорів у пазу вона також схильна до ударів і стирання об стінки паза. Якщо свобода переміщення відсутня, то в ізоляції крім розтягування і стиснення можлива поява деформації зсуву.

При вигині лобових частин обмотки найбільші напруги виникають у місцях виходу стержнів або котушок з пазів, де ізоляція випробовує напруги стиснення і розтягування. Крім того, вона мнеться на прокладках і місцях зіткнення з бандажами. В більшості випадків перелічені зусилля мають циклічний характер, причому характерною є вібрація з частотою 100 Гц.

Дія вібрації – вібраційне старіння на всипні обмотки виражається в поступовому руйнуванні просочувального лаку, в результаті чого порушується цементация обмотки і окремі провідники набувають деяку свободу переміщення. Це веде до руйнування виткової ізоляції в точках дотику сусідніх провідників, в результаті чого збільшується ймовірність віткових замикань. Помічено, що старіння ізоляції низьковольтних машин, що працюють при помірних температурах обмоток, взагалі не може бути пояснено з позицій електричних або теплових явищ. У цих випадках найбільш суттєвими причинами, що викликають поступове руйнування ізоляції, є механічні навантаження.

Для більшості електричних машин друге за значенням (після обмотки) джерелом відмов уявляють собою підшипники.

Підшипники кочення також досить чутливі до вібрації, але поперед всього до перевантажень. Відомо, що при збільшенні навантаження на підшипник у двічі його довговічність зменшується приблизно в 10 разів.

При розрахунку підшипників кочення визначають їх типорозміри при заданих термінах служби, навантаженні і частоті обертання.

Таким чином, розглянуті вище питання показують деякі напрями та можливості розрахунку та прогнозування відмов елементів електричних машин. Подальше проведення досліджень і розробок з розвитку питань прогнозування дозволить підвищити надійність електроустаткування і звести до мінімуму раптові відмови, а отже і збиток в господарствах країни, викликаний раптовими зупинками аварійного характеру.

Контрольні запитання за лекцією 1

1. Яка роль прогнозування?
2. Які основні етапи розвитку прогнозування?
3. Як пов'язані між собою поняття: прогнозування, і передбачення; гіпотеза, прогноз, план?
4. Назвіть основні напрями прогнозування?
5. На яких принципах ґрунтується процес прогнозування?
6. У чому полягає принцип прогнозування технічного стану електромехатронних систем?
7. Що становить поняття «подія» і як воно використовується на практиці?

ЛЕКЦІЯ 2

ПОСЛІДОВНІСТЬ РОЗРОБКИ ПРОГНОЗІВ

План

- 2.1 Основні етапи та організація прогнозування.
- 2.2 Необхідність та основні принципи аналізу об'єкта прогнозування.
- 2.3 Класифікація об'єктів прогнозування.
- 2.4 Вибір методу прогнозування.

2.1 Основні етапи та організація прогнозування

Сукупність робіт, що виконують при розробці економічних прогнозів, групують по етапах.

ЕТАП ПРОГНОЗУВАННЯ – частина процесу розробки прогнозів, що характеризується своїми задачами, методами і результатами.

Особливе місце серед етапів займають передпрогнозна орієнтація, що передує операціям власне прогнозування і розробка рекомендацій для керування на основі даних, отриманих у результаті прогнозування. На етапі передпрогнозних досліджень формують первинний опис об'єкта прогнозування, завдання на прогноз, йде підготовка наступного етапу.

Прогностичне дослідження починають із розроблення завдання на прогноз, що здійснюється, як правило, в тісному співробітництві замовника й виконавця.

ЗАВДАННЯ НА ПРОГНОЗ – документ, що визначає цілі і задачі прогнозу і регламентуючий порядок його розробки. Завдання повинно містити мотивацію розроблення прогнозу з переліком виконавців.

Визначаючи об'єкт прогнозу, вказують його основні характеристики і параметри, зв'язки з іншими об'єктами, які становлять фон розвитку об'єкта прогнозу. Завдання в першому наближенні має визначити межі дослідження об'єкта прогнозу, врахувати вплив фону з метою обмеження дослідження певними рамками. Для цього в завданні необхідно подати перелік вхідних даних і обмежень, які замовник зобов'язується поставити виконавцю.

У завданні на прогноз визначають точність, період упередження, інші умови його розробки, а також етапність розробки прогнозу з визначенням термінів виконання, мети і завдань кожного етапу, форми поетапної звітності і надання підсумкових результатів роботи. В розділі організаційних принципів проведення прогнозуючого

дослідження визначають джерела, форми й порядок фінансування робіт, співвиконавців та розподіл робіт між ними.

При значній кількості виконавців головна організація разом з ними складає **КООРДИНАЦІЙНИЙ ПЛАН**, який затверджується замовником. Він містить перелік організацій, зайнятих розробленням окремих прогнозів або допоміжних тем, визначає порядок їх взаємодії, завдання, поставлені перед кожним співвиконавцем, терміни їх виконання і порядок передачі результатів, вартість робіт і порядок фінансування співвиконавців.

Ці два документи – завдання на прогноз і координаційний план – є основними документами для всіх організацій у процесі розробки прогнозу. Після затвердження завдання на прогноз і координаційного плану розробки прогнозу, звичайно, виконують етапи робіт у певній послідовності, яка в кожному конкретному прогнозі може змінюватись, але має три основні стадії: ретроспекцію, діагноз і проспекцію.

ПРОГНОЗНА РЕТРОСПЕКЦІЯ – етап прогнозування, на якому досліджують історію розвитку об'єкта прогнозування і прогнозного фона з метою одержання їхнього систематизованого опису. На стадії ретроспекції розв'язують такі завдання: формування опису об'єкта прогнозу в минулому; остаточне формулювання й уточнення завдання прогнозування. До цієї стадії відносяться, як правило, такі роботи:

1. Передпрогнозний аналіз об'єкта. Виходячи із завдання на прогноз і попереднього дослідження об'єкта, уточнюють перелік характеристик і параметрів об'єкта, що розглядають в поданому завданні, дають попередні оцінки їх важливості і взаємних зв'язків.

2. Визначення й оцінювання джерел інформації, порядок організації і робота з ними. Остаточне формулювання постановки завдання.

3. Відповідно до встановленого порядку виконавці збирають ретроспективну інформацію і формують базу даних для проведення практичних розрахунків.

ПРОГНОЗНИЙ ДІАГНОЗ – етап прогнозування, на якому досліджують систематизований опис об'єкта прогнозування і прогнозного фона з метою виявлення залежностей. На стадії діагнозу розв'язуються такі завдання:

- розроблення моделі об'єкта прогнозу;

- вибір методу прогнозування.

На цій стадії існують чотири основних етапи дослідження. На основі прийнятої структури об'єкта та одержаної ретроспективної інформації створюють формалізований опис об'єкта – його математична модель.

1. Визначають поточні значення характеристик об'єкта на основі джерел інформації, перевіряють ступінь адекватності моделі об'єкта прогнозу.

2. Здійснюють вибір методу прогнозування, адекватного класифікації об'єкта, характеру його розвитку і завданню прогнозу.

3. Обирають комп'ютерні програми, що забезпечують процес прогнозування.

ПРОСПЕКЦІЯ – етап прогнозування, на якому за результатами діагнозу розробляють прогнози об'єкта прогнозування і прогнозного фона, проводять оцінку вірогідності і точності прогнозу. Стадія проспекції передбачає на основі усіх попередніх етапів одержання результатів прогнозу. Основні її кроки:

Проводять розрахунок прогнозних параметрів на заданому періоді упередження.

Узгоджують та синтезують окремі прогнози відповідно до прийнятих правил.

Роблять верифікацію прогнозу і з'ясовують ступінь його точності.

Така етапність у розробці прогнозів характерна для методів прогнозування, заснованих на математичному моделюванні об'єктів. У випадку експертних методів прогнозування склад і зміст етапів дещо змінюється. Завершується розробка прогнозу, як правило, розробкою рекомендацій щодо прийняття рішень. Після закінчення визначеного часу проводять експертизу прогнозу, а по її результатах - доробка прогнозу і рекомендацій.

2.2 Необхідність та основні принципи аналізу об'єкта прогнозування

В кожній науці, у тому числі й в прогностиці проводиться дослідження вивчаємих об'єктів, процесів та явищ. Одним з напрямків такого дослідження виступає аналіз об'єкта. В прогнозуванні метою аналізу об'єкта є розробка прогнозної моделі об'єкта, яка дозволить за допомогою експериментів з нею отримувати прогнозну інформацію щодо самого об'єкта. Але для отримання прогнозної інформації не достатньо мати лише модель об'єкта. Необхідні набір методів, методик та прийомів прогнозування. А тому в процесі аналізу об'єкта прогнозування треба вибрати методи прогнозування, що відповідають даному об'єкту та цілям прогнозування. Аналіз об'єкта проводиться на всіх етапах розробки прогнозу. Розпочинається він на перед прогнозних дослідженнях, коли визначають мету та цілі прогнозування, формують завдання та ін. На етапі ретроспекції аналіз об'єкта продовжується

більш детальніше, більш поглибило та в конкретній формі. На етапі діагнозу аналіз об'єкта практично закінчується розробкою прогнозу моделі та вибором методу прогнозування. На етапі проспекції аналіз відіграє другорядну, допоміжну роль щодо виявлення недостатньої інформації, уточнення раніш отриманої інформації, внесення корегувань в модель об'єкта на основі нової отриманої інформації. Таким чином аналіз об'єкта прогнозування є важливою частиною процесу розробки прогнозу. В економічному прогнозуванні на точність розроблюваного прогнозу значний вплив має повнота та якість проведеного аналізу об'єкта прогнозування. При аналізі об'єкта прогнозування треба дотримуватися певних принципів. *Принцип системності* вимагає розглядати об'єкт прогнозування як систему взаємозалежних характеристик об'єкта і прогнозного фона відповідно цілям і задачами дослідження. *Принцип природної специфічності* припускає обов'язкове урахування специфіки природи об'єкта прогнозування, закономірностей його розвитку, абсолютних і розрахункових значень меж розвитку. При порушенні цього принципу помилки можуть досягати великих розмірів, а прогнози стають просто абсурдними. *Принцип оптимізації об'єкта прогнозування* допомагає зробити такий опис об'єкту, що забезпечувал би задану вірогідність і точність прогнозу при мінімальних витратах на його розробку. *Принцип аналогічності* припускає при аналізі об'єкта постійне порівняння його властивостей з відомими в даній області подібними об'єктами і їхніми моделями з метою відшукування об'єкта-аналога і використання при аналізі і прогнозуванні його чи моделі окремих її елементів. При практичному аналізі реальних об'єктів дотриматися всіх цих принципів звичайно не вдається, однак кожне дослідження повинно бути спрямовано на максимальне наближення до виконання принципів. Ступінь цього наближення може служити однією з оцінок якості проведеного аналізу.

2.3 Класифікація об'єктів прогнозування

Метою класифікації є формування передумов щодо вибору адекватних методів прогнозування. Повної класифікації об'єктів, яка б забезпечила однозначний вибір того чи іншого методу прогнозування поки що не існує. Атому класифікація для сучасного прогнозування служить лише орієнтиром у складній процедурі вибору методу прогнозування. Розглянемо класифікацію об'єктів прогнозування за масштабністю, складністю, детермінованістю, трендом, забезпеченням інформацією.

За масштабністю об'єкти прогнозування можна класифікувати в залежності від кількості змінних, що входять в повний опис об'єкта на стадії його аналізу: сублокальні – з кількістю значущих змінних від 1 до 3 (чисельність робітників); локальні – з кількістю значущих змінних від 4 до 14 (виробнича дільниця, сировина); субглобальні – з кількістю значущих змінних від 15 до 35; суперглобальні – з кількістю значущих змінних понад 100. Масштабність об'єкта не має самостійного значення при виборі методу прогнозування. Її слід враховувати лише в сукупності з класифікацією об'єктів за принципомскладності. Характеристику масштабності слід враховувати при організації процедур обробки інформації, виборі технічних засобів для обробки і т. ін.

За складністю об'єкти прогнозування можна класифікувати в залежності від ступеню взаємозв'язку значущих змінних в опису об'єкта: над прості – об'єкти не мають суттєвих взаємозв'язків між змінними; прості – об'єкти мають парні зв'язки між змінними; для аналізу таких об'єктів можуть використовуватися моделі парних регресій, та експертних оцінок; складні – об'єкти, для опису яких необхідно враховувати взаємозв'язки та вплив декількох змінних, однак є можливість виділити окремі групи змінних; для аналізу таких об'єктів використовують в прогнозуванні множинний регресійний та кореляційний аналіз; надскладні – об'єкти, в опису яких необхідно враховувати взаємозв'язок між змінними; основним інструментом аналізу в цьому випадку виступає множинний кореляційний аналіз. Слід відзначити залежність даного аспекту класифікації від мети та завдань аналізу, від ступеня точності; один й той же реальний об'єкт у різних дослідженнях може бути віднесено до різних класів складності.

За ступенем детермінованості можна виділити такі об'єкти прогнозування: детерміновані, опис яких може бути представлений у детермінованій формі без суттєвих для завдань прогнозування втрат інформації; стохастичні, для аналізу і прогнозування яких врахування випадкових складових необхідне для задоволення вимог точності та достовірності прогнозу; змішані, опис яких можливо частково в детермінованому, частково в стохастичному вигляді. За характером розвитку у часі об'єкти прогнозування можна поділити на: дискретні – об'єкти, регулярна складова (тренд) яких змінюється стрибками у фіксовані моменти часу; аперіодичні – об'єкти, в яких опис регулярної складової у вигляді аперіодичної безперервної функції часу; циклічні – об'єкти, які мають регулярну складову у вигляді періодичної функції часу.

Регулярна складова або тренд в них розуміється як опис процесу, який очищено від випадкової складової.

За ступенем інформаційного забезпечення об'єкти прогнозування діляться на: об'єкти з повним забезпеченням кількісною інформацією, для яких ретроспективна інформація є в такому обсязі, що достатньо для реалізації методу екстраполяції або методу моделювання в розробці прогнозу; об'єкти з неповним забезпеченням кількісною інформацією, для яких ретроспективна інформація дозволяє використати методи екстраполяції або моделювання, але не забезпечує для заданого часу упередження задану точність прогнозу; об'єкти з наявністю якісної ретроспективної інформації і відсутністю повністю або частково кількісної інформації; об'єкти з повною відсутністю ретроспективної інформації – це, як правило, неіснуючі об'єкти, ті, що проєктуються. Класифікація за цією ознакою дає можливість оцінити використання екстраполяційних та статистичних методів аналізу та прогнозування об'єкту.

2.4 Вибір методу прогнозування

Метод прогнозування – це сукупність прийомів та способів мислення, що дозволяють на основі аналізу ретроспективних даних, зовнішніх (екзогенних) й внутрішніх (ендогенних) зв'язків об'єкта прогнозування, а також їх вимірювань у рамках вивчаемого явища або процесу вивести судження певної достовірності відносно майбутнього розвитку об'єкта.

У сучасний час вживають спроби пов'язати метод прогнозування з характеристикою об'єкта й таким чином впорядкувати та спростити вибір самого методу прогнозування, тобто знайти критерії його вибору в залежності від характеристики об'єкту. Але ця проблема ще не вирішена до кінця. Разом з тим слід пам'ятати, що якість прогнозу багато в чому залежить від правильного вибору методу прогнозування. Вибір методу базується на порівняльному аналізі декількох методів по певним критеріям та на практиці застосування цих методів. Якість прогнозу багато в чому залежить від правильного вибору методу прогнозування. В даний час починають спроби пов'язати метод прогнозування з характеристикою об'єкта і тим самим спростити вибір методу прогнозування. Але ця проблема ще не вирішена. В літературі з прогностики наводиться характеристика застосування того чи іншого методу в розрізі цих критеріїв. Наприклад, час упередження накладає межі на застосування методу екстраполяції. Якщо час упередження більш п'яти років, то екстраполяція може привести к значним відхиленням від фактичного стану об'єкта. Згідно іншого підходу вибір

методу можна здійснити, розрахувавши безрозмірний показник глибини прогнозування (τ):

$$\tau = \frac{\Delta t}{t_x}, \quad (2.1)$$

де Δt – абсолютний час попередження;

t_x – величина еволюційного циклу об'єкта прогнозування.

Якщо $\tau \leq 1$, то ефективне застосування формалізованих методів прогнозування, якщо $\tau \approx 1$ – інтуїтивних, якщо $\tau \geq 1$ – комплексу методів, але перевагу мають інтуїтивні.

Іноді в літературі наводяться також таблиці, в яких в бальної оцінці дана характеристика застосування того чи іншого методу економічного прогнозування з п'яти критеріїв. Прогнозист підсумовуючи бали вибирає метод, що має максимальну суму. Не можна вважати, що в умовах ринкової економіки достатньо вибрати правильно метод прогнозування, наприклад, діяльності підприємства і на цьому підприємстві буде прийнято правильне рішення відносно очікуваного економічного розвитку. Діяльність в умовах ринкових відносин завжди пов'язана з певним підприємницьким ризиком. А застосування чітких та раціональних методів прогнозування може підвищити здатність людини до оправданого ризику з метою успішної діяльності підприємства. Ці проблеми вже стосуються теорії прийняття рішень, а також достовірності, точності, якості прогнозів. На ці категорії впливає правильність вибору методу прогнозування. Можна виділити декілька факторів, що впливають на вибір методу прогнозування: мета прогнозу, тобто поставлена задача; час упередження прогнозу; специфіка об'єкту прогнозування; достовірність та повнота вихідної інформації; обмеження, що мають розробники прогнозу, а саме: час на розробку, наявність необхідних ресурсів і т. ін. Обраний метод прогнозування повинен відповідати наступним вимогам:

- використовувати та видавати в результаті застосування тільки достовірну інформацію. Недостатньо достовірною інформацією представляє собою дезінформація і більш шкідлива, ніж взагалі відсутність всяких даних;

- забезпечити своєчасність отримання інформації. Затримання інформації може її зценити;

- прогнозна інформація, що використовується при застосуванні обраного методу повинна відображати закономірні явища в розвитку показників, тобто бути репрезентативною.

Обраний метод повинен забезпечити можливість прогнозування як можна на більший період упередження.

Контрольні запитання за лекцією 2

1. Яка послідовність робіт, що виконуються при розробці прогнозу?
2. Що містить у собі завдання на прогноз?
3. Яка мета аналізу об'єкта прогнозування?
4. Зміст принципів аналізу об'єкта прогнозування?
5. З яких ознаках класифікують об'єкти прогнозування?

ЛЕКЦІЯ 3

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТЧАННЯ

План

3.1 Події, стани та процеси в об'єктах

3.2 Надійність як комплексна властивість

3.1 Події, стани та процеси в об'єктах

3.1 Події, стани та процеси в об'єктах

Термін «надійність» відображає дуже об'ємне поняття, яке широко використовується в науці, техніці, побуті, медицині і т.д. У всіх сферах діяльності накопичені знання, досвід у галузі надійності. Це дало змогу абстрагувати поняття надійності, розглядати його стосовно досить абстрактних об'єктів, систем. Вивчення надійності від абстрактного (абстрактних об'єктів, систем) до конкретного (систем електропостачання) найбільше ефективно, оскільки дозволяє застосовувати вже накопичені знання, отримані в системах не тільки електропостачання, а й в інших. Тому основні поняття надійності систем електропостачання розглядатимемо з досить абстрактних позицій, ілюструючи їх прикладами із систем електропостачання.

У процесі функціонування об'єкта виникають певні події, об'єкт приймає різні стани, що істотно впливають на використання його людиною, на функції, які він виконує. Такими є передусім стану працездатні та непрацездатні, події відмови та відновлення.

Стан будь-якого об'єкта можна описати набором, безліччю змінних станів.

$x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, які можуть набувати певних значень і змінюватися в часі $x_i(t)$. Належне виконання об'єктом його функцій можливе за умови, що всі змінні стани, що його описують, набувають значення, що лежать у певній (допустимій) області. У електроенергетиці змінні стани зазвичай називають параметрами режиму чи режимними параметрами. Кордон цієї області може змінюватися в часі та описується рівнянням:

$$D_0(x, t) = 0. \quad (3.1)$$

Якщо значення змінних стану об'єкта у цій галузі, тобто. забезпечується можливість виконання ним своїх функцій, тобто, що об'єкт перебуває у працездатному стані; якщо ж за кордоном допустимої області, то у непрацездатному.

На рис. 3.1 показано зміну у часі однієї з основних змінних стану електричного генератора – напруги. Тут же наведено область

допустимих значень цього змінного стану. Видно, що до моменту t_0 значення напруги було у допустимій області. Генератор перебував у працездатному стані. Після моменту t_0 . Значення напруги вийшло за кордон допустимих значень і генератор опинився в непрацездатному стані

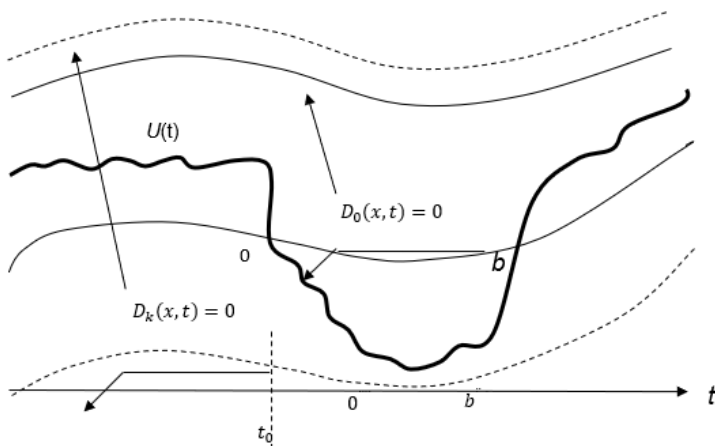


Рисунок 3.1 – Зміна у часі напруги електричного генератора

У деяких випадках можна говорити про частково працездатний стан, коли об'єкт може виконувати свої функції не повністю, а частково. Наприклад, на рис. 3.1 штриховими лініями показані межі допустимої області $D_k(x, t) = 0$ роботи генератора, але з зниженою якістю напруги (зазвичай обмеженому інтервалі часу). При зниженні напруги нижче цієї межі відбувається відключення генератора.

У працездатному стані об'єкт може виконувати своїх функцій, тобто. перебуває у робочому стані. Якщо ж він у працездатному стані не виконує з тих чи інших причин задані функції, то кажуть, що об'єкт перебуває у неробочому стані. Робочий стан об'єкта може бути повним чи частковим.

Залежно від цього, якого виду функції виконує працездатний об'єкт, розрізняють ще резервний стан, яке, своєю чергою, поділяється на стан навантаженого (чи включеного) і ненавантаженого (чи включеного) резерву). На виробничому жаргоні останні два стани іноді називають як стани в «гарячому» та «холодному» резервах.

Непрацездатний стан може бути класифікований так: стан попереджувального ремонту – ведуться роботи з виявлення, попередження та усунення несправностей об'єкта, які можуть

привести до його відмови; стан аварійного ремонту – ведуться роботи з відновлення працездатності об'єкта, порушеної внаслідок відмови.

До непрацездатного стану слід віднести і так званий граничний стан, при якому подальша експлуатація об'єкта повинна бути припинена через безперервний догляд заданих змінних станів і характеристик за встановлені межі.

Подія, яка полягає в тому, що об'єкт перейшов межу допустимої області значень змінних працездатного стану та непрацездатного, кваліфікується як відмова. У цьому відбувається втрата можливості об'єкта виконувати свої функції.

Відмови можуть бути:

- повні чи часткові (за рівнем порушення працездатності);
- раптові та поступові (за швидкістю перебігу процесів зміни змінних стану);
- незалежні чи залежні (залежні від відмов інших об'єктів);
- стійкі і нестійкі або збої (відмови, що самоусуваються, що призводять до короточасного порушення працездатності).

У об'єктів, що функціонують не завжди в часі, а на вимогу, відмови можуть бути наступних видів:

- спрацьовування на вимогу;
- хибне спрацьовування (за відсутності вимог);
- надмірне спрацьовування (при вимозі спрацьовування інших елементів).

Прикладами таких об'єктів є системи релейного захисту, протиаварійної автоматики, певною мірою вимикачі.

Причини відмов можуть бути зовнішніми та внутрішніми.

Відмови з внутрішніх причин можна поділити на три групи. Першу становлять помилки, допущені під час конструювання, визначення умов та режимів експлуатації, виготовлення, монтаж або ремонт обладнання. Ці помилки, приховані дефекти зазвичай виявляються у ранній період експлуатації – період опрацювання. Характерна підвищена частота відмов (рис. 3.2).

Друга група причин викликана зносом і призводить до поступового втрати об'єктом ряду функціональних властивостей і збільшення частоти відмов порівняно з періодом нормальної експлуатації об'єкта. Цей період називається періодом старіння (рис. 3.2 $t_{ж}$ – час життя об'єкта).

Третю групу складають відмови у період нормальної експлуатації. Частота відмов у період нижче, ніж у перші дві, але вона не нульова.

До відмов з внутрішніх причин можуть також бути віднесені ті, які викликані помилковими або вимушеними діями обслуговуючого персоналу, якщо він включений до складу об'єкта, що розглядається, знаходиться всередині його кордону. В іншому випадку вони будуть віднесені до відмов із зовнішніх причин.

Незалежно від способу віднесення, останні можуть бути підрозділені на дві групи. Першу складають причини, зумовлені недостатньо високою кваліфікацією експлуатаційного та ремонтного персоналу. Друга група причин пов'язана з громіздкістю та складністю пристроїв та схем, з якими експлуатаційному персоналу доводиться працювати. Наприклад, велика кількість комутаційної апаратури і складна схема з'єднань на підстанціях підвищують ймовірність неправильних перемикань, здатних призвести до помилкових відключень і включень на короткозамкнуті ланцюги.



Рисунок 3.2 – Частота відмов

Причини відмов зовнішнього походження також можна поділити на дві групи. До першої віднесемо впливу, що надходять із довкілля, за своєю силою перевищують ті, на які розрахований об'єкт (так звані нерозрахункові обурення) і які призводять до пошкодження об'єкта. Це зазвичай рідкісні та погано передбачувані впливи, як правило, фізичного характеру, не пов'язані з періодом попередньої роботи. Як приклади впливів, що призводять до раптових відмов, можна привести такі, як грози, падіння дерев або потрапляння тварин на електроустановки, ожеледиця та ін. Ця група причин призводить до незворотних змін властивостей об'єкта. До другої групи зовнішніх причин можна віднести обурення, що призводять до зміни режимних параметрів об'єкта, внаслідок чого вони виходять із допустимих меж.

Відмови цього виду можуть бути нестійкими (збоями) чи стійкими. Зазвичай вони мають досить обґрунтовані статистичні характеристики та не є унікальними. Після зняття впливу, що призвело до нестійкої відмови, зазвичай значення параметрів об'єкта входять у допустимі межі і він продовжує виконувати свої функції. Прикладом нестійкої відмови може бути коротке замикання (КЗ) на ЛЕП, що самоусувається за період паузи АПВ лінії. У разі стійкої відмови (наприклад, КЗ на ЛЕП з її відключенням за відсутності АПВ) можуть знадобитися додаткові дії щодо повернення об'єкта в нормальний працездатний стан (включення ЛЕП у роботу вручну), що призвело до нестійкої відмови, зазвичай значення параметрів об'єкта входять у допустимі межі і він продовжує виконувати свої функції. Прикладом нестійкої відмови може бути коротке замикання (КЗ) на ЛЕП, що самоусувається за період паузи АПВ лінії. У разі стійкої відмови (наприклад, КЗ на ЛЕП з її відключенням за відсутності АПВ) можуть знадобитися додаткові дії щодо повернення об'єкта в нормальний працездатний стан (включення ЛЕП у роботу вручну), що призвело до нестійкої відмови, зазвичай значення параметрів об'єкта входять у допустимі межі і він продовжує виконувати свої функції. Прикладом нестійкої відмови може бути коротке замикання (КЗ) на ЛЕП, що самоусувається за період паузи АПВ лінії. У разі стійкої відмови (наприклад, КЗ на ЛЕП з її відключенням за відсутності АПВ) можуть знадобитися додаткові дії щодо повернення об'єкта в нормальний працездатний стан (включення ЛЕП у роботу вручну).

За характером причин відмови, як правило, відрізняються випадковістю або невизначеністю моменту настання відмови, за винятком тих випадків, коли в результаті накопичення факторів, що може призвести до відмови, роблять навмисне відключення об'єкта заздалегідь, не чекаючи його природної відмови, з метою виведення його в ремонт.

У разі накопичення факторів старіння об'єкта може досягти так званого граничного стану. Зазвичай відмови, пов'язані з досягненням граничних станів, є поступовими, що дозволяють заздалегідь передбачити момент переходу межі області допустимих значень режимних параметрів.

У цілому нині можливість настання відмов об'єкта багато в чому залежить від умов, у яких працює. З цих позицій самі умови можуть бути класифіковані як мінімум на дві множини: звичайні, чи ординарні, і незвичайні, чи неординарні, особливі, форсмажорні.

Після відмови в результаті процесів, що організуються і протікають в об'єкті, можливий настання події, коли всі значення

режимних параметрів, що характеризують його стан, знову опиняться в допустимій з позицій подальшого функціонування області. Кажуть, відбулося відновлення, яке можливе за рахунок як певних впливів, що управляють, так і виконання ремонтів пошкодженого обладнання. Якщо відновлення об'єкта з тих чи інших причин не відбувається, об'єкт називають невідновлюваним.

Відновлення може бути повним чи частковим. Функціонування об'єкта, що відновлюється, на деякому інтервалі часу T може бути представлено потоком відмов і відновлень. При цьому можуть бути потоки з повними або частковими (з різним ступенем працездатності) відмовами, з повним чи частковим відновленням тощо.

Із загального потоку можна назвати лише потік відмов, виключивши на осі часу всі інтервали відновлень (чи непрацездатного стану). Тоді на цій осі відкладатиметься чистий час працездатного стану об'єкта за даний час T , який називають напрацюванням $t_n(t)$. Аналогічно можна із загального потоку виділити лише потік відновлень.

3.2 Надійність як комплексна властивість

Як зазначалося, термін надійність давно і широко застосовується людиною, проте наукове його осмислення як поняття почалося порівняно недавно, кілька десятиліть тому. Це було з появою потреби створення не просто машин, техніки, а ефективної техніки. Виділений суттєвий процес в об'єктах – потік відмов та відновлення – виявився недостатнім. Виникла потреба пов'язати його з ефективністю роботи об'єкта.

І тому знадобилося запровадження сучасного поняття «надійність» як елемента загального поняття «ефективність». Призначенням його стало пов'язати потік відмов та відновлення з виконуваними об'єктом функціями з позицій суттєвості цієї зв'язки для ефективності використання об'єкта. У результаті сьогодні надійність – це властивість об'єкта виконувати у часі задані функції у заданому обсязі за певних умов експлуатації.

У цьому формулюванні відбито головна суть поняття надійності. По-перше, це властивість об'єкта, по-друге, про надійність можна говорити, якщо визначено або обумовлено: 1) функції об'єкта, 2) обсяг цих функцій, 3) умови, в яких знаходиться об'єкт. Відсутність хоча б однієї з цих умов робить невизначеними будь-які міркування щодо надійності.

Якщо, наприклад, підприємство уклало з енергопостачальною організацією договір на постачання електроенергії, це лише позначення

функції – постачання електроенергії. Вона може здійснюватися у будь-якому розмірі, що буде виконанням заданої функції. При постачанні менше необхідної кількості (у тому числі і нульового) претензій щодо ненадійності не може бути. Для їх появи в договорі необхідно відобразити обсяг електроенергії, що поставляється, графік поставки і т.д.

Але цього недостатньо для пред'явлення вимог щодо надійності. Якщо не вказані умови поставки, наприклад форма та термін оплати, необхідні параметри якості електроенергії тощо, то і тут немає можливості пред'явити претензії щодо надійності.

Таке розуміння надійності показує, що є досить складним властивістю. Тому його можна у вигляді системи простіших властивостей. Це уявлення необхідне як більш конструктивного його вивчення, так забезпечення надійності при створенні та функціонуванні тих чи інших об'єктів і систем.

При вирішенні багатьох завдань у системах електропостачання доводиться мати справу не тільки з технічними виробами та об'єктами, але і з більш складними людино-машинними об'єктами, системами, що мають набагато більшу різноманітність істотних властивостей, ніж просто виріб і навіть технічний об'єкт. Тому важливо перерахувати, визначити окремі властивості надійності і структурувати їх, встановивши певні відносини та зв'язки між ними.

Структуризацію складного властивості надійності можна здійснити з урахуванням класифікації окремих більш простих властивостей з певних підстав. Як такі підстави доцільно вибрати надійнісні процеси в об'єктах та умови їх функціонування. Розглянемо спочатку класифікацію за процесами.

З рис. 3.3 видно, що загальний процес функціонування об'єкта характеризується двома періодами, що чергуються – працездатним і непрацездатним (періодом відновлення працездатності). Тому виділимо дві простіші властивості надійності першого рівня: безвідмовність і відновлюваність.

Безвідмовність – властивість об'єкта безперервно зберігати працездатність протягом заданого часу або заданого напрацювання.

Відновлюваність – властивість об'єкта бути пристосованим до попередження та виявлення причин виникнення відмов та їх усунення.

Відмовлення та відновлення можуть мати різні причини та різний характер. Так, відмова об'єкта може бути пов'язаний із втратою рівня його працездатності, а може – із втратою стійкості або з розвитком аварійного процесу. Відповідно, і відновлення після таких відмов відбувається по-різному. Тому при втраті стійкості та відновлення

системи та режиму після неї говорять про властивість стійкості, а у разі розвитку аварійного процесу та відновлення після нього – про властивість живучості.

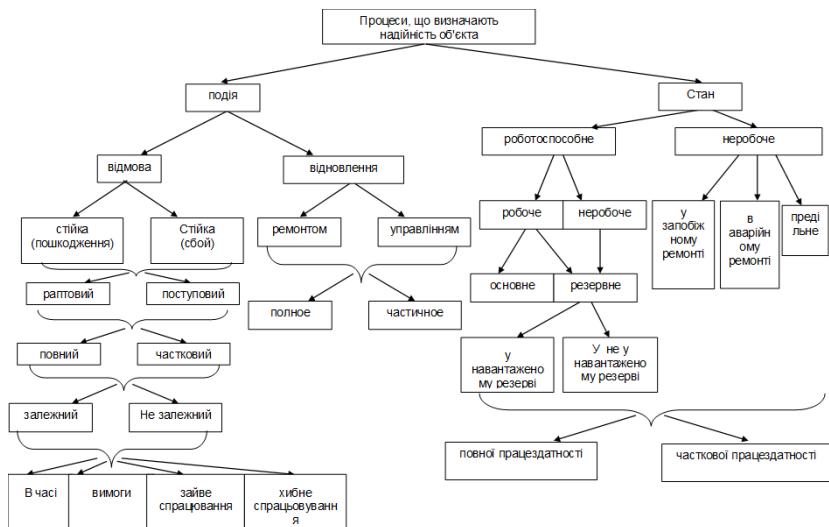


Рисунок 3.3 – Процеси, що визначають надійність об'єкта

Готовність – властивість об'єкта задовольняти вимоги споживачів у межах заданих значень та обмежень на постачання електроенергії з урахуванням запланованих та незапланованих перерв у роботі його елементів та експлуатаційних обмежень.

Стійкість – властивість об'єкта безперервно зберігати працездатність (стійкість до збурень) протягом заданого часу або заданого напрацювання до виходу значень параметрів за допустиму область без пошкодження об'єкта та відновлювати до аварійний режим або близький до нього.

Живість – властивість об'єкта (системи) протистояти обуренням, не допускаючи їх каскадного розвитку з масовими порушеннями харчування споживачів, та відновлювати до аварійний режим або близький до нього.

При відмовах та відновлення, особливо пов'язаних зі стійкістю та живучістю об'єкта, важливе значення має властивість керованості.

Керованість – властивість об'єкта, що полягає у пристосованості до попередження та виявлення виходу значень

параметрів режиму за допустимою областю та повернення їх у цю область засобами управління.

Таким чином, безвідмовність пов'язана з відмовами працездатності, або з відмовами щодо стійкості (порушеннями стійкості), або з відмовами по живучості (каскадним розвитком аварії).

Відновлюваність можна уявити, як мінімум, двома більш простими: ремонтпридатність та керованість.

Ремонтпридатність – властивість об'єкта, що полягає у пристосованості до попередження та виявлення причин виникнення ушкоджень та відновлення працездатного стану шляхом проведення технічного обслуговування та ремонтів.

Керованість вже визначена.

Перейдемо тепер до класифікації властивостей надійності за умовами функціонування об'єктів. Тут весь спектр умов можна розділити, як мінімум, на три частини: звичайні чи ординарні, особливі чи неординарні, спеціальні умови зберігання та транспортування об'єкта.

Звичайні чи ординарні умови визначаються щоденно, щотижня, щомісяця, кліматичними, техногенними та іншими впливами, що обумовлюються об'єктом, характерними режимами його завантаження.

Особливі чи неординарні умови з'являються значно рідше за перші і зумовлюються ураганами, землетрусами, військовими діями та іншими катаклізмами, при яких на об'єкт діють значні обурення і на які він, як правило, не розраховувався. Для систем електропостачання до таких неординарних впливів відносяться і системні аварії, що відбуваються, наприклад, при різкому зниженні частоти і приводять до масового відключення споживачів дією АЧР, з можливістю лавини напруги і т.п. Неординарні умови пов'язані з живучістю системи електропостачання.

У певному плані при таких неординарних обуреннях має сенс говорити про граничний стан системи електропостачання в цілому, який визначається можливостями утримати параметри режиму в допустимій області і зберегти електропостачання найбільш відповідальних споживачів.

Специфічні умови зберігання та транспортування створюють специфіку для прояву властивостей об'єкта та пов'язані з збереженням.

Збереженість – властивість об'єкта зберігати свої функції безвідмовності та відновлюваності протягом та після зберігання та (або) транспортування.

При розгляді часу життя об'єкта зазвичай говорять про його довговічність.

Довговічність – властивість об'єкта зберігати працездатність протягом заданого часу або заданого напрацювання до граничного стану з необхідними перервами для технічного обслуговування та ремонтів.

Для систем електропостачання як специфічних об'єктів енергетики з урахуванням їхньої специфіки можливе виділення додаткових властивостей надійності. Один із аспектів – відображення виконуваних системами електропостачання функцій. Головна функція систем електропостачання – постачання споживачів електроенергією. Зазвичай надійність виконання цієї функції позначають як надійність електропостачання.

Надійність електропостачання – властивість надійності об'єкта електроенергетики щодо його функції електропостачання у заданому обсязі.

У спеціалістів електроенергетиків іноді зустрічаються терміни структурна надійність та режимна надійність. Перший термін позначає надійність за умов, коли обсяг виконуваних функцій не важливий. Тут область допустимих значень змінних стану містить лише структурні характеристики, а режимні параметри враховуються приблизно. Режимна надійність, навпаки, розглядає надійність лише області режимних параметрів, а значення структурних характеристик вважаються заданими і незмінними.

Можлива також класифікація властивостей надійності за тривалістю інтервалу T , у якому вона розглядається. У цьому сенсі можна говорити, наприклад, про довгострокову або стратегічну (рік і більше), короткострокову (місяць – добу), комутаційну (на інтервалі виконання комутаційних операцій у схемі) надійності тощо.

На рис. 3.4 наведено структуру понять, що відображають специфіку якості надійності систем електропостачання. Кожен елемент у цій структурі, своєю чергою, може бути представлений за необхідності системою понять, деталізуючих даних.

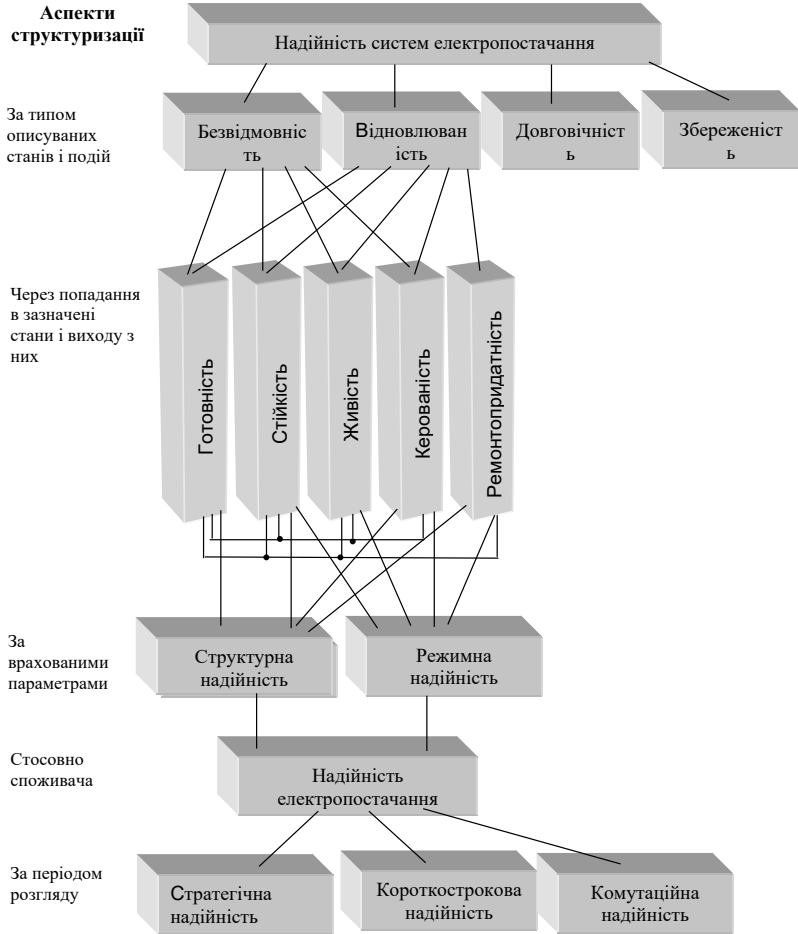


Рисунок 3.4 – Структура понять, що відображають специфіку якості надійності систем електропостачання

Контрольні запитання за лекцією 3

1. Дайте визначення безвідмовності.
2. Перелічте структурно-функціональні (умовні) показники безвідмовності
3. Поясніть оцінку збитків від ненадійності.

4. Яким чином здійснюється оцінка дефіциту потужності та недовідпустки електроенергії?
5. Дайте визначення середнього коефіцієнту готовності
6. Перелічте показники для звичайних ординарних умов.
7. Назвіть ймовірнісні (безумовні) показники відновлюваності.

ЛЕКЦІЯ 4 СИСТЕМА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

План

- 4.1. Показники безвідмовності
- 4.2 Показники відновлюваності
- 4.3. Комплексні показники

4.1 Показники безвідмовності

Надійні властивості об'єкта можуть оцінюватись різними показниками. Як і комплексне властивість надійності, систему показників надійності об'єкта доцільно структурувати і співвіднести кожен із показників з властивістю надійності, що оцінюється. Почати вимір властивостей надійності за допомогою показників доцільно з безвідмовності та відновлюваності. Зазвичай показники цих властивостей називаються одиничними, а побудовані їх основи – комплексними.

Визначати показники надійності має сенс у два етапи. На першому описуються цікаві для нас стани (працездатні, непрацездатні) і події (відмови, відновлення) об'єкта в залежності від його режимних параметрів (змінних стану), рівня виконуваних функцій. Назвемо ці показники структурно-функціональними (умовними). На другому етапі ці умови пов'язуються з деякими закономірностями їх появи, наприклад з ймовірностями наступу. Будемо називати ці безумовні показники імовірнісними, хоча можуть бути інші, неймовірні закономірності появи подій (відмови, відновлення), наприклад при аналізі живучості. Але це властивість значною мірою описується вже на структурно-функціональному (умовному) рівні.

Структурно-функціональні (умовні) показники безвідмовності

Зазначалося, що об'єкт перебуває у працездатному стані, якщо значення його змінних стану (параметрів режиму) $x(t)$ лежать усередині області допустимих значень $D(x, t) = 0$.

Для характеристики стану об'єкта введемо величину $z(t)$. Розглянемо спочатку об'єкт, що має два стани: працездатний, в якому в момент t величина $z(t) = 1$; непрацездатне $-z(t) = 0$. Тоді:

$$\begin{aligned} z(t) = z(x, t) = 1, \text{ якщо } D(x, t) < 0, \\ z(t) = z(x, t) = 0, \text{ якщо } D(x, t) \geq 0. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Крім того, об'єкт може перебувати в тому чи іншому стані протягом деякого інтервалу часу (t_1, t_2) , наприклад:

$$\begin{aligned} z(t) &= 1 \text{ при } t_1 \leq t \leq t_2, \\ z(t) &= 0 \text{ при } t_1 > t > t_2. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Умови (4.1), (4.2) зазвичай визначаються під час проєктування та виготовлення об'єкта. Вони виражаються у вигляді різних вимог: зовнішніх (кліматичних тощо), режиму використання, зберігання, транспортування, періодичності та обсягу ремонтів тощо. За виконання всіх цих вимог гарантується виконання (4.1), (4.2).

У загальному випадку об'єкти можуть мати декілька (L) різних рівнів якості функціонування, рівнів працездатності. Величина z прийматиме L значень. Значення $z = 0$ – стан повної відмови. Інші стани зазвичай нумеруються так, що більшому значенню z відповідає більш високий рівень працездатності. У цьому випадку перебування об'єкта у працездатному стані ℓ або умова працездатності об'єкта на ℓ -му рівні буде:

$$z(t) = \ell. \quad (4.3)$$

Показником безвідмовності об'єкта на рівні працездатності не нижче ℓ буде умова збереження працездатного стану об'єкта на ℓ -м рівні та вище ($1 \leq \ell \leq L$) на інтервалі часу (t_1, t_2)

$$z_\ell(t) \geq \ell \text{ при } t_1 \leq t \leq t_2 \text{ и } 1 \leq \ell \leq L. \quad (4.4)$$

Ймовірнісні (безумовні) показники безвідмовності

Зазначена гарантія виконання умов (4.1) – (4.4) зазвичай не є абсолютною. У багатьох випадках через велику кількість факторів, що впливають, вона носить ймовірнісний характер при нормальних (ординарних) умовах експлуатації об'єкта. Це й визначило використання ймовірнісних методів опису надійності.

У далеких від простих умовах вироджується ймовірнісна природа причин відмови тим більшою мірою, що далі ця віддаленість. Тому в неординарних (особливих) умовах ймовірнісний опис безвідмовності стає, як правило, неприйнятним. Тут безумовний показник безвідмовності являє собою сукупність значень показника, наприклад (4.4), та опис умов, у яких (4.4) виконується або не виконується. Зазвичай цей опис задається як сценаріїв, мінімаксних умов тощо.

Ймовірнісні показники зручно починати вивчати з показників об'єктів, що не відновлюються, які можуть перебувати лише в двох станах.

Невідновлюваний об'єкт.

Один з ймовірнісних показників надійності цього об'єкта – ймовірність того, що час його роботи вщент t_0 буде не менше заданого часу t або ймовірність безвідмовної роботи за час t

$$P\{z(t) = 1 \text{ при } 0 \leq t \leq t_0\} = P(t \leq t_0) = p(t). \quad (4.5)$$

Ймовірність того, що за час t об'єкт відмовить, визначиться як

$$q(t) = 1 - p(t). \quad (4.6)$$

Характерні залежності $p(t)$ і $q(t)$ представлені на рис. 4.1.

Часто використовується інший показник – інтенсивність відмови, яка є умовною щільністю ймовірності виникнення відмови, яка визначається для аналізованого моменту часу за умови, що до цього моменту відмова не виникла (позначимо цю ймовірність як $q(t, t + \Delta t | \xi > t)$). Тоді інтенсивність відмови буде

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q\{t, t + \Delta t | \xi > t\}}{\Delta t},$$

де $Q\{t, t + \Delta t | \xi > t\} = q(t, t + \Delta t) / p(t)$.

З урахуванням останнього співвідношення

$$\lambda(t) = \frac{1}{p(t)} dq(t) / dt. \quad (4.7)$$

Є залежність між показниками $p(t)$ і $\lambda(t)$, а саме

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (4.8)$$

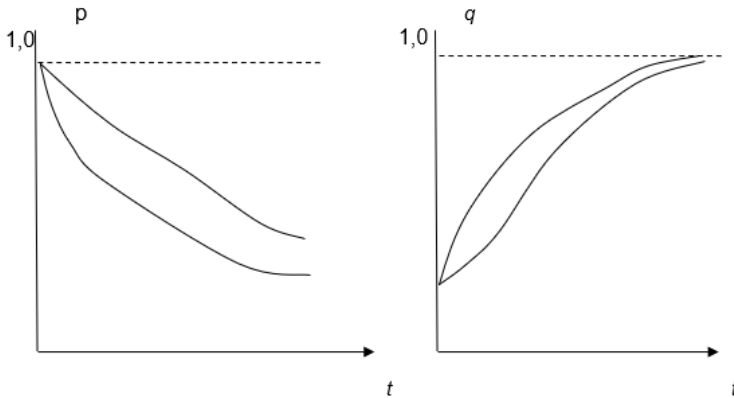


Рисунок 4.1 – Характерні залежності $p(t)$ і $q(t)$

Можливість безвідмовної роботи об'єкта на інтервалі $[t_1, t_2]$ якщо він пропрацював справно на інтервалі $[0, t_1]$, дорівнює $p(t_2/t_1)$. Цю можливість можна знайти з умови, що об'єкт не відмовить на інтервалі $[0, t_2]$ тільки в тому випадку, якщо він не відмовить на інтервалі $[0, t_1]$, а потім і на інтервалі $[t_1, t_2]$. Іншими словами, перша подія є твір двох інших. Тоді на підставі теореми множення ймовірностей маємо:

$$p(t_2/t_1) = p(t_2) / p(t_1) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt}. \quad (4.9)$$

Середнє напрацювання до відмови математичним очікуванням напрацювання об'єкта щент:

$$\bar{t}_0 = \int_0^{\infty} T p(t) dt, \quad (4.10)$$

тобто, графічно пропорційна площі, що лежить під графіком функції $p(t)$.

Середня тривалість безвідмовної роботи об'єкта, що справно пропрацював термін t_1 , дорівнює

$$\bar{t}_0(t_1) = M[t_0 - t_1] = \frac{1}{p(t_1)} \int_{t_1}^{\infty} p(t) dt, \quad (4.11)$$

де M – символ математичного очікування випадкової величини.

Часто великий практичний інтерес є випадком, коли інтенсивність відмови може вважатися постійною величиною

$$\lambda = \text{const}. \quad (4.12)$$

Це притаманно вже освоєного устаткування під час нормальної експлуатації (див. рис. 2). Тоді всі показники суттєво спрощуються і набувають вигляду

$$\left. \begin{aligned} p(t) &= e^{-\lambda t}, & q(t) &= 1 - e^{-\lambda t}, \\ p(t_2 / t_1) &= e^{-\lambda(t_2 - t_1)} = e^{-\lambda \Delta t} = p(\Delta t), \\ \bar{t}_0 &= \bar{t}(t_1) = 1 / \lambda. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Відновлюваний об'єкт. Для представлення його показників виділимо із загального потоку відмов та відновлення потік відмов (рис. 4.2). При цьому на осі часу відкладатиметься лише сумарний час працездатного стану об'єкта t_{Σ} – Сумарне напрацювання. Для такого об'єкта на кожному k -му циклі його роботи після відновлення будуть справедливі розглянуті показники об'єкта, що не відновлюється, які в загальному випадку різні для кожного циклу

$$p(t_k), q(t_k), \lambda(t_k), t_k, \dots,$$

де t_k – час від початку k -го циклу. Часто у практичних завданнях вважають, що ці показники ідентичні кожному за цикл.

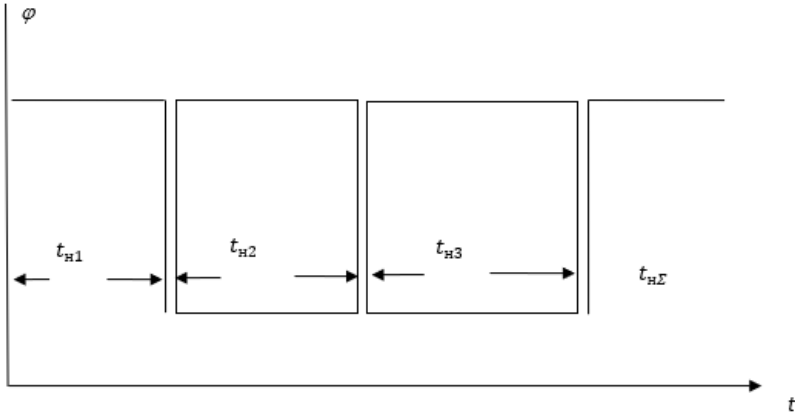


Рисунок 4.2 – Потоки відмов та відновлення

Як точкову характеристику потоку відмов можна використовувати параметр потоку відмов у вигляді

$$\omega(t_{н\Sigma}) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - p(t_{н\Sigma}, t_{н\Sigma} + \Delta t)}{\Delta t}, \quad (4.14)$$

де $p(t_{н\Sigma}, t_{н\Sigma} + \Delta t)$ – можливість безвідмовної роботи на інтервалі часу Δt після $t_{н\Sigma}$. Середній параметр потоку відмов або частота відмов на інтервалі $\{t_{н\Sigma1}, t_{н\Sigma2}\}$ визначається як

$$\omega(t_{н\Sigma1}, t_{н\Sigma2}) = \{\bar{\Omega}(t_{н\Sigma2}) - \bar{\Omega}(t_{н\Sigma1})\} / (t_{н\Sigma1}, t_{н\Sigma2}). \quad (4.15)$$

де $\bar{\Omega}(t_{н\Sigma1}, t_{н\Sigma2})$ – математичне очікування кількості відмов за сумарне напрацювання $t_{н\Sigma k}$.

Ще один найважливіший практичний показник – середнє напрацювання на відмову:

$$\frac{\bar{t}_{н\Sigma}}{\bar{\Omega}(t_{н\Sigma})}. \quad (4.16)$$

Визначення наведених показників суттєво залежить від характеру потоку відмов. Розрізняють потоки:

– *ординарні*, якщо ймовірність появи двох і більше відмов за проміжок часу прагне нуля, коли тривалість цього проміжку часу прагне нуля;

– *стаціонарні*, якщо ймовірність появи K відмов на відріжку часу $(t, t + \Delta t)$ залежить тільки від Δt і залежить від t (від передісторії);

– без післядії, якщо на будь-яких інтервалах часу, що не перетинаються, кількість подій, що з’являються в одному з них, не залежить від числа подій, що з’являються в інших.

Ординарні потоки без післядії називаються пуасонівськими. Вони можуть бути стаціонарними та нестаціонарними. Стаціонарний пуасонівський потік є найпростішим.

Потік відмов об’єкта, що відновлюється, є ординарним, так як друга відмова може відбутися тільки після відновлення. Часто може покладатися потоком і наслідки, тобто. пуасонівським. Якщо він ще й стаціонарний, тобто. найпростіший, то для нього маємо

$$\left. \begin{aligned} \lambda(t_k) &= \lambda = \text{const}, p(t_k) = p(t) = e^{-\lambda t}, \\ q(t_k) &= q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \bar{\Omega}(t) = \lambda t, \\ \omega(t_{н\Sigma 1}, t_{н\Sigma 2}) &= \omega = \lambda, \bar{t}_{н\Sigma} = \bar{t}_0. \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

Для якості довговічності багато хто з розглянутих показників мають свої назви. Наприклад, потоком відмов є потік виведення об’єкта різного роду попереджувальні ремонти (середні, капітальні); остання відмова – досягнення кінцевого граничного стану. Для цієї властивості всі показники, що характеризують різні напрацювання, позначаються терміном «ресурс» з відповідним визначенням, що його конкретизує.

Технічний ресурс – напрацювання об’єкта від початку його експлуатації до досягнення граничного стану або капітального (середнього) ремонту, від початку експлуатації після ремонту (середнього, капітального) до наступного ремонту або досягнення граничного стану. Зазвичай вказується, який саме технічний ресурс мається на увазі: середнього, капітального, від капітального до найближчого середнього ремонту тощо.

Гамма-відсотковий ресурс – напрацювання, протягом якого об’єкт не досягає граничного стану із заданою ймовірністю.

Середній ресурс – математичне очікування технічного ресурсу.

Призначений ресурс – сумарне напрацювання об’єкта, при досягненні якого експлуатація має бути припинена незалежно від його стану.

По суті показники безвідмовності характеризуються або ймовірністю (частотою) настання відмови, або еквівалентним цій частоті інтервалом часу вщент (або від відновлення вщент).

4.2 Показники відновлюваності

Структурно-функціональні (умовні) показники відновлюваності

Для дворівневого випадку відмов-відновлень умову відновлюваності (точніше, невідновлюваності) можна записати, що за час t не менше часу t_B , не відбудеться відновлення об'єкта:

$$z(t) = 0 \text{ при } 0 \leq t \leq t_B. \quad (4.18)$$

Якщо об'єкт має багато рівнів працездатності, ступенів виконання функцій L , умова невідновлюваності об'єкта з рівня ℓ за заданий час t не більше часу відновлення t_B :

$$z(t) = \ell \text{ при } 0 \leq t \leq t_B. \quad (4.19)$$

Ймовірнісні (безумовні) показники відновлюваності

У звичайних (ординарних) умовах час відновлення t_B , як правило, є випадковою величиною, тому досить повно характеризується законами розподілу ймовірностей часу відновлення після кожної k -ї відмови

$$P \{t_{Bk} < t_k\} = g_k(t_k), \quad (4.20)$$

де t_k – зазначений час, що відрховується з моменту k -ї відмови.

Аналогічно безвідмовності Якість відновлюваності можна охарактеризувати інтенсивністю відновлення

$$\mu_k(t_k) = \frac{1}{1-g_k(t_k)} \frac{dg_k(t_k)}{dt}. \quad (4.21)$$

Також може бути записане співвідношення

$$g_k(t_k) = 1 - e^{-\int_0^{t_k} \mu_k(t_k) dt_k}. \quad (4.22)$$

Інтегральний показник – середній час відновлення після k -го відмови

$$\bar{t}_{Bk} = \int_0^{\infty} t_k \frac{dg_k(t)}{dt} dt = \int_0^{\infty} t_k dg_k(t). \quad (4.23)$$

Наведені показники записані у досить загальному вигляді та можуть характеризувати будь-які види відновлення. Водночас для електроенергетичних об'єктів слід детальніше розглянути найбільш характерні види відновлень: ремонти та управління. При цьому клас ремонтів також підрозділяється, як мінімум, на два підкласи, що досить різняться: аварійні (або позапланові) і попереджувальні (планові). Час аварійного відновлення працездатності складається з часу виявлення місця ушкодження та часу усунення несправності (ремонту), а також, можливо, часу ймовірного очікування готовності ремонтної бригади до виконання даної роботи. Обидві ці складові залежить від багатьох випадкових чинників. Наприклад, час виявлення пошкодження повітряної ЛЕП та доставки на місце пошкодження ремонтної бригади визначається характером пошкодження, його місцем на лінії, часом доби та станом погоди, укомплектованістю на даний момент бригади

тощо; час ремонту – складністю ушкодження. Всі ці випадкові фактори визначають ймовірнісний характер величини $t_{вк}$. Теорія і досвід показують, що розподіл ймовірності часу аварійного відновлення добре описується експоненційним законом, тобто:

$$\mu_k = \text{const},$$

$$g_{авк}(t_k) = 1 - e^{-\mu_k(t_k)}, \quad (4.24)$$

$$\bar{t}_{вк} = 1/\mu_k. \quad (4.25)$$

Понад те, часто допустимо приймати однакові закони після кожного ушкодження, тобто

$$\mu_k = \mu = \text{const}. \quad (4.26)$$

Попереджувальні (планові) ремонти, у свою чергу, мають різновиди: поточні, капітальні та різні види ремонтів, що займають проміжні положення (розширені, середні та ін.). Відмінна риса всіх їх полягає в тому, що момент наступу таких ремонтів не випадковий, а намічається із заданою завчасністю; тривалість ремонтного стану визначається також цілком відомим переліком робіт. Проте вважати характеристики запобіжних ремонтів суворо детермінованими не можна. Зазвичай момент виведення ремонт може змінюватися залежно від багатьох чинників. Наприклад, виведення в запобіжний ремонт однієї з двох ЛЕП, що живлять, буде відкладено, якщо друга лінія опинилася в цей час в аварійному ремонті. З іншого боку, тривалість попереджувальних ремонтів величина нестійка. Дія таких факторів, як вдосконалення техніки проведення ремонтів, укомплектованість ремонтним персоналом та її кваліфікація, попередній режим роботи устаткування й інших, у результаті призводить до того, що час запобіжного ремонту доводиться розглядати як випадкову величину. Безліч перелічених чинників визначає з урахуванням граничної теореми Ляпунова нормальний закон розподілу цього часу, що добре підтверджується і статистикою (рис. 4.3).

Таким чином, для характеристики тривалості попереджувальних ремонтів може бути введена величина $g_n(t)$, аналогічна $g_{ав}(t)$, що являє собою ймовірність того, що час попереджувального ремонту виявиться менше заданого t :

$$g_n(t) = P(t_n < t). \quad (4.27)$$

Насправді часто використовується середнє значення часу попереджувального ремонту

$$\bar{t}_n = \int_0^\infty t \frac{dg_n(t)}{dt} dt = \int_0^\infty dg(t). \quad (4.28)$$

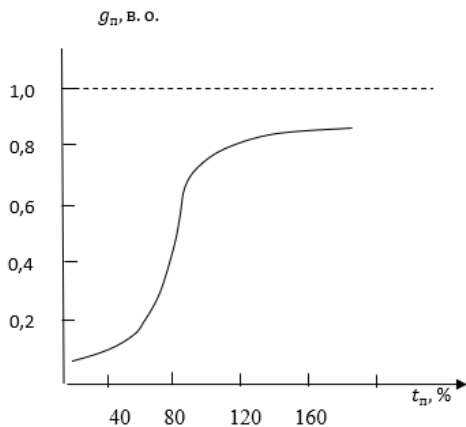


Рисунок 4.3 – Розподіл показників

Аналогічні показники має відновлення шляхом управління – керуваності.

У неординарних (особливих) умовах слід очікувати, що час відновлення теж матиме випадковий характер. Однак, на відміну від ординарних умов, середній час відновлення тут може суттєво залежати від виду відмови та глибини пошкодження

4.3 Комплексні показники

Абстрактний об'єкт

Розглянемо показники переважно для звичайних ординарних умов, тобто, при ймовірнісному описі потоку відмов та відновлення.

Виділимо спочатку потік непередбачених відключень (відмов) та відновлення. Для такого потоку найбільш уживані нестационарний, стационарний та середній коефіцієнти готовності.

Нестационарний коефіцієнт готовності – ймовірність того, що об'єкт виявиться працездатним у заданий момент часу t , що відраховується від початку роботи, для якого відомий початковий стан цього об'єкта $z_{нач}$:

$$k_r(t) = P \{z(t) = 1\} \text{ при } z(0) = z_{нач}. \quad (4.29)$$

Коефіцієнт готовності (стационарний) – ймовірність того, що відновлюваний об'єкт виявиться працездатним у довільно обраний момент часу в процесі експлуатації

$$k_r = \lim_{t \rightarrow \infty} k_r(t). \quad (4.30)$$

Середній коефіцієнт готовності – усереднений на заданому інтервалі часу $[t_1, t_2]$ значення нестационарного коефіцієнта готовності

$$k_r(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} k_r(x) dx. \quad (4.31)$$

Величини, що доповнюють усі розглянуті коефіцієнти готовності до одиниці, називаються коефіцієнтами неготовності k_{nr} .

Нестационарний коефіцієнт оперативної готовності – ймовірність того, що об'єкт, перебуваючи в режимі очікування, виявиться працездатним в заданий момент часу t , що відраховується від початку роботи, і буде працювати безвідмовно протягом заданого інтервалу часу Δt :

$$k_{or}(t, \Delta t) = k_r(t) p(t, \Delta t). \quad (4.32)$$

Коефіцієнт оперативної готовності (стаціонарний) – ймовірність того, що об'єкт, що відновлюється, виявиться працездатним у довільний віддалений момент часу і буде працювати безвідмовно протягом заданого інтервалу часу Δt :

$$k_{or} = k_r p(t, \Delta t). \quad (4.33)$$

Середній коефіцієнт оперативної готовності – усереднений на заданому інтервалі часу $[t_1, t_2]$ значення нестационарного коефіцієнта оперативної готовності

$$k_{or}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} k_{or}(x) dx. \quad (4.34)$$

Статистично коефіцієнт готовності – це частка часу, протягом якого об'єкт перебуває у працездатному стані за умови, що час спостереження дуже великий:

$$k_r = \bar{t}_0 / (\bar{t}_0 + \bar{t}_b), \quad (4.35)$$

де \bar{t}_0 – час, протягом якого об'єкт перебуває у працездатному стані,

\bar{t}_b – час відновлення об'єкта.

Відповідно коефіцієнт неготовності:

$$k_{nr} = \bar{t}_b / (\bar{t}_0 + \bar{t}_b). \quad (4.36)$$

З урахуванням останнього співвідношення (4.31) і співвідношення (4.36) можна також записати

$$k_r = \mu / (\mu + \lambda), \quad (4.37)$$

$$k_{nr} = \lambda / (\mu + \lambda). \quad (4.38)$$

Якщо \bar{t}_b вимірюється в частках року, тоді ця величина набагато менша за одиницю, так само. Тоді на основі (4.38) з урахуванням (4.25) матимемо

$$k_{nr} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{\lambda}{\lambda + 1/\bar{t}_b} = \frac{\lambda \bar{t}_b}{\lambda \bar{t}_b + 1} \approx \lambda \bar{t}_b, \quad (4.39)$$

Оскільки $\lambda \bar{t}_b + 1 \approx 1$. Зазначимо також, що k_{nr} при цьому визначає відносну тривалість (у частках аналізованого періоду, в даному випадку року) та одночасно ймовірність відповідного аварійного стану об'єкта.

Реальні потоки відмов (відключень) та відновлення складніше розглянутого дворівневого потоку. Як мінімум, у нього вклинюються потік планових (навмисних) відключень об'єкта та проведення планових ремонтів.

Основним показником, що застосовується при такому потоці є коефіцієнт технічного використання – відношення середнього напрацювання об'єкта за деякий період експлуатації $\bar{t}_{н\sigma}$ до суми середніх значень напрацювання, часу простою, обумовленого технічним обслуговуванням, та часу ремонтів за той же період експлуатації (планових $\bar{t}_{п\sigma}$ та аварійних $\bar{t}_{ав\sigma}$):

$$k_{тн} = \frac{\bar{t}_{н\sigma}}{\bar{t}_{н\sigma} + \bar{t}_{п\sigma} + \bar{t}_{ав\sigma}}. \quad (4.40)$$

У практиці часто використовується також показник, аналогічний стаціонарному коефіцієнту готовності, але відбиває відносний час перебування об'єкта над стані аварійного ремонту, а стані планового ремонту – коефіцієнт планових простоїв

$$k_{пл} = \frac{\bar{t}_{п\sigma}}{\bar{t}_{н\sigma} + \bar{t}_{п\sigma} + \bar{t}_{ав\sigma}}. \quad (4.41)$$

Обидва останні показники характеризують відносну тривалість відповідних показників. За певних умов вони можуть трактуватися і як можливість знаходження об'єкта в цих станах.

Усі розглянуті показники визначалися з урахуванням аналізу потоку відмов та відновлення, розгорнутого на осі часу. Реально можуть бути випадки, коли той чи інший потік розгортається і на іншій осі (не тимчасової). Так, відмови комутаційної апаратури, релейного захисту та автоматики часто зручно розглядати на осі «вимог до спрацьовування». Тоді такий показник, як середня частота відмов, переходить у можливість відмови на вимогу (відмова / вимога). Напрацювання вимірюватиметься кількістю правильних спрацьовувань повністю і т.д.

4.4 Система електропостачання

Перехід від абстрактних об'єктів до аналізу систем електропостачання розширює коло показників надійності, форма і зміст яких визначаються завданнями, що вирішуються, і використовуваними критеріями ефективності. Однак, як правило, всі вони можуть бути сформовані на основі розглянутих загальних показників з доповненням специфіки систем електропостачання. Виняток можуть скласти лише три показники безперебійності електропостачання, що найчастіше використовуються: дефіцит потужності, невідпуск електроенергії та збитки.

Оцінка дефіциту потужності та невідпустки електроенергії. Розглянемо спочатку випадок, коли час відновлення

електропостачання t_b менше доби. Нехай відомий добовий графік навантаження споживача $P_H(t)$ (рис. 4.4).

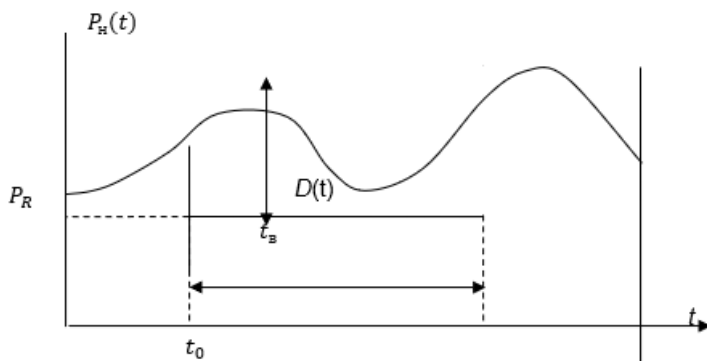


Рисунок 4.4 – Добовий графік навантаження споживача $P_H(t)$

Якщо відмова сталася у момент t_0 , а відновлення тривало t_b , виникає дефіцит $D(t)$:

$$D(t) = P_H(t) - P_R, \quad (4.42)$$

де P_R – резервувача (або збережена) потужність.

Недовипуск електроенергії визначиться як

$$\Delta E = \int D(t) dt \quad (4.43)$$

при $P_H(t) > P_R$, а при $P_H(t) \leq P_R$ $D(t) = 0$.

Оскільки момент виникнення відмови t_0 та час відновлення t_b – випадкові величини, значення дефіциту потужності $D(t)$ та недовипуск електроенергії ЕУ період спостереження на інтервалі від 0 до T також є випадковими величинами.

Якщо середня частота відмов за цей же період становить ΔE , то середня недовипуск електроенергії визначиться як

$$\Delta E_T = \Delta E \omega, \quad (4.44)$$

де ΔE_T – середнє значення недовипуску, причому

$$\Delta E = M(\Delta \tilde{E}), \quad (4.45)$$

$\Delta \tilde{E}$ – випадкова величина недовипуску електроенергії при одиничній відмові.

На основі недовідпустки електроенергії можна запровадити ще один показник – відносне задоволення споживача електроенергією

$$\pi = (E_T - \Delta E_T) / E_T, \quad (4.46)$$

де E_T – сумарна необхідна споживачами електроенергія у період від 0 до T .

Аналогічні визначення дефіциту потужності та недовідпустки електроенергії можна зробити і при розгляді тижневого, місячного, сезонного чи річного графіка навантаження.

Оцінка збитків від ненадійності. Цей параметр є найкомплекснішим показником надійності електропостачання. Він характеризує інтегрально всі властивості об'єкта, включаючи режим його завантаження та значущість споживача електроенергії. Зазвичай важливість кожного споживача характеризується величиною питомої шкоди, що виникає при обмеженні (відключенні) його в потужності та електроенергії, який у загальному випадку можна представити у вигляді двох складових: збитки через раптове відключення потужності ($y_{\text{вн}}$, грн/кВт·год) та через недовипуску електроенергії (y_0 , грн/кВт·год). З урахуванням цього шкода, що виникає, визначається як

$$Y_{\text{од}} = y_{\text{вн}}D + y_0\Delta E_{\text{T}}, \quad (4.47)$$

$$Y_{\text{T}} = y_{\text{вн}}D\omega T + y_0\Delta E_{\text{T}}, \quad (4.48)$$

де $D = M[\mathcal{D}(t)]$ на інтервалі від 0 до T ;

\mathcal{D} – випадкова величина дефіциту потужності.

Слід зазначити, що вибираючи показники надійності для практичного використання, необхідно мати на увазі деякі прості та досить очевидні рекомендації:

- загальна кількість показників надійності має бути по можливості мінімальною;
- слід уникати складних комплексних показників;
- обрані показники надійності повинні мати простий фізичний зміст;
- обрані показники надійності повинні допускати можливість проведення підтвердних (перевірочних) оцінок на етапі проектування (за допомогою аналітичних розрахунків, імітаційного моделювання тощо) та дослідної оцінки під час проведення спеціальних випробувань або за результатами експлуатації;
- обрані показники повинні дозволяти включати в критерії ефективності, за якими приймаються рішення про рівень надійності, допускати завдання норм надійності в кількісній формі.

Приклади

Задача 1. Коефіцієнт готовності об'єкта становить 0,95, часи до відмови та відновлення розподілені за експоненційними законами. Середній час відновлення об'єкта 48 год. Визначити ймовірність того, що об'єкт пропрацює без відмови протягом: а) місяця; б) півроку; в) року (до поточного ремонту); г) чотирьох років (до капітального ремонту).

Розв'язання.

$$k_r = \frac{\bar{t}_o}{(\bar{t}_o + \bar{t}_B)}$$

звідки середній час;

$$\bar{t}_o = \frac{k_r}{1 - k_r} \bar{t}_B = \frac{0,95}{1 - 0,95} 48 = 912 \text{ год.}$$

Інтенсивність відмови:

$$\lambda = \frac{1}{\bar{t}_o} = \frac{1}{912} = 0,0011 \frac{\text{відмова}}{\text{год}} = \frac{8760}{912} = 9,6 \frac{\text{відмова}}{\text{год}};$$

$$p(t) = e^{-\lambda t} = e^{-9,6t}.$$

Тоді

а) $p_{\text{місяця}} = e^{-9,6/12} = e^{-0,8} = 0,45;$

б) $p_{\text{півроку}} = e^{-9,6 \cdot 0,5} = e^{-4,8} = 0,0082;$

в) $p_{\text{року}} = e^{-9,6 \cdot 1} = e^{-9,6} = 0,000068;$

г) $p_{\text{чотирьох років}} = e^{-9,6 \cdot 4} = e^{-38,4} = 2 \cdot 10^{-17}.$

Як бачимо, об'єкт практично не зможе пропрацювати без відмови протягом року.

Задача 2. Добовий графік підприємства показано на рис. 4.5.

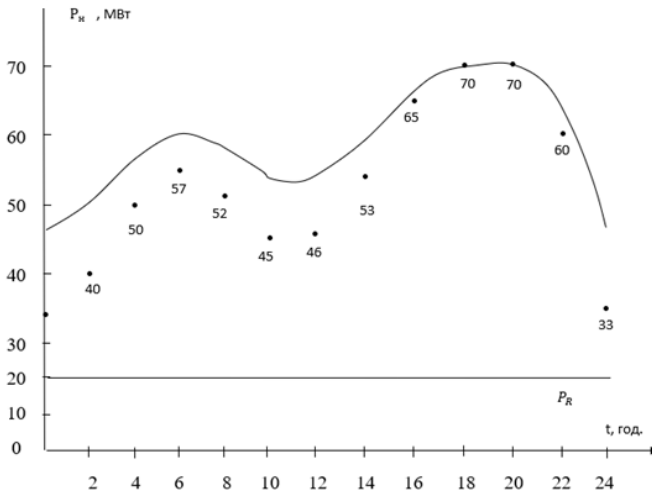


Рисунок 4.5 – Добовий графік підприємства

Розглянемо три ситуації:

а) обмеження потужності відбувалося з 22 до 2 год ночі (мінімально можлива недовідпустка);

б) обмеження потужності відбулося з 17 по 21 год вечора (максимально можлива недовідпустка);

в) обмеження потужності відбувалося за середнього навантаження споживача (середнє значення недоотпуска електроенергії).

$P_R = 20$ МВт – резервна потужність, що частково компенсує дефіцит потужності.

Розв'язання.

Для випадку в) визначимо середнє навантаження споживача, середня двогодинні інтервали:

$$\bar{P}_n = \frac{2}{24} \cdot (36,5 + 45 + 53,5 + 54,5 + 48,5 + 45,5 + 49,5 + 59 + 67,5 + 70 + 65 + 46,5) = 53$$

Середня недовідпустка електроенергії

$$\Delta E = \bar{P}_n - P_R = (53,4 - 20)4 = 133,6 \text{ МВт/год.}$$

Для випадків а) та б) були отримані значення

а) $\Delta E_{\min} = 88$ МВт/год;

б) $\Delta E_{\max} = 190$ МВт/год.

Як бачимо, середнє значення лежить посередині крайніх.

Контрольні запитання за лекцією 4

1. Дайте визначення безвідмовності.
2. Перелічте структурно-функціональні (умовні) показники безвідмовності
3. Поясніть оцінку збитків від ненадійності.
4. Яким чином здійснюється оцінка дефіциту потужності та недовідпустки електроенергії?
5. Дайте визначення середнього коефіцієнту готовності
6. Перелічте показники для звичайних ординарних умов.
7. Назвіть ймовірнісні (безумовні) показники відновлюваності.

ЛЕКЦІЯ 5 МЕТОДИ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК

План

5.1 Підготовка експертних оцінок.

5.2 Проведення експертних оцінок.

5.3 Методи обробки експертних оцінок.

5.1 Підготовка експертних оцінок

Іноді при прогнозуванні виникає ситуація, коли для розробки прогнозу недостатньо наявної інформації або взагалі відсутні дані про об'єкт прогнозування (наприклад, проєктовані об'єкти, які ще не функціонують). А виникає інколи ситуація, коли майбутню подію треба оцінити не кількісно, а якісно, наприклад: виявлення найбільш важливих факторів і взаємозв'язків, вибір з декількох варіантів рішень найбільш кращого й т.д.

У цих випадках доводиться звертатися до думки компетентних фахівців-експертів для одержання відсутньої інформації, а потім за допомогою спеціальних прийомів обробляти її та розробляти сам прогноз.

ЕКСПЕРТ – (латинське – досвідчений) – це фахівець у галузі науки, економіки та інших видах діяльності, запрошуваний для вирішення питань, що вимагають спеціальних знань або практичних навичок.

ЕКСПЕРТНА ГРУПА – колектив експертів, сформований за визначеними правилами для рішення поставленої задачі прогнозу.

При висловленні своєї думки експерт керується професійним досвідом і розвинений на його основі інтуїції.

Найбільше широко використовуються методи експертних оцінок у науково-технічному прогнозуванні. В економічному прогнозуванні ці методи використовують, як правило, не самостійно, а в сполученні з більше точними методами, а також при проведенні експертизи прогнозів, оцінки їхніх результатів.

У сучасний час, при переході до ринкових механізмів господарювання для підприємств збільшується обсяг рішень, прийнятих в умовах невизначеності й ризику. Це сприяє тому, що область використання методів експертних оцінок розширюється.

Цими методами вирішують такі завдання економічного прогнозування та планування:

– оцінка якості виготовляємої продукції, техніко-економічного рівня виробництва, коли експертам доводиться враховувати велику

кількість різноманітних факторів, що часто не підлягають приведенню до єдиного вимірника;

- визначення варіантів рішень конкретного завдання з оцінкою переваги кожного з варіантів;
- формування цілей і завдань планування по рівням управління з їхнім ранжируванням, тобто розміщенням за ступенем важливості;
- встановлення номенклатури робіт або продукції для досягнення певної мети при наявних обмеженнях на різні види ресурсів;
- розподіл різних видів ресурсів із установленням пріоритетності їхнього використання;
- оцінка ступеня впливу на досліджуваний об'єкт різних факторів і т.д.

Методи експертних оцінок використовують для аналізу об'єктів, розвиток яких або цілком, або частково не піддається математичній формалізації, а також при недостатній повноті інформації про об'єкт.

Методи експертних оцінок використовують для аналізу об'єктів і проблем, розвиток яких повністю або частково не піддається математичній формалізації, тобто для яких важко розробити адекватну модель. Це пояснюється:

- невизначеністю та складністю явищ, що прогнозуються;
- необхідністю кількісно оцінити події, для характеристики яких відсутня необхідна інформація і чітке знання тенденції розвитку ситуації;
- необхідністю враховувати не тільки об'єктивні тенденції розвитку ситуації, але й реакцію учасників подій на рішення, що приймається.

Типовими проблемами, які потребують проведення експертизи, є, наприклад:

- визначення мети розвитку об'єкта управління;
- прогнозування;
- розроблення сценаріїв;
- генерування альтернативних варіантів розв'язків;
- розроблення системи кількісних оцінок;
- визначення рейтингів тощо.

В управлінні виробництвом трапляються випадки, коли інформаційний масив надмірно обмежений або зовсім відсутній. А в деяких випадках статистичні дані неможливо отримати або для їх отримання потрібен значний час. Прийняти рішення в таких умовах, тобто в умовах невизначеності, коли та чи інша дія породжує багато можливих наслідків, причому ймовірності цих наслідків невідомі,

важко і ризиковано. Тому при недостатності чи взагалі відсутності інформації розробка прогнозу не тільки не виключається, але навпаки, стає особливо актуальною і практично важливою, тому що таким чином можна знизити рівень невизначеності та підвищити достовірність управлінських рішень. Особливо складні проблеми виникають, коли необхідно дати перспективні оцінки якісно новим процесам і явищам, які раніше не траплялись в суспільному житті і про які, природно, відсутня будь-яка інформація.

Можливість вирішення названих проблем, навіть в умовах відсутності теоретичних обґрунтувань, досягається за рахунок вмілого використання досвіду, інтуїції та знань спеціалістів, вчених, що працюють над розв'язанням відповідних проблем: науково-дослідні роботи, впровадження розробок та ін. Методи, які основані на припущенні про те, що на базі думок спеціалістів в певній галузі знань можна побудувати адекватну картину майбутнього розвитку з урахуванням всіх можливих зрушень та стрибків отримали назву методів експертизи або методів експертних оцінок.

Методи експертних оцінок в прогнозуванні використовуються в таких випадках:

- в умовах відсутності достатньої за обсягом та достовірної інформації про прогнозовані явища (процеси);
- в умовах значної невизначеності середовища, де функціонує об'єкт;
- в умовах дефіциту часу чи екстремальних ситуацій;
- при розробці середньо- та довгострокових прогнозів об'єктів, які підпадають під вплив корінних змін, наприклад, наукові відкриття.

5.2 Загальна характеристика методів

В основі використання експертних методів лежать глибокі знання спеціалістів та вміння узагальнити свій та світовий досвід досліджень та розробок по певній проблемі, гіпотеза про наявність у експерта так званої «практичної мудрості», далекоглядності, що стосується певної області знань і практичної діяльності, вміння, що приходить в процесі певних видів діяльності, оцінити достатньо достовірно важливість і значення напрямків дослідження, термінів прояву тієї чи іншої події, важливість того чи іншого параметру, процесу (явища) і т.д.

Існує дві групи методів експертних оцінок:

- методи індивідуальних експертних оцінок;
- методи колективних експертних оцінок.

До індивідуальних відносять: метод інтерв'ю, аналітичний метод, метод побудови сценаріїв, метод психоінтелектуальної генерації ідей.

До колективних відносять: метод комісій, метод колективної генерації ідей, метод Дельфі та матричний метод. Поділ на методи індивідуальних та колективних експертних оцінок проводиться в залежності від того, розробляється прогноз на основі висновків одного експерта чи групи експертів.

Незважаючи на відмінність, вказані методи мають ряд загальних процедур при їх використанні, наприклад:

– визначення необхідних і достатніх умов для оцінки спеціаліста як експерта;

– оцінка характеристик експерта;

– організація форм проведення експертизи;

– вибір методів стимулювання експертів;

– вибір методів обробки експертної інформації;

– верифікація результатів експертизи.

Від прогнозування за методом експертних оцінок треба відрізнити так зване прогнозування, яке широко використовується в соціології, політології, маркетингу та інших сферах. Останнє базується на репрезентативних даних, отриманих в результаті опитування респондентів в випадковому порядку.

Індивідуальні експертні оцінки ґрунтуються на використанні думок спеціалістів в певній сфері незалежно одне від одного. Вживаються в основному два методи індивідуальної експертної оцінки: інтерв'ю та аналітичні записки.

Метод інтерв'ю передбачає бесіду організатора експертизи (прогнозіста) зі спеціалістом-експертом в певній області знання, що проводиться згідно з раніше розробленою програмою. Переваги цього методу полягають в тому, що прогнозіст може в процесі бесіди уточнювати та корегувати відповіді. Недолік цього методу полягає в тому, що у експерта мало часу на обдумування відповідей.

Тому результат залежить насамперед від того, наскільки експерт може відповісти експромтом достатньо точно на поставлені питання.

Метод аналітичних записок (оцінок) передбачає можливість довгострокової та ретельної роботи експерта над поставленими запитаннями, що дозволяє використовувати необхідну інформацію для оцінки тенденцій, шляхів розвитку прогнозованого об'єкта. Результати своєї роботи експерт оформлює у вигляді аналітичної записки.

Індивідуальні експертні методи засновані на використанні думки експертів-фахівців відповідного профілю незалежно один від одного.

Головними перевагами розглянутих методів є можливість максимального використання індивідуальних здібностей експертів і незначний психологічний тиск на окремого виконавця. Однак ці методи мало придатні для прогнозування найбільш загальних стратегій через обмеженість знань одного фахівця-експерта про розвиток суміжних галузей науки.

Суттєвим недоліком методу індивідуальних експертних оцінок є те, що далеко не кожний експерт бере на себе відповідальність самостійно дати оцінку складним явищам (процесам) без урахування думки інших експертів.

Тому при необхідності прогнозування складних проблем, особливо тих, що знаходяться на стику різних сфер знань, застосовують групові (колективні) методи експертних оцінок, наприклад, метод комісій, метод Дельфі.

Суть методу комісії полягає в тому, що спеціалісти, які входять до однієї групи, погоджують свою думку про стан будь-якого процесу (явища, об'єкта) в майбутньому або шляхах і методах досягнення цілей у відкритій дискусії, найчастіше за круглим столом, що дозволяє впливати одне на одного таким чином, щоб компенсувати помилки одне одного. Метод комісій має як переваги над індивідуальними методами експертних оцінок, так і певні недоліки.

Охарактеризуємо метод колективної генерації ідей («мозкова атака»). Завдання прогнозування, які вирішуються з використанням методів експертних оцінок, містять два формально не пов'язані між собою елементи: визначення можливих варіантів розвитку об'єкта прогнозування та їх оцінку. Доцільність застосування «мозкових атак» полягає у визначенні можливих варіантів розвитку їх використання, дає змогу швидко отримати продуктивні результати і залучити всіх експертів до активного творчого процесу. Методи «мозкових атак» можна класифікувати за ознакою існування або відсутності зворотного зв'язку між керівником і учасниками «мозкової атаки» в процесі вирішення певної проблемної ситуації. Наявність зворотного зв'язку дає змогу учасникам концентрувати увагу тільки на варіантах, корисних за тим чи іншим критерієм для розв'язку проблемної ситуації. Однак штучне введення обмежень позбавляє можливості побачити всю різноманітність підходів, і тим самим з'являється імовірність пропустити оригінальні думки, які мають потенційну, але ще не усвідомлену цінність. Відсутність зворотного зв'язку, тобто

максимальна стимуляція висловлювань, припускає проведення складної і більшої за обсягом роботи на етапі їх оцінки.

Один із варіантів методу «мозкової атаки» – деструктивна відносна оцінка (ДВО) – здатний якісно і досить швидко проводити оцінку варіантів, не обмежуючись при цьому їх кількістю.

Суть цього методу полягає в актуалізації творчого потенціалу фахівців при «мозковій атаці» проблемної ситуації, що реалізує спочатку генерацію ідей і їх подальше руйнування (критику) з формулюванням контрідей.

Зробимо висновки. В основі колективних і індивідуальних методів експертних оцінок закладено використання думки експертів. І в колективних, і в індивідуальних методах експертних оцінок завжди формується група експертів. Існує дві їхні категорії: вузькі фахівці й фахівці широкого профілю, що забезпечують формулювання великих проблем. Розходження між двома групами методів експертних оцінок у способі одержання інформації від експертів:

– в індивідуальних – незалежно друг від друга висловлює думку кожний експерт;

– у колективних – висловлюється колективна думка про перспективи розвитку об'єкта прогнозування.

Сам механізм одержання експертної інформації в різних методах колективних експертних оцінок різний, але скрізь у них висловлюється колективна експертна оцінка. Вибір методу - за прогнозістом. Але при виборі того або іншого методу й при рішенні питання, кого включати в групу експертів, потрібно враховувати наступні моменти.

Першокласний фахівець не завжди може досить кваліфіковано розглянути й зрозуміти загальні глобальні питання. Для цієї мети потрібно залучати експертів, які недостатньо інформовані у вузьких питаннях, але володіють добре розвинутою логікою, увагою й т.д.

На перший погляд може здатися, що індивідуальні методи уступають колективним, тому що при їхньому застосуванні думки експертів не погоджені та можуть істотно розходитися, а виходить, таку експертну інформацію використовувати при розробці прогнозу складніше. Але робити висновок, що погоджена думка групи експертів (при колективних методах експертних оцінок) є більше достовірним, чим думка одного фахівця, не можна. Щонайменше цей висновок є спірним (в обговоренні простих питань – так, але в складних – немає). При виробленні погодженої думки найчастіше група фахівців керується логікою компромісу. При розробці прогнозів треба фіксувати отримані розбіжності та враховувати їх.

При виборі методів експертних оцінок для розробки прогнозів треба враховувати недоліки й переваги, які є в тих та інших.

Розглянемо переваги колективних методів експертних оцінок:

- інформація, що отримана від групи, та є необхідною для розробки надійного прогнозу, за обсягом не менше інформації, якою володіє кожний з членів групи експертів;

- кількість факторів, що впливають на прогнозований об'єкт, обумовлених у ході колективного обговорення групою експертів, не менше кількості факторів, висловлюваних будь-яким членом групи. Це істотний момент, тому що одна з причин помилок прогнозів полягає в нездатності врахувати максимально можливу кількість факторів, що впливає на об'єкт прогнозування;

- практика показує, що група експертів з більшою готовністю приймає на себе відповідальність при висловлюванні думки, чим окремі фахівці. Недоліками методів колективних експертних оцінок є:

- група експертів щонайменше настільки ж дезінформована, наскільки дезінформован будь-який член цієї групи. Однієї з причин використання групи експертів є надія на те, що невірна інформація одного з членів групи буде компенсована інформацією, якою розташовують інші члени групи. Однак немає гарантій, що на ділі буде саме так;

- група фахівців може зробити серйозний тиск на своїх членів, наприклад, змусивши одного з фахівців погодитися з думкою більшості, навіть якщо він розуміє, що точка зору цієї більшості помилкова (психологічний ефект більшості);

- якщо в групі фахівців є люди, що володіють ораторським мистецтвом, умінням психологічно «давити» на думку іншого, то може бути «подавлена» більш правильна точка зору при формуванні загальної думки групи експертів. Така ситуація може виникнути й коли в групі фахівців - експертів перебувають супідрядні за посадою фахівці.

- найчастіше загальна експертна оцінка групи фахівців залежить від бажання досягти якнайшвидшої угоди без особливих заперечувань окремими фахівцями своїх точок зору;

- можливі випадки, коли окремі фахівці свідомо впливають на думку групи, поставивши певну мету й володіючи даром переконання. У цьому випадку вони не приймають логіку та факти інших, вони концентрують свої сили на прагненні домогтися «перемоги» своєї точки зору. Їх мета - схилити інших на свою точку зору, а не досягти того, що могло б привести до кращих рішень. Така ситуація може виникнути, якщо розглянута прогнозована проблема стосується кадрових питань, зміни форми власності та ін.

5.3 Метод експертних оцінок Дельфі

Свою назву він отримав від імені грецького міста Дельфі, яке стало відоме завдяки своєму оракулу-храму, жерці якого передбачали майбутнє.

На відміну від традиційного підходу для досягнення погоджень думок експертів шляхом відкритої дискусії (методом комісії) метод Дельфі дав можливість цілком відмовитись від колективного обговорення. Це робиться для того, щоб зменшити вплив таких психологічних факторів, як приєднання до думки найбільш авторитетного чи впливового спеціаліста, небажання відмовитись від публічно вираженої думки, дотримуватися думки більшості, тобто максимально можливе усунення тих недоліків методу комісій, про які го- ворилось раніше.

В методі Дельфі прями дебати замінюються ретельно розробленою програмою послідовних індивідуальних опитувань, що проводять у вигляді анкетування.

Відповіді експертів, як правило, узагальнюють і разом з додатковою інформацією надходять у розпорядження експертів, після чого вони уточнюють свої початкові відповіді. Така процедура повторюється декілька разів до досягнення прийняттого узгодження сукупності висловлених думок експертів.

Метод Дельфі був розроблений у США співробітниками науково-дослідної корпорації «РЕНДкорпорейшн» О. Хелмером та Т. Гордоном і вперше застосований для вирішення деяких задач Міністерства оборони США в 1964 році. Отже, процедури, що використовують при реалізації методу Дельфі, характеризуються трьома основними особливостями: анонімністю, регульованим зворотним зв'язком, тобто використанням результатів попереднього туру та статистичною обробкою результатів групової відповіді.

Анонімність досягається тим, що члени групи невідомі одне одному. В результаті кожен експерт має можливість в процесі послідовних турів опитування змінити свою думку без публічної заяви про це, а відповідно, безвтрати репутації. Члени групи спілкуються тільки з організаторами експертизи чи з ЕОМ.

Використання результатів попереднього туру опитування, доповнене статистичними характеристиками групової відповіді, дозволяє кожному експерту познайомитись з думкою своїх анонімних колег, співставити свої відповіді з узагальненими висновками всієї групи експертів.

Статистична характеристика результатів групової відповіді передбачає визначення показників, котрі дозволяють виявити,

наскільки відповідь кожного експерта відповідає точці зору групи експертів в цілому. Для цього визначається медіана та квартилі.

Медіана ділить упорядкований ряди на дві рівні частини і відповідає середньому члену ряду, побудованому у черзі зростання (ранжований ряд). Квартиль – це значення ознаки, що відповідає членам ряду, віддаленої від початку на $1/4$ (нижній квартиль) та $3/4$ (верхній квартиль).

Отже, медіана та квартиль ділять упорядкований ряд чисел на чотири частини. Прийнято вважати, що медіана характеризує узагальнену думку групи експертів, а оцінки, що потрапили за межі верхнього та нижнього квартилів, знаходяться за межами інтервалу довіри.

В методі Дельфі прями дебати замінюються ретельно розробленою програмою послідовних індивідуальних опитувань, що проводять у вигляді анкетування.

Відповіді експертів, як правило, узагальнюють і разом з додатковою інформацією надходять у розпорядження експертів, після чого вони уточнюють свої початкові відповіді. Така процедура повторюється декілька разів до досягнення прийняттого узгодження сукупності висловлених думок експертів.

Експертиза (експертне опитування) після проведення відповідної підготовки здійснюється в декілька турів.

ПЕРШИЙ ТУР ОПИТУВАННЯ. Перша анкета може бути повністю безструктурною, і тому допускає будь-які відповіді. Це робиться для того, щоб необмежити спеціалістів в жорстких рамках відповіді. Організатори експертизи не можуть знати так глибоко та фундаментально досліджувану проблему, як спеціалісти у цій сфері. Можливість вільної відповіді дозволяє більш широко поставитись до проблем, прийняти до уваги невиявлені раніше моменти та ін.

Після того, як результати прогнозу експертів повернулись керівникові експертизи, останній повинен їх проаналізувати, об'єднати в певні групи, виключити другорядні (з точки зору керівника групи) відповіді та підготувати анкети для другого туру.

ДРУГИЙ ТУР. Членам експертної групи направляють вже більш чіткіші питання і просять їх дати свої оцінки і по можливості обґрунтувати відповіді.

Після того, як прогнози, які зроблені у другому турі, повернулись керівникові, треба обробити матеріали експертизи, розрахувати статистичні характеристики та підготувати матеріали до третього туру.

ТРЕТІЙ ТУР. Учасники експертизи отримують анкету з результатами статистичної обробки відповідей другого туру з одночасним поданням значень медіани та квартилей.

Якщо оцінка другого туру не потрапила в інтервал довіри, то кожного члена експертної групи просять обґрунтувати свою точку зору та прокоментувати точку зору експертів, що мають іншу думку. Вони можуть мати свої докази та заперечення, так само, як вони робили б це при особистому спілкуванні, але при цьому їх аргументи залишаються анонімними.

Після того, як перспективні оцінки та нові аргументи членів експертної групи повернулись керівникові експертизи, він повинен виконати роботу аналогічну тій, що виконувалась після другого туру - проаналізувати та узагальнити результати опитування, розрахувати нові значення медіани та квартилей, підготувати анкети для четвертого туру.

ЧЕТВЕРТИЙ ТУР. Членам експертної групи знову передають анкету з питаннями та результати статистичної обробки відповідей третього туру, причому відповіді узагальнені з обох сторін. Члени експертизи повинні взяти до уваги свої аргументи та їх критику. В залежності від бажання та потреби керівник може знову попросити і аргументувати свою точку зору. Отримавши відповіді четвертого туру, організатори експертизи обробляють їх та роблять остаточні висновки.

Необов'язково, щоб будь-який прогноз здійснювався через чотири тури опитувань. Якщо експерти дійшли згоди в другому турі, то опитування можна припинити.

Метод Дельфі, не дивлячись на ряд переваг, має і недоліки. Проведення опитувань в чотири та більше турів має за мету максимально зблизити точку зору експертів. Досвід показує, що досягається це не завжди. Крім того, багатотурове опитування подовжує процедуру складання прогнозу в часі і нерідко дратує експертів. Для того щоб усунути властиві методу Дельфі недоліки, розроблені його модифікації. Прикладом розвитку і удосконалення методу Дельфі є розробка SEER (System for Evaluation and Review) - система огляду та оцінки подій, що усуває ряд недоліків методу Дельфі.

Методика SEER передбачає лише два тури опитувань. В кожному турі залучається різний склад експертів. Експерти першого туру – спеціалісти промисловості, експерти другого туру – найбільш кваліфіковані спеціалісти з органів, що приймають рішення, а також спеціалісти з сфер природничих та технічних наук.

Експерти кожного туру практично не переглядають свої відповіді, за виключенням тих випадків, коли його відповідь виходить з

встановленого інтервалу, в якому знаходиться переважна більшість оцінок (наприклад, інтервалу, в якому знаходяться 90 % всіх оцінок).

Іншою модифікацією класичного методу Дельфі є методика «Початок – з чистого листа». Розробка вказаної методики обумовлена тим, що в першому турі перед деякими членами експертної групи и виникають труднощі психологічного характеру, оскільки ситуація безструктурна, і тому деякі експерти не знають з чого почати.

Крім того, немає гарантії, що прогнози, розроблені групою експертів після першою туру опитування, будуть задовільняти і керівника експертизи. Нарешті, по мірі звуження та уточнення питання в ході декількох турів цілком можлива ситуація, при якій один або декілька членів групи можуть не виявитися експертами в даній вузькій сфері знань. Тому суть методики

«Початок – з чистого листа» в тому, що перший тур опитування проводиться з однією групою експертів, а подальші тури опитування, починаючи з другого, проводяться з іншою групою експертів. Частково склад груп може співпадати.

В процесі практичної реалізації методу Дельфі відомі випадки відмов від жорстких вимог застосування, дещо простішим стає підхід до його використання, наприклад, виключається анонімність, якщо доводиться вибирати між виключенням анонімності та повною відмовою від використання методу; обмежують зворотні зв'язки, коли з точки зору керівника експертизи думка незалежного експерта його влаштовує і оцінки його стають прогнозом, в протилежному випадку в якості прогнозної оцінки приймається групова медіана.

Метод Дельфі характеризується трьома особливостями, які вирізняють його серед звичайних методів групової взаємодії експертів, а саме:

1. Анонімність експертів, яка полягає в тому, що в ході процедури експертної оцінки явища, що прогнозується, учасники експертної групи не відомі один одному. При цьому взаємодія членів групи при заповненні анкет повністю виключається. Тоді автор відповіді може змінити свою думку без оголошення про це.

2. Використання результатів попереднього туру опитування. Ця система дає можливість групі фахівців зосередитися на початкових завданнях, а не вигадувати кожного разу щось нове. Оскільки групова взаємодія здійснюється безпосередньо за допомогою відповіді на анкету, фахівець або організація, які проводять її дослідження за методом Дельфі, дістають з анкет тільки ту інформацію, яка стосується цієї проблеми. Фахівець-прогнозіст враховує «за» і «проти» експертів стосовно кожної точки зору. Головний результат функціонування цієї

системи полягає в тому, щоб запобігти досягненню групою власних мети і завдань. Статистична характеристика групової відповіді, полягає в тому, що група фахівців складає прогноз, який містить точку зору тільки більшості експертів. При цьому використовують статистичні характеристики відповіді, які відображають думку всієї групи. Групова відповідь може бути подана у вигляді медіани і двох кварталів, тобто таким числом, яке перевищує оцінки однієї половини групи й менші за другу.

Члени журі змінюють свої оцінки за умови переконливих доказів їх колег, в іншому разі вони дотримуються своїх точок зору.

Основними недоліками методу є:

1. На кінцевий результат впливають особисті якості експертів, зокрема наполегливість у відстоюванні своїх думок.

2. Застосування методу може вимагати значних коштів, а кінцевий результат не задовільнити жодного з експертів.

Немає згоди щодо того, чи слід використовувати саме фахівців. Як розуміти термін «експерт» (чи повинно журі складатися з фахівців різних спеціальностей) або яким обсягом інформації треба обмінюватися на першому етапі (медіани можуть викликати зсув до центру розподілу).

5.4 Аналіз впливу факторів методами експертного опитування та рангової кореляції

Загальні вимоги при організації опитування

Отримання в результаті анкетного опитування інформації залежить великою мірою від якості складених анкет, організації та проведенні опитування. Виходячи з цього при складанні анкет слід керуватись такими правилами:

– включати в опитування всі або хоча б основні фактори, що впливають на досліджувану результативну ознаку;

– вживати назви факторів тільки загальноприйняті для досліджуваного процесу;

– за можливістю вказувати для факторів інтервали;

– анкети складати невеликими за розміром, лаконічними та такими, що не потребують багато часу на їх читання та заповнення;

– питання в анкеті формувати чітко не припускати двоякого тлумачення;

– опитувати таких фахівців (експертів), які чітко уявляють собі досліджуваний процес;

– до опитування залучати фахівців різних споріднених спеціальностей;

– опитування проводити так, щоб забезпечити незалежність думки опитуваного фахівця;

– кількість опитуваних фахівців повинна значно перевищувати кількість факторів, включених у дослідження.

При заповненні анкет застосовують метод апіорного ранжирування, який потребує розміщення факторів у порядку зменшення ступеня її впливу на результативний показник.

Одна з можливих форм анкети наведена далі.

АНКЕТА ОПИТУВАННЯ

Шановний пане!

Просимо розмістити нижченазвані фактори (див. табл. 5.1) за ступенем впливу на _____

(назва результативної ознаки)

Цифри у стовпці «ранги» повинні відповідати місцю (номеру), відведеному вами даному фактору (число «І» приписується найзначнішому за впливом фактору і т.д.). Якщо Ви вважаєте, що ступінь впливу кількох факторів однаковий, то їм надається однаковий номер-ранг.

Таблиця 5.1

№ з/п	Впливаючий фактор	Позначення фактора	Ранг

Дякуємо за послугу

Підготовлені анкети вручають фахівцям для заповнення. Результати зводять у табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Експерти	Ранги факторів, включених в опитування				
	X_1	X_2	X_3	X_n

Вибір ознак (факторів), введених в опитування

Попередній економічний аналіз повинен довести, що між ознаками, які обрані для дослідження, існує причинний зв'язок.

Для виконання практичних завдань використовують фактори, наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Завдання для самостійної роботи

Варіант	Результативний фактор	Впливаючі фактори
1.	Продуктивність праці	Обсяг активної частини основних фондів Інтегральний коефіцієнт використання активної частини основних фондів Коефіцієнт ритмічності виробництва Співвідношення між основними та допоміжними працівниками Коефіцієнт механізації

Оцінка адекватності первинних та перетворених рангів

Якщо в табл. 1.2 ряд експертів не змогли визначити ступінь впливу деяких факторів та поставили їм однакові ранги, проводиться перетворення рангів.

Для цього:

- фактори розміщують у зростаючий ряд, ранжируваний за значеннями рангів відповідного експерта;
- нумерацію факторів здійснюють неперервним рядом натуральних чисел (1, 2, 3, ..., K, де K – кількість факторів);
- однакові ранги факторів для певного експерта замінюють перетвореними, що являють собою середнє арифметичне із відповідних номерів натурального ряду;
- решту рангів факторів замінюють порядковим номером фактора у ранжируваному ряді.

Правильність визначення рангів контролюється порівнянням їх сум, вкладених експертами, між собою, а також порівнянням величин, отриманих за формулою $\frac{1+K}{2} \cdot K$.

Результати перетворень зводять в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Перетворені ранги

Експерти	Ранги факторів, що включені в опитування									Сума рангів за експертами $\sum b_{ij}$
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	

При перетворенні первинної таблиці рангів може виникнути деяка втрата інформації. Враховуючи це, перевіряють адекватність (відповідність) первинних та перетворених рангів (табл. 5.2 і 5.4).

Для цього:

– визначають парний ранговий коефіцієнт Спірмена, використовуючи такі співвідношення:

1) для незв'язаних рангів:

$$\rho = 1 - \frac{6 * \sum_{i=1}^K (\alpha_i - \beta_i)^2}{K^3 - K};$$

2) для зв'язаних рангів:

$$\rho = \frac{\frac{K^3 - K}{6} - (T_1 - T_2) - \sum_{i=1}^K (\alpha_i - \beta_i)^2}{\sqrt{\left(\frac{K^3 - K}{6} - 2T_1\right) \left(\frac{K^3 - K}{6} - 2T_2\right)}}$$

де α_i, β_i – ранги i -го фактора, визначені за сумою відповідно початкових і перетворених рангів;

$$T_1 = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{l_1} (r_j^3 - r_j); \quad (5.3)$$

$$T_2 = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{l_2} (r_j^3 - r_j); \quad (5.4)$$

де r – кількість однакових рангів у j -й групі, які одержали при об'єднанні однакових рангів;

l_1, l_2 – кількість груп однакових умовних рангів відповідно у початковій та перетвореній таблицях;

– аналізують величину рангового коефіцієнта Спірмена та роблять висновки.

При цьому, якщо:

$\rho < 0$ – перетворена таблиця дає інформацію протилежну початковій таблиці. Подальший аналіз неможливий. Слід довідатись про причини цього (мало експертів брало участь в опитуванні; незрозуміло складені анкети; експерти не знали процесу, що аналізується; вплив факторів важко було визначити; була допущена помилка при перетворенні рангів і т.д.).

$\rho = 0$ – ранги початкової таблиці не відповідають перетвореній (незалежні один від одного). Подальший аналіз неможливий. Необхідно з'ясувати причини цього (див. попереднє для $\rho < 0$).

$\rho = 1$ – повна відповідність між початковою та перетвореною таблицями рангів.

$\rho > 0$, але $\rho \neq 1$, ранговий коефіцієнт Спірмена вважається:

а) незначущим, тобто вважаємо $\rho = 0$, якщо обчислене значення менше від критичного:

$$\rho_{\text{обч}} < \rho_{\text{крит}} = \frac{\varphi(P)}{\sqrt{K-1}} \left\{ 1 - \frac{0,19}{K-1} [\varphi^2(P) - 3] \right\}, \quad (5.5)$$

де $\varphi(P)$ – значення нормованої функції Лапласа при рівні надійності P , вибирається із спеціальних таблиць;

при ймовірності $P = 0,95; 0,954; 0,997$; $\varphi(P) = 1,96; 2,0; 3,0$;
 K – кількість факторів, включених в опитування;

б) значущим, якщо обчислене значення більше від критичного:

$$\rho_{\text{обч}} > \rho_{\text{крит}} = \frac{\varphi(P)}{\sqrt{K-1}} \left\{ 1 - \frac{0,19}{K-1} [\varphi^2(P) - 3] \right\}. \quad (5.6)$$

При цьому, чим ближче обчислене значення рангового коефіцієнта Спірмена ρ до одиниці, тим менше було втрачено інформації в процесі перетворення рангів.

Оцінка ступеня узгодженості думок експертів

Для виявлення ступеня узгодженості думок експертів (фахівців, що опитувалися) в оцінці поставленого перед ними питання використовуємо коефіцієнт конкордації Кенделла, що обчислюється:

1) для незв'язаних рангів:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^K \Delta_i^2}{n^2(K^3 - K)};$$

2) для зв'язаних рангів:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^K \Delta_i^2}{n^2(K^3 - K) - n \sum_{j=1}^n T_j};$$

де n – кількість фахівців, що опитувалися;

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n b_{ij}$$

b_{ij} – перетворений ранг i -го фактора j -го експерта;

$$T_j = \sum_{r=1}^{b_j} (r^3 - r);$$

r_r – чисельність груп однакових рангів j -го експерта;

b_j p – кількість груп однакових рангів j -го експерта;

Аналізуючи величину одержаного коефіцієнта конкордації Кенделла, робимо висновок.

Якщо:

$W=0$ – є повна узгодженість експертів в оцінці ступеня впливу факторів, тобто є ідентичність думок (уявлень, поглядів) експертів в оцінці ступеня впливу фактора;

$W = 0$ – узгодженість поглядів експертів повністю відсутня;

$W \neq 0$ та $W \neq 1$ перевіряємо значущість обчисленого коефіцієнта конкордації використовуючи критерій χ^2 (χ_1^2 -квадрант).

При цьому визначаємо:

$$\chi_{\text{обч}}^2 = n(k - 1)W.$$

Потім, задавши рівень надійності (значущості) для $K-1$ ступенів свободи, відшукуємо $\chi_{\text{табл}}^2$ за спеціальними таблицями.

У подальшому вважатимемо:

- 1) коефіцієнт конкордації значущим, тобто $W \neq 0$, якщо $X_{обч}^2 > X_{табл}^2$
- 2) коефіцієнт конкордації не значущий, тобто $W = 0$, якщо $X_{обч}^2 < X_{табл}^2$

Якщо обчислений коефіцієнт конкордації незначущий, то робимо висновок про відсутність узгодження думок експертів відносно поставленого завдання. Виявляємо причини неузгодженості (складність процесу, неясність поставлених питань, низький рівень знань експертів, мала кількість експертів, включених в опитування та т.п.).

У разі значущості коефіцієнта конкордації за його величиною робимо висновки про ступінь узгодженості експертів. Чим коефіцієнт конкордації ближчий до одиниці, тим більша узгодженість думок експертів в оцінці доставленого питання. Використовуючи табл. 5.5, робимо якісний висновок про ступінь узгодженості експертів.

Таблиця 5.5

Значення коефіцієнта конкордації W	0,1–0,3	0,3–0,5	0,5–0,7	0,7–0,9	>0,9
Характеристика узгодженості експертів	Слабка	Помірна	Помітна	Висока	Дуже висока

Оцінка узгодженості думок експертів по кожному фактору

У разі значущості коефіцієнта конкордації Кенделла, тобто коли існує узгоджена думка експертів в оцінці поставленого питання про ступінь впливу факторів, переходять до аналізу узгодженості думок експертів по кожному фактору окремо.

З цією метою перевіряють припущення по рівномірності розподілу рангів по кожному фактору, застосовуючи критерій Мізеса - Смирнова (критерій ω^2), за яким порівнюють обчислене значення критерія $n\omega^2$ з критерієм z_p та роблять висновки.

Якщо:

а) розподіл рангів фактора не суперечить рівномірному розподілу, то а цього фактора у експертів немає узгодженої думки. Цей висновок записують нерівністю:

$$n\omega^2 < z_p$$

Тоді виявляють причину цього (різкий рівень підготовки фахівців-експертів, неясно поставлені питання в анкеті, складність процесу, що вивчається, складний та неоднозначний характер впливу фактора і т.д.), або проводять додаткове опитування;

б) розподіл рангів на відповідає рівномірному розподілу, тобто у експертів узгоджена думка про ступінь впливу фактора, що аналізується. Цей висновок записують нерівністю:

$$n\omega^2 > z_p$$

Побудова діаграми рангів

Для того, щоб унаочнити розміщення факторів за ступенем впливу будується графік-діаграма рангів.

На осі абсцис відкладають рівні інтервали, на яких розміщують фактори в порядку збільшення сум їх рангів, а на осі ординат відкладають суми рангів у порядку зменшення їх значень (наприклад, рис. 5.1).

Перевірка рівня апріорної інформації відносно ступеня важливості факторів

Графік, побудований для оцінювання факторів, являв собою стовпчикову діаграму, показники в якій розташовані у порядку убубання. Перевіряємо, чи не носить спадання випадковий характер.

Для цього за критерієм згоди χ^2 (χ^2 – квадрат) перевіряють припущення про рівномірність розподілу сум рангів, обчислюючи величину

$$\chi_{обч}^2 = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2, \quad z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n b_{ij}$$

Задавшись рівнем надійності для $K-3$ ступенів свободи, шукаємо $\chi_{табл}^2$.

При цьому:

1) якщо $\chi_{обч}^2 < \chi_{табл}^2$, то приймається припущення про рівномірність розподілу сум рангів для факторів, тобто про випадковість спадання величин рангів; робиться висновок, що рівень апріорної інформації (зібраної за допомогою опитування відносно поставленої задачі) дуже низький, і необхідно проводити анкетне опитування на більш високому рівні або включити в дослідження всі фактори, тому що, на думку експертів, всі фактори важливі;

2) якщо $\chi_{обч}^2 > \chi_{табл}^2$, то відкидається припущення про рівномірність розподілу сум рангів для факторів, тобто спадання величин рангів носить не випадковий характер, і робиться висновок про високий рівень апріорної інформації про отупінь важливості факторів.

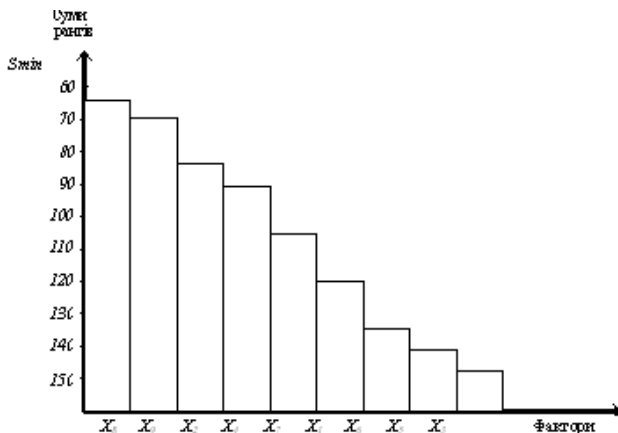


Рисунок 5.1 – Графік-діаграма рангів

Перевірка припущення про експоненціальний характер опадання величин у діаграмі рангів

Коли припущення про рівномірний розподіл сум рангів для факторів відкидається, перевіряють припущення про експоненціальний характер спадання величин рангів за критерієм WE_0 , обчислюючи значення критерію WE_0 :

$$WE_0 = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta_i^2}{k^2 (s_{max} - z)^2}$$

де s_{max} – максимальна сума рангів для факторів.

Потім порівнюють обчислене значення WE_0 , з 95%-ми інтервалами (WE_0^H ; WE_0^B).

Коли обчислене значення WE_0 не потрапляє в табличний інтервал, тобто

$$WE_0 \notin (WE_0^H; WE_0^B)$$

відкидають припущення про експоненціальний характер спадання величин у діаграмі рангів.

Коли обчислене значення WE_0 потрапляє в табличний інтервал, тобто

$$WE_0 \in (WE_0^H; WE_0^B)$$

приймають припущення про експоненціальний характер спадання величин у діаграмі рангів.

Розподіл факторів на групи за ступенем впливу.

У разі експоненціального характеру спадання величин у діаграмі рангів виникає можливість роздрібнити (розбити) фактори на групи за ступенем їх впливу на показники, які оцінюють.

Для цього, розглядаючи діаграму рангів, а також величину сум рангів для кожного фактора візуально обирають близькі за величиною стовпці або за величиною сум факторів діаграми рангів.

Детальну перевірку відмінності факторів один від одного виконують за допомогою t -критерію Ст'юдента.

Для цього:

1) обчислене значення $t_{обч}$ порівнюють з $t_{табл}$

При цьому:

а) різниця між середніми величинами вважається значущою, тобто фактори не можуть бути об'єднані в єдину групу, якщо

$$t_{обч} > t_{табл}$$

б) різниця між середніми величинами вважається незначущою, тобто фактор можуть бути об'єднані в єдину групу, якщо

$$t_{обч} < t_{табл}$$

При комплектуванні груп фактори включають у порядку їх важливості, тобто починаючи з фактора з найменшою сумою рангів, як і на діаграмі рангів.

Після виділення груп факторів за ступенем впливу доцільно у дослідження їх включати групами.

Необхідно пам'ятати, що чим швидше убуває величина фактора у діаграмі рангів, тим чіткіше виконуватиметься поділ факторів на групи за ступенем впливу.

Визначення груп експертів з високим та низьким ступенями узгодженості думок

При виявленні груп експертів, серед яких узгодженість думок висока, діємо таким чином.

Визначаємо коефіцієнт конкордації W для всіх значень рангів.

Виключаємо з розгляду одного експерта та визначаємо для тієї сукупності, що залишилася, коефіцієнт конкордації W_1 .

У подальшому порівнюємо обчислені коефіцієнти конкордації W . Якщо виявиться, що $W_1 > W_2$, то виключений нами експерт вилучається із сукупності, а якщо виявиться, що $W_1 \leq W_2$, то розглядуваний експерт залишиться у сукупності.

Виконавши зазначену процедуру для всіх експертів початкової таблиці, в результаті одержимо групу експертів, у якої узгодженість думок висока.

Для виявлення групи експертів з низьким ступенем узгодженості думок:

- 1) визначають коефіцієнт конкордації для всіх експертів W ;
- 2) виключають із розгляду одного експерта та визначають для сукупності, що залишилась, коефіцієнт конкордації W_1 .

Якщо виявиться, що $W_1 > W_2$, то цей експерт залишається у сукупності, а якщо $W_1 \leq W_2$, то розглядуваний експерт вилучається із сукупності.

Зробивши вищезазначену процедуру для всіх експертів початкової таблиці, одержуємо групу експертів, у якій узгодженість думок низька.

Оцінка узгодженості думок кожного експерта з усіма іншими

При оцінці узгодженості думок кожного експерта з усіма експертами, що залишилися:

- 1) беремо послідовно ранги відповідного експертів (1-го, 2-го і т.д.);

2) відшукаємо суми рангів за факторами для експертів, що залишилися, тобто вилучивши із суми ранги експерта, що аналізується;

3) для сум рангів встановлюємо залежно від їх величин умовні ранги: найменшої суми – 1-й ранг, наступної за величиною – 2-й і т.д.; у разі однакових сум привласнюємо однакові (зв'язані) ранги, визначені як середнє з порядкових номерів, що мають ці сум в ранговийому ряді;

4) визначаємо величину рангового коефіцієнта Спірмена ρ для рангів обраного експерта α_i та умовних рангів β_i , одержаних за сумами рангів, використовуючи співвідношення для обчислення ρ ;

5) аналізуючи величину обчисленого коефіцієнта Спірмена ρ , робимо висновки. При цьому негативне значення коефіцієнта Спірмена ($\rho < 0$) вказує на оригінальність думки фахівця в оцінці поставленої проблеми (завдання); позитивне значення коефіцієнта Спірмена ($\rho > 0$) вказує на узгодженість думок експерта з усіма іншими експертами;

6) використовуючи табл. 5.5, оцінюємо ступінь узгодженості або оригінальності думки кожного експерта порівняно з усіма іншими, а також даємо кількісну оцінку рівня компетентності експерта порівняно з усіма іншими експертами.

Таблиця 5.5

Значення коефіцієнта Спірмена ρ	0,0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,7-0,9	>0,9
Ступінь узгодженості думок $\rho > 0$	Слабка	Помірна	Помітна	Висока	Дуже висока
Ступінь відмінності думок $\rho < 0$	Слабка	Помірна	Помітна	Висока	Дуже висока
Оцінка компетентності	1	2	3	4	5

Примітка. При оригінальності думок окремого експерта шляхом додаткового аналізу уточнюється причина відмінності (новизна думки) або слабка компетенція фахівців у процесі, що оцінюється.

Контрольні запитання за лекцією 5

1. Назвіть особливості застосування експертного оцінювання.
2. Які існують вимоги до складання анкет?
3. Які критерії використовуються при оцінюванні узгодженості думок експертів?
4. Назвіть складові методу Дельфі.
5. Яким чином будується діаграма рангів?
6. В яких випадках застосовується ранговий коефіцієнт Спірмена?

ЛЕКЦІЯ 6

РЯДИ ДИНАМІКИ. АНАЛІЗ ІНТЕНСИВНОСТІ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ

План

- 6.1 Суть і складові елементи динамічного ряду
- 6.2 Характеристики інтенсивності динаміки
- 6.3 Середня абсолютна та відносна швидкість розвитку
- 6.4 Характеристика основної тенденції розвитку
- 6.5 Оцінка коливань та сталості динаміки

6.1 Суть і складові елементи динамічного ряду

Суспільні явища безперервно змінюються. Протягом певного часу – місяць за місяцем, рік за роком – змінюються кількість населення, обсяг і структура суспільного виробництва, рівень продуктивності праці тощо. Аналіз соціально-економічного розвитку – одне з важливих завдань статистики. Інформаційною базою його слугують динамічні (часові, хронологічні) ряди.

Динамічний ряд – це послідовність чисел, які характеризують зміну того чи іншого соціально-економічного явища. Елементами динамічного ряду є перелік хронологічних дат (моментів) або інтервалів часу і конкретні значення відповідних статистичних показників, які називаються *рівнями* ряду.

При вивченні динаміки важливі не лише числові значення рівнів, а і їх послідовність. Як правило, часові інтервали між рівнями однакові (доба, декада, календарний місяць, квартал, рік). Узнявши будь-який інтервал за одиницю, послідовність рівнів записуємо так: $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$.

Залежно від статистичної природи показника-рівня розрізняють динамічні ряди первинні й похідні, ряди абсолютних, середніх і відносних величин. За ознакою часу динамічні ряди поділяються на інтервальні та моментні. Рівень *моментного ряду* фіксує стан явища на певний момент часу t , наприклад кількість працюючих на початок року, студентів – на 1 вересня і т. д. В *інтервальному ряді* рівень – це агрегований результат процесу й залежить від тривалості часового інтервалу: виробництво електроенергії за рік, вилов риби за сезон. Зауважимо, що й похідні показники, обчислені на основі інтервальних рядів, на відміну від моментних залежать від протяжності часу (середньодобове чи середньорічне виробництво електроенергії на душу населення).

Соціально-економічні процеси динамічні, що виявляються сталою зміною рівнів динамічного ряду. Поряд з динамічністю їм притаманна інерційність: зберігається механізм формування явищ і характер розвитку (темпи, напрям, коливання). При значній інерційності процесу й незмінності комплексу умов його розвитку правомірно очікувати в майбутньому ті властивості й характер розвитку, які були виявлені в минулому. Діалектична єдність мінливості і сталості, динамічності та інерційності формує характер динаміки, уможливлючи статистичне прогнозування соціально-економічних процесів.

При вивченні закономірностей соціально-економічного розвитку статистика розв'язує низку завдань: вимірює інтенсивність динаміки, виявляє й описує тенденції, оцінює структурні зрушення, сталість і коливання рядів; виявляє фактори, які спричинюють зміни.

Передумовою аналізу будь-якого динамічного ряду є порівнянність статистичних даних, які його формують. Непорівнянність даних може зумовлюватися різними причинами:

- змінами в методології обліку та розрахунку показника, зокрема використання різних одиниць для вимірювання;
- змінами в структурі сукупності, а також територіальними змінами;
- різними критичними моментами реєстрації даних чи тривалістю періодів, до яких належать рівні;
- зміною цін для вартісних показників.

Порівнянність даних забезпечується на етапах їх збирання та обробки. Використовують також спеціальні прийоми зведення даних до порівнянного вигляду – «статистичні ключі» зімкнення динамічних рядів. Припустимо, помісячні рівні витрат сировини на виробництво продукції в I півріччі непорівнянні, оскільки у квітні змінився порядок обліку витрат (табл. 6.1). Подолати переривчастість ряду можна двома способами. Перший – спосіб відносних рівнів, коли за базу порівняння для кожного ряду беруть квітневий рівень. Два ряди відносних рівнів об'єднуються в один.

Таблиця 6.1 – Зімкнення динамічних рядів

Місяці	Обсяг витрат, т		Зімкнений ряд	
	Старий порядок реєстрації	Новий порядок реєстрації	відносних величин, %	абсолютних величин, т
Січень	40	–	80	44,0
Лютий	45	–	90	49,5
Березень	48	–	96	52,8

Квітень	50	55	100	55,0
Травень	–	58	105	58,0
Червень	–	60	109	60,0

Другий спосіб ґрунтується на співвідношенні квітневих рівнів: $55 : 50 = 1,1$. Помноживши рівні першого ряду на цей коефіцієнт, дістанемо єдиний зімкнений (порівнянний) ряд динаміки за весь період (остання графа таблиці).

6.2 Характеристики інтенсивності динаміки

Швидкість та інтенсивність розвитку різних суспільних явищ значно варіюють, що позначається на структурі відповідних динамічних рядів. Для оцінювання зазначених властивостей динаміки статистика використовує низку взаємозв'язаних характеристик. Серед них: абсолютний приріст, відносний приріст, темп зростання, інші.

Розрахунок характеристик динаміки ґрунтується на порівнянні рівнів ряду. При порівнянні певної множини послідовних рівнів база порівняння може бути постійною чи змінною. За постійну базу вибирається або початковий рівень ряду, або рівень, який вважається вихідним для розвитку явища, що вивчається. Характеристики динаміки, обчислені відносно постійної бази, називаються *базисними*. Якщо кожний рівень ряду y_t порівнюється з попереднім y_{t-1} , характеристики динаміки називаються *ланцюговими*. Схематично варіанти порівняння ілюструє рис. 6.1.

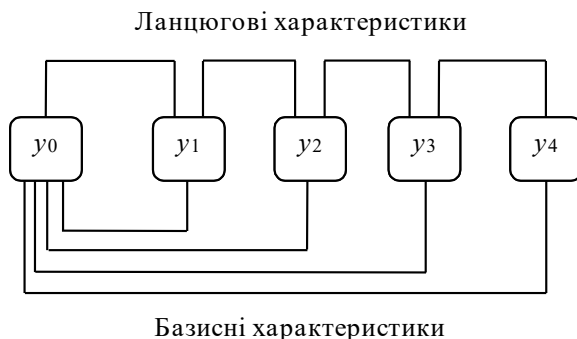


Рисунок 6.1 – Схеми порівняння при обчисленні ланцюгових і базисних характеристик динаміки

Абсолютний приріст Δ_t характеризує абсолютний розмір збільшення (чи зменшення) рівня ряду y_t за певний часовий інтервал і обчислюється як різниця рівнів ряду:

$$\text{базисний приріст } \Delta_t = y_t - y_0; \quad (6.1)$$

$$\text{ланцюговий приріст } \Delta_t = y_t - y_{t-1}. \quad (6.2)$$

Знак «+», «-» свідчить про напрям динаміки.

Темп зростання k_t показує, у скільки разів рівень y_t більший (менший) від рівня, взятого за базу порівняння. Він являє собою кратне відношення рівнів:

$$\text{базисний темп } k_t = \frac{y_t}{y_0}, \quad (6.3)$$

$$\text{ланцюговий темп } k_t = \frac{y_t}{y_{t-1}}. \quad (6.4)$$

При збільшенні рівня $k_t > 1$, при зменшенні – $k_t < 1$. Темпи зростання виражаються як у коефіцієнтах, так і в процентах.

Ланцюгові Δ_t і k_t відображують відповідно абсолютну і відносну швидкість динаміки. Вони взаємозв'язані. Якщо подати $y_t = y_{t-1} + \Delta_t$, то

$$k_t = \frac{y_{t-1} + \Delta_t}{y_{t-1}} = 1 + \frac{\Delta_t}{y_{t-1}}. \quad (6.5)$$

Отже, при стабільній абсолютній швидкості темпи зростання зменшуватимуться. Стабільні темпи зростання можливі за умови прискорення абсолютної швидкості.

Величину $\frac{\Delta_t}{y_{t-1}}$ називають відносним прискоренням або *темпом приросту* і позначають символом T_t . Вона функціонально пов'язана з темпом зростання, але на відміну від останнього завжди виражається в процентах:

$$T_t = 100(k_t - 1). \quad (6.6)$$

Отже, темп приросту показує, на скільки процентів рівень y_t більший (менший) від бази порівняння.

Співвідношенням абсолютного приросту і темпу приросту визначається абсолютне значення 1 % приросту. Нескладні алгебраїчні перетворення цього відношення показують, що воно становить соту частину рівня, взятого за базу порівняння:

$$A_t = \frac{\Delta_t}{T_t} = \frac{y_t - y_{t-1}}{100 \cdot \left(\frac{y_t - y_{t-1}}{y_{t-1}} \right)} = \frac{y_{t-1}}{100}. \quad (6.7)$$

У табл. 6.2 наведені всі розглянуті характеристики динаміки на прикладі виробництва електрообладнання за 3 роки. Очевидно, що ланцюгові й базисні характеристики динаміки взаємопов'язані:

а) сума ланцюгових абсолютних приростів дорівнює кінцевому базисному:

$$\sum_1^n \Delta_t = \sum_1^n (y_t - y_{t-1}) = y_n - y_0. \quad (6.8)$$

У нашому прикладі: $12 + 9 = 21$ тис. т;

б) добуток ланцюгових темпів зростання дорівнює кінцевому базисному:

$$k_1 k_2 \dots k_n = \prod_1^n k_t = K_n = \frac{y_n}{y_0}. \quad (6.9)$$

У нашому прикладі: $1,072 : 1,051 = 1,127$ або $186 : 165 = 1,127$.

Щодо темпів приросту, то вони не мають таких властивостей, як абсолютні прирости чи темпи зростання. Ланцюгові й базисні темпи приросту співвідносяться через темпи зростання.

Таблиця 6.2 – Абсолютні та відносні характеристики динаміки

Порядковий номер року,	Обсяг виробництва, у, тис.т	Абсолютний приріст, тис.т		Темп зростання		Темп приросту, %		Абсолютне значення 1% приросту, т	
		ланцюговий	базисний	ланцюговий	базисний	ланцюговий	базисний	ланцюговий	базисний
0	165	–	–	–	1,0	–	–	–	–
1	177	12	12	1,072	1,072	7,2	7,2	1,65	1,65
2	186	9	21	1,051	1,127	5,1	12,7	1,77	1,65

Якщо швидкість розвитку в межах періоду, що вивчається, неоднакова, порівнянням однойменних характеристик швидкості вимірюється прискорення чи уповільнення динаміки. На базі абсолютних приростів оцінюються *абсолютне та відносне прискорення*. Абсолютне – це різниця між абсолютними приростами:

$$\delta_t = \Delta_t - \Delta_{t-1}.$$

Прискорення характеризується додатною величиною $\delta_t > 0$, уповільнення – від'ємною $\delta_t < 0$.

Обчислимо характеристики прискорення на прикладі табл. 6.2:

$$\delta_t = 9 - 12 = -3 \text{ тис. т.}$$

Знак «мінус» свідчить про уповільнення динаміки. Темп уповільнення абсолютної швидкості обчислюється порівнянням абсолютних прискорень:

$$9 : 12 = 0,75.$$

Порівняння темпів зростання дає *коефіцієнт прискорення (уповільнення)* відносної швидкості розвитку. Для наочності та зручності їх тлумачення дільником є більший за значенням темп зростання. У нашому прикладі коефіцієнт уповільнення відносної швидкості динаміки $1,072 : 1,051 = 1,02$.

У статистичному аналізі порівнюється також інтенсивність динаміки в різних рядах. Відношення темпів зростання $k' : k''$ називають *коефіцієнтом випередження*. За допомогою останнього порівнюють відносну швидкість динамічних рядів однакового змісту по різних об'єктах (регіони, країни тощо) або різного змісту по одному об'єкту. Наприклад, за 3 роки фондоозброєність праці в одній галузі зросла на 50%, в іншій – на 25%. Коефіцієнт випередження темпу зростання фондоозброєності праці в першій галузі порівняно з другою становить $1,50 : 1,25 = 1,20$.

Можна порівняти динаміку фондоозброєності та продуктивності праці в кожній галузі. Якщо фондоозброєність зросла на 25%, а продуктивність праці – на 37,5%, то коефіцієнт випередження зростання продуктивності праці становить $1,375 : 1,250 = 1,10$.

Щодо темпів приросту, то співвідношення їх використовують лише для взаємозв'язаних показників x і y . Таке співвідношення називають *емпіричним коефіцієнтом еластичності* $\gamma = T_y : T_x$; він показує, на скільки процентів змінюється y зі зміною x на 1%. Наприклад, ціна на товар А зросла на 2%, а попит зменшився на 4%. Цінова еластичність попиту на цей товар $\gamma = \frac{-4}{+2} = -2$, тобто зі зростанням цін на 1% попит на товар зменшується на 2%.

6.3 Середня абсолютна та відносна швидкість розвитку

З плином часу змінюються, варіюють рівні динамічних рядів і обчислені на їх основі абсолютні прирости та темпи зростання. Постає потреба узагальнення притаманних динамічному ряду властивостей, визначення типових характеристик розвитку. Такими характеристиками є середні величини. Зауважимо, що динамічна середня буде типовою характеристикою лише за умови однорідності ряду, коли причинний комплекс формування закономірностей розвитку більш-менш стабільний.

Середні рівні використовують насамперед для узагальнення коливних рядів. Наприклад, при аналізі динаміки сільськогосподарського виробництва оперують не річними, а більш сталими середньорічними показниками за певні періоди. Середні рівні необхідні також для забезпечення порівнянності чисельника і знаменника при побудові динамічних рядів похідних показників. Наприклад, виробництво продукції на одного працюючого. Обсяг продукції – інтервальний показник, а кількість працюючих – моментний. Щоб забезпечити порівнянність цих показників, слід обчислити середньорічну кількість працюючих.

Метод обчислення середнього рівня динамічного ряду залежить від статистичної структури показника. В інтервальному ряді абсолютних величин, рівні якого динамічно адитивні, використовується середня арифметична проста:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t, \quad (6.10)$$

де n – число рівнів ряду.

У моментному ряді, за припущення про рівномірну зміну показника між датами, середня розраховується як півсума значень на початок і кінець періоду:

$$\bar{y} = \frac{y_0 + y_n}{2}. \quad (6.11)$$

Якщо в моментному ряді $n > 2$ і між суміжними датами однакові інтервали, розрахунок виконується за формулою *середньої хронологічної*:

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_n + \sum_{t=2}^{n-1} y_t}{n-1}. \quad (6.12)$$

У моментних рядах з різними інтервалами між датами розраховується середня арифметична зважена:

$$\bar{y} = \frac{1}{\sum D_t} \sum_{t=1}^m y_t D_t, \quad (6.13)$$

де D_t – інтервал часу між датами;

m – кількість інтервалів.

Середній абсолютний приріст (абсолютна швидкість динаміки) обчислюється діленням загального приросту за весь період на довжину цього періоду у відповідних одиницях часу (рік, квартал, місяць тощо):

$$\bar{\Delta} = \frac{y_n - y_0}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n \Delta_t}{n}. \quad (6.14)$$

Наприклад, у 1996 році автомобільним транспортом перевезено 2072 тис. т вантажів, у 1999 році – 2126 тис. т. Середньорічний приріст

цього показника за 1997 – 1999 рр. становить: $\bar{\Delta} = (2126 - 2072) : 3 = 18$ тис. т.

При обчисленні середнього темпу зростання враховується правило складних процентів, за якими змінюється відносна швидкість динаміки (нагромаджується приріст на приріст). Тому *середній темп зростання* обчислюється за формулою середньої геометричної з ланцюгових темпів зростання:

$$\bar{k} = \sqrt[n]{k_1 \cdot k_2 \dots k_n} = \sqrt[n]{\prod_{t=1}^n k_t}, \quad (6.15)$$

де n – кількість темпів зростання за однакові інтервали часу.

Наприклад, за останні 3 роки невинно зростали тарифи на автоперевезення. Темпи зростання становили: 1997 р. – 1,03; 1998 р. – 1,08; 1999 р. – 1,05. Середньорічний темп зростання:

$$\bar{k} = \sqrt[3]{1,03 \cdot 1,08 \cdot 1,05} = 1,053 \text{ або } 105,3 \%$$

Урахувавши взаємозв'язок ланцюгових і базисних темпів зростання, формулу середньої геометричної можна записати так:

$$\bar{k} = \sqrt[n]{K_n} = \sqrt[n]{\frac{y_n}{y_0}}. \quad (6.16)$$

Скажімо, вартість електроспоживання за три роки зросла на 12,5%. Середньорічний темп зростання становить

$$\bar{k} = \sqrt[3]{1 + 0,125} = \sqrt[3]{1,125} = 1,04.$$

Тобто щороку вартість електроенергії дорожчала у середньому на 4%. Розрахунок можна виконувати за допомогою логарифмів:

$$\lg \bar{k} = \frac{1}{n} \sum \lg k_t \quad \text{або} \quad \lg \bar{k} = \frac{1}{n} \cdot (\lg y_n - \lg y_0).$$

Наприклад, прямі іноземні інвестиції в галузь 1996 року становили 172 млн дол. США, 1999 року – 313,7. Десяткові логарифми, відповідно, 2,2355 і 2,4965. Звідси

$$\lg \bar{k} = \frac{1}{3} \cdot (2,4965 - 2,2355) = 0,087. \quad \text{Потенціювання дає } \bar{k} = 1,222.$$

Отже, середній темп зростання можна обчислити на основі:

- ланцюгових темпів зростання k_t ;
- кінцевого (за весь період) темпу зростання K_n ;
- кінцевого y_n і базисного y_0 рівнів ряду.

При інтерпретації середньої абсолютної чи відносної швидкості динаміки необхідно вказувати часовий інтервал, до якого належать середні, та часову одиницю вимірювання (рік, квартал, місяць, доба тощо).

6.4 Характеристика основної тенденції розвитку

Будь-який динамічний ряд у межах періоду з більш-менш стабільними умовами розвитку виявляє певну закономірність зміни рівнів – *загальну тенденцію*. Одним явищем притаманна тенденція до зростання, іншим – до зниження рівнів. Зростання чи зниження рівнів динамічного ряду, у свою чергу, відбувається по-різному: рівномірно, прискорено чи уповільнено. Нерідко ряди динаміки через коливання рівнів не виявляють чітко вираженої тенденції.

Щоб виявити й схарактеризувати основну тенденцію, застосовують різні способи згладжування та аналітичного вирівнювання динамічних рядів.

Суть *згладжування* полягає в укрупненні інтервалів часу та заміні первинного ряду рядом середніх по інтервалах. У середніх взаєморівноважуються коливання рівнів первинного ряду, внаслідок чого тенденція розвитку вирізняється чіткіше.

Залежно від схеми формування інтервалів розрізняють ступінчасті та ковзні (плинні) середні. Ряди цих середніх схематично зображено на рис. 6.2 для інтервалу $m = 3$. Очевидно, що ковзна середня більш гнучка і може краще відбити особливості тенденції.

При розрахунку *ковзних середніх* кожний наступний інтервал утворюється на основі попереднього заміною одного рівня. Оскільки середня \bar{y}_j належить до середини інтервалу, то доцільно формувати інтервали з непарного числа рівнів первинного ряду. У разі парного числа рівнів необхідна додаткова процедура центрування (усереднення кожної пари значень \bar{y}_j).

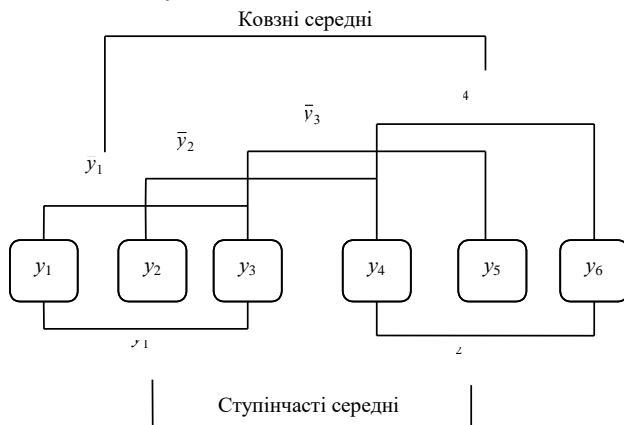


Рисунок 6.2 – Схеми утворення інтервалів згладжування динамічних рядів

Ряд ковзних середніх коротший за первинний на $(m - 1)$ рівнів, що потребує уважного ставлення до вибору ширини інтервалу m . Якщо первинному ряду динаміки притаманна певна періодичність коливань, то інтервал згладжування має бути рівним або кратним періоду коливань.

Порядок згладжування методом ковзної середньої розглянемо на прикладі динамічного ряду споживання електричної енергії у регіоні (табл. 6.3). Ширина інтервалу згладжування $m = 3$. Первинний ряд складається із семи рівнів, ряд ковзних середніх – з п'яти, тобто на два рівні коротший $(7 - 3 + 1)$.

Перше значення ковзної середньої обчислюється як арифметична проста, кожне наступне можна визначити на основі попередньої середньої та коригуючого доданка.

Таблиця 6.3 – Розрахунок ковзних середніх

Порядковий номер року	Y_t , ц/га	Ковзна середня \bar{y}_j	Розрахунок \bar{y}_j
1	23,8	–	–
2	19,1	21,6	$(23,8 + 19,1 + 21,9) : 3 = 21,6$
3	21,9	22,2	$21,6 + (25,6 - 23,8) : 3 = 22,2$
4	25,6	24,0	$22,2 + (24,5 - 19,1) : 3 = 24,0$
5	24,5	26,2	$24,0 + (28,5 - 21,9) : 3 = 26,2$
6	28,5	26,9	$26,2 + (27,7 - 25,6) : 3 = 26,9$
7	27,7	–	–

Наприклад:

$$\bar{y}_1 = \frac{23,8+19,1+21,9}{3} = 21,6 \text{ (ц/га);}$$

$$\bar{y}_2 = 21,6 + \frac{25,6-23,8}{3} = 22,2 \text{ (ц/га);}$$

$$\bar{y}_3 = 22,2 + \frac{24,5-19,1}{3} = 24,0 \text{ (ц/га) і т. д.}$$

У згладженому ряді трирічних ковзних середніх усунено первинні коливання врожайності й чітко виявляється систематичне підвищення її рівня.

Метод ковзних середніх застосовують також для попередньої обробки дуже коливних динамічних рядів; можливе подвійне згладжування.

При *аналітичному вирівнюванні динамічного ряду* фактичні значення y_t замінюються обчисленими на основі певної функції $Y = f(t)$, яку називають *трендовим рівнянням* (t – змінна часу, Y – теоретичний рівень ряду).

Вибір типу функції ґрунтується на теоретичному аналізі суті явища, яке вивчається, і характері його динаміки. Зазвичай перевага

надається функціям, параметри яких мають чіткий економічний зміст і вимірюють абсолютну чи відносну швидкість розвитку. Суттєвою підмогою при виборі функцій є аналіз ланцюгових характеристик інтенсивності динаміки. Якщо ланцюгові абсолютні прирости відносно стабільні, не мають чіткої тенденції до зростання чи зменшення, вирівнювання ряду виконується на основі лінійної функції: $Y_t = a + bt$

Якщо ж відносно стабільними є ланцюгові темпи приросту, то найбільш адекватною такому характеру динаміки є експонента $Y_t = ab^t$. У зазначених функціях t – порядковий номер періоду (дати), a – рівень ряду при $t = 0$. Параметр b характеризує швидкість динаміки: середню абсолютну в лінійній функції і середню відносну – в експоненті. Коли характеристики швидкості розвитку зростають (чи зменшуються), використовуються інші функції (парабола 2-го степеня, модифікована експонента тощо).

Параметри трендових рівнянь визначають методом найменших квадратів. Згідно з умовою мінімізації суми квадратів відхилень фактичних рівнів ряду y_t від теоретичних Y_t параметри визначаються розв'язуванням системи нормальних рівнянь. Для лінійної функції вона записується так:

$$na + b \sum t = \sum y, \quad (6.17)$$

$$a \sum t + b \sum t^2 = \sum yt. \quad (6.18)$$

Система рівнянь спрощується, якщо початок відліку часу ($t = 0$) перенести в середину динамічного ряду. Тоді значення t , розміщені вище середини, будуть від'ємними, а нижче — додатними. При непарному числі членів ряду (наприклад, $n = 5$) змінній t надаються значення з інтервалом одиниця: $-2, -1, 0, 1, 2$; при парному: $-2,5, -1,5, -0,5, 0,5, 1,5, 2,5$. В обох випадках $\sum t = 0$, а система рівнянь набирає вигляду:

$$na = \sum y, \quad (6.19)$$

$$b \sum t^2 = \sum yt. \quad (6.20)$$

Отже, $a = \frac{\sum y}{n}$, $b = \frac{\sum yt}{\sum t^2}$. Значення $\sum t^2$ можна визначити за формулами:

– для непарного числа членів ряду

$$\sum t^2 = \frac{n(n^2-1)}{12}; \quad (6.21)$$

– для парного числа членів ряду

$$\sum t^2 = \frac{n(n^2-1)}{3}. \quad (6.22)$$

Порядок обчислення параметрів лінійної функції розглянемо на прикладі динамічного ряду виробництва електрообладнання в регіоні (табл. 6.4).

Таблиця 6.4 – Динаміка видобутку нафти

Рік	Y_t , млн шт	Δ_t	Змінна часу t	$y_t t$	$Y_t = 74,5 + 3,8t$
1993	63,5	–	–3	–190,5	63,1
1994	66,8	3,3	–2	–133,6	66,9
1995	71,0	4,2	–1	–71,0	70,7
1996	74,3	3,3	0	0	74,5
1997	76,9	2,6	1	76,9	78,3
1998	82,2	5,3	2	164,4	82,1
1999	86,8	4,6	3	260,4	85,9
Разом	521,5	×	0	106,6	521,5

Ланцюгові абсолютні прирости динамічного ряду практично стабільні, тому тенденцію можна описати лінійною функцією. Оскільки довжина ряду $n = 7$, то $\sum t^2 = 7(7^2 - 1) : 12 = 28$. Параметри трендового рівняння становлять:

$$a = \sum y_t : n = 521,5 : 7 = 74,5;$$

$$b = \sum y_t t : \sum t^2 = 106,6 : 28 = 3,8.$$

Лінійний тренд має вигляд $Y_t = 74,5 + 3,8t$, тобто середній рівень виробництва електрообладнання становить 74,5 млн т, середньорічний приріст – 3,8 млн т.

В останній графі таблиці для кожного року наведено теоретичні рівні Y_t , тобто очікувані рівні видобутку нафти в t -му році, зумовлені дією основних чинників розвитку галузі: для 1993 р. $Y_1 = 74,5 + 3,8(-3) = 63,1$ млн т, для 1994 р. $Y_2 = 74,5 + 3,8(-2) = 66,9$ млн т і т. д.

Суми фактичних рівнів $\sum y_t$ і розрахованих за лінійним трендом теоретичних рівнів $\sum Y_t$ однакові: $\sum y_t = \sum Y_t = 521,5$ млн т.

Продовження виявленої тенденції за межі ряду динаміки називають *екстраполяцією тренду*. Це один із методів статистичного прогнозування, передумовою використання якого є незмінність причинного комплексу, що формує тенденцію. Прогнозний, очікуваний рівень Y_{t+v} залежить від бази прогнозування та періоду упередження v . Так, припускаючи, що умови, в яких формувалась тенденція видобутку нафти, найближчим часом не зміняться, визначимо прогноз на 2001 рік. Базою прогнозування є теоретичний рівень 1999 р., період упередження $v = 2$. Очікуваний в 2001 р. видобуток нафти досягне 93,5 млн. т:

$$Y_{t+v} = 85,9 + 3,8 \cdot 2 = 93,5.$$

Метод екстраполяції дає точковий прогноз. На практиці, як правило, визначають довірчі межі прогнозного рівня $Y_{t+v} \pm ts_p$, де s_p – стандартна похибка прогнозу, t – квантиль розподілу Стьюдента.

6.5 Оцінка коливань та сталості динаміки

Фактичні рівні динамічних рядів під впливом різного роду чинників варіюють, відхиляючись від основної тенденції розвитку. В одних рядах коливання мають систематичний, закономірний характер, повторюються через певні інтервали часу, в інших – не мають такого характеру і тому називаються *випадковими*. У конкретному ряду можуть поєднуватися систематичні та випадкові коливання.

Найпростішою оцінкою систематичних коливань є *коефіцієнти нерівномірності*, які обчислюються відношенням максимального і мінімального рівнів динамічного ряду до середнього. Чим більша нерівномірність процесу, тим більша різниця між цими двома коефіцієнтами.

Наприклад, споживання питної води за добу становить 7200 м^3 , у середньому за годину $7200 : 24 = 300 \text{ м}^3$. Найбільший рівень споживання води в період від 20-ї до 21-ї години – 381 м^3 , найменший – у період від 2-ї до 3-ї години – 165 м^3 .

Коефіцієнти нерівномірності такі:

$$K_{\max} = 381 : 300 = 1,27;$$

$$K_{\min} = 165 : 300 = 0,55.$$

Амплітуда коливань у розмірі 72 пункти $[100 \cdot (1,27 - 0,55)]$ свідчить про істотну нерівномірність споживання води протягом доби.

Окремим соціально-економічним процесам притаманні внутрішньорічні, сезонні піднесення і спади. Наприклад, виробництво й переробка сільськогосподарської продукції, нерівномірне завантаження транспорту, коливання попиту на товари тощо. *Сезонні коливання* виявляються і аналізуються на основі рядів щомісячних або щоквартальних даних.

Характер сезонних коливань описується «сезонною хвилею», яку утворюють індекси сезонності. У динамічних рядах, які не виявляють чіткої тенденції розвитку, *індекси сезонності* є відношенням фактичних місячних (квартальних) рівнів y_t до середньомісячного (середньоквартального) за рік \bar{y} , %:

$$I_c = 100 \frac{y_t}{\bar{y}}. \quad (6.23)$$

Порядок обчислення сезонної хвилі розглянемо на прикладі споживання електроенергії комунальним господарством регіону (табл.

5). Середньомісячний обсяг споживання $\bar{y} = 1848 : 12 = 154$ млн квт · год. Індеси сезонності коливаються від 121,4% у грудні [(187 : 154)100] до 80,5% у липні [(124 : 154)100]. Амплітуда сезонних коливань становить $R_t = 121,4 - 80,5 = 40,9$ п. п. Характер сезонної хвилі схематично ілюструє рис. 6.3.

Оскільки сезонні коливання з року в рік не лишаються незмінними, виявити сталу сезонну хвилю можна за допомогою середніх індесів сезонності за кілька років:

$$\bar{I}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{c_i}, \quad (6.24)$$

де n – число років.

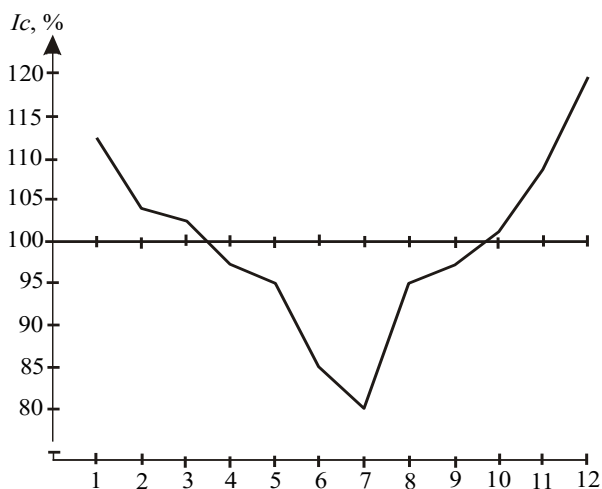


Рисунок 6.3 – Сезонна хвиля споживання електроенергії

Таблиця 6.5 – Щомісячна динаміка споживання електроенергії

Місяць року	Спожито електроенергії, y_t , млн. квт·год	Індекс сезонності I_c , %	$I_c - 100$	$(I_c - 100)^2$
Січень	172	111,7	11,7	136,89
Лютий	161	104,5	4,5	20,25
Березень	158	102,6	2,6	6,76
Квітень	151	98,0	-2,0	4,00
Травень	147	95,5	-4,6	20,25
Червень	130	84,4	-15,6	243,36
Липень	124	80,5	-19,5	380,25
Серпень	146	94,9	-5,1	26,01
Вересень	149	96,8	-3,2	10,24

Жовтень	155	100,6	0,6	0,36
Листопад	168	109,1	9,1	82,81
Грудень	187	121,4	21,4	457,96
Разом	1848	100	0	1389,14

Для порівняння інтенсивності сезонних коливань різних явищ чи одного й того самого явища в різні роки використовуються узагальнюючі характеристики варіації індексів сезонності:

середнє лінійне відхилення:

$$\bar{l}_c = \frac{1}{12} \sum_1^{12} |I_c - 100|; \quad (6.25)$$

або середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_1^{12} (I_c - 100)^2}. \quad (6.26)$$

У динамічному ряду споживання електроенергії (табл. 6.6) середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1389,14}{12}} = 10,8 \text{ п.п.}$$

Якщо спостерігається тенденція розвитку, попередньо проводиться згладжування чи вирівнювання динамічного ряду, визначаються теоретичні рівні для кожного місяця (кварталу) року, а індекс сезонності обчислюється як відношення фактичних рівнів ряду y_t до теоретичних Y_t , тобто $I_c = 100 \frac{y_t}{Y_t}$.

Розрахунок сезонної хвилі за наявності тенденції подано в табл. 6 на прикладі щоквартальної динаміки продажу електрообладнання. Тенденція ряду описується рівнянням $Y_t = 48,2 + 1,445 t$, де t змінюється в межах від $t_1 = -5,5$ до $t_n = +5,5$.

Таблиця 6.6 – Тренд і сезонні коливання продажу електрообладнання

Рік	Квартал	Кількість, шт.	Тренд Y_t	Індекс сезонності	Тренд, скоригований на сезонність, $Y_t \hat{I}_t = \hat{Y}_t$
1997	1	24,4	40,3	0,606	27,7
	2	52,6	41,7	1,262	51,0
	3	60,4	43,1	1,401	59,0
	4	34,0	44,6	0,763	32,1
1998	1	32,7	46,0	0,711	31,6
	2	56,2	47,5	1,184	58,0
	3	67,3	48,9	1,377	66,9
	4	36,2	50,4	0,719	36,1
1999	1	37,8	51,8	0,730	35,6

	2	65,3	53,3	1,225	65,1
	3	73,1	54,7	1,337	74,9
	4	38,4	56,1	0,689	40,4
Разом	×	578,4	578,4	12	578,4

Середньозважені індекси сезонності (для яких ваги – середньорічні обсяги продажу) становлять:

Для першого кварталу

$$\hat{I}_1 = \frac{60,6 \cdot 42,85 + 71,1 \cdot 48,1 + 73,0 \cdot 53,65}{144,6} = 68,7.$$

Аналогічно розраховані індекси для другого кварталу $\hat{I}_2 = 122,2$; для третього $\hat{I}_3 = 136,9$; для четвертого $\hat{I}_4 = 72,0$.

Скоригований на сезонність тренд наведено в останній графі табл. 6.7. Для першого кварталу 1997 р.

$$\hat{Y}_t = 40,3 \cdot 0,687 = 27,7.$$

Відхилення фактичних рівнів y_t від скоригованих трендів \hat{Y}_t зумовлено дією випадкових причин.

Абсолютною мірою випадкових коливань є *середнє квадратичне відхилення* s_e , яке обчислюється на основі залишкової дисперсії:

$$s_e = \sqrt{s_e^2}. \quad (6.27)$$

За даними табл. 6.7 залишкова дисперсія продажу безалкогольних напоїв становить

$$s_e^2 = \frac{1}{n-m} \sum_1^n (y_t - \hat{Y}_t)^2 = \frac{35,76}{12-2} = 3,576,$$

звідки $s_e = \sqrt{3,576} = 1,89$.

Поряд з абсолютною мірою випадкових коливань використовують відносну – *коефіцієнт варіації* $V_e = 100 \frac{s_e}{\bar{y}}$, де \bar{y} – середній рівень динамічного ряду. Щодо випадкових коливань продажу безалкогольних напоїв, то

$$V_e = 100 \frac{1,89}{48,2} = 3,92\%.$$

Різницю $100 - V_e$ використовують для оцінки сталості динаміки. У розглянутому прикладі ця різниця наближається до 100%, що свідчить про сталий характер тенденції і сезонних коливань реалізації безалкогольних напоїв.

Таблиця 6.7 – До розрахунку залишкової дисперсії

t	y_t	\hat{Y}_t	$y_t - \hat{Y}_t$	$(y_t - \hat{Y}_t)^2$
-5,5	24,4	27,7	-3,3	10,89
-4,5	52,6	51,0	1,6	2,56
-3,5	60,4	59,0	1,4	1,96
-2,5	34,0	32,1	1,9	3,61
-1,5	32,7	31,6	1,1	1,21
-0,5	56,2	58,0	-1,8	3,24
0,5	67,3	66,9	0,4	0,16
1,5	36,2	36,1	0,1	0,01
2,5	37,8	35,6	2,2	4,84
3,5	65,3	65,1	0,2	0,04
4,5	73,1	74,9	-1,8	3,24
5,5	38,4	40,4	-2,0	4,00
Разом	578,4	578,4	0	35,76

Контрольні запитання за лекцією 6

1. Як виявляється динамічність та інерційність явищ?
2. Наведіть приклад динамічного ряду, зазначте його елементи та особливості.
3. Укажіть, які з наведених рядів є динамічними – моментними чи інтервальними?
4. Залишки міді на складі електротехнічного обладнання становили, кг: на 1 квітня – 64, на 1 травня – 66, на 1 червня – 60, на 1 липня – 62. Визначіть середньомісячний залишок міді за другий квартал.
5. Як виміряти інтенсивність динаміки? Чим різняться базисні та ланцюгові характеристики динаміки?
6. Поясніть взаємозв'язок абсолютного приросту і темпу приросту. Доведіть, що абсолютне значення одного процента приросту становить соту частину рівня, узятого за базу порівняння.
7. За п'ятиріччя випуск електрообладнання в регіоні збільшився на 45%. Абсолютне значення одного процента приросту становило 2,4 млн. т. Визначіть середньорічний абсолютний приріст випуску за цей період.
8. Тарифи на послуги зв'язку за перше півріччя зросли на 5%, за друге – на 6%. На скільки процентів зросли тарифи за рік?
9. Як ви розумієте тенденцію розвитку? Наведіть приклади тенденції.
10. Яка різниця між згладжуванням і вирівнюванням динамічного ряду? Які методи використовують у тому й іншому випадку?
11. Зазначте особливості методу ковзних середніх. Скільки п'ятичленних ковзних середніх можна обчислити в ряду динаміки з 15 рівнів?

ЛЕКЦІЯ 7 МОДЕЛІ ДИНАМІКИ

План

- 7.1 Методи моделювання часових рядів
- 7.2 Перевірка гіпотези про існування тренда
- 7.3 Моделювання тенденції часового ряду: згладжування та аналітичне вирівнювання
- 7.4 Моделювання сезонних коливань

7.1 Методи моделювання часових рядів

При побудові моделюванні використовуються два типи даних:

- 1) дані, що характеризують сукупність різних об'єктів у певний момент часу;
- 2) дані, що характеризують один об'єкт за низку послідовних моментів часу.

Моделі, збудовані за даними першого типу, називаються просторовими моделями. Моделі, побудовані з урахуванням другого типу даних, називаються моделями часових рядів.

Часовий ряд (ряд динаміки) – це сукупність значень будь-якого показника за кілька послідовних моментів чи періодів часу. Кожен рівень часового ряду формується під впливом великої кількості факторів, які умовно можна поділити на три групи:

- 1) фактори, що формують тенденцію низки;
- 2) фактори, що формують циклічні коливання низки;
- 3) випадкові чинники.

Розглянемо вплив кожного фактора на часовий ряд окремо.

Ряди, в яких рівні коливаються навколо постійної середньої, називаються стаціонарними. Ряди, що характеризують технічні системи, як правило, нестационарні. Для більшості з них характерна систематична зміна рівнів з нерегулярними коливаннями, коли піки і западини чергуються з різною інтенсивністю. Скажімо, цикли повторюються з різною тривалістю і різною амплітудою коливань.

Більшість часових рядів відповідних показників мають тенденцію, що характеризує сукупний довготривалий вплив безлічі факторів на динаміку досліджуваного показника. Всі ці фактори, взяті окремо, можуть надавати різноспрямований вплив на досліджуваний показник. Однак у сукупності вони формують його зростаючу чи спадну тенденцію. На рис. 7.1 показаний гіпотетичний часовий ряд, що містить зростаючу тенденцію.

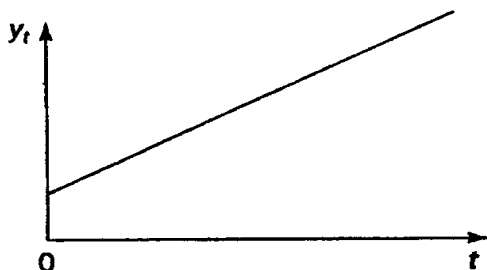


Рисунок 7.1 – Часовий ряд, що містить зростаючу тенденцію

Також досліджуваний показник може бути схильний до циклічних коливань. Ці коливання можуть мати сезонний характер, оскільки діяльність щодо роботи електрообладнання залежить від пори року. За наявності великих масивів даних за тривалі часові відтинки можна виявити циклічні коливання, пов'язані із загальною динамікою. На рис. 7.2 представлений гіпотетичний часовий ряд, що містить лише сезонну компоненту.



Рисунок 7.2 – Часовий ряд, що містить сезонну компоненту

Деякі часові ряди не містять тенденції та циклічної компоненти, а кожен наступний їхній рівень утворюється як сума середнього рівня ряду та деякої (позитивної чи негативної) випадкової компоненти. Приклад ряду, що містить лише випадкову компоненту, наведено на рис. 7.3.

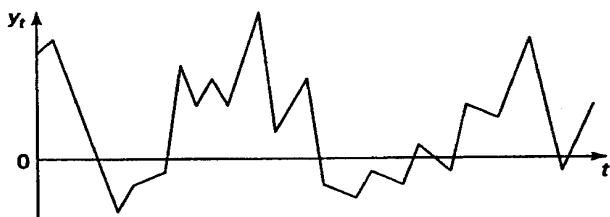


Рисунок 7.3 – Часовий ряд, що містить випадкову компоненту

Очевидно, що реальні дані не випливають цілком і повністю з описаних вище моделей. Найчастіше вони містять усі три компоненти. Кожен їхній рівень формується під впливом тенденції, сезонних коливань та випадкової компоненти.

Найчастіше фактичний рівень часового ряду можна як суму чи твір трендової, циклічної і випадкової компонент. Модель, у якій часовий ряд представлений як сума перерахованих компонентів, називається адитивною моделлю часового ряду. Модель, у якій часовий ряд представлений як добуток перерахованих компонентів, називається мультиплікативною моделлю часового ряду. Основне завдання дослідження окремого часового ряду – виявлення та надання кількісного виразу кожної з перерахованих вище компонент для того, щоб використовувати отриману інформацію для прогнозування майбутніх значень ряду або при побудові моделей взаємозв'язку двох або більше часових рядів.

7.2 Перевірка гіпотези про існування тренда

За наявності у часовому ряді тенденції та циклічних коливань значення кожного наступного рівня ряду залежать від попередніх. Кореляційну залежність між послідовними рівнями часового ряду називають автокореляцією рівнів ряду.

Кількісно її можна виміряти за допомогою лінійного коефіцієнта кореляції між рівнями вихідного часового ряду та рівнями цього ряду, зрушеними на кілька кроків у часі.

Формула для розрахунку коефіцієнта автокореляції має вигляд

$$r_1 = \frac{\sum_{t=2}^n (y_t - \bar{y}_1)(y_{t-1} - \bar{y}_2)}{\sqrt{\sum_{t=2}^n (y_t - \bar{y}_1)^2 \sum_{t=2}^n (y_{t-1} - \bar{y}_2)^2}}, \quad (7.1)$$

де

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{n-1} \sum_{t=2}^n y_t, \quad \bar{y}_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{t=2}^n y_{t-1}. \quad (7.2)$$

Цю величину називають коефіцієнтом автокореляції рівнів ряду першого порядку, оскільки він вимірює залежність між сусідніми рівнями ряду.

Аналогічно можна визначити коефіцієнти автокореляції другого та вищих порядків. Так, коефіцієнт автокореляції другого порядку характеризує тісноту зв'язку між рівнями та визначається за формулою:

$$r_2 = \frac{\sum_{t=3}^n (y_t - \bar{y}_3)(y_{t-2} - \bar{y}_4)}{\sqrt{\sum_{t=3}^n (y_t - \bar{y}_3)^2 \sum_{t=3}^n (y_{t-2} - \bar{y}_4)^2}} \quad (7.3)$$

де

$$\bar{y}_3 = \frac{1}{n-2} \sum_{t=3}^n y_t, \bar{y}_4 = \frac{1}{n-2} \sum_{t=3}^n y_{t-2}. \quad (7.4)$$

Число періодів, якими розраховується коефіцієнт автокореляції, називають лагом. Зі збільшенням лага число пар значень, якими розраховується коефіцієнт автокореляції, зменшується. Вважається за доцільне для забезпечення статистичної достовірності коефіцієнтів автокореляції використовувати правило – максимальний лаг повинен бути не більше $n/2$.

Властивості коефіцієнта автокореляції.

1. Він будується за аналогією з лінійним коефіцієнтом кореляції і таким чином характеризує тісноту лише лінійного зв'язку поточного та попереднього рівнів ряду. Тому за коефіцієнтом автокореляції можна будувати висновки про наявності лінійної (чи близької до лінійної) тенденції. Для деяких часових рядів, що мають сильну нелінійну тенденцію (наприклад, параболу другого порядку або експоненту), коефіцієнт автокореляції.

2. За знаком коефіцієнта автокореляції не можна робити висновок про зростаючу або спадну тенденцію в рівнях ряду. Більшість часових рядів економічних даних містять позитивну автокореляцію рівнів, проте при цьому можуть мати спадну тенденцію.

Послідовність коефіцієнтів автокореляції рівнів першого, другого тощо. порядків називають автокореляційною функцією часового ряду. Графік залежності її значень від величини лага (порядку коефіцієнта автокореляції) називається корелограмою.

Аналіз автокореляційної функції і корелограмми дозволяє визначити лаг, у якому автокореляція найбільш висока, отже, і лаг, у якому зв'язок між поточним і попередніми рівнями низки найтісніша, тобто, за допомогою аналізу автокореляційної функції та корелограми можна виявити структуру ряду.

Якщо найвищим виявився коефіцієнт автокореляції першого порядку, досліджуваний ряд містить лише тенденцію. Якщо найвищим

виявився коефіцієнт автокореляції порядку, то ряд містить циклічні коливання з періодичністю τ моментів часу. Якщо жоден з коефіцієнтів автокореляції не є значущим, можна зробити одне з двох припущень щодо структури цього ряду: або ряд не містить тенденції і циклічних коливань, або містить сильну нелінійну тенденцію, для виявлення якої потрібно провести додатковий аналіз. Тому коефіцієнт автокореляції рівнів та автокореляційну функцію доцільно використовувати для виявлення у тимчасовому ряді наявності чи відсутності трендової компоненти та циклічної (сезонної) компоненти.

7.3 Моделювання тенденції часового ряду: згладжування та аналітичне вирівнювання

Поширеним способом моделювання тенденції часового ряду є побудова аналітичної функції, що характеризує залежність рівнів від часу, або тренду. Цей спосіб називають аналітичним вирівнюванням часового ряду.

Оскільки залежність від часу може набувати різних форм, для її формалізації можна використовувати різні види функцій. Для побудови трендів найчастіше застосовуються такі функції:

$$\text{Лінійний тренд: } \hat{y}_t = a + b \cdot t; \quad (7.5)$$

$$\text{гіпербола: } \hat{y}_t = a + \frac{b}{t}; \quad (7.6)$$

експоненціальний тренд:

$$\hat{y}_t = e^{a+bt} \quad (\text{або } \hat{y}_t = a \cdot b^t); \quad (7.7)$$

$$\text{ступенева функція: } \hat{y}_t = a \cdot t^b; \quad (7.8)$$

$$\text{поліноми різних ступенів: } \hat{y}_t = a + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + \dots + b_m \cdot t^m. \quad (7.9)$$

Параметри кожного з перерахованих вище трендів можна визначити звичайним МНК, використовуючи як незалежний змінний час $t = 1, 2, \dots, n$, а як залежна змінна – фактичні рівні часового ряду \hat{y}_t та \hat{y}_{t-1} . Для нелінійних трендів попередньо проводять стандартну процедуру їхньої лінеаризації.

Існує кілька способів визначення типу тенденції. До найпоширеніших методів відносяться якісний аналіз досліджуваного процесу, побудова і візуальний аналіз графіка залежності рівнів від часу. У цих цілях можна використовувати і коефіцієнти автокореляції рівнів ряду. Тип тенденції можна визначити шляхом порівняння коефіцієнтів автокореляції першого порядку, розрахованих за вихідними та перетвореними рівнями ряду. Якщо тимчасовий ряд має лінійну тенденцію, то його сусідні рівні тісно корелюють. У цьому випадку коефіцієнт автокореляції першого порядку рівнів вихідного ряду має бути високим. Якщо тимчасовий ряд містить нелінійну тенденцію, наприклад, у формі експоненти, коефіцієнт автокореляції

першого порядку за логарифмами рівнів вихідного ряду буде вищим, ніж відповідний коефіцієнт, розрахований за рівнями ряду. Чим сильніше виражена нелінійна тенденція в тимчасовому ряді, що вивчається, тим більшою мірою будуть відрізнятися значення зазначених коефіцієнтів.

Вибір найкращого рівняння у разі, коли ряд містить нелінійну тенденцію, можна здійснити шляхом перебору основних форм тренду, розрахунку за кожним рівнянням скоригованого коефіцієнта детермінації та середньої помилки апроксимації. Цей метод легко реалізується під час комп'ютерної обробки даних.

Досить поширеним і простим методом аналізу динаміки є згладжування ряду. Суть його полягає в заміні фактичних рівнів y_i середніми за певними інтервалами. Варіація середніх порівняно з варіацією рівнів первинного ряду значно менша, а тому характер динаміки проявляється чіткіше. Процедуру згладжування називають фільтруванням, а оператори, за допомогою яких вона здійснюється, – фільтрами. На практиці використовують переважно лінійні фільтри, з-поміж яких найпростіший – *ковзна середня* з інтервалом згладжування $m < n$. Інтервали поступово зміщуються на один елемент

$$y_1, y_2, \dots, y_m; \quad (7.10)$$

$$y_2, y_3, \dots, y_{m+1}; \quad (7.11)$$

$$y_3, y_4, \dots, y_{m+2} \text{ і т.д.} \quad (7.12)$$

Для кожного з них визначається середня \bar{y} , яка припадає на середину інтервалу. Якщо m – непарне число, тобто $m = 2p + 1$, а ваги членів ряду в межах інтервалу однакові

$$a_r = \frac{1}{(2p + 1)}, \quad (7.13)$$

то

$$\bar{y}_t = \frac{1}{(2p + 1)} \cdot \sum_{t-p}^{t+p} y_t, \quad (7.14)$$

де y_i – фактичне значення рівня в i -й момент;
 i – порядковий номер рівня в інтервалі.

При парному m середина інтервалу знаходиться між двома часовими точками і тоді проводиться додаткова процедура *центрування* (усереднення кожної пари значень).

Ковзна середня з однаковими вагами a_r при згладжуванні динамічного ряду погашає не лише випадкові, а й властиві конкретному процесу періодичні коливання. Припускаючи наявність таких коливань, використовують зважену ковзну середню, тобто кожному рівню в

межах інтервалу згладжування надають певну вагу. Способи формування вагової функції різні. В одних випадках ваги відповідають членам розкладання бінома $\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right)^{2p}$, при $m=3$, скажімо $a_r = \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$.

В інших випадках до даних інтервалу згладжування добирається певний поліно, наприклад, парабола $\bar{y}_i = a + b_i + c_i^2$, де $i = -p, \dots, p$. Тоді вагова функція така:

$$\text{для } m=5 \quad a_r = \frac{1}{35}(-3, 12, 17, 12, -3);$$

$$\text{для } m=7 \quad a_r = \frac{1}{21}(-2, 3, 6, 7, 6, 3, -2) \text{ і т.д.}$$

Як видно з формул, ваги симетричні відносно центра інтервалу згладжування, сума їх з урахуванням винесеного за дужки множника дорівнює $\sum a_r = 1$.

Основна перевага ковзної середньої – наочність і простота тлумачення тенденції. Проте не слід забувати, що ряд ковзних середніх коротший за первинний ряд на $2p$ рівнів, а отже, втрачається інформація про крайні члени ряду. І чим ширший інтервал згладжування, тим відчутніші втрати, особливо нової інформації. Окрім того, маючи спільну основу розрахунку, ковзні середні виявляються залежними, що при згладжуванні значних коливань навіть за відсутності циклів у первинному ряду може вказувати на циклічність процесу (ефект Слуцького).

У симетричних фільтрах стара і нова інформація рівноважна, а при прогнозуванні важливішою є нова інформація. У такому разі використовують асиметричні фільтри. Найпростіший з них – ковзна середня, яка замінює не центральний, а останній член ряду (*адаптивна середня*):

$$\bar{y}_t = \bar{y}_{t-1} + \frac{y_t - y_{t-m}}{m}. \quad (7.15)$$

У наведеній формулі перший елемент характеризує інерцію розвитку, другий – адаптує середню до нових умов. Таким чином середня \bar{y} з кожним кроком ніби оновлюється. Ступінь оновлення визначається постійною вагою – $\frac{1}{m}$

7.4 Моделювання сезонних коливань

Найпростіший підхід до моделювання сезонних коливань – це розрахунок значень сезонної компоненти методом ковзної середньої та побудова адитивної чи мультиплікативної моделі часового ряду.

Загальний вигляд адитивної моделі наступний:

$$Y = T + S + E. \quad (7.16)$$

Ця модель передбачає, що кожен рівень часового ряду може бути представлений як сума трендової (T), сезонної (S) та випадкової (E) компонент.

Общий вид мультиплікативної моделі виглядає так:

$$Y = T \cdot S \cdot E. \quad (7.17)$$

Ця модель передбачає, що кожен рівень тимчасового ряду може бути представлений як добуток (T), сезонної (S) та випадкової (E) компонент.

Вибір однієї з двох моделей складає основі аналізу структури сезонних коливань. Якщо амплітуда коливань приблизно стала, будують адитивну модель часового ряду, в якій значення сезонної компоненти передбачаються постійними для різних циклів. Якщо амплітуда сезонних коливань зростає або зменшується, будують мультиплікативну модель часового ряду, яка ставить рівні в залежність від значень сезонної компоненти.

Побудова адитивної та мультиплікативної моделей зводиться до розрахунку значень T , S і E для кожного рівня.

Процес побудови моделі включає наступні кроки.

- 1) Вирівнювання вихідного ряду методом ковзної середньої.
- 2) Розрахунок значень сезонної компонент S .
- 3) Усунення сезонної компоненти з вихідних рівнів ряду та отримання вирівняних даних ($T + E$) в адитивній або ($T \cdot E$) в мультиплікативній моделі.
- 4) Аналітичне вирівнювання рівнів ($T + E$) або ($T \cdot E$) і розрахунок значень T з використанням отриманого рівняння тренда.
- 5) Розрахунок отриманих значень ($T + E$) або ($T \cdot E$).
- 6) Розрахунок абсолютних та/або відносних помилок. Якщо отримані значення помилок не містять автокореляції, ними можна замінити вихідні рівні ряду і надалі використовувати часовий ряд помилок для аналізу взаємозв'язку вихідного ряду та інших рядів тимчасових.

Контрольні запитання за лекцією 7

1. Перелічте властивості коефіцієнта автокореляції
2. Етапи процесу побудови моделі сезонних коливань
3. Способи визначення типу тенденції
4. Поняття часового ряду
5. Що визначає фільтрування?

ЛЕКЦІЯ 8 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

План

- 8.1 Базові положення теорії моделювання
- 8.2 Елементи динаміки електромехатронних пристроїв
- 8.3 Динамічні характеристики нелінійних елементів
- 8.4 Автоматизація моделювання динаміки електромехатронної системи

8.1 Базові положення теорії моделювання

Основою традиційних електромеханічних систем є одночасна наявність таких найважливіших компонент:

- приводів, що виконують функції виконавчих елементів;
- датчиків самої різної природи, дія яких заснована на різних фізичних і хімічних законах природи;
- інформаційно керуючих модулів (регуляторів), принцип дії яких заснований на роботі напівпровідникових елементів;
- аналогової або цифрової техніці, робота яких залежить від законів математичних співвідношень і теорії автоматичного керування;
- об'єктів керування, які діють по програмах розробників цих систем і відповідних джерел енергії, що живлять датчики, приводи і регулятори.

Вся система діє в контакт з зовнішнім середовищем, яке впливає на роботу всіх інших елементів. Приклад такої системи показаний на рис. 8.1.

У сучасних елементах електромеханічних систем (ЕМС) відбулися деякі зміни у функціональному призначенні і способі реалізації.

Наприклад, виконавчі модулі (приводи) перетворюють електричні сигнали впливу на об'єкт, тобто формують той вид впливу, який керується в певному контурі. Датчики здійснюють зворотне перетворення, а саме: вихідний сигнал об'єкта перетворюється ними в електричний сигнал. Регулятор виводиться як електронний модуль, що не передбачає в своєму складі механічних або оптичних компонент.

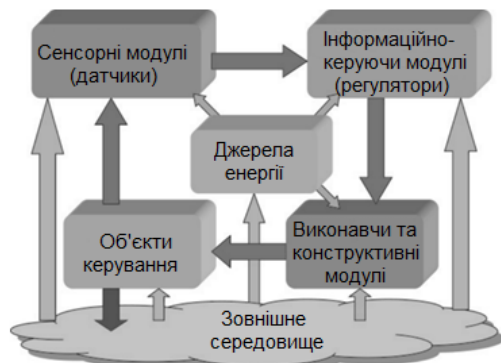


Рисунок 8.1 – Взаємодія електромеханічних систем [13]

У сучасних ЕМС не вдається розділити просторово і функціонально елементи на механічні, електронні, оптичні тощо. Це є основною їх відмінністю від мехатронних систем.

ЕМС будь-якої складності є деякою сукупністю модулів, об'єднаних загальним режимом функціонування. Для того щоб дослідити її динамічні властивості, необхідно адекватним способом оцінити і проаналізувати окремі складові системи. З цією метою використовуються різні динамічні характеристики, які дозволяють також оцінити зміни процесів у часі.

Найбільш загальною формою подання математичної моделі ЕМС або окремих її складових є рівняння динаміки, які достатньо адекватно відображають властивості реальних фізичних пристроїв. Математичні моделі динаміки ЕМС засновані на спрощеннях, що передбачає відкидання деяких факторів, несуттєвих для цього завдання.

Таким чином, складання математичної динамічної моделі становить компроміс між двома суперечливими вимогами: з одного боку, вона повинна найбільш повно відповідати реальній системі, з іншого – бути достатньо простою, щоб не ускладнювати дослідження. Розглянемо найбільш поширені способи подання математичних моделей динаміки ЕМС і їхніх вузлів та елементів.

Методи математичного моделювання та проектування ЕМС, які розробляються, повинні ґрунтуватися на єдиному, комплексному підході щодо об'єкта проектування [13]. Розглянемо базові елементи моделювання.

Моделлю (від лат. *Modulus* – зразок, міра) називається елемент, що володіє основними властивостями досліджуваного об'єкта.

Моделювання як метод дослідження застосовується тоді, коли досліджуваний об'єкт із будь-яких причин частково або повністю недоступний. Така ситуація виникає у разі проєктування принципово нової техніки, оскільки для обґрунтування прийнятих проєктних рішень необхідно досліджувати систему, поки ще неіснуючу фізично.

Моделювання може бути:

- натурним, коли модель має те саме фізичне походження, що і досліджуваний об'єкт;
- аналоговим, коли модель і об'єкт мають різне фізичне походження.

Якщо властивості досліджуваного об'єкта виражені математичними співвідношеннями (рівняннями, нерівностями), то говорять про наявність *математичної моделі*.

Високий рівень розвитку обчислювальної техніки і програмного забезпечення, досягнутий до теперішнього часу, дозволяє розглядати математичне моделювання як потужний інструмент наукових досліджень. Через те що ЕМС становлять технічно складні вироби, їхнє проєктування та підготовка до виробництва, а також значення математичного моделювання з використанням комп'ютерів, є визначальним.

Тому для ЕМС належною є САПР, яка обов'язково містить підсистему математичного моделювання динаміки. Сукупність елементів дозволяє в автоматизованому режимі розробляти моделі динаміки проєктованого виробу, проводити дослідження, вирішувати інженерні задачі оптимізації та синтезу.

У завданнях автоматизації моделювання, дослідження та проєктування електромехатронних комплексів і систем використовуються форми подання математичних моделей динаміки:

- системою диференційних рівнянь;
- пов'язаних графів;
- структурно-динамічною схемою.

Рівняння динаміки є найзагальнішою формою подання математичної моделі ЕМС або її окремих підсистем. Вони становлять рівняння, що пов'язують координати системи, її швидкості та прискорення з діючими на систему силами. Координатами можуть бути не тільки лінійні і кутові положення ланок механічної частини машини, але й обсяги робочої рідини гідроприводу, електричні заряди, що протікають через поперечні перерізи провідників, тощо.

Силовими параметрами в рівняннях динаміки ЕМС (крім «механічних» сил і їхніх моментів відносно будь-яких вісей) можуть бути тиск робочої рідини (газу), електрична напруга тощо.

У таких випадках формування рівнянь динаміки ЕМС в узагальнених координатах здійснюється методом Лагранжа [13], а також на основі пов'язаного графа системи, шляхом застосування до його вузлів законів Кірхгофа тощо [13].

Перспективним у задачах моделювання динаміки ЕМС є підхід, який полягає в тому, що динаміка виконавчого механізму (з декількома ступенями свободи в просторі узагальнених координат) представляється як точки, що зображені в рімановому просторі. У таких випадках диференціюються різноманіття, у яких дотичний простір кожної точки є кінцевомірним евклідовим простором.

Динаміка ЕМС та комплексів зазвичай характеризується нелінійними диференційними рівняннями. Застосування ефективних методів аналізу й синтезу, розроблених у теорії лінійних систем автоматичного керування, передбачає лінеаризацію рівнянь динаміки [13]. Лінійну модель динаміки системи можна представити у формі структурно-динамічної схеми, тобто у вигляді обмеженого набору лінійних динамічних ланок, об'єднаних у загальну структуру за допомогою прямих і зворотних зв'язків. Комп'ютерний аналіз і синтез систем автоматичного керування здійснюється на основі уявлення динаміки систем структурно-динамічними схемами. Такий принцип інтенсивно розвивався з 70-х рр. минулого століття і на цей час є поширеним та має спеціальні програмні комплекси Simulink, VisSim та інші. Суттєвими результатами, отриманими в цьому напрямку, є пакет програм ПДС («Проектування динамічних систем») [13].

Низка завдань проектування ЕМС, що мають просторові механізми з великою кількістю ступенів свободи, або управління їхнім рухом, вирішуються без складання та інтегрування складної системи рівнянь. Водночас можна обмежитись дослідженням інваріантів механічної частини (роботою узагальнених сил на малих переміщеннях, перетворенням кінетичної енергії, тощо) за допомогою тензорно-геометричного методу [13].

8.2 Елементи динаміки електромехатронних пристроїв

Для дослідження динамічних властивостей ЕМС необхідно аналізувати окремі складові системи. З цією метою використовуються різні динамічні характеристики, які дозволяють оцінити зміни процесів під час їхньої експлуатації.

Найбільш загальною формою подання математичної моделі ЕМС або окремих її складових є рівняння динаміки, які відображають властивості реальних фізичних пристроїв.

Розглянемо найбільш поширені способи подання математичних моделей динаміки електромехатронних вузлів і систем [13]. Для визначення динамічної характеристики електромехатронного модуля або системи використовуються звичайні *диференціальні рівняння*, які можуть бути представлені в тій або іншій формі. У загальному випадку вони мають вигляд:

$$y^n + a_n y^{(n-1)} + \dots + a_1 y = b_m u^m + \dots + b_0 u, n \geq m, \quad (8.1)$$

де y – вихідна змінна;

u – вхідний вплив;

n, m – порядок об'єкта.

Оскільки це рівняння пов'язують вхідну і вихідну змінні системи, то іноді його називають рівнянням «вхід-вихід». В окремому випадку диференціальне рівняння (1) приймає форму:

$$y^n + a_n y^{(n-1)} + \dots + a_2 \dot{y} + a_1 y = bu. \quad (8.2)$$

Як модель лінійних багатоканальних ЕМС зручно використовувати векторно-матричну форму для змінного стану, яка представлена системою диференціальних рівнянь першого порядку (нормальна форма Коші):

$$\begin{cases} \dot{X} = Ax + Bu, \\ y = CX. \end{cases} \quad (8.3)$$

Для цієї форми: $X \in R^n$ – вектор стану; $u \in R^m$ – вектор керуючих впливів; $m \leq n$, $y \in R^m$ – вектор виходу; A – квадратна матриця коефіцієнтів; B і C – прямокутні матриці коефіцієнтів.

Перше рівняння (8.3) називається диференціальним рівнянням стану, а друге – рівнянням виходу. У багатьох практичних завданнях вихід – це одна або кілька змінних стану, які можна виміряти. Тому систему рівнянь виду (8.3) називають моделлю «вхід-стан-вихід».

Математичні моделі (8.1) і (8.2) також можуть бути представлені у формі (8.3) після відповідного вибору лінійно-незалежних змінних стану. Їх число завжди дорівнює порядку об'єкта (n), а вхід і вихід – це скалярні змінні ($u \in R^1$, $y \in R^1$).

Оцінювання рівняння (8.3) буде простішим, якщо як компоненти вектора стану X обираються вихідна змінна y і її похідні:

$$x_1 = y, x_2 = \dot{y}, \dots, x_n = y^{(n-1)}.$$

У результаті замість (8.2) отримується система рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \dots \\ x_n = -a_1 x_1 - a_2 x_2 - \dots - a_n x_n + bu, \\ y = x_1, \end{cases} \quad (8.4)$$

яка представлена у матричній формі:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_1 & -a_2 & \dots & -a_n \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ b \end{bmatrix}, C = [10 \dots 0], \quad (8.5)$$

де A , B і C – матриці, що мають розмірності:

$$\dim A = n \times n, \dim B = n \times 1, \dim C = 1 \times n.$$

Варто зазначити, що перехід від моделі (8.2) або (8.1) до (8.3) не є однозначним, оскільки існує безліч лінійно-незалежних наборів змінних стану X . Водночас від вибору змінних стану властивості технічного пристрою не змінюються.

Приклад 1. Записати рівняння стану для моделі, яка представлена у формі диференціального рівняння:

$$\ddot{y} + 5\dot{y} + 3y = 4u.$$

Розглядаються два варіанти оцінювання в змінних стану.

1. Як змінні стану обирається вихідна величина і її похідна, тобто $x_1 = y$, $x_2 = \dot{y}$. В результаті отримується так звана канонічна модель (з мінімальним числом ненульових елементів):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -3x_1 - 5x_2 + 4u, \\ y = x_1 \end{cases}$$

і матриці, що характеризують її властивості:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3 & -5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \end{bmatrix}, C = [10].$$

2. Як нові змінні стану обираються такі лінійно-незалежні величини:

$x_1 = y$, $x_2 = \dot{y} + 3y$. Рівняння стану для них мають вигляд:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -3x_1 + x_2, \\ \dot{x}_2 = -12x_1 - 5x_2 + 4u, \\ y = x_1 \end{cases}$$

і відповідні матриці

$$A = \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ -12 & -5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \end{bmatrix}, C = [10].$$

Таким чином, залежно від мети дослідження може бути прийнята за основу одна або інша форма представлення рівнянь стану об'єкта.

Поряд з вихідною моделлю ЕМС виду (1) її можна уявити в символічній формі з застосуванням оператора диференціювання $p = d / dt$. Це дозволяє записати диференціальне рівняння (1) у формі алгебраїчного рівняння:

$$p^n y + a_n p^{n-1} + \dots + a_1 y = b_m p^{m-1} u + \dots + b_0 u \quad (8.6)$$

і ввести нову динамічну модель – *передавальну функцію* як відношення вихідного сигналу до вхідного:

$$W(p) = \frac{y}{u} = \frac{b_m p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{p^n + a_n p^{n-1} + \dots + a_2 p + a_1}, \quad (8.7)$$

де чисельник і знаменник передавальної функції (8.7) становлять поліноми від оператора p . Функція повністю оцінює зв'язки між виходом і входом об'єкта при нульових початкових умовах, але не враховує його внутрішню конструкцію. Варто також зауважити, що вираз $y(t) = W(p) u(t)$ – це символічний запис диференційного рівняння (8.1). Таким чином, застосування оператора диференціювання дозволяє замінити рішення диференційних рівнянь алгебраїчним обчисленням.

Оскільки корені полінома чисельника $B(p) = b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0$ обертають передавальну функцію в нуль, то вони називаються нулями $N = \{u, \dots, n_m\}$. Поліном знаменника $A(p) = p^n + a_n p^{n-1} + \dots + a_2 p + a_1$ називається характеристичним поліномом. Його коріння обертають вираз (8.7) у нескінченність і називаються полюсами передавальної функції $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$.

З урахуванням нулів і полюсів передавальну функцію (8.7) можна записати у формі:

$$W(p) = k \frac{(p-n_1)\dots(p-n_m)}{(p-\lambda_1)\dots(p-\lambda_n)}, \quad (8.8)$$

де k – коефіцієнт посилення системи.

Передавальну функцію виду (6) можна також отримати за допомогою зображення Лапласа, якщо перетворити обидві частини диференціального рівняння (1) і знайти відношення зображень по Лапласу вихідної величини до вхідної при нульових початкових умовах. У цьому випадку передавальна функція набуде вигляду:

$$W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_n s^{n-1} + \dots + a_2 s + a_1}, \quad (8.9)$$

де s – комплексна змінна.

Від оцінки в змінних стану (8.3) також можна перейти до моделі у вигляді передавальної функції (матриці) з використанням перетворення Лапласа або оператора диференціювання.

Наприклад, рівняння стану (8.3) в операторній формі набирає вигляду:

$$pX = AX + Bu, \quad (8.10)$$

Характеристику також можна представити у вигляді:

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\phi(\omega)} = R(\omega) + jI(\omega), \quad (8.15)$$

де $R(\omega)$ – речова частотна характеристика (РЧХ);

$I(\omega)$ – уявна частотна характеристика (УЧХ);

$\phi(\omega) = \arctg \frac{I(\omega)}{R(\omega)}$ – фазо-частотна характеристика (ФЧХ), де

ω певної частоти характеризує фазовий зсув вихідного сигналу по відношенню до вхідного (ФЧХ відображає фазові зрушення, що вносяться системою на різних частотах);

$A(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)}$ – амплітудно- частотна характеристика (АЧХ), яка становить собою коефіцієнт посилення гармонійного сигналу. Якщо на якійсь частоті значення $A(\omega) > 1$, то вхідний сигнал посилюється, якщо $A(\omega) < 1$, то сигнал цієї частоти послаблюється.

За формою АЧХ можна виділити такі основні типи фільтрів:

– фільтр низьких частот, який пропускає низькочастотні сигнали приблизно з однаковим коефіцієнтом посилення, але пригнічує високочастотні сигнали (шуми, перешкоди, тощо);

– фільтр високих частот, який пропускає високочастотні сигнали, проте послаблює сигнали низької частоти;

– смуговий фільтр, що пропускає сигнали певної частоти (у діапазоні від ω_1 до ω_2);

– смуговий (режекторний) фільтр, який блокує сигнали з частотами в діапазоні від ω_1 до ω_2 , а інші пропускає.

Амплітудна частотна характеристика показує, як ланка пропускає сигнали різної частоти, а оцінкою пропускання є відношення амплітуд вихідного (A_2) і вхідного сигналу (A_1).

Для зручності побудови АЧХ можна застосовувати логарифмічний масштаб і використовувати логарифмічну амплітудну частотну характеристику (ЛАЧХ):

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega), \quad (8.16)$$

де амплітуда вимірюється в децибелах (дБ).

Графічне представлення узагальненої частотної характеристики $W(j\omega)$ на комплексній площині при зміні ω від 0 до ∞ називається амплітудно-фазовою характеристикою (АФХ) (рис. 8.3).

Крім АФХ, використовується графічне представлення на відповідній площині всіх інших частотних характеристик.

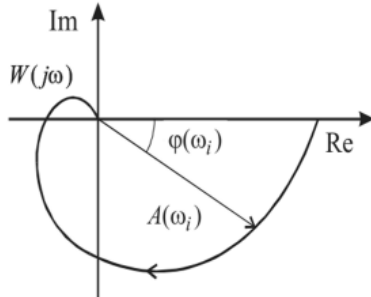


Рисунок 8.3 – Приклад амплітудно-фазової характеристики системи

Приклад 2. Побудувати амплітудно-фазову (АФХ), речову частотну (РЧХ) і фазочастотну характеристики (ФЧХ) для елемента, передавальна функція якого має вигляд:

$$W(p) = \frac{10p}{p+1}.$$

Під час зміни оператора $p \rightarrow j\omega$ вираз для узагальненої частотної характеристики:

$$W(j\omega) = \frac{10j\omega}{j\omega+1} = \frac{10\omega^2}{\omega^2+1} + j \frac{10\omega}{\omega^2+1}.$$

Вирази для РЧХ і ФЧХ у вигляді:

$$R(\omega) = \frac{10\omega^2}{\omega^2+1}, \phi(\omega) = \text{arctg} \frac{1}{\omega}.$$

Відповідні частотні характеристики, побудовані під час зміни частоти від 0 до ∞ , подано на рис. 8.4.

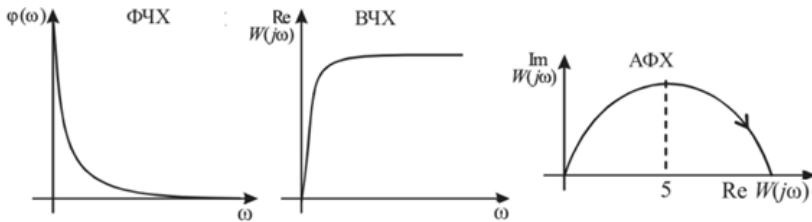


Рисунок 8.4 – Частотні характеристики передавальної функції

Таким чином, з визначенням передавальної функції отримуються характеристики системи.

Один з методів побудови математичних динамічних моделей «вхід-вихід» полягає у визначенні реакції об'єкта на певний стандартний сигнал.

У разі, коли на вхід об'єкта з нульовими початковими умовами надходить одиничний ступінчастий сигнал, на його виході виникає реакція у вигляді перехідної характеристики $h(t)$.

Оскільки ступінчастий сигнал легко отримати на практиці, то перехідну характеристику можна зняти експериментально. Для аналітичного визначення перехідної характеристики $h(t)$ потрібно вирішити диференціальне рівняння при нульових початкових умовах і одиничному вхідному впливі:

$$y^n + a_n y^{n-1} + a_{n-1} y^{n-2} + \dots + a_1 y = b_m u^m + \dots + b_0 u, \quad (8.17)$$

$$y(0) = 0, \dot{y}(0) = 0, y^{n-1}(0) = 0 \quad (8.18)$$

$$1(t - \tau) = \begin{cases} 0, & t < \tau > 0, \\ 1, & t \geq \tau > 0, \end{cases} \quad (8.19)$$

де τ – момент виникнення вхідного сигналу.

Приклад перехідної характеристики системи показаний на рис. 8.5.

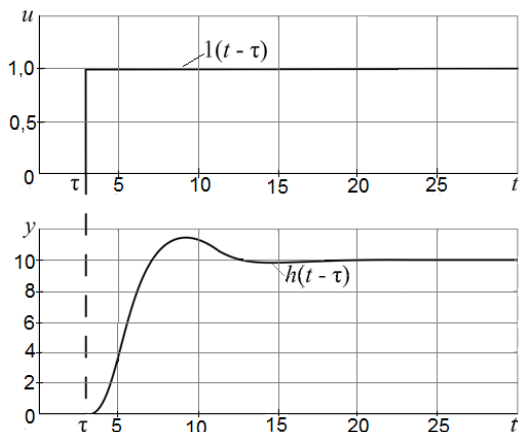


Рисунок 8.5 – Приклад перехідної характеристики

Імпульсна перехідна характеристика $g(t)$ становить реакцію на вхідний вплив типу одиничної імпульсної функції (рис. 8.6).

Так само як і перехідна характеристика системи, вона визначається при нульових початкових умовах, коли система знаходиться в стані спокою.

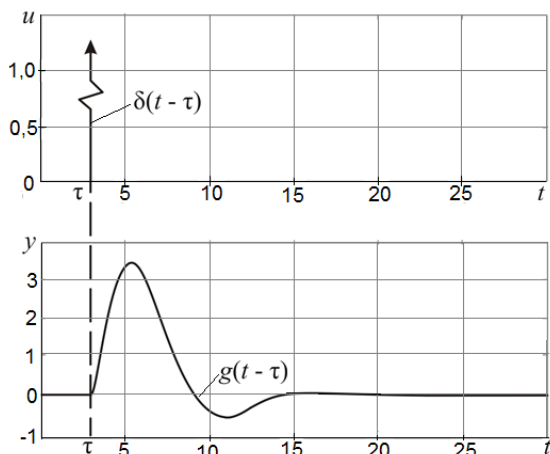


Рисунок 8.6 – Приклад імпульсної перехідної характеристики

Вхідний вплив типу одиначної імпульсної функції математично відображає дельта-функція, яка має властивості:

$$\delta(t - \tau) = \begin{cases} 0, & t \neq \tau, \\ \infty, & t = \tau; \end{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - \tau) d\tau = 1. \quad (8.20)$$

На практиці імпульсні вхідні впливи на об'єкт завжди кінцеві за рівнем і тривалістю. Однак з певною точністю реальний вхідний вплив сигналу типу удару можна замінити дельта-функцією з деяким коефіцієнтом, тому що його тривалість набагато менше тривалості перехідних процесів.

Перехідна характеристика й імпульсна перехідна функція однозначно пов'язані між собою співвідношеннями:

$$g(t) = \dot{h}(t), h(t) = \int_0^t g(\theta) d\theta, \quad (8.21)$$

що дозволяє за однієї відомої характеристики визначити другу.

Показані моделі використовуються переважно для лінійних елементів системи. Застосування лінійних математичних моделей для оцінювання процесів в ЕМС виправдано зазвичай тільки в певному діапазоні зміни стану.

8.3 Динамічні характеристики нелінійних елементів

За інших умов роботи ЕМС виникають фізичні процеси, які можуть стати істотно нелінійними, що вимагає відповідного їх оцінювання.

Оскільки динаміка процесів нелінійної системи, як і її стійкість, залежить від величини зовнішніх впливів і початкових умов, то в цій

ситуації методи лінійної теорії незастосовні. Під час аналізу властивостей нелінійної системи завжди обмовляється чисельне значення зовнішніх впливів [13]. Основна особливість нелінійних систем полягає в тому, що на відміну від лінійних систем до них не застосовується принцип суперпозиції. Водночас їхню реакцію на кілька довільних зовнішніх впливів не можна розглядати як суму складових на кожний вплив окремо.

Вид і якість перехідного процесу нелінійної системи істотно залежать від величини вхідного впливу і початкових умов. Якщо в лінійній системі якість процесу не змінюється при зміні вхідного впливу, то в нелінійній системі збільшення вхідного впливу (рис. 8.7) спричиняє якісну зміну перехідного процесу (зі стійкого він стає нестійким).

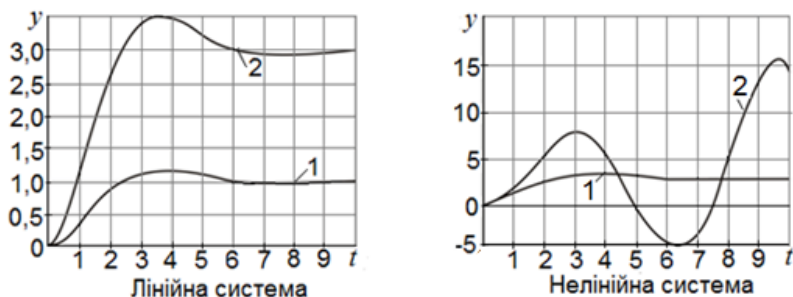


Рисунок 8.7 – Приклад реакції систем (1, 2) на зміну вхідної дії: $u_2 > u_1$

Зміна початкових умов, яка не тягне за собою зміну якості процесів у лінійному випадку, також може спричинити істотну відмінність у перехідних процесах, наприклад виникнення коливань (рис. 8.8).

У нелінійній системі може існувати кілька станів рівноваги систем (x_1, x_2), до яких залежно від величини початкових умов і вхідних впливів прагнуть перехідні процеси. Наприклад, як видно з рисунка 8, точка лінійної системи, що зображає різні початкові стани, рухається до єдиної точки рівноваги.

У нелінійній системі з одного початкового стану точка, що його зображає, рухається до стану рівноваги $X = 0$ (траєкторія 1), а з іншого – по замкнутій траєкторії, яка називається граничним циклом (крива 2) (рис. 8.9).

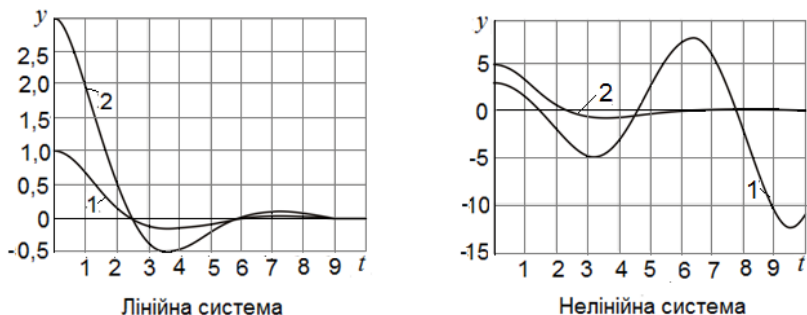


Рисунок 8.8 – Приклад реакції систем (1, 2) на зміну початкових умов і виникненні коливань

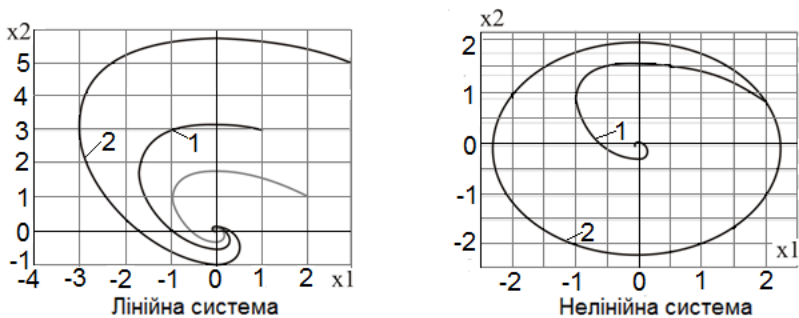


Рисунок 8.9 – Приклад станів рівноваги систем (1, 2)

Для кожної точки справедлива умова $\dot{X} = 0$. Отже, ця фазова траєкторія відповідає рівноважному режиму роботи системи.

Приклад 3. Зобразити фазовий портрет системи, де передавальна функція лінійної частини має вигляд

$$W(p) = \frac{4}{0,5p^2 + 0,3p + 1}.$$

У цьому випадку нелінійний елемент системи – «мертва» зона шириною $c = 0,5$ і коефіцієнтом посилення $k = 1$. Чисельне значення вхідного впливу $v = 1$. Модель системи представлена у відносних змінних.

Для оцінки параметрів лінійної частини системи в змінних стану, попередньо вважається: $x_1 = y$, $x_2 = \dot{y}$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -2x_1 - 0,6x_2 + 8u. \end{cases}$$

Для побудови зображення стану елемента системи (фазового портрета) використовується інструмент візуального моделювання

Simulink пакета MATLAB. Відповідна схема моделювання показана на рис. 8.10.

Подане зображення системи має фазові траєкторії руху з різних початкових станів (рис. 8.11).

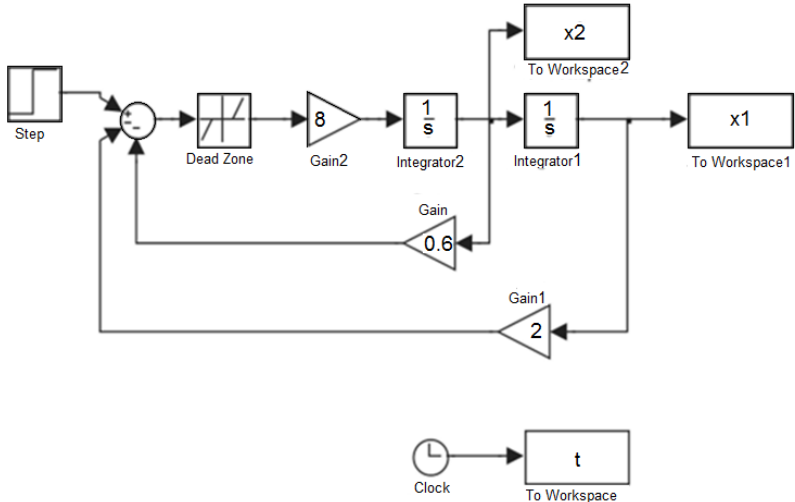


Рисунок 8.10 – Схема моделювання комбінованої системи в Simulink

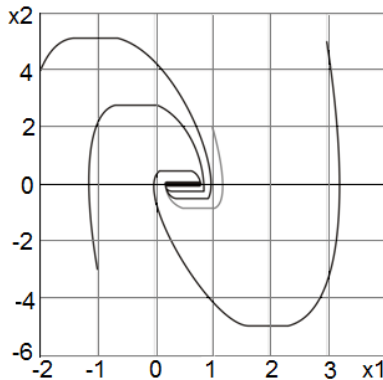


Рисунок 8.11 – Результати моделювання початкового стану системи

Таким чином, сукупність усіх фазових траєкторій, отриманих під час руху з різних початкових станів, становить фазовий портрет, який дозволяє оцінити властивості нелінійної системи.

Точки простору станів, для яких справедлива умова $X = 0$, є точками рівноваги системи. Наявність граничного циклу в просторі станів означає, що в нелінійній системі виникають автоколивання, які представляють власні періодичні процеси, з параметрами (наприклад, частота і фаза), що не залежать від початкових умов (рис. 8.12).

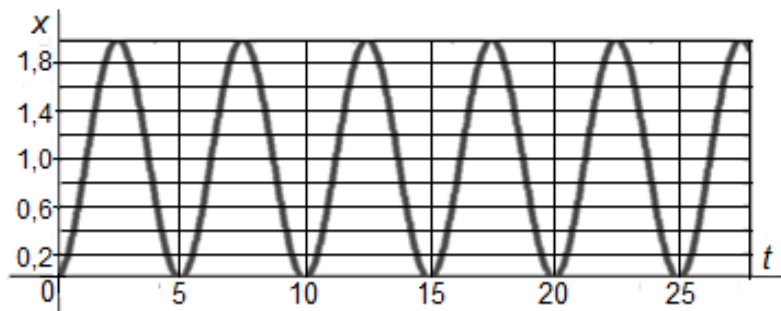


Рисунок 8.12 – Приклад автоколивального режиму

З урахуванням характеристик деяких елементів, які мають істотний нелінійний характер і взагалі не можуть бути лінеаризовані (наприклад, реле з гістерезисом), необхідно застосовувати нелінійні динамічні математичні моделі для оцінки ЕМС.

Серед нелінійних моделей можна виділити статичні нелінійні елементи, аналіз яких представляється у вигляді нелінійних характеристик $y = f(x)$.

Такого роду характеристики мають гідравлічні, пневматичні, електромагнітні підсилювачі.

Статичні характеристики нелінійних ланок можуть містити типові нелінійності: насичення, зону нечутливості, релейне перемикання, люфт, петлю гістерезису тощо. Деякі приклади таких характеристик подано на рис. 8.13.

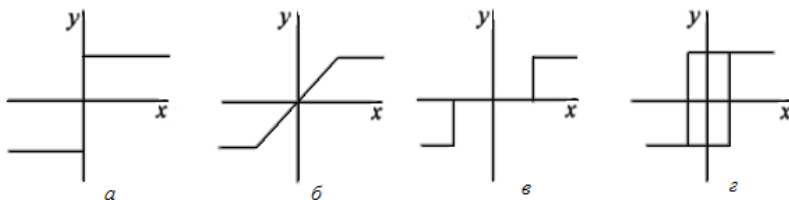


Рисунок 8.13 – Приклади статичних характеристик нелінійних ланок:

a – ідеальне реле; b – підсилювач з обмеженням; c – реле з зоною нечутливості; z – реле з гістерезисом

Крім статичних нелінійних елементів, виділяють також динамічні нелінійні ланки, процеси в яких також потрібно оцінювати нелінійними диференціальними рівняннями.

У загальному випадку поведінку нелінійних багатоканальних систем характеризують рівняння стану і виходу:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(t, X, u), X \in R^n, u \in R^m, \\ y = g(t, X), y \in R^m, n \geq m, \end{cases} \quad (8.22)$$

де $f(t, X, u)$ і $g(t, X)$ – нелінійні вектор-функції.

Залежність цих функцій від часу t відображає дію як параметричних, так і сигнальних збурень, тобто вплив навколишнього середовища і зміну параметрів об'єкта.

В окремому випадку керуючий вплив може входити в рівняння стану (8.22) у вигляді суми з нелійними коефіцієнтами:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(t, X) + B(t, X)u, \\ y = g(t, X), \end{cases} \quad (8.23)$$

де $B(t, X)$ – матриця нелінійних коефіцієнтів розміру $n \times m$.

При відсутності управляючого впливу в (8.23) наявна нелінійна нестационарна автономна модель, яка оцінює процеси руху з ненульових початкових станів:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(t, X), \\ y = g(t, X). \end{cases} \quad (8.24)$$

Якщо права частина рівнянь (8.22) – (8.24) не залежить від часу t , то модель відповідає нелінійній стаціонарній системі.

Динамічні процеси в нелінійній ЕМС з одним входом і одним виходом мають рівняння вигляду:

$$y^n = f(t, y, \dots, y^{n-1}) + b(t, y, \dots, y^{n-1}) \cdot u, \quad (8.25)$$

яке також можна представити у формі (8.22), обравши відповідно лінійно-незалежні змінні стану.

До нелінійних моделей належать, наприклад, сили тертя, рух рухомих елементів (за наявності в з'єднаннях люфтів), течії робочої рідини (за нерівномірної подачі насосів) та інші процеси.

Під час складання загальної математичної моделі динамічних процесів в ЕМС необхідно попередньо отримувати характеристику окремих елементів у вигляді відповідних рівнянь, які по можливості необхідно лінеаризувати. Ланки рівнянь, які допускають лінеаризацію, утворюють лінійну частину системи. Пристрої, поведження яких можна оцінити тільки за допомогою нелінійних рівнянь, складають її нелінійну

частину. У результаті отримується система з *комбінованою оцінкою* (рис. 8.14).

У такій схемі нелінійним елементом (НЕ) – є нелінійна частина системи, яка становить сукупність всіх нелінійних ланок. Часто в комбінованій системі як НЕ розглядається статична нелінійність, де залежність між вхідною і вихідною величинами характеризується співвідношенням $u=f(\Delta)$.

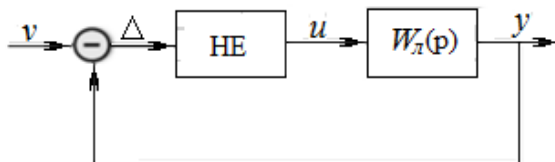


Рисунок 8.14 – Структурна схема комбінованої системи:
 v – величина вхідного сигналу; Δ – помилка від впливів

Лінійна частина системи оцінюється передавальною функцією $W_T(p)$.

Динаміка ЕМС зазвичай характеризується нелінійними диференціальними рівняннями. Разом із тим нелінійна функція наближено замінюється лінійною так щоб залежно від обраного показника обидві ці функції збігалися.

Вибір способу лінеаризації нелінійних елементів визначається кінцевою метою дослідження. Проте заміна нелінійної ланки лінеаризованою завжди пов'язана з певною втратою точності рішення. Важливо, щоб такий перехід не призвів до зміни якісних властивостей системи. Ця вимога виконується, якщо лінеаризація нелінійної функції $y = f(x)$ виконується у малому просторі робочої точки x^0 .

Якщо функція $f(x)$ в просторі робочої точки неперервна і диференційована, то її можна розкласти в ряд Тейлора:

$$y = f(x^0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 (x - x^0) + R(x), \quad (8.26)$$

де $y^0 = f(x^0)$ і $\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0$ – значення функції і похідною в робочій точці відповідно;

$R(x)$ – члени ряду розкладання Тейлора вище першого ступеня.

Оскільки члени ряду розкладання $R(x)$ багато менше двох перших доданків, то вони відкидаються і замість (8.26) отримується:

$$y = f(x^0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 (x - x^0), \quad (8.27)$$

Після віднімання з (8.27) $y^0 = f(x^0)$, отримується:

$$y - y^0 = \frac{\partial f}{\partial x} |_0 (x - x^0). \quad (8.28)$$

У даному випадку приватна похідна розглядається в робочій точці, тому являє собою коефіцієнт, що позначається як $k = \frac{\partial f}{\partial x} |_0$. При введенні позначення $\Delta y = y - y^0$ і $\Delta x = x - x^0$ отримується лінійне рівняння ланки:

$$\Delta y = k \Delta x, \quad (8.29)$$

яке називається рівнянням в відхиленнях.

На практиці така лінеаризація відповідає проведенню дотичній в робочій точці і визначенню $k = \operatorname{tg} \alpha$ (рис. 8.15).

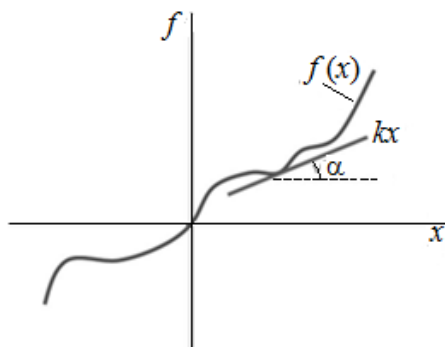


Рисунок 8.15 – Ілюстрація лінеаризації статичної характеристики

Це особливо важливо в тих випадках, коли функція $f(x)$ не має аналітичного виразу.

Отже, при розгляданні нелінійних систем необхідно визначити їхні лінійні елементи, або ланки і використовувати необхідний механізм розрахунку параметрів.

8.4 Автоматизація моделювання динаміки електромехатронної системи

Одним із напрямів наукових досліджень в електромехатроніці є розробка загальних теоретичних положень, на основі яких можливе створення ефективних методів математичного моделювання ЕМС і алгоритмів автоматизації моделювання. Оскільки властивості об'єкта керування, виконавчого приводу й інформаційної системи повинні розглядатися в комплексі та враховуватися вже на ранніх стадіях проектування ЕМС, необхідно розробляти моделі динаміки як

механічних, так і електричних підсистем за допомогою єдиного методу. Разом з тим метод математичного моделювання динаміки ЕМС повинен мати такі властивості [13]:

- інваріантність до фізичної природи об'єктів, що моделюються;
- формальність дій, які виконуються при реалізації методу;
- зручність результатів обчислень для аналізу й використання в проєктуванні.

Роботи-маніпулятори, мобільні роботи, багатокординатні верстати з ЧПК тощо мають просторові виконавчі механізми. Вони мають велику кількість ступенів свободи й містять замкнуті кінематичні контури. Це ускладнює математичне моделювання динаміки таких ЕМС.

Відомі труднощі при моделюванні динаміки становлять багатоступінчасті передавальні механізми приводів. У них істотні відхилення від ідеальної механічної передачі, до яких належать: інерційність, пружна піддатливість ланок, люфти та сухе тертя в кінематичних парах тощо.

Механічна частина машини в окремих випадках може становити неголономну систему (з наявністю диференціальних неінтегрованих зв'язків).

Створення математичних моделей динаміки багатовимірних систем, що складаються з фізично різнорідних функціональних частин, становить трудомістке й наукомістке завдання. Для його вирішення в умовах жорстких обмежень часу необхідне ефективне та максимально повне використання можливостей сучасних засобів автоматизації обчислень. До нових можливостей апаратних і програмних засобів автоматизації обчислень належать:

- висока обчислювальна потужність;
- автоматизація створення просторово-геометричних моделей (комп'ютерна графіка);
- автоматизація математичних обчислень у символному вигляді (комп'ютерна алгебра);
- розвинені системи обміну інформацією між програмними модулями різного цільового призначення;
- вільний доступ учасників проєкту до проміжних результатів проєктування, можливість оперативного використання раніше отриманих результатів у розробці нових проєктів;
- доступність широкому колу користувачів, візуалізація та анімація модельованих об'єктів і процесів.

Відповідно до завдання, автоматизація моделювання динаміки ЕМС полягає:

– в аналізі існуючих методів динаміки й обґрунтуванні вибору методу, на базі якого розробляється математичне забезпечення програмного модуля автоматизованого формування моделі динаміки ЕМС;

– у розробці математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення, орієнтованого на можливості сучасних засобів автоматизації обчислень.

Таким чином, методи, що покладені в основу алгоритмів автоматизованого формування моделей динаміки ЕМС, повинні володіти спільністю, достатньою для обліку всіх перерахованих факторів.

Порівняльний аналіз методів динаміки.

Для отримання рівнянь динаміки багатоланкових виконавчих механізмів розповсюдженими є наукові оцінки з використанням [13]:

– методу Лагранжа, що заснований на рівняннях Лагранжа II роду й оцінці кінематики системи матрицями однорідних перетворень координат;

– модифікованого методу Лагранжа, що заснований на рівняннях Лагранжа II роду й рекурентному аналізу кінематики механічної системи;

– методу Ейлера, що заснований на застосуванні другого закону динаміки та принципу Д'Аламбера;

– методу Гауса, який заснований на принципі найменшого примушування;

– методі зв'язкових графів.

Проаналізуємо особливості перелічених методів.

Метод Лагранжа та метод Ейлера вважаються традиційними, які найчастіше використовуються на практиці.

Висновок рівнянь руху голономних механічних систем методом Лагранжа відрізняється простотою та єдністю підходу. Рівняння, що отримані цим методом, забезпечують оцінку динаміки й можуть бути використані для розробки законів керування у просторі приєднаних змінних [13]. Вирази для кінетичної та потенційної енергії ланок можна записати відносно координат ланок у нерухомій системі координат. Перевага методу Лагранжа дає змогу застосовувати його для виведення рівнянь руху механічних систем, що містять замкнуті контури. Як вже було зазначено, рівняння динаміки у формі Лагранжа можна скласти для електричної системи. Наприклад, рівняння та

алгоритми динаміки роботів-маніпуляторів, засновані на застосуванні методу Лагранжа [13].

Застосування методу Ейлера веде до системи прямих і зворотних рекурентних рівнянь, послідовно застосованих до ланок механічної системи. Цей метод найефективніший з обчислювального погляду, що дає змогу використовувати його для керування системою в реальному часі і для моделювання її рухів на комп'ютері [13]. Перевагою методу Ейлера є також можливість обчислювати сили та моменти сил реакцій у кінематичних парах механізму. З погляду аналізу, рекурентні співвідношення не є зручними. Тому метод Ейлера практично не застосовується в задачах синтезу законів керування.

Модифікований метод Лагранжа дозволяє отримати рівняння динаміки у векторно-матричній формі, зручній для аналізу. Крім того, ці рівняння забезпечують зниження обчислювальних витрат на розрахунок динамічних коефіцієнтів порівняно з рівняннями Лагранжа. З використанням коефіцієнтів є можливість розрізнити динамічні ефекти, що обумовлені обертальним і поступальним рухом ланок. Це необхідно використовувати під час синтезу керування у просторі станів систем. Обчислювальна ефективність цих рівнянь обумовлена використанням для оцінки кінематики ланок матриць поворотів і векторів відносного положення. Використання модифікованого методу Лагранжа для аналізу систем, що містять замкнуті кінематичні контури, пов'язане з труднощами, тому що цей метод передбачає рекурентні обчислювальні процедури.

Метод, заснований на принципі Гауса, на відміну від методів, заснованих на рівняннях Лагранжа, дає змогу отримувати рівняння динаміки механічних систем, як з голономними, так і з неголономними зв'язками. При використанні принципу Гауса завдання зводиться до визначення прискорень природного руху, які забезпечують мінімум виразу для примушування. Це досягається шляхом чисельної мінімізації примушування як функції узагальнених прискорень механічної системи методом динамічного програмування або невизначених множників Лагранжа. Перевагою методу Гауса є можливість його застосування для дослідження руху механічних систем із нерегульованими зв'язками. Це досягається саме в тих випадках, коли використовуються чисельні методи мінімізації примушування на кожному кроці інтегрування рівнянь динаміки.

Метод зв'язкових графів ґрунтується на поданні системи (механічної, електричної, гідравлічної або комбінованої) у вигляді деякого кінцевого числа елементів, що мають формальний математичний опис і з'єднаних один з одним у загальну структуру за

допомогою зв'язків. Цей метод є результатом розвитку теорії графів, одним з основоположників якої був Л. Ейлер.

Математична модель динаміки системи відображається у вигляді схеми (графа), на підставі якої виводяться рівняння динаміки, водночас механічна частина системи може бути неголономною. Головною перевагою методу зв'язкових графів є структурно-графічне представлення динаміки досліджуваних систем. Це дає змогу простежити всі взаємовпливи елементів системи візуально й отримати рівняння динаміки шляхом застосування до зв'язкового графу простих законів Кірхгофа. Використання методу зв'язкових графів дає найбільший ефект при оцінці, аналізі та проектуванні розгалужених систем із наявністю замкнених кінематичних контурів.

Порівняльний аналіз методів подання в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Порівняльний аналіз методів динаміки

Метод	Механічні системи			Електричні системи	Результат обчислень		
	голономні	неголономні	із замкненими контурами		замкнена система диференційного рівняння	рекурентне рівняння	числений
Лагранжа			+				
Модифікований	+	-	-	+	+	-	-
Ейлера	+	-	-	-	-	+	-
Гауса	+	+	+	-	-	-	+
Зв'язкових графів	+	+	+	+	+	-	-

Результати порівняльного аналізу свідчать про те, що найперспективнішим з погляду автоматизації моделювання динаміки ЕМС є метод зв'язкових графів. Цей метод, з одного боку, має найбільшу спільність і необхідну інваріантність до фізичної природи об'єктів дослідження.

З іншого боку, результатом його застосування є не тільки замкнута система диференційних рівнянь динаміки, а й зв'язковий граф досліджуваної системи. Це розширює можливості інженерного аналізу й автоматизації моделювання динаміки з використанням інформаційних систем.

Таким чином, метод зв'язкових графів прийнятий як теоретична основа рівнянь і алгоритмів автоматизованого моделювання динаміки ЕМС, який необхідно розглянути докладніше.

Контрольні запитання за лекцією 8

1. Дайте характеристику взаємодії електромеханічних систем.
2. Особливості мехатроних систем.
3. Особливості побудови математичної динамічної моделі.
4. Форми подання математичних моделей динаміки.
5. Якість процесу в лінійній системі.
6. Статичні характеристики нелінійних ланок.
7. Властивості методу математичного моделювання динаміки електромеханічних систем.

ЛЕКЦІЯ 9

БАЗОВІ ЗАСАДИ ЩОДО ПІДТРИМАННЯ РІВНЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

План

- 9.1 Загальні положення
- 9.2 Види ремонтів, їх характеристика, етапи розвитку систем ремонту
- 9.3. Планово-попереджувальні ремонти електрообладнання
- 9.4 Технічне обслуговування та ремонт електрообладнання з урахуванням технічного стану
- 9.5 Класифікація засобів діагностування
- 9.6 Методи діагностування електроустаткування
- 9.7 Прогнозування технічного стану електрообладнання

9.1 Загальні положення

Ефективність та надійність функціонування електроенергетичного обладнання систем електропостачання залежить від його технічного стану. Сучасне електротехнічне обладнання має високу надійність. Однак у процесі експлуатації під впливом зовнішніх умов і режимів роботи вихідний стан обладнання безперервно погіршується, знижується експлуатаційна надійність та збільшується небезпека виникнення відмов.

В даний час в електроенергетиці для ведення виробничої експлуатації та підтримки технічного стану обладнання відповідно до вимог нормативно-технічної документації (Правила технічної експлуатації електричних станцій та мереж, Правила організації технічного обслуговування та ремонту обладнання, будівель та споруд електростанцій та мереж) застосовують систему планово-запобіжних ремонтів (ППР). Основним техніко-економічним критерієм системи ППР служить мінімум простоїв обладнання на основі жорсткої регламентації ремонтних циклів. Відповідно до цього критерію періодичність та обсяг робіт з технічного обслуговування та ремонту визначаються заздалегідь встановленими для всіх видів обладнання типовими нормативами.

Система ППР дає можливість підготувати керовану та прогнозовану на тривалий період ремонтну програму: за видами ремонтів, за типами обладнання, за підстанціями та мережевими районами, за системами електропостачання в цілому. Постійність ремонтних циклів дозволяє здійснювати довгострокове планування режимів електропостачання, а також прогнозувати матеріальні,

фінансові та трудові ресурси, необхідні капітальні вкладення у розвиток виробничої бази енергоремонту. Це спрощує планування профілактичних заходів, дозволяє здійснити попередню підготовку ремонтних робіт, виконувати їх у мінімальні терміни, підвищує якість ремонту та зрештою підвищує надійність електропостачання споживачів. Таким чином,

Однак система ППР у нових економічних умовах не забезпечує у багатьох випадках ухвалення оптимальних рішень. Це тим, що призначення профілактичних робіт здійснюється регламентно і залежить від фактичного стану електрообладнання на момент початку ремонту; плани-графіки профілактичних робіт не встановлюють пріоритет виведення в ремонт різних видів електрообладнання; при складанні планів-графіків часто не враховується низка обмежень (технологічних, матеріальних, тимчасових, трудових), а також не передбачається їх оптимізація з позиції раціонального управління станами процесу експлуатації та повнішого використання ресурсу кожної одиниці електрообладнання. Крім того, система ППР має велику трудомісткість профілактичних робіт, що потребує значної чисельності ремонтного персоналу.

На окремих енергооб'єктах кількість відмов протягом року сягає кількох десятків, а річний недовідпуск електроенергії – кілька мільярдів кіловат-годин. Сумарна кількість електрообладнання в країні, що одночасно простоює в аварійному ремонті, становить кілька тисяч одиниць при сумарній виведеній потужності в десятки мільйонів кіловат. У цьому більшості відмов передує той чи інший вид накопичених ушкоджень, а фактичний час роботи електроустаткування, що у структурі ремонтних циклів, зазвичай, не враховується. За такої високої аварійності проблема забезпечення надійності електроустаткування в процесі експлуатації стає першочерговим завданням.

Наразі розроблено цілу гаму інформаційних систем, методів та засобів контролю технічного стану та діагностики електрообладнання. Їхнє широке впровадження створює умови для реалізації нової технології експлуатації електрообладнання з урахуванням технічного стану.

Загальна проблема вдосконалення системи технічного обслуговування та ремонту (ТОР) електрообладнання включає рішення наступних завдань:

- оптимальна організація діагностики та контролю технічного стану електрообладнання;
- оцінка та прогнозування експлуатаційної надійності

електрообладнання;

- оптимізація термінів проведення ТОР;
- визначення оптимального обсягу ТОР;
- вибір раціональної стратегії проведення ТОР;
- вибір стратегії управління процесом експлуатації

електроустаткування;

- планування ТОР електрообладнання з урахуванням технічного стану.

Таким чином, основним принципом нової технології управління технічним станом електрообладнання є метод ТОР об'єктів, заснований на індивідуальному спостереженні за реальними змінами технічного стану обладнання в процесі експлуатації. Тоді система ТОР є сукупність правил, які забезпечують задане управління виробничою експлуатацією електрообладнання з урахуванням контролю його технічного стану.

9.2 Види ремонтів, їх характеристика, етапи розвитку систем ремонту

У процесі експлуатації вихідні властивості устаткування безперервно змінюються. З часом старіє ізоляція, зношуються струмопровідні частини, контактні системи, обмотки та підшипники електричних машин, окремі вузли та деталі електроустаткування, відбувається порушення умов його нормального функціонування. З цих причин, а також внаслідок заводських дефектів, неправильних дій персоналу, зволоження, забруднення, несприятливих умов та режимів роботи обладнання знижується його експлуатаційна надійність та збільшується небезпека виникнення відмов. Більшості відмов передують той чи інший вид накопичених ушкоджень. Тому підтримки працездатного стану устаткування застосовують систему ТОР.

Обсяг, зміст та періодичність робіт з ТОР залежать від багатьох факторів і, в першу чергу, від показників експлуатаційної надійності, досконалості конструкції, складності та відповідальності обладнання. Чим складніше (дорожче) обладнання та відповідальніший технологічний процес, на якому його використовують, тим більші допустимі експлуатаційні витрати, які можуть бути реалізовані за рахунок збільшення обсягу та кількості заходів щодо технічного обслуговування та ремонту.

Комплекс заходів щодо ТОР, спрямованих на попередження відмов та продовження термінів служби електроустаткування, прийнято називати профілактикою (профілактичними роботами). Профілактичні роботи розрізняються за часом проведення, рівнем спрацювання

ресурсу, джерелам фінансування, обсягом та змістом робіт. Класифікація ремонтів наведено на рис. 9.1.

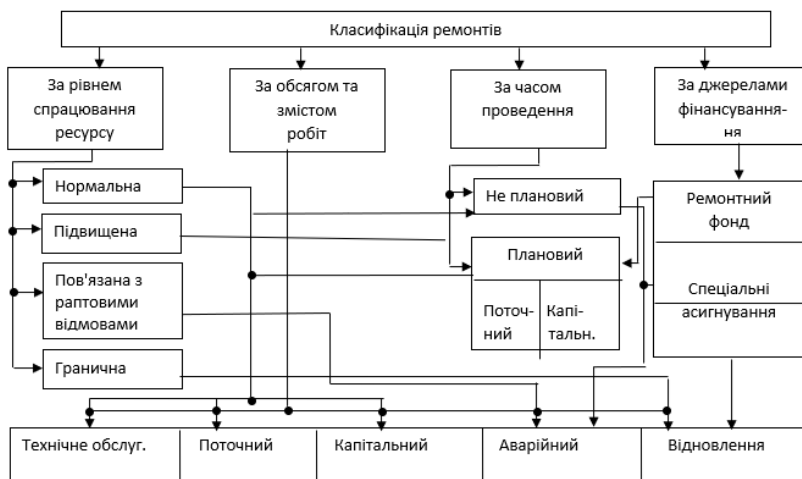


Рисунок 9.1 – Класифікація ремонтів

Правило, що однозначно встановлює вибір ремонтного впливу (параметрів ТОР) на технічну систему протягом усього часу її експлуатації, прийнято називати стратегією профілактики. Відомі три стратегії профілактики технічних систем (табл. 9.1):

1. Стратегія аварійної профілактики, коли планові профілактичні заходи не проводять, а аварійні відновлювальні роботи здійснюють лише після відмови устаткування.

Таблиця 9.1 – Характеристика стратегій організації профілактики обладнання

Вид профілактичного впливу	Організація робіт зі стратегії		
	аварійної	планово-попереджувальної	за технічним станом
Технічне обслуговування	Епізодичне	Періодичне	Періодичне за технічним станом
Діагностування	Не проводиться	Епізодичне	Періодичне
Середній та поточний ремонти	Після відмови	Періодично	За технічним станом

Капітальний ремонт	Після відмови	Періодично	За технічним станом
Аварійний ремонт	Після відмови	Після відмови	Після відмови

2. Стратегія планово-попереджувальної профілактики, за якою профілактичні роботи проводять періодично в планові терміни, незалежно від технічного стану устаткування, а разі його відмови здійснюють відновлення чи заміну.

3. Стратегія профілактики щодо технічного стану, коли профілактичні заходи проводять з урахуванням фактичного стану обладнання, що визначається методами технічної діагностики.

Багаторічний досвід експлуатації як вітчизняних, так і зарубіжних електростанцій, підстанцій та електричних мереж показує, що організація ТОР електрообладнання за першою стратегією в більшості випадків є малоефективною і виправдовує себе лише іноді для найпростішого та високонадійного обладнання. При цьому технічне обслуговування проводиться епізодично, а ремонт після відмови. Обсяг ремонтних робіт залежить від виду відмови чи ушкодження. Така стратегія дозволяє найповніше використовувати ресурс обладнання, але вона призводить до тривалих зупинок технологічних процесів, що обумовлює велику шкоду та значні витрати на ремонт. Тому в електроенергетиці стратегія аварійної профілактики може застосовуватись лише для невідповідальних установок, відмова яких не супроводжується зупиненням відповідального обладнання та не порушує ритму виробничого процесу. На ряді об'єктів ця стратегія застосовується вимушено через недостатнє фінансування ремонтних робіт, відсутність матеріалів та запасних частин та ін.

В даний час профілактика електрообладнання систем електропостачання виконується за другою стратегією, що ґрунтується на планово-попереджувальних принципах виконання робіт. У цьому профілактичні заходи виконують у плановому порядку у строго регламентовані терміни. Така система отримала назву системи планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Чинними нормативами і системи ППР встановлюються: структура ремонтного циклу; періодичність проведення профілактичних заходів; типові обсяги робіт з технічного обслуговування та видів ремонту (поточний, середній, капітальний); трудові та матеріальні витрати; норми простою через ремонт; норми складського запасу обладнання, запасних частин, комплектуючих виробів та матеріалів.

Найбільш перспективним напрямом удосконалення системи ППР є використання стратегії профілактики з технічного стану.

Основою для його побудови є методи та засоби технічної діагностики, що дозволяють визначити технічний стан шляхом безперервного або дискретного контролю за зміною параметрів обладнання, що визначають його працездатність. При досягненні цих параметрів стану, близького до граничного, проводиться попереджувальний ремонт обладнання.

Технічна діагностика включає два основних напрямки – оперативну і ремонтну діагностику. Досі ремонтна діагностика була практично єдиним засобом виявлення дефектів, що й визначило застосування системи ППР з чіткою регламентацією термінів і видів планових ремонтів. Оперативна діагностика виконується без відключення обладнання від мережі та дозволяє оцінити технічний стан об'єкта в процесі експлуатації. Стратегія профілактики з технічного стану ефективна під час експлуатації складного устаткування, ремонт якого пов'язаний з великими затратами. Це дозволяє більш повно використовувати технічний ресурс та забезпечити надійну роботу електрообладнання за мінімальних витрат.

9.3 Планово-попереджувальні ремонти електрообладнання

В основу системи ППР покладено такі основні засади:

- виконання профілактичних робіт має здійснюватися строго за заздалегідь складеними календарними графіками;
- при обґрунтуванні періодичності виконання профілактичних робіт необхідно враховувати умови довкілля, тимчасові режими роботи обладнання, ступінь відповідальності технологічних процесів та ін.;
- обсяг і трудомісткість профілактичних робіт, що виконуються, передбачаються усереднено (укрупнено) і в кожному конкретному випадку уточнюються в залежності від технічного стану обладнання;
- конструктивне виконання обладнання має відповідати умовам довкілля та режиму роботи, виходячи з вимог нормативних документів.

Планово-попереджувальний ремонт є комплексом робіт, спрямованих на підтримку та відновлення працездатності обладнання. Залежно від характеру та ступеня зношування обладнання, від обсягу, змісту та складності профілактичних робіт він включає міжремонтне технічне обслуговування, поточний, середній та капітальний ремонти.

Міжремонтне обслуговування має профілактичний характер. Воно складається з регулярного чищення та змащення обладнання, огляду та перевірки роботи його механізмів, заміни деталей з коротким терміном служби, усунення дрібних несправностей. Ці роботи,

зазвичай, виконуються без зупинки устаткування, у його поточної експлуатації.

Поточний ремонт – це комплекс ремонтних робіт, які проводяться між двома черговими капітальними ремонтами і що складається у заміні чи відновленні окремих частин. Поточний ремонт проводиться без повного розбирання обладнання, але він вимагає короткочасного зупинення та виведення обладнання з роботи зі зняттям напруги. При поточному ремонті обладнання проводиться зовнішній огляд, чищення, мастило, перевірка роботи механізмів, ремонт поламаних і зношених деталей, наприклад огляд та очищення генератора без виїмки ротора, покриття лаком лобових частин, обтирання ізоляторів, огляд та очищення введень у трансформаторів та вимикачів і т.д.

Таким чином, поточний ремонт виконується для забезпечення або відновлення працездатності електрообладнання усунення відмов і несправностей, що виникають у процесі його роботи. Під час поточного ремонту проводяться необхідні вимірювання та випробування, що дозволяють виявити дефекти обладнання на ранній стадії їх розвитку. З вимірів і випробувань уточнюється обсяг майбутнього капітального ремонту. Поточні ремонти проводять зазвичай не рідше одного разу на 1-2 роки.

При середньому ремонті проводяться розбирання окремих вузлів для огляду, чищення деталей та усунення виявлених несправностей, ремонт або заміна деталей або вузлів, що швидко зношуються, що не забезпечують нормальної експлуатації обладнання до чергового капітального ремонту. Середній ремонт проводиться з періодичністю не частіше ніж 1 раз на рік.

При капітальному ремонті виконуються розтин та ревізія обладнання з ретельним внутрішнім оглядом, вимірами технічних параметрів та усуненням виявлених несправностей. Капітальний ремонт виконується після закінчення терміну міжремонтного періоду, що встановлюється кожному за видом устаткування. При остаточному ремонті замінюються або відновлюються всі деталі, що зносилися, виконується модернізація окремих елементів і вузлів обладнання. Ці роботи вимагають розбирання агрегатів, повного зовнішнього та внутрішнього ремонту з перевіркою стану вузлів та деталей, значної кількості висококваліфікованих робітників, тривалого зупинення електрообладнання, великого обсягу випробувань та складних пристроїв. Основне електрообладнання зазнає капітальних ремонтів у визначені терміни.

На відміну від поточного ремонту, середній та капітальний спрямовані на відновлення частково або повністю витраченого механічного та комутаційного ресурсу обладнання.

Після закінчення ремонту проводяться складання обладнання, налагодження та випробування. Основне обладнання електростанцій та підстанцій після попереднього приймання з ремонту перевіряють у роботі під навантаженням протягом 24 год.

Висновок про придатність обладнання до експлуатації робиться на підставі порівняння результатів випробувань із чинними нормами, результатами попередніх випробувань, а також вимірюваннями, отриманими на однотипному обладнанні. Нетранспортабельне обладнання випробовується у пересувних електротехнічних лабораторіях.

Крім планово-попереджувальних ремонтів у практиці систем електропостачання мають місце неплановані ремонти: аварійно-відновлювальні та позапланові. Завданням аварійно-відновлювального ремонту є ліквідація наслідків аварії або усунення отриманих пошкоджень, які потребують негайної зупинки обладнання. За надзвичайних обставин (загоряння, перекриття ізоляції та ін.) обладнання зупиняється у ремонт без дозволу диспетчера.

Строки проведення капітальних ремонтів основного обладнання енергооб'єктів наведено в табл. 9.2.

Позапланові ремонти узгоджуються з диспетчером системи та оформляються відповідною заявкою. Їх проводять для усунення різних несправностей у роботі обладнання, а також після спрацювання ним комутаційного ресурсу. Так, залежно від типу вимикачі напругою 6 кВ та вище виводять у позаплановий ремонт після відключення 3–10 коротких замикань при номінальному струмі відключення.

Таблиця 9.2 – Строки проведення капітальних ремонтів основного обладнання енергооб'єктів

Турбогенератори до 100 МВт	1 раз на 45 років
Турбогенератори понад 100 МВт	1 раз на 3-4 роки
Гідрогенератори	1 раз на 4-6 років
Синхронні компенсатори	1 раз на 4-5 років
Головні трансформатори, реактори та трансформатори власних потреб	Перший раз не пізніше, ніж через 8 років після включення в експлуатацію, надалі – при необхідності, залежно від результатів вимірювань їх стану
Масляні вимикачі	1 раз на 6-8 років
Вимикачі навантаження, роз'єднувачі, заземлюючі ножі	1 раз на 4-8 років
	1 раз на 4-6 років

Повітряні вимикачі та їх приводи	1 раз на 2-3 роки
Компресори для повітряних вимикачів	1 раз на 2-3 роки
Відділювачі та короткозамикачі з приводами	1 раз на 6 років
Конденсаторні установки	Не пізніше 15 років після початку експлуатації
Акумуляторні батареї	

9.4 Технічне обслуговування та ремонт електрообладнання з урахуванням технічного стану

Основою побудови системи ТОР, що базується на встановленні фактичного технічного стану обладнання, є методи технічної діагностики. Сучасний рівень та перспективи розвитку засобів діагностики, дефектоскопії та автоматизованого контролю в електроенергетиці відкривають реальні можливості застосування в недалекому майбутньому методів ТОР обладнання з технічного стану у широких масштабах. Найбільший ефект від використання такої системи досягається при експлуатації складного обладнання, профілактичний ремонт якого пов'язаний із великими витратами, а аварійний стан спричиняє величезні збитки.

Деякі методи та засоби технічної діагностики вже давно знайшли застосування для контролю за технічним станом електроустаткування. Це, наприклад, хроматографічний контроль маслонаповненого обладнання; тепловізійний контроль контактних систем; температурний контроль за станом підшипників, магнітопроводів, обмоток генераторів, великих електродвигунів і трансформаторів; вібраційний контроль гідрогенераторів та іншого електрообладнання; контроль ізоляції кабельних ліній

При діагностуванні визначають, яким видам профілактичних робіт необхідно піддати електроустаткування для запобігання відмовам та відновлення рівня його працездатності. Ці роботи мають бути спрямовані на підвищення або відновлення ресурсу окремих деталей, вузлів та електроустаткування загалом.

Як кількісну оцінку технічного стану електрообладнання використовують такі показники: напрацювання, допустимі відхилення параметрів стану (температури, опору, струму, концентрації газів та ін), залишковий ресурс. Для визначення цих показників необхідний збір, вивчення та аналіз причин відмов та відповідних їм ознак технічного стану обладнання. Тому необхідно вирішувати питання про організацію служб діагностики в системах електропостачання, їх цілі, завдання, умови роботи та фінансування.

Що стосується електроустаткування важливо визначити, які параметри контролювати і які чинники враховувати в оцінці його технічного стану, тобто. вирішити питання щодо глибини діагностування. Як уже зазначалося, можна говорити про механічні (вібраційні), теплові, електричні та інші фактори, що мають різну фізико-хімічну природу. Згадані чинники призводять до зміни окремих властивостей електроустаткування. У цьому випадку оцінка технічного стану за окремими властивостями виконується більш менш задовільно. Однак загальна оцінка технічного стану надзвичайно утруднена через необхідність зіставлення показників різної фізичної природи та відсутності нині між ними кореляційних залежностей. Ця проблема змушує шукати інший підхід до загальної оцінки технічного стану електроустаткування. Доцільно як інтегральну оцінку технічного стану приймати значення спрацьованого ресурсу, що визначається за результатами експлуатаційного контролю параметрів обладнання в перехідних та стаціонарних режимах роботи.

У системі ремонту електрообладнання за технічним станом питання призначення термінів профілактичних робіт конкретним одиницям устаткування визначатиметься не регламентним ППР, які фактичним станом. У той же час періодичне діагностування виконуватиметься в рамках технічного обслуговування за планом, що включений до календарних графіків. Безперервне діагностування в процесі експлуатації найбільш ушкоджуваних та відповідальних елементів обладнання здійснюватиметься в рамках реалізації автоматизованої системи ТОР електрообладнання за технічним станом. Дані безперервного діагностування від відповідних спеціалізованих датчиків та пристроїв після обробки та аналізу видаються у вигляді рекомендацій або відповідних сигналів та команд іншим пристроям.

9.5 Класифікація засобів діагностування

Метою діагностування є забезпечення раціональної експлуатації електроустаткування при заданих показниках надійності та скорочення витрат на технічне обслуговування та ремонт. Ця мета досягається шляхом керування технічним станом електрообладнання в процесі експлуатації, що дозволяє проводити ТОР відповідно до даних діагностування [24, 25].

Основне завдання технічного діагностування полягає у отриманні достовірної інформації про технічний стан електрообладнання у процесі експлуатації. Вона вирішується на основі вимірювання, контролю, аналізу та обробки кількісних та якісних

значень параметрів електрообладнання, а також шляхом керування обладнанням відповідно до алгоритму діагностування.

Аналіз причин виникнення дефектів електрообладнання показує, що технічний стан кожного з них характеризується як йому властивими індивідуальними, так і загальними ознаками. Для кожного виду обладнання характерні свої типові дефекти, що часто зустрічаються в експлуатації. Поєднавши всі дефекти та ознаки їх появи в окремі групи, отримаємо структуру діагностування електрообладнання, що складається з трьох рівнів та підсистем: перевірки функціонування, виявлення дефектів, оцінки та прогнозування працездатності. У цьому кожному наступному рівні використовуються результати попередніх.

Як зазначалося, технічна діагностика електрообладнання включає у собі два основних напрями – оперативну і ремонтну діагностику. До основних завдань оперативної діагностики входять:

- раннє виявлення дефектів на працюючому чи виведеному з роботи для обстеження (але не розібраному) устаткуванні;

- прогнозування розвитку дефектів, оцінка їх небезпеки та загального стану обладнання;

- підготовка рекомендацій щодо подальшої експлуатації та технічного обслуговування обладнання (наприклад, негайний висновок у ремонт, зсув термінів планового ремонту, робота без обмежень тощо).

Ремонтна діагностика здійснюється на виведеному з роботи на ремонт обладнанні. До її основних завдань входять: локалізація дефектів обладнання, визначення обсягу ремонтно-відновлювальних робіт аж до рекомендації щодо доцільності заміни обладнання.

Велика різноманітність видів обладнання та завдань технічного діагностування призвела до того, що в даний час застосовуються засоби діагностування найрізноманітніших принципів побудови та призначення.

Всі ці засоби розрізняються за такими ознаками: способам технічної реалізації, конструктивному виконанню, розташування щодо об'єкта діагностування, ступеня автоматизації та універсальності, принципам на об'єкт діагностування, формам обробки та подання інформації про стан об'єкта, режимів роботи.

На рис. 9.2 показано класифікацію технічних засобів діагностування за основними ознаками.

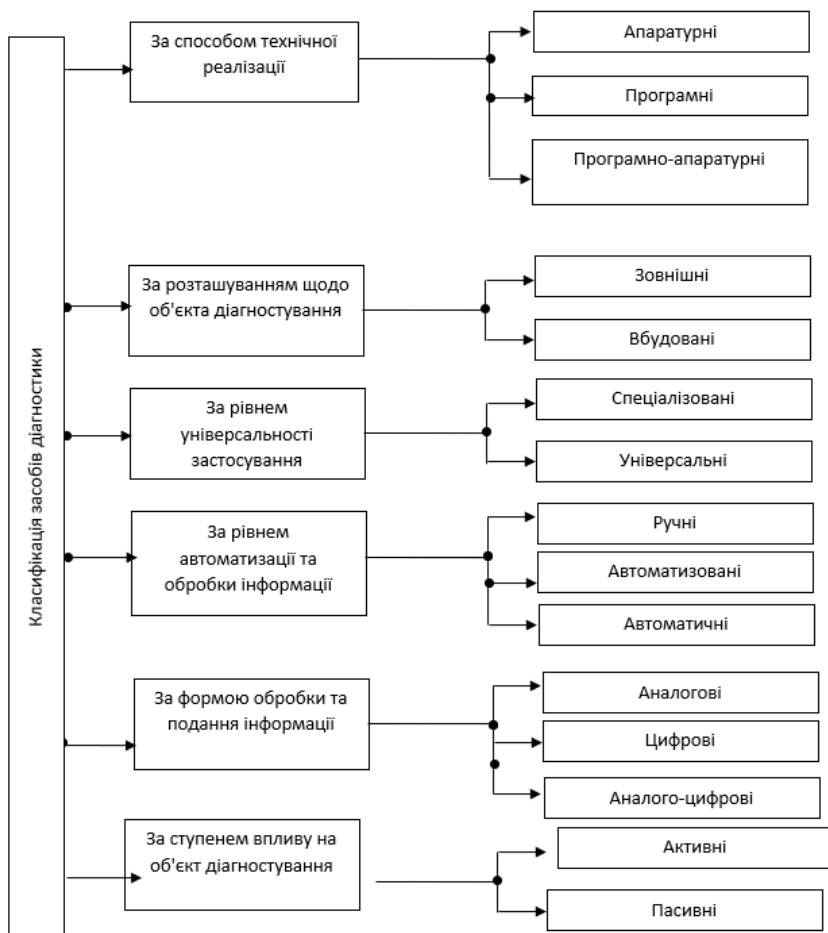


Рисунок 9.2 – Класифікація технічних засобів діагностування за основними ознаками

До апаратурних засобів діагностування належать різні пристрої: прилади, пульти, стенди, спеціальні промислові комп'ютери. Апаратурні засоби, що становлять об'єкт діагностування конструктивно єдине ціле, є вбудованими апаратурними засобами діагностування. Прикладами таких засобів можуть бути електровимірювальні прилади (струму, напруги, потужності, частоти та ін.), пристрої індикації

технічного стану елементів (реле, світловипромінюючі діоди, неонові лампи тощо), пристрої контролю ізоляції та ін.

Якщо у схемах експлуатації електрообладнання вбудовані засоби діагностування не передбачені або їх виявляється недостатньо для діагностування з необхідною глибиною, то застосовують зовнішні апаратурні засоби діагностування, виконані окремо від конструкції обладнання та підключаються до нього лише у процесі діагностування. Найпростішими прикладами зовнішніх апаратурних засобів можуть бути комбіновані прилади для вимірювання в ланцюгах постійного та змінного струму, тестери логічного стану, електронно-променеві та цифрові осцилографи, переносні вимірювальні комплекти тощо.

Якщо апаратурні засоби діагностування призначені лише для однотипного обладнання, то вони є спеціалізованими, а якщо для обладнання різного конструктивного виконання та функціонального призначення – універсальними.

Зовнішні спеціалізовані засоби діагностування – це пристрої, які використовуються, наприклад, для перевірки працездатності окремих елементів або вузлів електроустаткування на стадіях технічного контролю після виконання ремонтних робіт.

До вбудованих спеціалізованих засобів діагностування можуть входити спеціально розроблені обчислювальні пристрої з жорстко запрограмованими алгоритмами діагностування конкретної системи електроустаткування.

Універсальні засоби діагностування технічно досить складні та, як правило, побудовані на базі серійних промислових комп'ютерів.

Програмні засоби діагностування є комп'ютерними програмами, які управляють роботою обладнання відповідно до алгоритму діагностування. Вони застосовні, наприклад, для програмованих контролерів, мікропроцесорних систем управління релейним захистом та інших. Програми забезпечують технічне діагностування устаткування як у його використанні за прямим призначенням (робочі програми), і при короткочасному перериванні функціонування об'єкта (спеціальні випробувальні програми). Програмні засоби у поєднанні з апаратурними утворюють програмно-апаратурні засоби діагностування, що дозволяють вирішувати завдання самодіагностування обладнання, наприклад, на основі сучасних SCADA-систем.

За ступенем автоматизації засоби діагностування можуть бути ручними, автоматизованими та автоматичними. Застосування ручних засобів вимагає участі людини-оператора й у підключенні коштів до об'єкта діагностування, й у прийнятті рішень про його технічний стан.

Такий підхід знижує продуктивність та об'єктивність діагностування. Як правило, ручні засоби виконуються спеціалізованими.

Автоматизовані засоби вимагають часткової участі оператора для їх підключення до обладнання та вибору режимів діагностування. Основна процедура діагностування, включаючи видачу інформації про технічний стан обладнання, здійснюється автоматично.

Автоматичні засоби (мікропроцесорні комплекти, мікро- та міні-ЕОМ) вирішують завдання діагностування без втручання людини.

Автоматизовані та автоматичні засоби можуть бути як спеціалізованими, так і універсальними. Вони мають високу швидкодію і достовірність діагностування.

Залежно від форм обробки та подання інформації технічні засоби діагностування можуть бути поділені на аналогові, цифрові та цифроаналогові.

За ступенем впливу на об'єкт діагностування технічні засоби можуть бути активними та пасивними. Активні впливають на об'єкт, посылаючи в нього сигнал, що викликає реакцію об'єкта, яка потім аналізується. Пасивні засоби виконують лише вимірювання, обробку та оцінку сигналів, що характеризують стан об'єкта.

З усього різноманіття засобів діагностування в електроенергетиці найбільше застосування нині знаходять апаратні засоби визначення працездатності та справності окремих складальних одиниць електроустаткування. Програмні та програмно-апаратні засоби діагностування широко впроваджуються в міру поширення мікропроцесорних систем та обчислювальної техніки.

Важливість забезпечення надійності електроустаткування на основі застосування методів та засобів діагностики висуває до останніх високі вимоги. При проектуванні та експлуатації засобів діагностування ці вимоги характеризуються:

- номінальними та допустимими значеннями вхідних та вихідних сигналів;
- статичною та динамічною точністю їх вимірювання;
- глибиною діагностування (числом сигналів, що діагностуються);
- достовірністю діагностування;
- технічною та метрологічною надійністю;
- способом зв'язку з об'єктом діагностування;
- формою подання результатів.

Перелічені показники взаємопов'язані та мають бути узгоджені між собою. Розглянемо основні їх.

При діагностуванні електрообладнання контролюються безперервні та дискретні сигнали у широкому діапазоні їх номінальних значень. Так, вихідні сигнали інформаційно-вимірювальних пристроїв знаходяться на рівні 0...5 В по напрузі та 0...10 А за струмом, а силової частини електроустаткування – на рівні 0...750 кВ та 0...104 кА. Доцільно прийняти вхідні та вихідні сигнали засобів діагностування відповідно до низки значень шкал приладів, прийнятих у державній системі приладів. Уніфікація полегшує об'єднання приладів у комплекси та приєднання датчиків до комп'ютерної техніки. Вихідні сигнали засобів діагностування, які технічно реалізовані на елементах комп'ютерної техніки, повинні збігатися за рівнем з вхідними сигналами комп'ютерів.

Технічні засоби діагностування можуть мати похибку вимірювання, що задовольняє ряду 5; 2,5; 1 %. На величину похибки впливають вид сигналу (аналоговий або дискретний), спосіб і форма передачі інформації, а також статичні та динамічні характеристики контрольованих параметрів електрообладнання.

Високий рівень електромагнітних та технологічних перешкод на об'єктах електроенергетики, пов'язаний зі специфікою роботи обладнання та природними коливаннями електричних та технологічних параметрів, пред'являє високі вимоги до перешкодозахищеності та перешкодостійкості засобів діагностування.

Коли використовують апаратні засоби діагностування та дотримуються ієрархічного принципу виділення дефекту (починаючи з діагностування окремих функціональних елементів і закінчуючи діагностуванням обладнання в цілому), то для кожного з них вважають достатнім контролювати не більше 25-26 діагностичних параметрів. Подальше зростання числа вхідних сигналів невиправдано ускладнює технічну реалізацію засобів діагностування та може призвести до збільшення його тривалості. Для програмних засобів діагностування кількість контрольованих сигналів визначається ємністю носія інформації і може бути необмеженим, хоча надмірно велика кількість діагностичних параметрів ускладнює їх аналіз та подання.

Достовірність засобів діагностування – властивість забезпечувати відповідність результату діагностування істинному стану об'єкта – залежить від глибини діагностування (набору або числа параметрів, що діагностуються), періоду перевірки та його тривалості, перешкодостійкості тощо. Достовірність діагностування знижується зі збільшенням тривалості періоду перевірки через можливе виникнення дефектів устаткування цей час. Залежно від необхідної точності оцінки діагностичних параметрів обладнання (оцінки справності,

працездатності чи правильності функціонування) період перевірки окремих елементів електрообладнання може коливатися в широких межах: від 104 до 105 с.

Чинники, що впливають період перевірки, визначають доцільну його тривалість. Швидкодія діагностування зростає в міру зниження числа контрольованих параметрів, вибору їх складу найбільш інформаційних, застосування вбудованих засобів діагностування, а також використання програмованих обчислювальних пристроїв.

Надійність засобів діагностування не повинна бути нижчою за рівень надійності елементів та деталей електрообладнання, а також не повинна знижувати їх надійність у процесі діагностування. Досягнення високої надійності засобів діагностування може бути забезпечене за рахунок використання в них високонадійних комплексуючих елементів та деталей, вибором системних та технічних рішень побудови схем, стійких до різних факторів, що дестабілізують, застосуванням резервних пристроїв, методом самоконтролю і т.п.

До технічних засобів діагностування можуть пред'являтися високі вимоги щодо метрологічної надійності, особливо в оцінці працездатності та прогнозуванні технічного стану устаткування. По відношенню до засобів виділення несправностей об'єкта, коли вони виражені в логічній формі, метрологічні вимоги можуть бути суттєво знижені, оскільки граничні значення сигналів 1 і 0, як правило, помітно відрізняються.

Для зовнішніх засобів діагностування потрібна наявність гальванічного поділу електричних ланцюгів обладнання та засобів діагностування. Останнє диктується як умовами надійності роботи низьковольтної електричної ланцюга засобів діагностування, а й умовами безпеки діагностування пристроїв із високим потенціалом.

Результати діагностування повинні бути представлені у зручній для їхнього аналізу формі. Зазвичай це індикація у вигляді звукової та світлової сигналізації або документованого запису на паперових та магнітних носіях.

9.6 Методи діагностування електроустаткування

Особливості, методичні та інформаційні основи методів діагностування електроустаткування досить різноманітні та докладно описані у спеціальній літературі. Тому нижче дається лише загальний огляд найпоширеніших методів контролю, розроблених у Росії. Деякі застосовувані та найбільш перспективні напрямки діагностування електрообладнання, що розробляються, наведені в табл. 9.3.

Таблиця 9.3 – Напрями діагностування електроустаткування

Електроустаткування	Напрямок діагностування
Турбогенератори	<p>Діагностика теплового стану обмотки ротора</p> <p>Діагностика несправностей обмотки статора</p> <p>Діагностика системи охолодження стрижнів статора обмотки</p> <p>Контроль вібрації та діагностика механічного стану</p> <p>Діагностика щітково-контактного апарату</p> <p>Контроль електромагнітного випромінювання</p> <p>Діагностика ущільнень та підшипників</p> <p>Діагностика системи збудження</p>
Силові трансформатори	<p>Хроматографічний аналіз газів, розчинених у маслі</p> <p>Температурний контроль</p> <p>Контроль зношування контактів РПН</p> <p>Тепловізійний контроль трансформаторів</p> <p>Реєстрація часткових розрядів в ізоляції</p>
Вимикачі високої напруги	<p>Контроль комутаційного та механічного ресурсу</p> <p>Оцінка стану контактної системи</p> <p>Контроль характеристик приводу</p> <p>Контроль стану порцелянових ізоляторів</p> <p>Контроль витоків дугогасного середовища (повітря, елегаз)</p>
Високовольні електродвигуни	<p>Діагностика обриву стрижнів короткозамкнутого ротора</p> <p>Контроль виткових замикань</p> <p>Вібраційний контроль обмоток статора</p> <p>Контроль підшипникового вузла</p> <p>Контроль та захист від неуспішних пусків</p> <p>Контролює ексцентриситет повітряного зазору між ротором і статором.</p> <p>Контроль неповнофазних режимів</p> <p>Контроль напрямку обертання</p> <p>Безперервний селективний контроль активного опору ізоляції</p> <p>Температурний контроль</p> <p>Оцінка витрати ресурсу на основі контролю пускових та тривалих режимів роботи</p>
КРУ та струмопроводи	<p>Контроль дугового захисту</p> <p>Тепловізійний контроль стану електричних контактів та ізоляторів</p>
Повітряні та кабельні лінії	<p>Дистанційна тепловізійна діагностика контактів та підвісної ізоляції</p> <p>Контроль часткових розрядів</p> <p>Діагностика опор ЛЕП</p> <p>Контроль стану ізоляції кабелів</p>

Метод інфрачервоної термографії. Зміна температури вузлів та елементів електрообладнання в процесі експлуатації є важливою інформативною ознакою їхнього технічного стану. Дистанційний контроль температури нагрівання струмопровідних частин, контактних з'єднань, корпусів електрообладнання, підвісної та опорно-стрижневої ізоляції реалізується засобами тепловізійного контролю. Цей метод діагностики ґрунтується на реєстрації інфрачервоного випромінювання.

Роздільна здатність тепловізійного контролю 0,2°C. В електроенергетиці Росії найбільш поширені вітчизняні тепловізори ТВ-03 та тепловізори шведської фірми AGEMA, наприклад AGEMA-782.

Оцінка технічного стану контактних з'єднань проводиться порівнянням температури однотипних контактів, що знаходяться в однакових умовах по навантаженню та охолодженню, а також температури контактного з'єднання та сусідніх ділянок струмопроводів. Оцінка технічного стану ізоляторів ґрунтується на аналізі різниці температур дефектного та непробитого ізолятора. Ця різниця визначається напругою на ізоляторі та величиною діелектричних втрат порцеляни ізолятора.

Температура пробитого ізолятора дорівнює температурі довкілля, оскільки напруга у ньому нуль. Температура непробитого ізолятора визначається за середніми параметрами ємності, розмірів та напруги та перевищує температуру навколишнього середовища на 0,4–0,5°C.

Тепловізійний метод контролю отримав найбільше застосування у відкритих і закритих розподільних пристроях напругою 35 кВ і вище, а також на ЛЕП.

Метод хроматографічного контролю маслонаповненого обладнання. Це найбільш опрацьований та поширений в електроенергетиці метод діагностики. Він застосовний для раннього виявлення дефектів, що розвиваються, всередині маслонаповнених силових трансформаторів, автотрансформаторів, шунтуючих реакторів, великих електричних машин з водомасляною системою охолодження, вимірювальних трансформаторів, високовольтних вводів і високовольтних кабелів. Хроматографія є поділ сумішей. Ідея методу полягає в припущенні, що ушкодження в маслонаполненому устаткуванні супроводжується виділенням різних газів, які у маслі при нормальної роботи. Ці гази розчинені у маслі. Виділивши їх з олії та провівши хроматографічний аналіз, можна виявити дефекти на ранній стадії виникнення. В даний час вивчений склад газів, що містяться в олії недефектного устаткування, що нормально працює, виявлено гази, характерні для різних ушкоджень, та граничні їх концентрації. При

цьому визначають концентрацію водню H_2 , метану CH_4 , етилену C_2H_4 , етану C_2H_6 , ацетилену C_2H_2 , оксиду та діоксиду вуглецю CO , CO_2 та інших газів.

Відбір олії з працюючого трансформатора проводиться спеціальними масловідбірниками поршневого типу. При цьому виключається зіткнення олії з навколишнім повітряним середовищем і запобігають втратам розчинених в маслі газів у процесі відбору. Олія міститься в замкнутий об'єм, і газ над поверхнею олії піддається аналізу. Для аналізу складу, динаміки зміни та концентрації газів у пробах олії застосовують хроматографи. Крім того, відомі вбудовані засоби аналізу газів, розчинених в маслі, і газів, що виділилися, а також пристрої безперервного контролю, засновані на визначенні CO_2 і H_2 , розчинених в маслі. Характер і зразкове місце ушкодження визначають за кількісним складом газів. Необхідність виявлення дефекту на ранніх стадіях його розвитку потребує обробки даних хроматографічного аналізу. Оцінка стану маслонаполненого устаткування здійснюється, зазвичай, з урахуванням чотирьох критеріїв: граничних концентрацій, швидкості наростання концентрації газів, відносин концентрацій газів, критерію рівноваги.

Перший критерій дозволяє судити за значенням перевищення граничних концентрацій характер внутрішніх дефектів. Так, сильні пошкодження ізоляції характеризуються високою концентрацією водню та ацетилену та зазвичай супроводжуються наявністю вуглекислого газу. Відносно велика концентрація насичених та ненасичених вуглеводнів CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , (крім C_2H_2) у поєднанні з невеликим відсотком H_2 вказує на теплове розкладання олії внаслідок перегріву металевих частин. Якщо є помітна кількість CO і CO_2 це означає, що відбувається розкладання целюлози. Різка збільшення CO_2 і H_2 свідчить про сильний локальний перегрів, що супроводжується обвуглюванням олії. Якщо зміст CO_2 в 10-20 разів більше ніж CO за відсутності інших газоподібних продуктів розкладання, причиною є термічне розкладання целюлози. При високих температурах виявляється невелика кількість H_2 , а вміст кисню помітно знижено. Наявність водню та невеликого вмісту етилену та CO_2 показово для часткових розрядів. У разі слабкого іскріння виявляється невелика кількість C_2H_2 . Присутність C_2H_2 говорить про дефект, що розвивається всередині трансформатора, який необхідно вивести з експлуатації і оглянути.

За другого критерію контролюється швидкість наростання концентрацій газів. Якщо приріст вмісту газів перевищує 10 % на місяць, трансформатор ставиться на прискорений контроль.

Достовірність оцінки стану за допомогою цього критерію значно вища за вуглеводневими газами та СО, ніж по водню та оксиду вуглецю, втрати яких у пробі олії іноді можна порівняти з чисельними значеннями цього критерію.

Третій критерій дає можливість використовувати три відносини пар газів: C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 . Наприклад умови $C_2H_2/C_2H_4 \ll 0,1$ та $CH_4/H_2 > 1$ вказують на дефект термічного характеру, а ставлення C_2H_4/C_2H_6 характеризує температуру перегріву. Найбільш частими причинами згаданих відносин є виникнення дефектів в ізоляції трансформаторного заліза, нагрівання та вигорання контактів РПН, порушення ізоляції стяжних шпильок та ярмових балок з утворенням короткозамкнутого контуру, нагрівання контактів з'єднань відводів низької напруги.

Четвертий критерій заснований на зіставленні результатів аналізу олії з газового реле та з проби. Використовується у разі спрацьовування газового захисту. На основі цього критерію робиться висновок про можливість включення трансформатора в роботу і визначається дефект електричного характеру, коли повторне включення трансформатора могло б призвести до збільшення вогнища ушкодження.

Перспективним напрямом застосування зазначених критеріїв є розробка алгоритмів реалізації автоматизованих систем оцінки стану маслонаполненого устаткування. Слід зазначити універсальність методу та зростаючу зі збільшенням напруги ефективність його використання.

Метод контролю діелектричних характеристик ізоляції.

Заснований на вимірі діелектричних характеристик, до яких відносяться струми витоку, величини ємності, тангенс кута діелектричних втрат (tg) та ін. В основі контролю струму витоку лежить вимірювання струму, що проходить через тверду ізоляцію за наявності напруги. Відомі два методи контролю. У першому прямому методі вимірюється модуль комплексної провідності ізоляції або її ємність. Метод вимагає реєстрації часткою відсотка у зміні контрольованого параметра, застосування різних схем підвищення чутливості та завадостійкості, що є його недоліком. У другому методі порівнюються ємність та $\text{tg}\phi$ однотипного електроустаткування за допомогою схеми Шерінга. Метод вимагає наявності спеціальних вимірювальних висновків ізольованої від землі конструкції. Він може використовуватися для контролю за високовольними вимірювальними трансформаторами та конденсаторами зв'язку.

Метод контролю розрядів. Все більшого поширення як показник стану ізоляції електрообладнання набуває використання розрядів. Відомі методи вимірювання характеристик розрядів можна розділити на вимірювання часткових, пазових та поверхневих розрядів та на електричні та неелектричні методи. Методи застосовуються на напругах 110 кВ і вище у трансформаторах та електричних машинах.

Досліджуються залежності рівня інтенсивності часткових розрядів в ізоляції електричних машин від теплових та механічних впливів. Аналізуються дані виявлення зв'язків між характеристиками часткових розрядів і термінами служби ізоляції. Вимірювання часткових розрядів дозволяє контролювати стан ізоляції під час випробувань та виявляти її передаварійний стан. Наявність часткових розрядів визначається за імпульсами напруги, що з'являються, і по змінах електромагнітного поля в зовнішньому ланцюгу за допомогою електромагнітного датчика. Відомі пристрої, що контролюють амплітуду та частоту проходження імпульсів у певних діапазонах частот.

Основні труднощі застосування методу часткових розрядів пов'язані з наявністю перешкод, зумовлених комутаціями та перехідними процесами у первинних ланцюгах установки, наявністю коронних розрядів, радіоперешкод тощо. Проблема вимірювання сигналу та його відокремлення від перешкод не завжди можна вирішити. Ефективність використання контролю часткових розрядів збільшується зі зростанням робочої напруги, оскільки, з одного боку, зростають напруженість електричного поля і можливість виникнення дефектів, з іншого – з'являється можливість відмовитися від випробувань підвищеним напругою.

Виявляти пазові розряди, іскріння та утворення дуг доцільно та в обмотках великих електричних машин під навантаженням. Причини виникнення розрядів: ослаблення пазових клинів, стирання та усадка підклинових прокладок між стрижнями обмоток статора, обрив елементарних провідників, вібрація пластин гнучких висновків та ін. Виявити іскровий, тліючий та дуговий розряди можна за допомогою індуктивних датчиків. Виявити розряди можна також за допомогою провідних електродів, накладених на ізоляцію, ємнісних датчиків, що підключаються до нейтралі та лінійного виведення, або антени, що встановлюється на роторі машини, високочастотного трансформатора, розташованого в ланцюзі заземлення нейтралі, та вимірювача радіоперешкод.

Дефекти стрижневих ізоляторів, такі як тріщини та локальні провідні забруднення, є джерелами поверхневих розрядів. Утворення

поверхневих розрядів супроводжується випромінюванням у звуковому, оптичному та радіо діапазонах. Відомий метод оптичного контролю випромінювання поверхневих розрядів за допомогою електронно-оптичного дефектоскопа. Він ґрунтується на реєстрації просторово-часового розподілу яскравості свічення та визначенні за її характером дефектних ізоляторів. Для цих же цілей з різною ефективністю застосовують радіотехнічний та ультразвуковий методи, а також метод контролю ультрафіолетового випромінювання за допомогою електронно-оптичного дефектоскопа «Філін». Даний принцип можна застосувати і для виявлення таких дефектів як обрив стрижнів ротора асинхронного електродвигуна, утворення дуги в КРУ і т.п.

Описані методи не дають однозначного зв'язку рівня та характеру контрольованих параметрів з характером та місцем uszkodження. Вони універсальні за принципом і вимагають індивідуального підходу до кожного об'єкту та спеціальних експериментальних досліджень.

Метод вібродіагностики. Для контролю над технічним станом механічних вузлів велике значення має зв'язок параметрів об'єкта з такою інтегральною ознакою, як спектр частот вібрації. Будь-яке параметричне збудження зміщує діапазон. Це і використовується як ознака. Оцінка стану зі зміщення низькочастотних складових спектра менш ефективна.

Електрофізичний метод контролю. Перспективним напрямом діагностики електроустаткування є застосування електрофізичних методів контролю. Гідність таких методів – швидке отримання первинної інформації, зручність її передачі та подання у вигляді сигналу відгуку. Легко вбудовуються датчики в об'єкт, порівняно проста апаратура, хороші можливості налаштування на різні електрофізичні ефекти, висока ефективність виявлення дефектів. Легко піддаються автоматизації та реалізації на ЕОМ.

Методичну основу використання електрофізичних методів становить принцип спостереження, а носіями інформації є електрофізичні ефекти, що виникають при активізації фізичних процесів. За способами прояву, виведення та обробки інформації ефекти такого типу можна розділити на інтегральні ефекти та пов'язані з ними перехідні процеси, ефекти нелінійності, флуктуаційні ефекти та шуми.

Використання електрофізичних ефектів виробляється з урахуванням визначення способу прояви дефекту чи дефектообразуючого чинника як конкретного фізичного процесу можливості спостереження цим процесом зовнішніми засобами. Ця

можливість визначається силою прояву ефекту і роздільною здатністю застосовуваних вимірвальних засобів.

9.7 Прогнозування технічного стану електрообладнання

В результаті діагностування електрообладнання в процесі експлуатації здійснюється раннє виявлення дефектів та визначається технічний стан електроустановки в даний час. З точки зору вибору оптимальної стратегії технічного обслуговування та ремонту потрібні прогноз розвитку дефектів та перспективна оцінка технічного стану на наступний період експлуатації. Прогнозування технічного стану підвищує ефективність діагностування.

Описані у літературі різні методи, що застосовуються під час прогнозування технічного стану машин і механізмів, можна розділити на аналітичні, ймовірнісні та розпізнавання образів.

Метод аналітичного прогнозування. Цей метод дозволяє отримувати параметри обладнання, розмірність яких відповідає розмірності контрольованих параметрів. При цьому значення обчислених параметрів характеризують перебіг процесу у часі. Цей метод зазвичай застосовується, коли відома аналітична залежність функції зміни діагностичного параметра в часі.

Метод ймовірнісного прогнозування. Його особливістю є визначення ймовірності збереження працездатності устаткування функції часу, тобто. результат прогнозу визначає ймовірність виходу та невиходу контрольованого діагностичного параметра за допустимі межі. При цьому визначаються ймовірнісні характеристики: щільність розподілу значень параметрів, математичне очікування та дисперсія.

Метод розпізнавання образів (статистичної класифікації). Цей метод полягає в тому, що прогнозування можна починати з моменту здійснення одноразового контролю обладнання, що діагностується. В результаті прогнозу контрольований об'єкт відносять до того чи іншого класу технічного стану, який встановлюють заздалегідь за критерієм працездатності чи довговічності та приймають за зразок (образ). Потім, виходячи із закономірності зміни параметрів даного класу, вирішують, як змінюватиметься даний параметр у майбутньому.

Вибір методу прогнозування багато в чому визначається необхідною точністю та достовірністю. Отримати точний прогноз технічного стану проблематично. Це пов'язано з безліччю чинників, які впливають процес прогнозування. До основних факторів можна віднести: ступінь вивченості досліджуваного діагностичного процесу, глибину та частоту діагностування, точність вимірюваних параметрів,

обраний метод прогнозування та ін. Тому точність прогнозування технічного стану електроустаткування можна оцінити лише орієнтовно.

При прогнозуванні технічного стану електроустаткування вирішуються такі:

- виявляються складальні одиниці обладнання, технічний стан яких значно зміниться на наступний період експлуатації;
- контролюються параметри та ознаки зміни технічного стану електрообладнання;
- нормуються значення діагностичних параметрів;
- порівнюються діагностичні параметри із величинами їх нормативних значень;
- фіксуються момент, абсолютне значення та тривалість виходу діагностичних параметрів електрообладнання за допустимі межі;
- виконуються накопичення, відображення та реєстрація оброблюваної інформації;
- проводиться первинна обробка діагностичної інформації про технічний стан обладнання;
- обчислюються поточні та перспективні значення узагальнених ресурсних показників технічного стану контрольованого обладнання;
- призначаються строки проведення профілактичних робіт, спрямованих на підвищення рівня працездатності електроустаткування;
- видається інформація персоналу про технічний стан та рекомендації про доцільні зміни процесу експлуатації кожної одиниці електрообладнання.

Прогнозування технічного стану електромехатронних систем

Фізичні основи прогнозування технічного стану та процеси зміни властивостей і розмірів деталей і вузлів підпорядковуються певним законам, за якими можна прогнозувати зміни з певним ступенем точності.

За умовами технології виробництва технічні пристрої виготовляють із певними допусками в розмірах, та з урахуванням хімічних і структурних властивостей матеріалів.

На інтенсивність зношування деталей і вузлів пристроїв істотно впливає організація та періодичність технічного обслуговування й поточного ремонту. Якщо технічне обслуговування та ремонти здійснюють нерегулярно або їх зовсім не проводять, то швидкість зношування вузлів і деталей значно збільшується. Унаслідок цього всі перелічені вище фактори впливають на імовірність прогнозування роботи обладнання.

Існуючі методи прогнозування не дають можливості передбачати раптові відмови, які характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів стану деталі або вузла обладнання до граничного значення. Прогнозувати з певним ступенем точності можна поступові відмови, які характеризуються поступовою зміною параметрів технічного стану й зумовлені зношуванням або старінням матеріалу деталей або вузлів обладнання. Процеси зношування й старіння деталей і вузлів переважно містять детермінований (визначений) і випадковий складники. Кожен із них може мати переважний вплив для відповідного конкретного випадку, що впливає на характер процесів зношування або старіння.

Головним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу елементів систем і агрегатів.

Ресурс – це напрацювання об'єкта від початку експлуатації або її поновлення після ремонту до настання граничного стану, коли подальша експлуатація має бути припинена, зважаючи на вимоги техніки безпеки або економічні міркування.

У техніці найчастіше для визначення ресурсу користуються такими термінами, як доремонтний, міжремонтний, залишковий і використаний ресурс.

Доремонтний ресурс характеризується напрацюванням нового обладнання від початку експлуатації до першого ремонту, а *міжремонтний* – напрацюванням між ремонтами.

Під час прогнозування визначається також *залишковий ресурс*, тобто напрацювання обладнання від моменту діагностування (контролю) до граничного стану, обумовленого технічною документацією. Використаний ресурс характеризується напрацюванням обладнання після виготовлення або ремонту до моменту діагностування (контролю).

Для орієнтовного порівняння технічного стану елементів пристрою, що діагностується, з різними діагностичними параметрами, можна користуватися поняттям коефіцієнта технічного ресурсу, за допомогою якого оцінюють залишковий ресурс деталі, спряження або вузла.

Коефіцієнт технічного ресурсу (K_r) для параметрів, абсолютні значення яких збільшуються під час експлуатації обладнання, визначають за формулою:

$$K_{tr} = \frac{P_g + P_v}{P_g - P_n}, \quad (9.1)$$

де P_g – граничне значення параметра;

P_v – вимірне значення параметра;

P_n – номінальне значення параметра.

Якщо під час експлуатації значення параметра зменшується, то коефіцієнт залишкового ресурсу (K_{sr}) визначається виразом:

$$K_{sr} = \frac{P_v - P_g}{P_n - P_g}. \quad (9.2)$$

Для нового елемента вузла або машини $K_{sr} = 1$, а при повному вичерпанні ресурсу $K_{sr} = 0$.

Відмова або загроза відмови зазвичай настає з пошкодження однієї-двох деталей або вузла, що зумовлено різною зносостійкістю деталей або вузлів обладнання. Конструкцією обладнання передбачається нескладна заміна деталей, які швидко зношуються. Після заміни або ремонту деталей, які вичерпали ресурс роботи, пристрій знову стає працездатним та отримує певний запас часу роботи до наступної загрози втрати працездатності.

Шляхи отримання результатів прогнозу об'єднують групи методів прогнозування:

– визначення параметрів технічного стану об'єкта;

– встановлення імовірності зміни характеристик контрольованих параметрів за певні межі;

– встановлення критеріїв працездатності або довговічності.

Відповідно використовують три методи прогнозування: аналітичний, імовірнісний і статистичної класифікації.

Метод *аналітичного прогнозування* застосовують для завдань, коли зміна контрольованого параметра інерційна у часі та всі зміни поступово накопичуються. Тоді завданням прогнозування є визначення за відомими значеннями функції контрольованого параметра $P(t)$ у минулому та теперішньому значенні функції, а також у майбутньому при визначенні моменту часу, коли параметр досягне свого допустимого значення P_0 .

Метод *ймовірнісного прогнозування* заснований на теорії імовірності й використовується при вирішенні практичних задач діагностування.

Теорія ймовірностей вивчає закономірності випадкових явищ, що часто повторюються. Для визначення параметрів імовірнісного прогнозування використовують поняття події та формули Баєса.

Подія – це явище, що відбулося або не відбулося. Події можуть бути вірогідні або неможливі.

Ймовірністю якоїсь події A називають число $P(A)$, яке характеризує можливість виникнення події. Ймовірність вірогідної події визначається як $P(a) = 1$, а неможливої $p(\bar{A}) = 0$.

Ймовірність випадкової події перебуває у межах $0 \leq P(A) \leq 1$.
В інженерній практиці

$$P(A) = \frac{m}{n}, \quad (9.3)$$

де m – кількість спроб, за яких подія A відбулася;

n – загальна кількість виконаних спроб.

За великою кількістю спроб статистична ймовірність події наближається до істинної ймовірності події.

Приклад 1. Необхідно визначити приблизну оцінку ймовірності безвідмовної роботи 100 штук тягових двигунів типу TN-81 для двох проміжків часу: $t=1\ 000$ і $t=3\ 000$ год. Середньостатистична величина інтенсивності відмов у частках одиниць на одну годину роботи двигуна становить: $\lambda \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Розв'язання. Середнє напрацювання до першої відмови двигуна визначається системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} P(t) &= e^{-\lambda t} \\ Q(t) &= 1 - e^{-\lambda t} \\ a(t) &= \lambda e^{-\lambda t} \\ T_{cp} &= \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (9.4)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи двигуна;

$Q(t)$ – ймовірність відмови двигуна;

$a(t)$ – частота відмов або щільність їхньої ймовірності;

T_{cp} – середнє значення напрацювання двигуна до першої відмови:

Кількісні характеристики надійності й інших величин технічного пристрою для експоненціального розподілу зображено на рис. 9.3.

За інтенсивності відмов $\lambda = const$ середній час між сусідніми відмовами, або напрацювання на відмову, $t_{cp} = T_{cp}$

Ймовірність безвідмовної роботи за час роботи двигуна за $t = T_{cp}$:

$$P(t) = e^{-\lambda T_{cp}} = \frac{1}{e} \approx 0,37$$

Ймовірність безвідмовної роботи двигуна:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_{\text{cp}}}}. \quad (9.5)$$

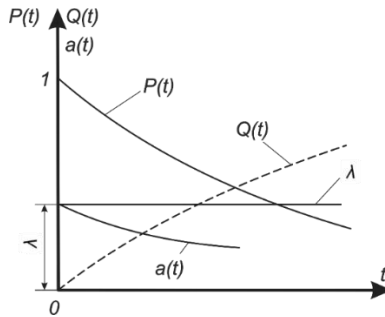


Рисунок 9.3 – Кількісні характеристики надійності технічного пристрою за експоненціальним розподілом

Середнє значення напрацювання двигуна до першої відмови:

$$T_{\text{cp}} = \frac{1}{\lambda} = 5 \cdot 10^4, \text{ год.}$$

Відповідно до вимог задачі імовірність безвідмовної роботи двигуна для двох проміжків часу його роботи:

$$P(1000) = e^{-\frac{1000}{5 \cdot 10^4}} = e^{-0,02} = 0,98;$$

$$P(3000) = e^{-\frac{3000}{5 \cdot 10^4}} = e^{-0,06} = 0,94.$$

Як показують отримані дані, надійність двигуна, що розглядається, характеризується тим, що на кожні 100 двигунів імовірність виходу з ладу на протязі вказаних двох проміжків часу роботи становить: у першому випадку 2 двигуни (2 %), у другому – 6 двигунів (6 %).

Формула Баєса дає змогу визначити імовірність поломки, наприклад вузла B_i за появи ознаки A через відому імовірність поломки вузла B_i із попередніх досліджень $P(B_i)$.

Розглянемо приклад несумісних (дві разом не відбуваються) подій B_1, B_2, \dots, B_n , що характеризують пошкодження відповідних вузлів. Вони створюють повну групу.

Припустимо, що з'являється подія A , яка характеризує пошкодження вузлів B_1, B_2, \dots, B_n .

Імовірність відмови вузлів складається з $P(B_1), P(B_2), \dots, P(B_n)$. Імовірність появи ознаки A за несправності окремих вузлів є $P(A/B_i)$.

Необхідно визначити імовірність $P(B_i / A)$ пошкодженого вузла B_i відносно інших, якщо під час експлуатації з'являється подія A .

Для розв'язання задачі розглядається імовірність одночасної появи ознаки A і пошкодження (стану) B_i .

Ймовірність одночасної появи ознаки A та події B_i визначається за формулою:

$$\begin{aligned} P(A \cap B) &= P(A) \cdot P(B/A) = P(B) \cdot P(A/B), \\ P(A \cap B_i) &= P(A) \cdot P(B_i/A) = P(B_i) \cdot P(A/B_i). \end{aligned} \quad (9.6)$$

З урахуванням (9.6) визначається:

$$P(B_i/A) = \frac{P(B_i)P(A/B_i)}{P(A)}. \quad (9.7)$$

Встановимо, що імовірність події $A \in P(A)$. Оскільки ознака A характеризує пошкодження якогось вузла, то ця подія складається з логічної суми окремих подій

$$A = (A \cap B_1) \vee (A \cap B_2) \vee (A \cap B_3) \vee \dots \vee (A \cap B_n). \quad (9.8)$$

У зв'язку з припущенням, що може з'явитися тільки одна з можливих подій, отримаємо

$$P(A) = P(A \cap B_1) + P(A \cap B_2) + P(A \cap B_3) + \dots + P(A \cap B_n). \quad (9.9)$$

Повна ймовірність події A визначається:

$$\begin{aligned} P(A \cap B_i) &= P(B_i) \cdot P(A/B_i), \\ P(A) &= \sum_{j=1}^n P(B_j) P(A/B_j). \end{aligned} \quad (9.10)$$

Фізичний принцип (9.10) полягає в тому, що якщо система має декілька можливих несумісних шляхів переходу до іншого стану, то ймовірність переходу дорівнює сумі ймовірностей реалізації кожного з них (несумісні шляхи – такі, що не можуть реалізуватись одночасно).

З урахуванням (9.7) та (9.10) отримаємо формулу Баєса:

$$P(B_i/A) = \frac{P(B_i)P(A/B_i)}{\sum_{j=1}^n P(B_j)P(A/B_j)}. \quad (9.11)$$

Знаменник рівняння (9.11) визначає суму добутку тих самих величин, але для всіх вузлів.

Розглянемо на прикладах практичне використання формули Баєса.

Приклад 2. Імовірність безвідмовної роботи елемента $P = 0,9$. Визначити надійність (R – reliability) блоків за послідовного та паралельного з'єднань елементів.

Розв'язання:

а) логічний добуток подій A, B, C (блок працює, якщо всі елементи працюють)

$$\begin{aligned} P(R) &= P(A \cap B \cap C) = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C), \\ P(R) &= 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 0,729; \end{aligned}$$

б) логічна сума подій A, B, C (блок працює, якщо працює хоча б один елемент):

$$P(R) = P(A \vee B \vee C) = \\ = P(A) + P(B) + P(C) - P(A \wedge B) - P(B \wedge C) - P(A \wedge B \wedge C). \\ P(R) = 0,9 + 0,9 + 0,9 - 0,81 - 0,81 - 0,729 = 0,351.$$

Приклад 3. Імовірність безвідмовної роботи авіаційного двигуна $P = 0,99$. Якщо літак має два двигуни, то потрібно знайти імовірність того, що не буде одночасної відмови двох двигунів.

Розв'язання:

A – безвідмовна робота першого двигуна (надійність роботи);

B – безвідмовна робота другого двигуна (надійність роботи);

R – надійність роботи двох двигунів.

$$P(R) = P(A \vee B) = P(A) + P(B) - P(A \wedge B),$$

$$P(R) = 0,99 + 0,99 - (0,99 \cdot 0,99) = 0,9999.$$

Це імовірність того, що буде працювати хоча б один двигун.

Імовірність того, що не буде одночасної відмови двигунів (робота кожного з двигунів – незалежні події) визначається:

$$P(R) = P(A \wedge B) = P(A) \cdot P(B/A) = P(A) \cdot P(B),$$

$$P(R) = 0,99 \cdot 0,99 = 0,9801.$$

Приклад 4. Відомо, що 90 % шарикопідшипників виробляють свій ресурс у справному стані. Підвищення температури мастила на 30 % від нормальної зустрічається на практиці тільки в 5 % випадків.

Визначити імовірність того, що підшипник справний у разі підвищення температури на 30 %.

Розв'язання:

A – підвищення температури на 30 % – це ознака;

B_1 – підшипник справний;

B_2 – підшипник несправний.

За формулою Баєса:

$$P(B_1/A) = \frac{P(B_1)P(A/B_1)}{P(B_1)P(A/B_1) + P(B_2)P(A/B_2)},$$

де $P(B_1) = 0,9$; $P(A/B_1) = 0,05$;

$P(B_2) = 0,1 = (1 - 0,9) = 1 - P(B_1)$;

$P(A/B_2) = 0,95 = (1 - 0,05) = 1 - P(A/B_1)$.

$$P(B_1/A) = \frac{0,9 \cdot 0,05}{0,9 \cdot 0,05 + 0,1 \cdot 0,95} = 0,32.$$

Під час вирішення завдань прогнозування методами *статистичної класифікації* (розпізнавання образів) відомі значення параметра у певні моменти часу, які зараховують до одного з класів (еталону). Після врахування закономірності зміни параметрів аналізується зміна певного параметру у майбутньому. Разом із тим розподіл значень параметрів на класи може бути часовим (за часом або напрацюванням) або параметричним (за величинами контрольованих параметрів).

Розглянемо на прикладах розрахунок параметрів надійності ЕМС.

Приклад 5. Розрахунок параметрів надійності ЕМС складається з трьох етапів:

Перший етап – розрахунок часу напрацювання на відмову для кожного елемента системи за формулою:

$$T_n = \frac{1}{\lambda_n}, \quad (9.12)$$

де n – номер елемента системи;

λ_n – інтенсивність відмов кількості елементів у системі.

Другий етап – визначення загальної інтенсивності відмов за формулою:

$$\lambda_{заг} = \sum \lambda_n. \quad (9.13)$$

Третій етап – визначення ймовірності безвідмовної роботи ЕМС протягом 10 000 годин, побудова графіка $P(t) = e^{-\lambda t}$ і визначення чисельних значень за графіком. Для рішення завдання в табл. 9.4 знаходяться необхідні параметри 1 час напрацювання на відмову для кожного елемента системи.

Таблиця 9.4 – Час напрацювання на відмову елемента системи

Номер елемента системи	Час напрацювання на відмову, год.
1	$T_1 = 26280$, для датчиків тиску серії МЕТРАН-100
2	$T_2 = 53000$, для датчиків температури типу ТХ 6273
3	$T_3 = 38000$, для датчиків витрати ТХ6001
4	$T_4 = 43800$, для датчиків горючих газів серії ТХ6383
5	$T_5 = 45300$, для ПК
6	$T_6 = 250000$, для шаф ЛИС-4510
Загальна інтенсивність відмов : $\lambda_{заг} = 0,000\ 667\ 2$	

З урахуванням кількості відмов у системі та ймовірності безвідмовної роботи протягом 10 000 годин будується графік залежності $P(t) = e^{-0,006672t}$ (рис. 9.4).

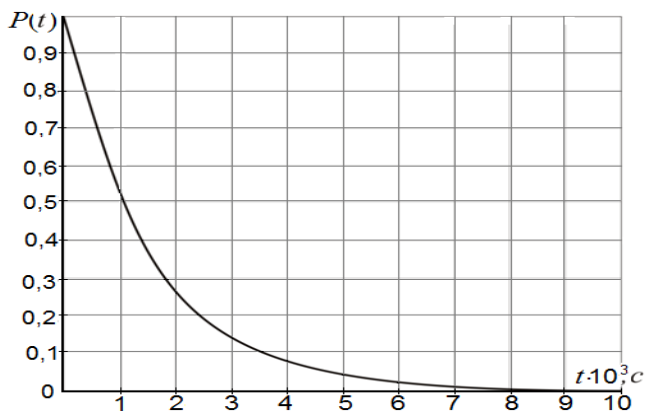


Рисунок 9.4 – Ймовірність безвідмовної роботи системи

У результаті розрахунку визначено, що система може працювати за високого ступеня ймовірності безвідмовної роботи $P = 0,9$ близько 200 годин, а чисельне значення ймовірності безвідмовної роботи після 10 000 годин становитиме 0,00125.

Однією з найважливіших інтегральних характеристик всіх типів інформації, а також програмно-технічних комплексів різного призначення є ймовірність ($P_{\text{над}}$) надійності подання.

При підготовці вихідних даних для відповідних розрахунків проводиться комплексне випробування всіх компонентів системи інформації:

- прикладних і системних програмних засобів;
- інформаційно-обчислювальної техніки і периферійних пристроїв та комунікації;
- обробки вихідних статистичних даних про напрацювання на відмову і часу відновлення.

Приклад 6. Провести оцінку і розрахунок показників надійності, що видано системою інформації, де довірча ймовірність складає $\alpha = \gamma = 0,975$ (1 год). Необхідно також оцінити показники інформації, що запитуються, і визначити надійність щодо видачі вихідної i -ї інформації. Інші параметри розрахунку наведені в табл. 9.5.

Таблиця 9.5 – Параметри розрахунку інформаційної смистеми

Позначення показників							
Початок , кінець роботи	Номери переривань і відновлень працездатності інформаційної системи (год., хв., с)						
	1	2	3	4	5	6	7
t_{H1}	10.00.00	10.45.00	12.12.45	12.51.57	13.58.09	15.37.13	16.57.55
t_{K1}	10.02.23	12.00.45	12.43.23	13.57.12	15.35.01	16.57.00	18.00.00
Номер s-го заміру часу обробки i-го запиту та час обробки (хв., с)							
s	1	2	3	4	5	6	
t_s	43.06	45.34	44.34	44.12	43.11	44.24	

Оцінка середнього напрацювання на відмову:

$$T_{oi} = \frac{T_{pi}}{k}, \quad (9.14)$$

де T_{pi} – сумарний час перебування системи в працездатному стані;

k – сумарне число відмов системи ($k = 6$).

Сумарний час перебування системи в працездатному стані:

$$T_{pi} = \frac{1}{k} \sum_{L=1}^N (t_{K1} - t_{H1}), \quad (9.15)$$

де N – сумарна кількість переривань працездатного функціонування системи за період випробувань;

t_{H1} – момент часу фактичного початку роботи системи після настання ($l-1$)-го переривання, наприклад значення 10.00.00 означає десять годин рівно;

t_{K1} – момент часу фактичного закінчення роботи при настанні переривання, наприклад значення 10.02.23 означає десять годин, дві хвилини та двадцять три секунди відповідно.

$$\begin{aligned} T_{pi} &= (10.02.23 - 10.00.00) + (12.00.45 - 10.45.00) \\ &\quad + (12.43.23 - 12.12.45) + \\ &\quad + (13.57.12 - 12.51.57) + (15.35.01 - 13.58.09) \\ &\quad + (16.57.00 - 15.37.13) + \\ &\quad + (18.00.00 - 16.57.55) = \\ &\quad = 00.02.23 + 01.15.45 + 00.30.38 + 01.05.15 + \\ &\quad + 01.36.52 + 01.19.47 + 01.02.05 = 06.52.45 = 00.00.24765с. \end{aligned}$$

$$T_{oi} = \frac{24765}{6} = 4127,5 \text{ с.}$$

Оцінка середнього часу відновлення:

$$T_{bi} = \frac{1}{k} \sum_k^1 t_{Bj}, \quad (9.16)$$

де t_{Bj} – час відновлення системи після j -ї відмови.

$$T_{bi} = 0,2(00.30.24 + 00.18.45 + 00.15.41 + 00.03.12 + 00.09.00) = \\ = 0,2(01.17.02) = 0,2 \cdot 4622 = 924,4 \text{ с.}$$

Оцінка середнього часу реакції вхідної інформації на отримання вихідної інформації за запитом.

$$T_{реак.i} = \frac{1}{m} \sum_{s=1}^m t_{is}, \quad (9.17)$$

де m – кількість замірів часу обробки запитів i -го типу ($m = 6$);

t_{is} – час обробки s -го запиту на видачу вихідної інформації по i -

му запиту.

$$T_{реак.i} = 0,2(43.06 + 45.34 + 44.34 + 44.12 + 43.11 + 44.24) = \\ = 0,2(04.23.50) = 0,2 \cdot 15890 = 3178 \text{ с.}$$

Оцінка коефіцієнта готовності системи інформації:

$$K_{ri} = \frac{T_{oi}}{T_{oi} + T_{bi}} \\ K_{ri} = \frac{4127,5}{4127,5 + 924,4} = 0.817.$$

Оцінки ймовірності надійного подання вихідної інформації запиту:

$$P_{над.i} = \frac{T_{oi}(T_{oi}+T_{bi})^{-1}}{T_{реак.i}[(T_{oi})^{-1}+(T_{реак.i})^{-1}]} = 0,463.$$

Визначення довірчих ймовірностей і межі показників надійності:

– нижня і верхня довірчі межі для показника напрацювання на відмову.

$$T_{oi}^H = r_3 T_{oi}^Y; \quad T_{oi}^B = r_1 T_{oi}^Y, \quad (9.18)$$

– коефіцієнти межі для показників напрацювання на відмову:

$$r_1=2,49, \quad r_3=0,52,$$

$$T_{oi}^H = 0,52 \cdot 4127,5^{0,975} = 1743,004 \text{ с,}$$

$$T_{oi}^B = 2,49 \cdot 4127,5^{0,975} = 8346,305 \text{ с;}$$

– нижня і верхня довірчі межі для показника часу відновлення

працездатності системи

$$T_{bi}^H = r_3 T_{bi}^Y; \quad T_{bi}^B = r_1 T_{bi}^Y,$$

$$T_{bi}^H = 0,52 \cdot 924,4^{0,975} = 405,244 \text{ с,}$$

$$T_{bi}^B = 2,49 \cdot 924,4^{0,975} = 1940,4962 \text{ с;}$$

– нижня і верхня довірчі межі для показника коефіцієнта готовності системи інформації

$$K_{ri}^H = \frac{T_{oi}^H}{T_{oi}^H + T_{bi}^B} = 0,4732;$$

$$K_{ri}^B = \frac{T_{oi}^B}{T_{oi}^B + T_{bi}^H} = 0,9537.$$

Нижня і верхня довірчі межі ймовірності надійного подання запитуваної вихідної інформації:

$$P_{над.і}^H = \frac{T_{oi}^H (T_{oi}^H + T_{bi}^B)^{-1}}{T_{реак.і} [(T_{oi}^H)^{-1} + (T_{реак.і})^{-1}]},$$

$$P_{над.і}^B = \frac{T_{oi}^B (T_{oi}^B + T_{bi}^H)^{-1}}{T_{реак.і} [(T_{oi}^B)^{-1} + (T_{реак.і})^{-1}]}.$$

$$P_{над}^H = 0,1678 ; P_{над}^B = 0,795.$$

Таким чином, з використанням основ теоретичного синтезу систем автоматичного керування визначаються методи розрахунку параметрів надійності системи як сукупності елементів з подальшим будівництвом їхніх характеристик.

Контрольні запитання за лекцією 9

1. Яке призначення, недоліки та переваги системи ППР?
2. За допомогою чого оцінюють залишковий ресурс ізоляції електрообладнання?

Завдання для розрахунку надійності електрообладнання

1. Ймовірність безвідмовної роботи трансформатора $P_T = 0,98$. Яке число паралельно сполучених трансформаторів забезпечать імовірність безвідмовної роботи $P = 0,999$?
2. Проводяться випробування електричних машин. Загальне їх число $N_0 = 50$. Число відмов:

$$t = 2000 \text{ год.} \quad n(2000) = 10$$

$$t = 2100 \text{ год.} \quad n(2100) = 30$$

Визначити:

- а) імовірність безвідмовної роботи $P(2000)$ – ?
 - б) частоту відмов (2100) – ?
 - в) інтенсивність відмов (2100) – ?
3. Побудувати криві імовірності безвідмовної роботи для одного реле $P_p(t)$ і системи паралельно сполучених реле, що незалежно живляться $P_c(t)$, якщо задано середньостатистичне значення часу

відмов $T = 1000$ год., СКВ $t = 300$ год, число реле $N = 4$, допустиме число відмов реле $n_1 = 3$.

4. Імовірність безвідмовної роботи трансформатора $P_T = 0,999$. Яке число паралельно сполучених трансформаторів забезпечать імовірність безвідмовної роботи $P = 0,99999$?

ЛЕКЦІЯ 10

МОНІТОРИНГ В СИСТЕМІ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

План

10.1 Критерії оцінки якості функціонування системи моніторингу.

10.2 Оцінка точності в системах моніторингу.

10.3 Дискретність спостережень у системі моніторингу.

10.1 Критерії оцінки якості функціонування системи моніторингу

Прогресивні зрушення в техніці не виникнуть самі по собі. Для їх досягнення необхідні зусилля керівництва країни (політичні, правові, організаційно-економічні перетворення), менеджерів усіх рівнів (реструктуризація економічних об'єктів, галузей, економіки в цілому), вчених (удосконалювання методів дослідження функціонування та розвитку економічних систем).

Всі технічні об'єкти функціонують у складі технічної системи і знаходяться під впливом навколишнього природного й техніко-економічного середовища. Ці впливи не завжди бувають сприятливими і для виконання поставленої цілі об'єкт повинний змінювати свої стани. Цілями або задачами керування технічними об'єктами можуть бути підтримка деякого бажаного стану (наприклад, стабільності функціонування) при впливі на нього різного роду впливів, що збурюють, визначення такого режиму роботи. Для керування об'єктом необхідно знати і передбачати його поведінку при різних зовнішніх впливах. Для цього необхідно мати у своєму розпорядженні модель функціонування об'єкта і одержувати інформацію про стан об'єкта (зворотний зв'язок) і зовнішні впливи. У такий спосіб для керування об'єктом необхідно мати цільову функцію роботи об'єкта, модель його функціонування, систему моніторингу його внутрішніх станів і зовнішніх впливів на нього.

Серед різних способів рішення задач управління особливе місце як серед штучних систем, побудованих людиною, так і серед систем управління, що функціонують у живих організмах, особливе місце займають системи, які використовують принцип зворотного зв'язку. Це дозволяє створювати системи, які ефективно працюють в умовах, що змінюються. Реалізація зворотного зв'язку найбільш успішно здійснюється системами моніторингу.

Для систем моніторингу технічного характеру, інформаційно-аналітичної служби по дослідженню чинників впливу прийнятне

визначення: система моніторингу (СМ) – це спеціально розроблений механізм здійснення постійного спостереження за найважливішими поточними показниками об'єкта в умовах постійно мінливих збурюючих факторів з врахуванням наукового супроводу впровадження новацій, моделювання, прогнозування і системного аналізу процесів, пошук залежностей, виявлення аномалій.

В Україні створюються нові технологічні напрямки, значну частину яких визначають сучасні інформаційні технології, що самі по собі досить складні і динамічні. В цих умовах інформаційні технології, неодмінно використовувані у всіх новаціях і відіграючи в них основну роль, також повинні удосконалюватися і забезпечувати більш високі результати ефективності функціонування. У цьому напрямку підвищення ефективності досягається використанням новітніх досягнень техніки, технології, засобів зв'язку, інформаційних і програмних систем, а також організаційних форм їх застосування.

Світ зараз знаходиться на перехідному етапі від індустріального до інформаційного суспільства, тому важливість інформації та інформаційного забезпечення все більше зростає.

На сьогодні склалась ситуація, яка вимагає створення систем моніторингу і відповідної бази, яка забезпечить об'єктивною і актуальною інформацією для компетентного всебічно зваженого підходу при прогнозуванні електроенергетичних систем.

Нині типовою є ситуація, коли органи систем управління усіх рівнів забезпечуються інформацією низької якості і в недостатній кількості. Разом з тим, аналіз динаміки і прогнозування зміни техніко-економічних показників надзвичайно важливий для обґрунтування рішень щодо терміну служби електротехнічних систем. Актуальність задачі моніторингу та інформаційно-аналітичної підтримки рішень незмірно зростає в даний момент, коли існує необхідність визначення терміну служби електрообладнання.

Термін «моніторинг» для позначення цілеспрямованого спостереження за одним або більш об'єктами деякої системи в просторі і в часі з'явився тільки в ХХ столітті, хоча цілі, принципи і методи моніторингу використовувалися з тих пір, як у практику ввійшов термін «управління». Цей факт можна пояснити тією обставиною, що функції моніторингу були «вбудовані» в процес управління і розчинялися у терміні «інформаційна система». Система моніторингу та інформаційна система поняття не тотожні. Система моніторингу більш специфічна і виконує цілком визначені функції. Моніторинг (від латинського *monitor* – нагадуючий, наглядаючий) – це безупинне спостереження за технічними (або будь-якими іншими) об'єктами, аналіз їх

функціонування. В той же час слід відзначити підвищення рівня інтелектуалізації систем моніторингу, коли на них покладаються інформаційно-аналітичні функції, обробка інформації, наукове супроводження спрямовані на поширення інформаційної бази для розробки пропозиції щодо вдосконалення механізму функціонування об'єкта.

Системи моніторингу, аналізу і прогнозування функціонування технічних об'єктів призначені для накопичення, зберігання, всебічного аналізу різної структурованої інформації і прогнозування техніко-економічних процесів.

У тих випадках, коли використовуються тільки елементи моніторингу, має місце як би кустарне використання систем моніторингу. При цьому не виконуються їх принципи, розрахункові значення критеріїв оцінки роботи СМ, технологія і структура, що робить моніторинг малоефективним. В системах моніторингу треба враховувати вимоги до формування інформаційних потоків, визначення характеру, частоти надходження, обсяги інформації, уявлення про те, яка інформація необхідна для прогнозування роботи технічної системи.

Системи моніторингу вимагає для свого визначення, становлення і вивчення наукового підходу, важливим інструментом якого є класифікація. Класифікація являє собою спосіб упорядкування, встановлення зв'язків і відношень між властивостями і функціями СМ. У процесі класифікації визначаються класи - групи об'єктів, що мають визначені загальні ознаки, що забезпечують їхнє зіставлення й ідентифікацію, шляхом устанавлення приналежності до визначеного класу. Визначення класифікації має і прикладне значення, тому що визначає спільність принципів технологічних і функціональних методів дослідження, розробки, побудови і забезпечення функціонування систем і об'єктів моніторингу.

У функції системи управління звичайно включаються не тільки задачі прийняття конкретних рішень, але і задача формування і корекції цільової функції, моделі функціонування об'єкта і вироблення основних напрямків формування прогнозів.

Ефективність функціонування технічного об'єкту будь-якого рівня визначається ефективністю управління ним. Для нормального виконання функцій управління потрібна інформація. Таку інформацію повинна надавати насамперед система моніторингу, яка виявляє і систематизує дані про функціонування об'єкту.

Проблеми інформаційного забезпечення управління та прогнозування об'єктами вимагають значних зусиль. Інформаційне забезпечення – це підтримка процесів управління технічними об'єктами

засобами систем баз даних і знань. Реалізується шляхом концентрації і використання інформації в базах даних і знань.

Побудова розвинутої ринкової економіки вимагає не тільки перепроєктування систем інформаційного забезпечення, але і розширення предметної області використовуваних даних і знань, підвищення оперативності, різкого розширення й ускладнення функцій обробки інформації, глибокого використання алгоритмів аналізу і прогнозування. Розширення області застосування інформаційного забезпечення, вимога відображення динаміки стану об'єкта і зовнішніх умов його функціонування вимагають обов'язкового використання систем моніторингу.

Функціонування технічних об'єктів, особливо з другої половини минулого століття, характеризується фундаментальним використанням систем моніторингу для забезпечення якісного прогнозування.

Моніторинг є найважливішим аспектом інформаційної діяльності. Тому можна говорити: «інформаційний моніторинг». Але звичайно говорять просто «моніторинг», припускаючи, що він саме інформаційний.

Моніторинг – це найважливіший атрибут процесів управління та прогнозування, зв'язаний із вирішенням питань дослідження деякої проблеми, спостереженням за ситуацією плину і розвитку деякого процесу, із метою попередження збоїв в роботі обладнання. Здійснювати моніторинг можна навіть для маловідомих процесів, адже для того, щоб почати їх вивчати і досліджувати потрібно за щось «зачепитися» і мати якісь індикатори, показники, за якими можна оцінювати поведінку досліджуваної ситуації. Коли задача моніторингу зрозуміла, його організація принципових складностей не складає: виділяються внутрішня і зовнішня сфери, сприятливі і негативні чинники, визначаються джерела інформації і вимоги до неї і починається спостереження за ситуацією. Складніше організувати моніторинг у недостатньо вивчених ситуаціях. А з ними на практиці частіше за все доводиться мати справу. Проблемні області, в яких виникають такі ситуації, звичайно характеризуються наступними особливостями: великою динамічністю зміни ситуації, необхідністю з'ясування й уточнення задачі дослідження, неповторністю кожної події в процесі, суперечливістю вихідної інформації, інтуїтивністю критеріїв оцінки подій і рішень, хаотичністю поведінки (важко передбаченістю) об'єкта дослідження і т.п. До таких проблем, зокрема, відносяться: попередження збоїв в роботі обладнання, оцінка можливих наслідків прийнятих не вірних рішень щодо терміну роботи обладнання,

виявлення тенденцій і закономірностей функціонування технічних систем, змістовний контроль і оцінка ефективності роботи обладнання і багато чого іншого. У розглянутих проблемах для організації моніторингу необхідно застосовувати деяку методичну структуру дій, що підказує інформаційна практика, а саме:

1. З'ясувати проблемну ситуацію моніторингу, її структуру, виділити основні чинники, мету. Основні шляхи рішення: експертні методи.

2. Чітко визначити рамки предметної області, що підлягає дослідженню, у відповідності з метою моніторингу

3. Організувати структуру системи моніторингу, виділивши в ній змістовні рівні ієрархії й алгоритми переходу результатів моніторингу з нижнього поверху на верхній, для формування цільових результатів моніторингу. При проходженні інформації знизу нагору вона фільтрується. Фільтрація інформації повинна супроводжуватися додатковими звертаннями до інформації нижніх рівнів. Відсутність таких звертань знижує усталеність уявлення траєкторії об'єкта, що обстежується.

4. Ретельно вибрати індикативний набір ознак, за якими здійснюється моніторинг. Цей набір необхідно постійно аналізувати і по необхідності коригувати.

5. При проведенні моніторингу необхідно ретельно відпрацювати модель системи моніторингу, на котрій чітко визначена послідовність формування основного результату з часткових результатів спостережень, отриманих на об'єкті. Задача вирішується засобами обробки інформації, що використовуються у системах моніторингу.

6. Особливу увагу приділити засобам візуалізації результатів моніторингу, використовуючи монітор, графіки, таблиці, засоби подання розмірів і кольори.

7. Моніторинг звичайно розуміється як спостереження в часу за об'єктом. Якщо часова вибірка відсутня, її можна спробувати замінити пооб'єктною вибіркою, виявляючи закономірності, що спостерігаються при переході від об'єкта до об'єкта.

Термін моніторинг використовується для визначення системи повторюваних цілеспрямованих спостережень за одним або більш елементами системи в просторі і в часу. Схема системи моніторингу подана на рис. 10.1.

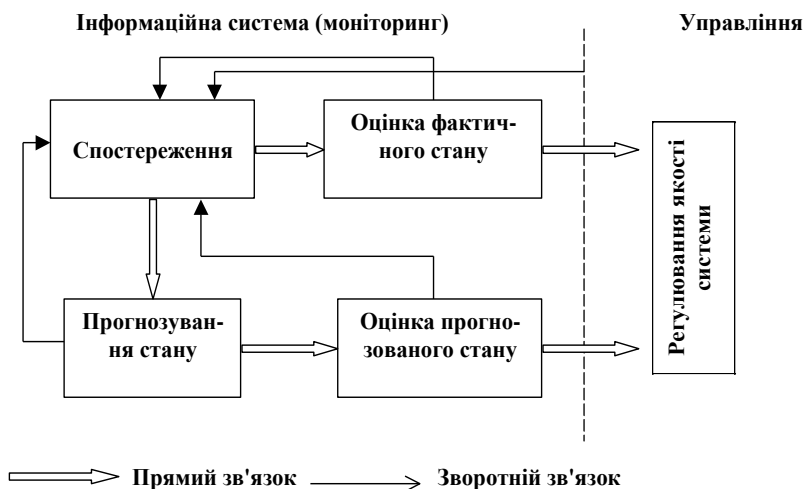


Рисунок 10.1 – Схема системи моніторингу

Для контролю виконання програми моніторингу і внесення в неї корективів поставлені цілі моніторингу повинні бути конкретними, досяжними і підлягаючими перевірці. Формулюючи їх, варто враховувати специфічні риси системи моніторингу.

Основна мета будь-якої програми моніторингу має інформаційний характер. Результатом досягнення цієї мети повинно бути отримання інформації, усунення тієї або іншої невизначеності або нестачі інформації. Моніторинг орієнтований на конкретні об'єктні області і тісно пов'язаний з контролем і подальшим вживанням заходів на основі отриманої інформації. Часто моніторинг розуміється як постійне спостереження за яким-небудь процесом або системою з метою виявлення їх відповідності очікуваному результату. Останнє визначення вказує на нерозривний зв'язок моніторингу з прогнозуванням. Наведене дає можливість сформулювати ключові властивості, що визначають моніторинг. Ними є:

- постійне спостереження за об'єктом або процесом, що може бути побудоване як безперервне;
- дискретне отримання даних з постійною або змінною дискретністю;
- епізодичні спостереження з виконанням деяких умов або сигналів.

Процес або система визначаються, як правило, множиною інгредієнтів (показників) параметрів, змінних, факторів, чинників тощо, інформація про значення яких цікавить спостерігача. Назвемо їх умовно вимірюваними величинами (ВВ). Звичайно ВВ утворюють зчислену множину або визначаються вектором. Отже, моніторинг передбачає наявність множини ВВ, яка може бути непостійною за своїм складом під час спостереження.

Реалізація моніторингу завжди має конкретну, чітко сформульовану мету, що визначається передусім об'єктною областю, до якої належить об'єкт моніторингу. Під об'єктом моніторингу розуміється спостережуваний процес, об'єкт або система. Моніторинг необхідний в ситуації переходу системи від незмінного стабільного стану до режиму розвитку і свідомого впливу на ситуацію, що вимагає відстеження поточних станів. Особливістю моніторингового спостереження (збирання інформації) є об'єктивність і незалежність отримуваних даних і захист даних про параметри, що фіксуються кількісно, від суб'єктивної інтерпретації.

Будь-яка доцільна діяльність пов'язана з реалізацією алгоритмів прогнозування, розподілу, узгодження, координації тощо. Будь-який алгоритм для своєї роботи застосовує інформацію, для представлення якої створюється, орендується, купується або використовується в інший спосіб певна інформація. Поняття «системи моніторингу» дуже широке. Воно охоплює збирання, зберігання, обробку інформації, що надходить з різних джерел, і видачу її у заданій часовій, просторовій конфігурації. Це передбачає її суб'єктивну спрямованість. Конкретна СМ передбачає певну множину джерел інформації, споживачів інформації та їх запитів, технічну реалізацію і оснащення усіма видами забезпечення функціонування.

Системи моніторингу можуть мати самостійне і забезпечуюче значення. Самостійна СМ видає моніторингову інформацію, отримання якої складає основну мету її функціонування. Забезпечуюча система моніторингу (ЗСМ) функціонує в інтересах забезпечення інформацією про об'єкт системи управління. Будь-яка система управління має забезпечуватися інформацією про об'єкт управління, проте цю роль не завжди виконують ЗСМ, її може відігравати інформаційна система.

Мета і задачі моніторингу, а отже, структура і склад забезпечуючої системи моніторингу, визначаються об'єктною областю її використання. Перелік об'єктних областей застосування СМ такий широкий, що його важко вичерпно визначити. Як приклад можна навести перелік об'єктних областей, в яких термін «моніторинг» міцно влаштувався як основна функція.

Цілі, задачі і параметри моніторингу в значній мірі визначаються призначенням і об'єктною областю, у якій він проводиться. Тому в ряді випадків доцільно на одній фірмі створювати декілька систем моніторингу, або одну систему моніторингу, але багатоканального характеру. При цьому варто мати на увазі, що оскільки загальноприйнятим є реалізація СМ засобами сучасних інформаційних технологій, то організаційно здійснення моніторингу не викликає складностей. Складніше визначити об'єкт моніторингу, його параметри й алгоритми обробки інформації для одержання кінцевого продукту системи моніторингу. У кожній об'єктній області може бути врахована її специфіка у визначенні моніторингу.

Функціонування будь-якого об'єкта, що має (або не має) у своєму складі спеціально виділений блок, не може відбуватися успішно без постійного використання інформації про свій стан, стани навколишнього середовища.

Особливу роль у використанні систем моніторингу, переважно масштабних і розподілених, відіграє вирішення питань вибору використовуваної інформаційної технології. Система моніторингу за своєю сутністю має інформаційний характер, крім того, її основною місією є отримання, збирання та обробка інформації, що потребує вирішення комунікативних проблем і проблем побудови комп'ютерної мережі. Це потребує особливої уваги до проблеми підвищення інтелектуального рівня системи обробки інформації і забезпечення її не тільки даними, а й знаннями.

Методологія визначає сукупність методів, використовуваних при знаходженні і становленні кожного напрямку функціональної системи.

Стосовно до системи моніторингу – це сукупність методів дослідження і пізнання принципів, критеріїв, технологій побудови і використання СМ. Кожний метод спирається на використання визнаних у його межах і випробованих моделях різної складності і рівня абстракції.

Формулюючи методологічні принципи створення і використання систем моніторингу, варто визначити його основні положення, визначальному логіку роботи і характер виконуваних призначень.

Треба насамперед виходити з місії, покладеної на СМ, при цьому варто враховувати і обмежені можливості побудови СМ.

Аналіз існуючих СМ дозволяє сформулювати ті обмеження, знаходження в рамках котрих повинно забезпечити виконання методологічних принципів створення СМ. Ці обмеження і визначають

основні методологічні положення, яким повинні задовольняти створювані СМ.

Такими положеннями є:

1. Виконання вимог економічності при створенні СМ. Ретельно обгрунтована структура СМ, її склад, вибір ВВ і критеріїв спостереження вирішують дві проблеми СМ: забезпечення високого рівня якісних характеристик; мінімізацію вартості побудови і функціонування. Реалізацію виконання цього принципу забезпечують модельні дослідження побудови структури СМ, вибор якості і складу ВВ, розрахунок критеріїв оцінки СМ.

2. Забезпечення необхідної ефективності СМ. Технологічне устаткування, число і розподіл обслуговуючого персоналу повинні безумовно забезпечити необхідний рівень ефективності, обумовлений значеннями критеріїв оцінки і достатнім обгрунтуванням ВВ.

Будь-який технічний об'єкт (ТО) протягом свого життєвого циклу проходить шлях, зумовлений його траєкторією. Число можливих траєкторій може бути незоро великим. Вибір траєкторії і забезпечення проходження по ній без несприятливих відхилень забезпечує система керування ТО (СКТО). Вона може успішно працювати, тільки одержуючи інформацію про стани ТО, навколишнього середовища й ефективності ТО (від системи контролю за обладнанням). Найбільше повну і якісну інформацію такого роду забезпечує функціонування СМ. Тому якість її роботи визначає ефективність ТО, і ця якість повинна задовольняти заданому рівню.

3. Керованість СМ. За час життєвого циклу ТО умови роботи СМ і вимоги до неї можуть змінитися. Якщо ці зміни ігнорувати, то якість роботи СМ, а отже і ТО може змінитися у бік погіршення. Щоб цього уникнути, принцип керованості повинний безумовно виконуватися. Для цього в складі СМ використовується блок управління СМ (БУСМ).

4. Відповідність рівня інформаційних процесів і ефективності СМ. Оскільки функціонування СМ носить інформаційний характер, то відповідність інформаційних процесів і їх характеристик повинно забезпечити ефективність функціонування СМ. Найбільш значущими інформаційними процесами, що впливають на ефективність, є: ущільнення записів інформації, що циркулює у мережі СМ, вибір алгоритмів обробки інформації в СМ, алгоритми модельних досліджень для побудови СМ.

Якісна реалізація процесів ущільнення записів інформації, визначає вартість побудови СМ, особливо для масштабних і

розподілених систем, причому ця залежність носить прямо-пропорційний характер, тобто виявляється дуже сильно.

СМ працює в інтересах забезпечення СКТО і тому принципово алгоритми управління можуть бути включені в номенклатуру алгоритмів, реалізованих у СМ, але при цьому може бути порушена її цілісність. Щоб уникнути цього потрібно чітко розмежувати придатність алгоритмів. До складу СМ доцільно включити тільки типові алгоритми, реалізація яких включається в її основні задачі. До них, зокрема, відносяться алгоритми прогнозування характеру зміни значень ВВ, експертні алгоритми.

5. Узгодженість роботи СМ і СКТО. Оскільки СМ і СКТО працюють у тісній взаємодії, їх робота повинна бути погоджена. Таке узгодження найкраще робити шляхом встановлення нормативів значень критеріїв оцінки якості функціонування СМ. Особливе значення тут набуває критерій оцінки форми уявлення інформації в СМ і СКТО.

6. Забезпечення високого рівня сучасних інформаційних технологій, використовуваних у СМ. Інформаційні технології мають вирішальний вплив на ефективність роботи СМ, тому вимоги до їх забезпечення повинні бути найвищими як з боку використовуваних технічних засобів, так і програмного забезпечення. Реалізація розглянутих положень здійснюється з використанням цілого ряду відповідних моделей. Широке застосування знаходять моделі системного аналізу, комбінаторного аналізу, теорії штучного інтелекту, теорії диференціальних рівнянь, теорії імовірностей і математичної статистики, теорії інформації. Ці моделі використовуються для обґрунтування і дослідження інформаційних процесів, реалізованих у СМ.

Системи моніторингу, представляючи функцію керування технічними об'єктами, мають ґрунтуватися на певних критеріях оцінки якості функціонування. Такі критерії відіграють важливу роль при проектуванні, порівняльній оцінці СМ. Ця роль полягає в тому, що наявність критеріїв ефективності функціонування СМ дає можливість:

- оцінити існуючі СМ і ступінь задоволення покладеної на дану СМ місії;
- порівняти різні варіанти СМ між собою;
- сформулювати ціль проектування СМ;
- удосконалити методи проектування, технологію та апаратну реалізацію СМ з метою оптимізації критерію її оцінки.

Оскільки СМ виконує інформаційні функції, то, природно, критерії оцінки мають характеризувати інформаційні можливості СМ при реалізації нею своїх функцій.

Аналіз призначення систем моніторингу, областей їх застосування і конкретних реалізацій дає змогу визначити часткові критерії оцінки, що характеризують інформаційні аспекти функціонування СМ:

- точність інформації про ВВ, що видається;
- дискретність інформації, що видається;
- форму подання інформації;
- функції обробки інформації, які виконує СМ;
- вартість реалізації і функціонування.

Перші три критерії обов'язкові для СМ будь-якого масштабу; функції обробки реалізуються складними і розвинутими СМ, для них, звичайно, важливий і останній критерій. Загальний критерій ефективності СМ являє собою згортку зазначених критеріїв.

Розглянуті вище три критерії оцінювання точності функціонування СМ – точність представлення ВВ, дискретність і форма подання даних – можна вважати основними, але при оцінюванні та порівнянні різноманітних реалізацій СМ важливі значення ще трьох критеріїв:

- оцінка ризику комплексу «СМ – об'єкт моніторингу»;
- наявність і характеристика функцій обробки інформації у складі СМ;
- вартість побудови і забезпечення функціонування СМ.

Оцінка ризику комплексу «СМ – об'єкт моніторингу» в умовах ринкових відносин набуває в технічних системах винятково важливого значення, оскільки у функціонуванні технічного об'єкта ризик неминує є присутній. У такому комплексі має місце можливість ризику при функціонуванні об'єкта моніторингу і ризику, обумовленого фактом наявності СМ. Функції обробки інформації покладаються на СМ різною мірою. Основним показником розширення цих функцій є масштабність об'єкта моніторингу і, отже, потужність множини ВВ. Проте цей критерій не можна розглядати у загальному вигляді, він потребує урахування характеристик і потреб конкретного об'єкта моніторингу. Найтиповішою функцією обробки, покладеною на СМ, є прогнозування найважливіших ВВ на основі отримуваної моніторингової інформації. Ця функція найчастіше використовується при моніторингу технічних об'єктів. На цих же об'єктах використовуються і функції аналізу стану об'єктів шляхом порівняння моніторингової інформації з плановою або регламентною. Тому задачі виконання функцій обробки інформації слід конкретно вирішувати для конкретних систем. З принципової позиції обмежень тут не повинно

бути. Більші можливості реалізації функцій обробки інформації забезпечує застосування для цих цілей експертних систем.

Найбільш універсальним і поширеним критерієм оцінки є вартість побудови і забезпечення функціонування СМ. Зменшення вартості при всіх заданих рівнях забезпечення інших критеріїв може досягатися як на етапі побудови СМ, так і при розробці технології її роботи та раціоналізації системи комунікацій, що відіграє важливу роль у СМ. Максимальні досягнення в цьому напрямі забезпечує застосування оптимізаційних методів і моделей.

Розглянемо методологію використання запропонованих критеріїв оцінки та згортки їх у загальний критерій. Введемо позначення:

F_1 – точність;

F_2 – дискретність;

F_3 – форма представлення;

F_4 – рівень ризику;

F_5 – наявність алгоритмів обробки;

F_6 – вартість побудови і забезпечення функціонування;

W – критерій згортки.

Співвідношення

$$W = F(F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6) \quad (10.1)$$

є процедура згортки.

Розглянемо форми і засоби представлення частинних критеріїв оцінки.

F_1 визначається законом розподілу ймовірностей значення ВВ та його параметрів. Для нормального розподілу це:

H – ідентифікатор виду розподілу;

m – математичне сподівання ВВ;

σ – середньоквадратична помилка.

При точковій оцінці це:

x – точкова оцінка ВВ;

$|\varepsilon|$ – довірчий інтервал;

β – довірча ймовірність.

У такий спосіб F_1 оцінюється трьома скалярними значеннями.

F_2 обчислюється відповідно до методів і виражається через τ .

F_3 визначається на основі порівняння вимог до вихідних характеристик, що видаються СМ, і вхідних даних про ВВ. Якщо вони не збігаються, але СМ має засоби перетворення, то $F_3 = 1$, якщо СМ їх не має, то $F_3 = 0$. За збігу вимог і форми подання вхідних даних $F_3 = 1$.

Отже, F_3 визначається однорозрядною булевою змінною

$$F_3 = \begin{cases} 1, \text{ якщо є можливість перетворення форм характеристик,} \\ \text{а вони співпадають} \\ 0, \text{ у протилежному випадку} \end{cases} . \quad (10.2)$$

F_4 – рівень ризику виражається в абсолютному або відносному вимірі. У тому й іншому випадках ці оцінки не мають складного характеру і виражаються звичайно двома числами: M_p – математичне сподівання рівня ризику; σ_p – середньоквадратична помилка визначення рівня ризику. Отже, $F_4 = \{M_p, \sigma_p\}$.

F_5 – важко формалізований критерій, для його визначення необхідно прийняти угоду. Прикладом такої угоди може бути таке. До СМ висуваються вимоги наявності списку M_1 алгоритмів обробки, СМ має засоби реалізації списку з M_2 алгоритмів обробки. У цьому випадку можлива оцінка:

$$F_5 = \begin{cases} 1, \text{ якщо } M_1 \subset M_2 \\ 0, \text{ якщо } M_1 \not\subset M_2. \end{cases} \quad (10.3)$$

F_6 – вартісна оцінка СМ; включає F_6^1 – вартість побудови СМ; F_6^2 – вартість забезпечення функціонування СМ в одиницю часу (наприклад, один рік). Може використовуватися оцінка F_6 у такому вигляді:

$$F_6 = F_6^1 + F_6^2 \text{ – вартісна сумарна оцінка.}$$

Під процедурою згортки розуміється встановлення співвідношення $W = F(F_1 \dots F_6)$ за умови приведення часткових критеріїв F_i , $i = \overline{1, 6}$, до спільної системи обчислення, за допомогою введення вагових коефіцієнтів γ_i , що визначаються експертним шляхом в кожній системі моніторингу:

$$W = \sum_{i=1}^6 F_i \cdot \gamma_i. \quad (10.4)$$

Тоді W_i дає уявлення про ступінь відповідності СМ висунутим вимогам.

Система моніторингу має багатоаспектний характер, тому оцінка якості її функціонування виглядає надзвичайно складною. Шість часткових критеріїв і критерій згортки дають повне уявлення про оцінку СМ, але існує ще один аспект, який необхідно розкрити. Окремий частковий критерій визначає конкретну систему властивостей СМ. Однак практично всі часткові критерії не можна розглядати як незалежні, між ними існує певний зв'язок, що також слід оцінювати. Крім того важливе значення для будь-якого критерію має його фізична інтерпретація і його ранг на шкалі корисності або практичної значимості. Для вирішення цих проблем було б корисним розглянути

ще один критерій, назвемо його універсальним, що дозволяє оцінювати взаємозв'язок часткових критеріїв і їх положення на шкалі корисності.

Попередньо обговоримо проблему взаємозв'язку часткових критеріїв, що іноді трактується не зовсім правильно. Іноді робляться спроби ототожнення або взаємозамінності критеріїв F_1 і F_2 . Без усякого сумніву ці критерії дуже тісно зв'язані, проте вони різні, і відображають різні властивості СМ. Критерій F_1 визначає точність визначення координат ВВ у момент спостереження ($t=0$). Згодом ця точність не може бути підвищена, але її зниження з часом відбувається ($t>0$), тому період часу між спостереженнями (τ), прямо залежними від F_2 впливає на значення F_1 , розглянуте як функція часу. Тому можна стверджувати, що вимога до F_1 і F_2 взаємозалежні, але не адекватні. Аналогічні твердження можна зробити щодо порівняння інших часткових критеріїв, так, наприклад, поліпшення $F_1 - F_5$ звичайно веде до зниження якості F_6 . Порівняння часткових критеріїв між собою зручніше усього робити за допомогою універсального критерію, що відображає кількісно властивості корисності.

Розглянемо можливість вибору універсального критерію при допущеннях:

- часткові критерії оцінюють інформаційні аспекти моніторингу, тому теоретико-інформаційна міра для них є природною;
- деякі положення зручно інтерпретувати на прикладі конкретних систем моніторингу, у якості такої системи будемо використовувати розподілену в просторі і в часі масштабну систему моніторингу.

Для визначення функції корисності необхідно задати значення, що забезпечують відповідно оцінки, які враховуються в часткових критеріях і які значення визначаються відповідно до потреб забезпечення нормального функціонування об'єкта керування. При цьому слід враховувати, що часткові критерії оцінки СМ можуть бути конфліктними. Наприклад, при визначенні заданого значення дискретності моніторингу $\tau_{\text{зад}}$ варто враховувати, що $\tau_{\text{зад}}$ визначає динамічні характеристики точності визначення спостережуваних ВВ. З точки зору точності визначення ВВ, чим менше $\tau_{\text{зад}}$, тим із більшою точністю вони визначаються. Але завищені вимоги посилюють навантаження на канали передачі інформації і систему обробки інформації, включаючи параметри запам'ятовуючих пристроїв у системі обробки, тому потрібно визначати мінімальні вимоги до визначення $\tau_{\text{зад}}$, щоб не підвищувати вартісні оцінки.

Найважливішим моментом, поряд із визначенням цілі моделювання, є вибір критерію ефективності при дослідженнях на

моделі. Звичайно схема вибору критерію має такий вигляд: визначення загального критерію ефективності функціонування об'єкта; визначення часткових критеріїв ефективності, критичних до змін досліджуваних властивостей; встановлення взаємозв'язку загального і часткового критеріїв; визначення можливості його використання для дослідження.

Перший етап цієї схеми майже очевидний: екстремуми загального і часткового критеріїв часто не збігаються, а щоб не загубити ефект системності, необхідно будь-яке рішення в остаточному підсумку розглядати з позицій загального критерію. Використовувати загальний критерій для всебічного дослідження функціонування об'єкта звичайно буває дуже складно і такий підхід є неконструктивний. Зручніше і простіше використовувати часткові критерії, але потрібно встановити їх взаємозв'язок із загальним критерієм так, щоб все ж таки оптимізувався загальний критерій. Досліджуючи взаємозв'язок, визначають і області і значення часткових критеріїв, що мають бути забезпечені при виборі досліджуваної величини, властивості, структури.

Будь-яка інформаційна система забезпечує визначення і видачу деяких даних із заданою точністю і достовірністю. Іноді до них додають продуктивність системи при видачі інформації або її інформаційну пропускну спроможність. Усі ці часткові критерії (точність, достовірність, продуктивність) взаємозалежні і взаємопов'язані. Дійсно, якщо продуктивність системи обмежена і не видаються деякі типи даних, то це можна трактувати, як повну відсутність точності невиданих значень. Таким же чином можна зв'язати точність і достовірність. Той факт, що ці критерії взаємозалежні, унеможливило використання їх окремо, оскільки можна домогтися збільшення, наприклад, точності за рахунок зниження достовірності або пропускну спроможності. Але дослідження по трьох різних критеріях досить складні, оскільки потребують не менш складного узгодження. Тому виявляються цікавими спроби підібрати такий інтегральний критерій, який би описував одночасно точність, достовірність і пропускну спроможність і був конструктивним, тобто обчислюваним на моделі теоретико-інформаційного рівня.

Обговоримо можливе використання природного для теоретико-інформаційної моделі критерію – середньої кількості інформації на символ (слово) повідомлень, що одержуються або видаються системою моніторингу. Позначимо його для стислості ІМ (інформаційна міра). Будемо розглядати тільки дискретні системи, для яких використовуються знакові моделі, а потоки інформації подаються в текстовій формі. Властивості знакових систем вивчає семіотика, що має три основні аспекти: синтаксис, семантику і прагматику. Синтаксис

вивчає структурні аспекти сполучень знаків системи, правила утворення їх і перетворення безвідносно до їх призначень і функцій. Різноманітні, у тому числі статистичні методи дають змогу при відомих припущеннях визначити величину ІМ з урахуванням аспектів синтаксису при відомих припущеннях, сформульованих для конкретних текстів. Семантика вивчає знакові системи як засоби вираження змісту, а прагматика – відношення до самої знакової системи (адресата або інтерпретатора). Основним обмеженням на застосування теоретико-інформаційних методів і моделей для прикладних цілей (крім систем зв'язку і кодування) завжди були твердження про некритичність ІМ у семантичному і, тим більше, прагматичному аспектах. На практиці панує думка, що ІМ не має фізичного змісту в тому розумінні, що його мають інші критерії. Наприклад, у задачах лінійного програмування використовуються чітко виражені вартісні або часові критерії, у задачах теорії масового обслуговування – час сподівання, довжина черги, можливість відмови, тобто критерії мають цілком визначену фізичну інтерпретацію. Найбільш близька до теорії інформації дисципліна – теорія ймовірностей, іноді теорію інформації навіть трактують як її відгалуження. Але і там застосовувані критерії – можливість події, середнє значення величини, середнє зважене значення і т. п. – мають цілком визначені значення. Таку визначену фізичну інтерпретацію мають навіть моменти вищих порядків. Порівняємо ІМ із критеріями близької до неї теорії ймовірностей. У теорії ймовірностей вихідний критерій (можливість події) відноситься саме до цієї події і прив'язаний саме до неї, тому всі похідні критерії (моменти) також інтерпретуються в термінах подій і відносяться до них безпосередньо. Навіть такі інтегральні оцінки, як математичне сподівання або дисперсія, вимірюються в термінах подій (або величин). У теорії інформації ІМ має особливий і своєрідний зміст – вона не відноситься ніяк до окремої події, а визначається саме на повній групі подій і тільки на ній. З іншого боку, що не менш важливо, середня кількість інформації вимірюється не в термінах подій і навіть не в термінах можливості подій, а складним чином, із використанням імовірності події і логарифма ймовірностей. Формально ІМ утворюється як середнє зважене значення $\log P_i$, але саме поняття $\log P_i$ (P_i – можливість появи i -ї події) фізичного змісту окремо не має. Ці обставини утруднюють безпосереднє тлумачення фізичного змісту ІМ і не дають змоги безпосередньо зв'язати його з подіями, ентропія яких вимірюється при обчисленні ІМ. Проте усе ж уможлиблюють знаходження способу фізичного трактування ІМ, до речі, такі спроби неодноразово робилися. Однією з перших спроб такого роду було введено А. А. Харкевичем поняття «цінність інформації».

Міра цінності інформації не збігалася з ІМ і не була з нею безпосередньо пов'язана. За Харкевичем, цінність інформації (C) вимірюється за формулою:

$$C = \log \frac{P_2}{P_1}, \quad (10.5)$$

де: P_1 – можливість досягнення цілі (події) до одержання інформації;

P_2 – можливість досягнення цілі (події) після одержання інформації;

C – цінність інформації.

Ця міра не знайшла на практиці широкого застосування. З інших мір найпомітнішою є міра, запропонована Стратановичем і заснована на байєсовій оцінці виходів подій. Становить інтерес підхід до визначення цінності інформації, з позицій оцінки ризику.

Той факт, що спроби визначити цінність інформації (яку правильніше віднести до прагматичного, а не до семантичного аспекту) не дали суттєвих результатів, був витлумачений так, що теорію інформації взагалі, і ІМ зокрема, стали вважати застосовною тільки до вирішення задач зв'язку і кодування, перешкодостійкого кодування і статистичного кодування. Для інших прикладних задач стали вважати, що застосування теоретико-інформаційних моделей обмежено відсутністю фізичної сутності ІМ. Як доказ прикладної обмеженості наводять такий приклад. З формальної точки зору два повідомлення «почалася війна» і «приїдемо скоро» вважають однаково інформативними, оскільки вони містять однакову кількість слів і символів і обидва виражені тією самою мовою, тому від інформаційних моделей не можна очікувати яких-небудь корисних рішень.

Насамперед, будемо розрізняти синтаксичний і семантичний аспекти (СИНА і СЕМА). У випадку СИНА повну групу подій утворюють знаки, що складають коди повідомлень або подій. Імовірнісна міра визначається саме на цій повній групі і вона цілком визначає ІМ, тому СЕМА в цій ситуації, а отже, і прагматичний аспект, цілком ігноруються. Дійсно, такі розгляди придатні для дослідження систем зв'язку, що передають і приймають знакові комбінації. У даному випадку немає ніяких зв'язків (точніше, вони не розглядаються) між знаковою системою і системою реальних об'єктів і повідомлень. З формальної точки зору, з аналогічною ситуацією можна зустрітися і в теоретико-ймовірнісних дослідженнях.

Нехай ми розглядаємо ризик неповернення суми інвестиції. Тоді ця можливість для будь якої повної групи подій визначатиметься безпекою для інвестицій понад великої суми і невеликої суми. Інша

справа, що в даному випадку при використанні ймовірнісних методів легко ввести, наприклад, вагому функцію (суму інвестиції) і з точки зору змістовності, поставити усе на місце, узгодити «вартість» інвестиції на її вплив на теоретико-ймовірнісні критерії. У теоретико-інформаційних моделях це робиться інакше і дещо складніше, оскільки не можна приписати «вагу» конкретній події, адже ІМ визначена для всієї повної групи подій. Проте нижче ми покажемо спосіб узгодження формальної знакової моделі цього рівня і реальної системи подій.

У випадку СЕМА визначення повної групи подій набуває зовсім іншого значення. Тут треба цілком відмовитися від орієнтації на знакову систему і виходити з реальних подій або повідомлень, що описуються за допомогою теоретико-інформаційної моделі. Тоді кожній події можна приписувати «теоретико-інформаційну вагу» (ТІВ), рівну величині ІМ, властивій даній події. У цій ситуації наведений приклад набуває зовсім іншого висвітлення. Якщо відірватися від знакової системи, то повідомлення варто розглядати як код, що має свою ТІВ, причому визначену споживачем інформації (або дослідником модельованої системи), яка залежить від його тезауруса і зацікавленості. Так, перше повідомлення прикладу (банкротство банку А) для трирічної дитини можливо буде мати меншу ТІВ, ніж друге, якщо вона очікує приїзду улюбленої бабусі або тітки. Для дорослої ж людини перше повідомлення породжує масу подій, повна група яких просто неозора, і цей код має незрівнянно більшу ТІВ.

10.2 Оцінки точності в системах моніторингу

У самому загальному випадку вимірювання – це порівняння вимірюваної величини з побудованою в той чи інший спосіб шкалою можливих значень цієї величини; результат вимірювання ніколи не може являти собою точне значення вимірюваної величини, а є лише вказівкою на вузький інтервал її можливих значень. Вимірювання – процес, що полягає у порівнянні вимірюваної величини з деяким її значенням, прийнятим за норматив. У даному контексті терміном «вимірювання» позначається будь який спосіб знаходження значення ВВ, отриманого від джерела інформації. Джерелом інформації можуть бути: дані, отримані від експерта; дані, передані по каналах зв'язку; результати розрахунків показника; дані отримані з бази даних, тощо.

Вимірювана величина завжди визначається з деякою помилкою (похибкою). Ця помилка може бути інструментальною – при вимірі, виникати при реєстрації або перезапису даних, при передаванні по каналах за наявності перешкод. Так, при повідомленні про результати виконання виробничої програми в одиницях виробів, здавалося б,

помилки не може бути. Але результати можуть бути отримані в деякому інтервалі часу, через що й можлива помилка.

Система моніторингу, видаючи інформацію про систему ВВ, використовує деякі джерела одержання цієї інформації, яка може бути опрацьована з різним ступенем складності. Вхідна відносно СМ інформація може формуватися або утворюватися в різні способи, а джерелами її можуть слугувати: система звітності організації, дані, одержувані від інших систем по каналах зв'язку, результати вимірювання спостережуваних величин і характеристик об'єктів, повідомлення про явища природи, ринкова інформація тощо. Але якщо конкретно не була вхідна інформація, вона відображає фактично існуючі явища, реальні закономірності та факти. В основі отримання всіх цих характеристик лежать дослідні дані, експериментальні дані, фіксація реальних явищ, дані, отримувані у вигляді повідомлень або в результаті вимірів.

Результати вимірів і повідомлень у реальній дійсності мають імовірнісну природу і залежно від форми подання даних (неперервна або дискретна) визначаються законом розподілу ВВ, імовірністю достовірності даного повідомлення або іншими статистичними характеристиками. На практиці вхідна інформація базується на статистичному матеріалі обмеженого обсягу (два-три десятки спостережень). Така обмеженість звичайно пов'язана з дорожнечою і складністю кожного вимірювання. Цього матеріалу часто буває недостатньо для визначення закону розподілу випадкової величини, проте існуючі дані можуть бути оброблені та використані для одержання деяких відомостей про ВВ. У таких випадках можна говорити про одержувану оцінку ВВ. Якщо ця оцінка виражається одним числом, то вона називається точковою. Щоб охарактеризувати точність і надійність точкової оцінки ВВ, у математичній статистиці користуються так званими довірчими інтервалами і довірчими ймовірностями.

Визначимо довірчий інтервал і довірчу ймовірність.

Нехай для значення ВВ отримана точкова оцінка a . Якщо позначити через ε можливу помилку точкової оцінки і вважати, що з імовірністю β ця помилка не перевищить $|\varepsilon|$, то:

$$I_{\beta} = (a - \varepsilon, a + \varepsilon) \quad (10.6)$$

ε довірчим інтервалом, а значення β

$$\beta = P(a - \varepsilon \leq \bar{a} \leq a + \varepsilon) \quad (10.7)$$

називають довірчою ймовірністю визначення істинного значення ВВ, рівного \bar{a} .

Значення $a_1 = \bar{a} - \varepsilon$ та $a_2 = \bar{a} + \varepsilon$ називають довірчими межами.

Довжина довірчого інтервалу дорівнює 2ε . Для визначення чисельних значень довжини довірчого інтервалу і довірчої ймовірності потрібно знати (або мати гіпотезу) функцію розподілу значення ВВ. Нехай ВВ розподілена за нормальним законом з функцією розподілу $F(x)$:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (10.8)$$

і ми хочемо визначити математичне сподівання ВВ із довірчою ймовірністю β .

За формулою визначення ймовірності випадкових величин, розподілених за нормальним законом влучення на ділянку, симетричну щодо центру розсіяння m , знаходимо:

$$P(|x - m| \leq \varepsilon) = 2\Phi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right) = \beta, \quad (10.9)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення.

З рівняння $2\Phi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right) = \beta$ знаходимо значення ε :

$$\varepsilon = \sigma \arg \Phi\left(\frac{\beta}{2}\right), \quad (10.10)$$

де $\arg \Phi(x)$ — функція, обернена до $\Phi(x)$, тобто таке значення аргументу, при якому нормальна функція розподілу дорівнює $\Phi(x)$.

З формули (10.10) випливає, що між значеннями 2ε і β існує функціональна залежність і, задавши ε , ми можемо визначити β і навпаки. У цілому ряді додатків важливо визначити оптимальне співвідношення між ε і β . Скористаємося теоретико-інформаційним критерієм I при визначенні цього співвідношення і обчислимо:

$$I = H^1 - H^2, \quad (10.11)$$

де H^1 і H^2 – апіорна та апостеріорна ентропія визначення значення ВВ з урахуванням прийнятого співвідношення.

Величина H^1 не залежить від співвідношення між ε і β , а H^2 визначається відповідно за формулою:

$$H^2 = \beta H_\beta + (1 - \beta) H_{1-\beta}, \quad (10.12)$$

де H_β і $H_{1-\beta}$ – умовні ентропії при прийнятті гіпотез про влучення та невлучення ВВ у довірчий інтервал;

$$H_\beta = \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} f(x) \ln f(x) dx - \ln \Delta, \quad (10.13)$$

де $f(x)$ – щільність розподілу ВВ при влученні її у довірчий інтервал;

Δ – «ділянка нечутливості».

При застосуванні методу довірчих інтервалів у випадку невлучення ВВ у довірчий інтервал (з імовірністю $1 - \beta$) ми використовуємо лише інформацію про те, що ВВ не належить довірчому інтервалу, що зменшує апіорну ентропію H^1 на величину H_β . Отже:

$$H_{1-\beta} = H^1 - H_\beta; \quad (10.14)$$

з огляду на (10.11), (10.12), одержуємо

$$I = \beta H^1 + H_\beta(1 - 2\beta). \quad (10.15)$$

Для обчислення H_β необхідно з'ясувати закон розподілу $f(x)$ ВВ. Вважаючи закон розподілу усіченим нормальним і використовуючи метод довірчих інтервалів, одержуємо вираз для усіченого нормального закону:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \text{ при } -\varepsilon \leq x \leq \varepsilon \\ 0 \text{ при } x \leq -\varepsilon, x \geq \varepsilon \end{cases}$$

Підставляючи значення $f(x)$ у (10.13), отримаємо:

$$H_\beta = \frac{1}{\beta\sqrt{\pi}} \int_0^{\Phi^{-1}(\beta)} y^2 e^{-y^2} dy + \ln\left(\beta \frac{\sigma}{\Delta} \sqrt{2\pi}\right), \quad (10.16)$$

де $\Phi^{-1}(\beta)$ – обернена функція Лапласа.

У табл. 10.1 наведено значення інтеграла, що входить у вираз (10.16).

Для обчислення значення H^1 зручно навести у вигляді:

$$H^1 = \ln \frac{\sigma}{\Delta} + H^*.$$

Ентропію H^1 та H_β зв'язує вираз (10.14), але $H_\beta < H^1$, оскільки всі обчислення спрямовані на зменшення невизначеності значення ВВ.

Таблиця 10.1 – Значення інтеграла у виразі (10.16)

Z	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$\int_0^z y^2 e^{-y^2} dy$	0,001	0,0022	0,0082	0,019	0,0356	0,0579	0,088	0,1176
Z	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$\int_0^z y^2 e^{-y^2} dy$	0,1526	0,1891	0,225	0,2509	0,2936	0,323	0,3188	0,3704
Z	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
$\int_0^z y^2 e^{-y^2} dy$	0,3883	0,4027	0,4139	0,4224	0,4287	0,4332	0,4365	0,4387
Z	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0		
$\int_0^z y^2 e^{-y^2} dy$	0,4402	0,4411	0,4418	0,4422	0,4424	0,4426		

З урахуванням виразів (10.15), (10.16) одержуємо значення критерію I :

$$I = (1 - \beta) \ln \frac{\sigma}{\Delta} + H^* \beta + (1 - 2\beta) \left[\ln(\beta\sqrt{2\pi}) + \frac{2}{\beta\sqrt{\pi}} \int_0^{\Phi^{-1}(\beta)} y^2 e^{-y^2} dy \right]. \quad (10.17)$$

При цьому значенні ε і β пов'язані між собою виразом (5).

У практичному діапазоні значень $\left(H^* \geq 5, \frac{\sigma}{\Delta} = 0,1 \div 1 \right)$, оптимальне значення довірчої ймовірності має високе значення $\beta_{opt} = 0,96 \div 0,98$. Тому інформативнішими є дані про значення ВВ, що обчислюються з високою довірчою ймовірністю. Значення довірчого інтервалу визначається при цьому відповідно до (10.10).

У реальних додатках до СМ завжди висуваються вимоги щодо точності визначення значення ВВ. Найчастіше в результаті вимірів визначається ряд значень x_1, x_2, \dots, x_n ВВ, після обробки якого може бути визначений ряд характеристик ВВ (ми припускаємо, що вона розподілена за нормальним законом).

Нехай в результаті обробки ряду значень x_1, x_2, \dots, x_n визначено щільність закону розподілу ВВ:

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a_1)^2}{2\sigma_1^2}}. \quad (10.18)$$

При цьому виявилось, що $\sigma_1 > \sigma_{зад}$ або $a_1 \neq a_{зад}$, де $a_{зад}$ і $\sigma_{зад}$ — задані значення щільності розподілу ВВ, що висуваються до СМ.

У цьому випадку для виконання вимог необхідно провести додаткову серію вимірів значень ВВ. Нехай у результаті проведення додаткової серії вимірів отримана щільність розподілу

$$f_2(x) = \frac{1}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a_2)^2}{2\sigma_2^2}}. \quad (10.19)$$

Аналогічно можна трактувати два виміри однієї й тієї ж ВВ, виконані різними засобами.

Задача полягає у визначенні результуючого закону розподілу ВВ. Результати вимірів — розподіли $f_1(x)$ і $f_2(x)$ — будемо називати першою і другою вибіркою відповідно. За наявності тільки першої вибірки природно думати, що вона являє собою випадкову величину з апріорною щільністю розподілу $\varphi_1(x)$ при $\alpha = 0$. Тоді:

$$\varphi_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(x-a_1)^2}{2\sigma_1^2}}. \quad (10.20)$$

За цієї умови розподіл другої вибірки $\varphi_2(x)$ матиме вигляд:

$$\varphi_2(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(y-c)^2}{2\sigma_2^2}}, \quad (10.21)$$

де $c = |a_2 - a_1|$, а початок координат відповідає умові одержання першої вибірки.

Скористаємося формулою Байєса і одержимо:

$$\varphi(x) = \frac{\varphi_1(x)\varphi_2(x)}{\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(x)\varphi_2(x)dx}. \quad (10.22)$$

Підставляючи у формулу (10.22) значення $\varphi_1(x)$ і $\varphi_2(x)$, після перетворення одержимо:

$$\varphi(x) = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}{\sqrt{2\pi\sigma_1\sigma_2}} \exp \left[\frac{\left(\frac{c\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} - x \right) (\sigma_1^2 - \sigma_2^2)}{2\sigma_1\sigma_2} \right]. \quad (10.23)$$

Як бачимо, отриманий вираз описує нормальний закон розподілу з параметрами:

$$m_0 = \frac{c\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}; \quad \sigma_0 = \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}. \quad (10.24)$$

Оскільки обидві вибірки відносяться до однієї й тієї ж ВВ, то, за рівності в них числа вимірів n , варто очікувати $\sigma_1 = \sigma_2$, при цьому:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{2}}. \quad (10.25)$$

З формули (10.25) випливає, що шляхом використання додаткової вибірки можна збільшити результатну точність вимірювання, причому не обов'язково вирівнювати потужності множин вимірів в обох вибірках. Навіть якщо в другій вибірці використано меншу кількість вимірів, ніж у першій, і $\sigma_1 > \sigma_2$, усе одно, відповідно до, $\sigma_0 < \min [\sigma_1, \sigma_2]$ і результат додаткової вибірки підвищить результатну точність визначення значення ВВ.

Будь-які відомості про значення ВВ утворюються в результаті її вимірювання. Головною ознакою вимірювання є одержання інформації про кількісне значення ВВ, проте форма подання результату виміру не може визначатися безвідносно до того, для чого необхідний результат цього виміру.

Результат виміру має обмежуватися деяким полем допуску $\pm \Delta$, в який вкладаються похибки вимірювання. Припущення про існування такої граничної похибки, яка не може бути перевищена, є неприйнятним, оскільки значення «максимальної спостережуваної похибки» є випадковою величиною, яка монотонно зростає зі збільшенням числа вимірів.

Найповнішою характеристикою опису похибки визначення ВВ є завдання розподілу ймовірності розміру похибки. При цьому використовується завдання щільності розподілу ймовірностей помилок (H^*). Ці величини визначаються законом розподілу помилки.

Найчастіше використовуються рівномірний і нормальний закони розподілу. Розглянемо ці випадки.

Рівномірний закон розподілу.

Щільність розподілу ймовірностей записується по ділянках:

$$p|x| = \begin{cases} 0, \text{при } |x| > \Delta \\ \frac{1}{2\Delta}, \text{при } |x| < \Delta. \end{cases} \quad (10.26)$$

Середньоквадратична помилка дорівнює:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx = \int_{-\Delta}^{+\Delta} x^2 \frac{1}{2\Delta} dx = \frac{(\Delta)^2}{3}; \quad (10.27)$$

$$H^2 = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx = - \int_{-\Delta}^{+\Delta} \frac{1}{2\Delta} \ln \frac{1}{2\Delta} dx = \ln 2 \Delta. \quad (10.28)$$

Нормальний закон розподілу.

Щільність розподілу дорівнює:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \quad (10.29)$$

Середньоквадратична помилка дорівнює:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx; \\ H^2 &= - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \left(\ln(\sqrt{2\pi}\sigma) + \frac{x^2}{2\sigma^2} \right) \\ &= dx = \\ &= \ln(\sqrt{2\pi}\sigma) \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx + \frac{1}{2\sigma^2} \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx. \end{aligned}$$

Оскільки $\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx = \sigma^2$,

$$H^2 = \ln \sqrt{2\pi}\sigma + \frac{1}{2} = \ln \sqrt{2\pi e}\sigma.$$

Отримані результати оцінки точності визначення значень ВВ використовують п'ять показників визначення точності:

x – похибка виміру;

σ – середньоквадратична похибка;

σ^2 – дисперсія ВВ;

A – максимальна похибка;

H^2 – апостеріорна ентропія оцінки ВВ.

Якщо перші чотири оцінки мають загальновідому фізичну інтерпретацію, то інтерпретація H^2 потребує роз'яснень. Ентропія значення ВВ характеризує невизначеність нашого знання щодо значення ВВ. Її можна інтерпретувати як величину, пропорційну зваженій точності, або як згладжування результатів окремих вимірів. Одне слід вважати непорушним: чим менша H^2 , тим менша невизначеність у наших знаннях про значення ВВ. Отже, ця міра без

будь-яких обмежень може бути використана у порівняльних оцінках: чим менша H^2 , тим більше ми знаємо про ВВ.

У кожному конкретному випадку в СМ використовуються всі або деякі з перерахованих показників, які зручні для споживача чи для використання в подальших розрахунках.

10.3 Дискретність спостережень у системі моніторингу

Система моніторингу призначена для спостереження, оцінювання і прогнозування станів деякого об'єкта, що знаходиться у взаємодії з навколишнім середовищем, а також для аналітичної обробки даних моніторингу. Природа спостережуваних об'єктів може бути найрізноманітнішою. Важливо вирізнити такі дві обставини:

- моніторинг доцільно проводити тільки для динамічних об'єктів, що потребує введення до розгляду чинника часу;
- будь-які спостережувані характеристики є вимірними і характеризуються сигналами, заданими в дискретній або аналоговій формі. Отже, система моніторингу має інформаційну природу і відповідне представлення.

Система моніторингу повинна надавати інформацію про спостережувані характеристики об'єкта з деякою необхідною точністю, яка визначається точністю первинного вимірювання або отримання інформації, що залежить від багатьох чинників: вимірювальної системи, системи зв'язку або документальних джерел і можливих ушкоджень при зберіганні, передачі та обробці інформації в самій СМ і в каналах передачі.

Дійсно, будь-які СМ видають інформацію з деяким періодом дискретності τ . Навіть якщо інформація видається безперервно, то її аналіз і використання відбуваються в дискретні моменти часу. До того ж, на проходження та обробку інформації від джерел до засобів аналізу витрачається час δ і виконується умова $\delta \leq \tau$.

Період дискретності τ є найважливішою характеристикою системи моніторингу, його значення визначається як розв'язання конфліктної ситуації:

- збільшення τ призводить до втрати точності спостереження системи моніторингу;
- зменшення τ збільшує навантаження на джерела інформації, систему передачі інформації, систему обробки інформації.

Тому при визначенні τ необхідно виконати умову: визначити залежність точності отримання інформації системою моніторингу від

часу її запізнення t_3 між моментом її отримання і моментом використання, при цьому має виконуватися умова $t_3 \leq \tau$.

Визначимо цю залежність.

Реально первинне значення вимірюваної величини x визначається з деякою точністю, яка характеризується в момент часу $t = 0$ (момент вимірювання) диференціальним законом розподілу $\varphi(x, 0)$ та ентропією:

$$H(x, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x, 0) \log_2 \varphi(x, 0) dx. \quad (10.30)$$

За час τ щільність розподілу φ зміниться за рахунок деформації цього закону (його розмивання) і виникне додаткова помилка, яку ми назвемо динамічною помилкою моніторингу. При цьому виникає динамічна втрата інформації моніторингу $\Delta I(\tau)$, що вимірюється як втрата ентропії співвідношенням:

$$\Delta H(\tau) = H(x, \tau) - H(x, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} [\varphi(x, \tau) \log_2 \varphi(x, \tau) - \varphi(x, 0) \log_2 \varphi(x, 0)] dx. \quad (10.31)$$

Для визначення $\Delta I(\tau)$ необхідно обчислити $\varphi(x, \tau)$, для чого розглянемо функції розподілу $x - F(x, 0)$ і $F(x, \tau)$. Введемо до розгляду приріст Δx часу t ($0 \leq t \leq \tau$):

$$\Delta x = V(t) \Delta t, \quad (10.32)$$

де $V(t)$ – швидкість зміни вимірюваної величини x у момент t .

Закон розподілу вимірюваної величини позначимо через $F(x, t)$, тоді:

$$F(x, t) = \int_0^x \varphi(y, t) dy. \quad (10.33)$$

За час Δt закон розподілу $F(x, t)$ змінюється відповідно до:

$$F(x, t + \Delta t) = F(x, t) P_1, \quad (10.34)$$

де P_1 – ймовірність невиходу вимірюваної величини за відрізок вимірювання $(0, x)$ до моменту $t + \Delta t$ за умови, що вона знаходиться всередині цього відрізка в момент t , який слідує з ймовірністю $F(x, t)$, при цьому:

$$P_1 = 1 - P_2 P_3, \quad (10.35)$$

де P_2 – ймовірність знаходження вимірюваної величини всередині відрізка $(x - \Delta x, x)$ у момент часу t ;

P_3 – ймовірність виходу вимірюваної величини за межі відрізка вимірювання $(0, x)$ за умови виконання події з ймовірністю P_2 .

Оскільки $F(x, t)$ описує закон розподілу ВВ і відповідно до (10.33)

$$P_2 = \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} \Delta x = V(t) \frac{\partial F(x, t)}{\partial x} \Delta t \quad (10.36)$$

Підставляючи вирази (10.35) і (10.36) у формулу (10.34), отримаємо диференційне рівняння у частинних похідних після граничного переходу $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\frac{\partial F(x, t)}{\partial t} = -P_3 V(t) \cdot F(x, t) \frac{\partial F(x, t)}{\partial x}, \quad (10.37)$$

для якого має місце початкова умова (10.33).

Вираз (10.37) описує характер зміни у часі точності визначення ВВ за рахунок деформації закону розподілу $F(x, t)$. Для визначення величини зміни і динамічних втрат інформації необхідно розв'язати диференційне рівняння (10.37) враховуючи (10.33).

Відповідні диференційні рівняння характеристик мають вигляд:

$$\frac{dF(x, t)}{dt} = 0; \quad \frac{dx}{dt} = F(x, t) \cdot P_3 V(t) \quad (10.38)$$

Поверхня, яку описують ці характеристики у разі гладкої функції $F(x, t)$ (ця умова вважається виконаною для розподілів ймовірностей, що розглядаються на практиці), визначає розв'язання задачі Коші для рівняння (10.37) з урахуванням (10.33).

Перші інтеграли звичайних диференційних рівнянь відповідно дорівнюють:

$$F(x, t) = C_1; \quad x - P_3 F(x, t) \int_0^t V(x) dt = C_2$$

Загальне рішення рівняння (10.38) має вигляд:

$$F(x, t) = U(x - P_3 F(x, t) \int_0^t V(x) dx). \quad (10.39)$$

У рівнянні (10.39) рішення виражається неявно через довільну функцію U . Визначимо цю функцію з урахуванням (10.33). Підставляючи у вираз (10.39) $t = 0$ і $F(x, 0) = \int_0^x \varphi(y, t) dy$, отримаємо $F(x, 0) = U(x, 0)$, звідки випливає:

$$U(x - P_3 F(x, t) \int_0^t V(x) dx) = F(x - F(x, t) P_3 \int_0^t V(x) dx).$$

Враховуючи це, отримаємо рішення рівняння (10.37) з початковою умовою (10.33) у неявному вигляді

$$F(x, t) = F \left[x - F(x, t) P_3 \int_0^t V(z) dz \right]. \quad (10.40)$$

У багатьох практичних випадках доцільно вимірювати не точність визначення ВВ (що характеризується законом розподілу ймовірностей $F(x, t)$) або кількість інформації, отримуваної при вимірюванні значення ВВ, а динамічні втрати інформації ΔH (приріст ентропії значення ВВ), що відбуваються за час $t = \tau$. Величина $\Delta H(t)$ визначається за відомою формулою теорії інформації:

$$\Delta H(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} [\varphi(x, t) \log_2 \varphi(x, t) - \varphi(x, 0) \log_2 \varphi(x, 0)] dx. \quad (10.41)$$

Для обчислень необхідно отримати вирази в явному вигляді для $\varphi(x, 0)$, $\phi(x, t) = \frac{d}{dx} F(x, t)$. Розглянемо конкретні випадки відомих розподілів $\varphi(x, 0)$, що мають практичне значення.

1. Рівномірний закон розподілу в момент вимірювання $t = 0$ відповідає ситуації, коли відомо, що ВВ знаходиться в межах $(0, B)$, але конкретно про значення величини в цьому інтервалі нічого не відомо,

тоді $F(x, 0) = \frac{x}{B}$. Внаслідок повної невизначеності та симетричності

розподілу $P_3 = 0,5$. Підставляючи ці значення у вираз (10.40) і розв'язуючи його відносно $F(x, t)$, отримуємо:

$$F(x, t) = \frac{x}{B + 0,5 \int_0^t V(z) dz}$$

При $V(t) = V = \text{const}$

$$F(x, t) = \frac{2x}{2B + Vt} \quad (10.42)$$

$$\Delta H(t) = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{2}{2B + Vt} \log_2 \frac{2B + Vt}{2} dx - \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \frac{\log_2 B}{B} dx. \quad (10.43)$$

Межі інтегрування в першому інтегралі виразу визначимо з умови нормування:

$$\frac{2a}{2B + Vt} = 1,$$

звідки

$$a = \frac{2B + Vt}{2}.$$

Знаходячи інтеграли (10.43), отримаємо:

$$\Delta H(t) = \log_2 \left(1 + \frac{vt}{2B} \right). \quad (10.44)$$

Величина $\Delta H(t)$ характеризує зменшення точності визначення ВВ і збільшення невизначеності за час t .

2. Квадратичний закон розподілу ВВ в момент вимірювання $t = 0$ має місце при визначенні координат точки на площині $F(x, 0) = ax^2$. Радіус визначення значення ВВ покладемо рівним R , тоді $F(x, t) = x^2/R^2$.

Для визначення P_3 враховується, що розглядуваний розподіл має місце при розподілі ВВ на площині. Унаочнимо цю ситуацію. Побудуємо (рис. 10.2) два концентричні кола з радіусами $x - \Delta x$ та x і штрихпунктиром проведемо кола радіусом $x - \Delta x + y$.

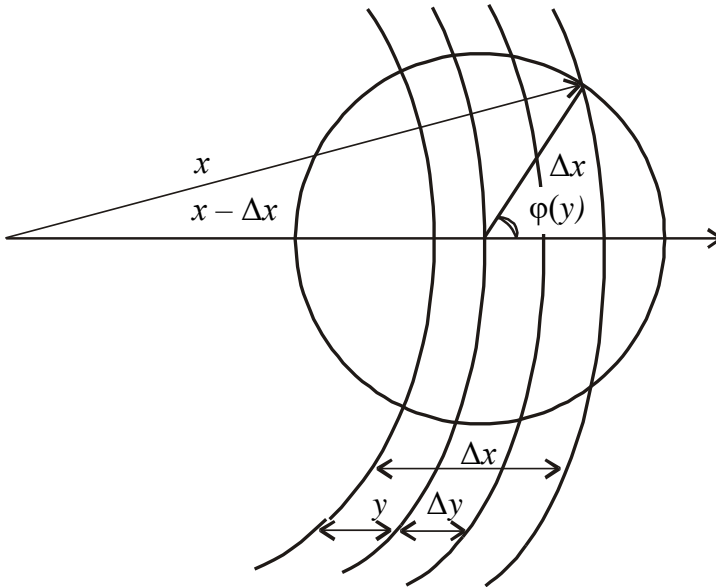


Рисунок 10.2 – Інтерпретація положення ВВ на площині

Якщо з імовірністю P_2 ВВ знаходиться в кільці з радіусами $(x - \Delta x + y)$ та $(x - \Delta x + y + \Delta y)$ у момент часу t , то ймовірність P_3 виходу ВВ за межі кола радіусом x до моменту часу $t + \Delta t$ визначиться формулою повної ймовірності:

$$P_3 = \int_0^{\Delta x} P_2(y) \frac{2\varphi(y)}{\pi} dy, \quad (10.45)$$

де $\varphi(y)$ показаний на рис. 10.2 і утворений перетином кола радіусом x та кола радіусом Δx , центр якого знаходиться на колі радіусом $x - \Delta x + y$.

Для визначення $P_2(y)$ розглянемо приріст Δy величини y , тоді $P_2(y)$ дорівнюватиме відношенню площ кілець з радіусами $(x - \Delta x + y + \Delta y)$ та $(x - \Delta x + y)$ і кільця з радіусами x та $(x - \Delta x)$:

$$P_2(y) = \frac{(x - \Delta x + y)\Delta y + 0(\Delta y)}{x\Delta x + 0(\Delta x)}. \quad (10.46)$$

Із трикутника зі сторонами x , Δx , $x - \Delta x + y$ знаходимо:

$$\varphi(y) = \pi - \arccos \frac{(x - \Delta x - y)^2 + x^2 - (\Delta x)^2}{2(x - \Delta x + y)x}, \quad (10.47)$$

звідки

$$P_3 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\Delta x} \frac{2(x - \Delta x + y)}{x\Delta x + 0(\Delta x)} \left[\pi - \arccos \frac{(x + \Delta x - y)^2 + x^2 - (\Delta x)^2}{2(x + \Delta x - y)x} \right] dy = \quad (10.48)$$

$$= \frac{2}{\pi(x\Delta x + 0(\Delta x))} \int_0^{\Delta x} (x - \Delta x + y) \left[\pi - \arccos \frac{(x - \Delta x + y)^2 + x^2 - (\Delta x)^2}{2(x - \Delta x + y)x} \right] dy.$$

У формулі для P_3 виділимо фрагмент підінтегрального виразу:

$$b = -\frac{(\Delta x)^2}{2(x - \Delta x + y)x}; \quad B = \frac{(x + \Delta x - y)^2 + x^2}{2(x + \Delta x - y)x}; \quad (10.49)$$

тоді формула визначення P_3 матиме вигляд:

$$P_3 = \frac{2}{\pi[x\Delta x + 0(\Delta x)]} \int_0^{\Delta x} (x - \Delta x + y) [\pi - \arccos(B + b)] dy \quad (10.50)$$

Нехай $\arccos(B + b) = \alpha$: $\arccos B = \alpha + \beta$, тоді $\cos \alpha = (B + b)$, $\cos(\alpha + \beta) = B$.

Розглядаючи значення B і b , помічаємо, що

$$b = \frac{x + \Delta x - y}{2x} + \frac{x}{2(x + \Delta x - y)},$$

оскільки $\Delta x \ll x$ та $y \ll x$, то $b \rightarrow 1$, $B = 0(\Delta)$; отже, $\beta = \arccos B - \arccos(B + b)$ – дуга малої величини.

З визначення α безпосередньо знаходимо $\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta$, оскільки β – дуга малої величини, то $\sin \beta = \beta + 0(\beta)$, а $\cos \beta = 1 - 0(\beta)$.

Оскільки $\cos(\alpha + \beta) = B$, то:

$$B = B + b - \beta \sin \alpha + 0(\beta),$$

звідки

$$b = \beta \sin \alpha + 0(\beta).$$

Вище показано, що $b \rightarrow 1$, $B \rightarrow 0$, отже, $\alpha = \arccos(B + b) = \arccos B - \beta$, але β – дуга малої величини порядку $O(\Delta x)$, тому $\arccos(B + b) = \arccos B + O(\Delta x)$.

Використовуючи ці підстановки і знаходячи інтеграли, отримаємо:

$$P_3 = \frac{1}{\pi} + O(\Delta x) \quad (10.51)$$

Враховуючи (10.40), $F(x, 0) = x^2/R^2$ та (10.51), отримаємо квадратне рівняння:

$$\left[\frac{F(x, t)}{\pi R} \int_0^t V(z) dz \right]^2 - \left[1 + \frac{2x}{\pi R^2} \int_0^t V(z) dz \right] F(x, t) + \frac{x^2}{R^2} = 0. \quad (10.52)$$

Розв'язавши це рівняння відносно $F(x, t)$ і отримаємо:

$$F_{1,2}(x, t) = \frac{1 + \frac{2x}{\pi R^2} \int_0^t V(z) dz \pm \sqrt{1 + \frac{4x}{\pi R^2} \int_0^t V(z) dz}}{\frac{2}{\pi^2 R^2} \left[\int_0^t V(z) dz \right]^2}. \quad (10.53)$$

Рішення з додатним радикалом не має сенсу, оскільки приводить до значень $F(x, t) > 1$. Тому приймається:

$$F(x, t) = \frac{1 + \frac{2xVt}{\pi R^2} \int_0^t V(z) dz - \sqrt{1 + \frac{4x}{\pi^2 R^2} \int_0^t V(z) dz}}{\frac{2}{\pi^2 R^2} \left[\int_0^t V(z) dz \right]^2} \quad (10.54)$$

При $V = \text{const}$ вираз (10.54) набуде вигляду:

$$F(x, t) = \frac{1 + \frac{2xVt}{\pi R^2} - \sqrt{1 + \frac{4xVt}{\pi R^2}}}{\frac{2V^2 t^2}{\pi^2 R^2}} = \frac{\pi^2 R^2 + 2\pi xVt - \sqrt{\pi^4 R^4 + 4xVt \pi^3 R^2}}{2V^2 t^2} \quad (10.55)$$

$$\Delta H(t) = \int_0^{\varphi_1(t)} \pi \left[\frac{\pi R}{(1 - \sqrt{\pi^2 R^2 + 4xVt\pi})Vt} \right] \log_2 \left[\frac{\pi R}{(1 - \sqrt{\pi^2 R^2 + 4xVt\pi})Vt} \right] dx + \int_0^R \frac{2x}{R^2} \log_2 \frac{2x}{R^2} dx \quad (10.56)$$

Знаходимо $\varphi_1(t)$ за умови нормування

$$2v^2t^2 = \pi^2 R^2 + 2\pi v t x - \sqrt{\pi^4 R^4 + 4xv t \pi^3 R^3}.$$

Рішення останнього рівняння має вигляд:

$$x_{1,2} = \frac{1}{\pi} V t \pm R.$$

Оскільки рішення з $(-R)$ не має сенсу, то:

$$\varphi_1(t) = R + \frac{vt}{\pi}.$$

Знаходячи інтеграл (3.35) і підставляючи межі, визначаємо:

$$\Delta H(t) = \left(\frac{\pi^2 R^2}{4V^2 t^2} - 1 \right) \log_2 \frac{\pi R}{\pi R + 2Vt} - \frac{\log_2 e}{2} \left(1 - \frac{\pi R}{Vt} \right). \quad (10.57)$$

Динамічні втрати інформації визначені як збільшення ентропії значення ВВ на величину $\Delta H(t)$:

Отримані результати можуть бути використані для розв'язування різних прикладних задач. Розглянемо деякі з них:

1. Визначити закон розподілу ймовірностей ВВ у момент часу $t = \tau$, якщо відомий закон її розподілу при $t = 0$. Задача розв'язується за допомогою формул (10.42) і (10.44) підстановкою в них початкових значень розподілу при $t = 0$.

Нехай відомий закон розподілу ВВ у момент часу $t = 0$: $F(x, 0) = \frac{x}{a_1}$; задано також значення часу запізнення τ . Потрібно знайти таке a_1 , щоб забезпечити при $t = \tau$ нульове значення динамічної втрати інформації.

Для виконання цієї умови необхідно прирівняти

$$H(a_2, t = 0) = H(a_1, t = \tau);$$

$$H(a_2, t = 0) = \int_{-\frac{a_2}{2}}^{+\frac{a_2}{2}} \frac{dx}{a_2} \log_2 a_2 = \log_2 a_2;$$

$$H(a_1, t = \tau) = H(a_1, t = 0) + \Delta H(\tau) = \log_2 a_1 + \log_2 \left(1 + \frac{V\tau}{2a_1} \right).$$

Прирівнюємо ці значення:

$$\log_2 a_2 = \log_2 a_1 + \log_2 \left(1 + \frac{V\tau}{2a_1} \right);$$

$$\log_2 \frac{a_2}{a_1} = \log_2 \left(1 + \frac{V\tau}{2a_1} \right);$$

$$\frac{a_2}{a_1} = 1 + \frac{V\tau}{2a_1}; \quad a_2 = a_1 + \frac{V\tau}{2},$$

звідки $a_1 = a_2 - \frac{V\tau}{2}$.

Якщо $V\tau = a_2$, то це означає, що при запізненні τ , щоб компенсувати динамічну втрату інформації, необхідно подвоїти точність вимірювання, оскільки:

$$a_1 = a_2 - a_2/2; \quad \text{звідки } a_1 = a_2/2.$$

2. Обґрунтування дискретності роботи системи моніторингу можна виконати, виходячи з таких передумов: відомо закон визначення ВВ у момент $t = 0$ і задано точність визначення значень ВВ при $t = \tau$.

Нехай має місце закон розподілу ймовірності значень ВВ

$$F = \frac{2x}{2B + Vt}, \quad \text{причому при } t = 0 \quad B = a_1; \quad \text{при } t = \tau \quad B = a_2.$$

Тоді $2a_1 + V\tau = 2a_2$, звідки

$$\tau = \frac{2a_2 - 2a_1}{V} = \frac{2}{V}(a_2 - a_1).$$

Наведені результати дають змогу знайти час дискретності τ при заданій точності ВВ на виході СМ.

Контрольні запитання за лекцією 10

1. Дайте визначення моніторингу.
2. Призначення систем моніторингу технічних систем.
3. Дайте визначення інформаційного забезпечення.
4. Структурізація дій моніторингу технічних систем.
5. Специфічні риси моніторингу електромеханічних систем.
6. Критерії ефективності функціонування СМ
7. Оцінка якості функціонування СМ технічних систем.
8. Области і значення часткових критеріїв при формуванні СМ терміну служби електрообладнання.
9. Дайте визначення вимірювання.
10. Ознаки вимірювання.
11. Дискретність спостережень у системі моніторингу.

ЛЕКЦІЯ 11

СУЧАСНІ ПІДХОДИ З УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

План

11.1 Наукові рішення побудови інтелектуальних систем технічної діагностики на основі SMART-технологій

11.2 Аналіз засобів контролю технічного стану та сучасні методи діагностування електрообладнання

11.3 Аналіз засобів контролю технічного стану та сучасні методи діагностування електрообладнання

11.4 Подальший розвиток інтелектуальних систем безперервного контролю та діагностування силового електрообладнання

11.1 Наукові рішення побудови інтелектуальних систем технічної діагностики на основі SMART-технологій

Крім надійності електрообладнання, яка закладена на стадії його проектування й виготовлення, необхідно досліджувати надійність електрообладнання, яка проявляється під час експлуатації. Процес експлуатації включає такі елементи: саме електрообладнання, організацію його експлуатації та організацію обслуговування й ремонту. Розрізняють розрахункову й експлуатаційну надійність енергосистеми та її елементів. Перша характеризує очікувану надійність електроустановок або енергосистеми в цілому, розраховану з використанням статистичних даних показників експлуатації обладнання енергосистеми. Методично розрахункова надійність може бути поділена на апаратну й схемну. Друга (експлуатаційна надійність) характеризує надійність роботи конкретного обладнання (елемента) енергосистеми, яке реально експлуатується, або надійність системи електропостачання в цілому.

Між розрахунковою та експлуатаційною надійністю є принципова різниця. При проектуванні та розвитку системи тягового електропостачання використовується розрахункова надійність електрообладнання, а при оцінці господарської діяльності експлуатованої електричної системи, з метою розробки заходів щодо поліпшення її роботи, проводиться розрахунок експлуатаційної надійності електроустановок.

Експлуатація здійснює вирішальний вплив на надійність об'єктів, яка забезпечується шляхом:

– дотримання умов і режимів експлуатації (мастило,

навантажувальні режими, температурні режими й ін.);

- проведення періодичних технічних обслуговувань з метою виявлення й усунення виникаючих порушень та підтримки об'єкта в працездатному стані; систематична діагностика стану об'єкта, виявлення відмов та запобігання їм, зниження шкідливих наслідків відмов тощо;

- проведення профілактичних відновних ремонтів.

Основною причиною зниження надійності в процесі експлуатації є знос і старіння компонентів об'єкта. Знос призводить до зміни параметрів об'єкта, порушення працездатності, поломки, зниження міцності й т.д. Старіння спричиняє зміну фізико-механічних властивостей матеріалів, що викликає несправності або відмови.

Якість експлуатації електротехнічних пристроїв також залежить від ступеня наукової обґрунтованості застосовуваних методів експлуатації та кваліфікації обслуговуючого персоналу (знання матеріальної частини, теорії та практики надійності, вміння швидко знаходити й усувати несправності тощо). Застосування профілактичних заходів (регламентні роботи, огляди, випробування), ремонту, використання досвіду експлуатації електротехнічних пристроїв забезпечують їх більш високу експлуатаційну надійність.

Враховуючи вищевикладене, відзначимо основні шляхи підвищення надійності ТП:

- подальше вивчення й удосконалення умов експлуатації та підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання, визначення характеру, причин і законів розподілу відмов;

- вдосконалення та розробка нових методів розрахункової оцінки надійності електроустаткування, а також оцінки надійності шляхом випробування на надійність;

- розробка і вдосконалення методів розрахункової і експериментальної оцінки надійності при зберіганні й транспортуванні;

- налагодження й правильна експлуатація систем захисту електрообладнання, передбачених під час проектування;

- покращення теплового стану електрообладнання шляхом переходу на більш високий клас нагрівостійкості ізоляції, вирівнювання температури окремих частин обладнання за рахунок вибору навантажень, розробки сучасних систем охолодження, застосування захисту від перевантажень тощо;

- розробка і впровадження заходів щодо зниження вібрацій як електроустаткування, так і електромеханічної системи ТП у цілому;

- підвищення якості комплектуючих виробів і матеріалів, у тому числі: застосування їх найвищих класів, використання просочувальних лаків, спеціальних проводів з міцною та еластичною

ізоляцією, зменшення жорсткості обмотувальних проводів, застосування високоякісної міканітової ізоляції (міканітова ізоляція струмовідводів настільки надійна, що їх огляди можуть здійснюватися через дуже великі проміжки часу) тощо;

– розробка методів визначення економічно оптимальних показників надійності.

Підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання пов'язане з матеріальними витратами, тому ця проблема повинна вирішуватися на базі техніко-економічних розрахунків. Для кожного типу силового електрообладнання ТП можуть бути розроблені економічно-обґрунтовані оптимальні показники надійності з урахуванням умов застосування, фізичного та морального зносу, витрат на технічне обслуговування і ремонт.

Утримання технічного обладнання залізничного транспорту на високому експлуатаційному рівні неможливе без об'єктивної інформації про його фактичний стан. Об'єкти залізничного транспорту містять велику кількість пристроїв, тривала експлуатація яких без належного діагностування технічного стану може призвести до виходу їх з ладу та значних матеріальних збитків. Для реалізації ефективного діагностування цих пристроїв необхідна інтелектуалізація електричних мереж. При розробці проектів з інтелектуалізації електричних мереж необхідно вивчати світовий досвід розвитку концепцій Smart Grid. Керування повинно здійснюватися всією системою електропостачання залізниць, яка зрештою повинна стати повністю автоматичною, а всі наявні автоматизовані системи (АСКД, АСКТП, системи моніторингу, системи керування даними, системи діагностування тощо) є лише інструментом для досягнення поставлених цілей. Інтегровані в єдину платформу існуючі автоматизовані інформаційні системи дистанції електропостачання дозволять по-новому підходити до побудови електричних мереж та контролю їх роботи. Інтелектуальна електрична мережа залежно від умов, що склалися, у автоматичному режимі повинна здійснювати зміну конфігурації системи електропостачання з метою досягнення мінімуму витрат енергоресурсів без зниження надійності роботи, у тому числі: керування системою електропостачання дистанції, діагностування стану електротехнічного електрообладнання ТП, а також організацію, планування та проведення ТО і Р обладнання.

Регламентоване обслуговування, що виконується згідно з інструкціями на обладнання, у цілому призначене забезпечувати його працездатність. Проте інколи таке обслуговування призводить до не виправданих витрат, оскільки за реальним технічним станом пристрій

в момент виконання робіт може й не потребувати технічного обслуговування, а замінені деталі ще не досягли критичної межі зносу. Однак поступове старіння парку устаткування й зниження запасів міцності гостро ставлять питання оцінки його стану й рівня ризику його експлуатації за межами нормованого терміну служби. Розвиток вільного ринку електроенергії і збільшення фінансового тиску стали додатковими чинниками, які, з одного боку, максимально підсилюють необхідність продовження термінів служби устаткування, а з іншого – спрямовані на зниження експлуатаційних витрат на його технічне обслуговування і ремонт. Необхідність розв'язання цієї суперечності приводить до формування нового підходу в оцінці стану устаткування.

В основі нових пропонованих методів управління й прийняття рішень, що формуються сьогодні, лежить аналіз ризиків експлуатації старого устаткування або устаткування з певними дефектами (обслуговування устаткування за фактичним технічним станом). Метою ТО і Р за фактичним технічним станом є забезпечення необхідного рівня надійності при зниженні експлуатаційних витрат. При цьому призначають необхідні роботи з ТО і Р залежно від реального технічного стану конкретного об'єкта й передбачуваної зміни його стану в процесі експлуатації. Цей метод полягає в контролі за технічним станом устаткування з використанням сучасних засобів технічної діагностики та проведенням ремонтних робіт лише тоді, коли вони дійсно необхідні (рис. 11.1).

У результаті проведення безперервної діагностики експлуатованого устаткування можна досягти зниження обсягів робіт за рахунок систематичного зменшення причин виникнення дефектів.

Накопичений світовий досвід застосування ТО і Р за фактичним технічним станом дозволяє дати таку узагальнену оцінку ефективності цього методу.

- зниження витрат на обслуговування на 75 %;
- зниження кількості обслуговувань на 50 %;
- зниження кількості відмов на 70 % за перший рік роботи.

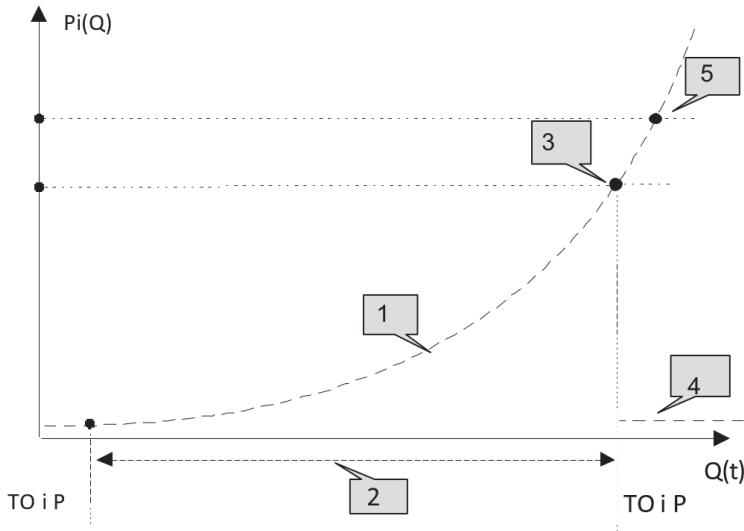


Рисунок 11.1 – Обслуговування пристроїв за фактичним технічним станом:

$P_i(Q)$ – узагальнений показник ресурсу пристрою; 1 – зміна технічного стану обладнання пристрою $Q(t)$; 2 – моніторинг та діагностику технічного стану обладнання; 3 – передвідмовний стан пристрою; 4 – відновлення ресурсу; 5 – відмова пристрою

Порівняльний аналіз різних методів обслуговування устаткування, за даними Асоціації відкритих систем управління інформацією про стан машин «MIMOSA», показав, що питомі витрати на ТО і Р в енергетичному секторі США склали в 1998 р.:

– 24 \$ на 1 кВт – при функціонуванні устаткування до виходу з ладу;

– 18 \$ на 1 кВт – при ТО і Р на базі планово-запобіжних ремонтів;

– 12 \$ на 1 кВт – при ТО і Р на базі оцінки фактичного стану устаткування.

Інший приклад економічного ефекту від переходу з обслуговування і ремонту за регламентом на ремонт і обслуговування за фактичним станом за даними фірми «Bruel and Kjaer» (Данія) [14] наведено в табл. 11.1.

Таблиця 11.1 – Річний економічний ефект від переходу з ТО і Р за регламентом на ТО і Р за фактичним станом

Підприємство	Економічний ефект
Хімічний комбінат (електричні машини)	Зниження кількості ТО і Р з 274 до 14
Нафтопереробний комбінат (ел. обладн.)	Зниження затрат на ТО і Р на 75 %
Паперова фабрика (електрообладнання)	Економія 250 000 \$, що в 10 разів перекрило затрати на закупівлю засобів для моніторингу
Атомна електростанція (електрообладнання)	Економія 3 000 000 \$ за рахунок зниження затрат на ТО і Р
Залізничний транспорт Коефіцієнт окупності вкладених коштів	Зниження кількості ТО і Р на 15 % Більше 10 разів

Розглянутий досвід показує, що для вирішення проблеми своєчасного відновлення ресурсу та підвищення надійності пристроїв електропостачання залізниць, скорочення витрат, пов'язаних з ремонтом і простоями, необхідно переходити від регламентованого ТО і Р до інтелектуальної системи обслуговування за фактичним технічним станом.

Сьогодні підтримка необхідного рівня надійності енергетичного устаткування в процесі експлуатації забезпечується, по-перше, за рахунок значних коефіцієнтів запасу, які закладені при його створенні, а по друге, системою технічного обслуговування і періодичних ремонтів, яка базується на проведенні ПЗР після напрацювання певного часу.

В основу діючої системи ТО і Р ТП, згідно з «Інструкцією з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць» ЦЕ-0024 [4], покладено поєднання технічного обслуговування й ПЗР. Залежно від важливості призначення устаткування в технологічному процесі, ПЗР може проводитися за методом планово-періодичного ремонту й ремонту за технічним станом.

Ремонт обладнання за технічним станом виконується у випадку виявлення при оглядах несправностей, що загрожують нормальній роботі обладнання, після відмов у роботі обладнання та пристроїв релейного захисту й автоматики (РЗА), у разі пошкодження обладнання аварійними струмами, атмосферними й комутаційними впливами, а

також при виробітку встановленого механічного й комутаційного ресурсу.

Як бачимо, питання визначення фактичного технічного стану обладнання за допомогою діагностування, вимірів, випробувань тощо не розглядається, а ТО і Р виконується за фактом пошкодження обладнання, його несправного стану або непрацездатності.

Вищерозглянутий закордонний досвід обслуговування за фактичним технічним станом дозволяє, з одного боку, забезпечити працездатність техніки, з іншого – заздалегідь підготуватися до проведення ТО і Р та мінімізувати витрати на нього.

Однак планування ТО і Р пристроїв ТП досить складне у зв'язку з тим, що стан кожного з об'єктів контролюється множиною показників, за кожним з яких повинна розраховуватися дата наступного ТО і Р або іншого виду обслуговування. В існуючій на ТП системі ТО і Р необхідно шукати резерви для скорочення витрат. У цьому напрямку, в першу чергу, згідно з, необхідно забезпечити прозорість і обґрунтованість ремонтної програми:

1. Прозорість витрат на ТО і Р – це розуміння того, на що, на які об'єкти і які роботи плануються засоби ремонтного фонду, скільки коштує кожна з цих робіт.

2. Обґрунтованість витрат на ТО і Р – це усвідомлений вибір між витратами на підтримку працездатності устаткування й розміром ризику в разі невиконання ремонту.

Для забезпечення прозорості й обґрунтованості витрат на ТО і Р ТП слід:

- впровадити пооб'єктне планування ремонтного фонду;
- прив'язати витрати на ремонт до технічного стану й фактичного завантаження обладнання;
- впровадити оцінку ризику невиконання ремонтів і систему прийняття рішень на основі ризиків.

Виконаний аналіз показує, що найбільш прогресивна система технічного обслуговування і ремонту – це система, що базується на встановленні фактичного технічного стану обладнання. Основою для побудови такої системи служать методи технічної діагностики. Сучасний рівень і перспективи розвитку засобів діагностики, дефектоскопії і автоматизованого контролю в електропостачанні залізниць відкривають реальні можливості застосування в недалекому майбутньому методів технічного обслуговування й ремонту устаткування за технічним станом у широких масштабах.

Стосовно електрообладнання принципово важливо визначити, які параметри контролювати і які чинники враховувати при оцінці його

технічного стану, тобто слід вирішити питання про глибину діагностування. Як відомо, широко розглядаються механічні (вібраційні), теплові, електричні й інші чинники, що мають різну фізико-хімічну природу. При цьому згадані чинники призводять до зміни окремих властивостей електроустаткування. У цьому випадку оцінка технічного стану за окремими властивостями електрообладнання виконується більш-менш задовільно. Проте загальна оцінка технічного стану пристрою надзвичайно ускладнена через необхідність зіставлення показників різної фізичної природи й відсутність між ними кореляційних залежностей. Ця проблема змушує шукати інший підхід до загальної оцінки технічного стану електрообладнання. Одним з напрямків вирішення цієї проблеми є доцільність прийняття як інтегральної оцінки технічного стану електрообладнання значення спрацьованого (залишкового) ресурсу. Спрацьований (залишковий) ресурс визначається за результатами експлуатаційного контролю параметрів пристрою в перехідних і стаціонарних режимах роботи.

У системі ремонту електроустаткування за фактичним технічним станом питання про призначення термінів ТО і Р конкретним видам устаткування повинне визначатися не регламентним графіком ПЗР, а їх фактичним технічним станом. У той же час періодичне діагностування виконується у рамках технічного обслуговування за планом, який включається в календарні графіки. Безперервне діагностування в процесі експлуатації найбільш ушкоджуваних і відповідальних елементів електрообладнання ТП за технічним станом можливо впровадити за допомогою застосування запропонованої автором концепції інтелектуальної системи ТО і Р, моніторингу та діагностування обладнання ТП.

На початковому етапі впровадження системи ТО і Р електроустаткування за фактичним технічним станом доцільно зберегти планування основних ремонтних показників (ремонтного циклу, міжремонтного періоду, трудомісткості, об'єму складських запасів матеріалів і запасних частин). Проте в ремонтний цикл як основну операцію технічного обслуговування необхідно включити графік контролю технічного стану електрообладнання ТП, сформований за допомогою інтелектуальної системи моніторингу й діагностування обладнання. У результаті прогнозування технічного стану на підставі діагностування міжремонтний період кожного виду електрообладнання необхідно коригувати залежно від його фактичного технічного стану. У процесі накопичення діагностичної інформації про відпрацьований або залишковий ресурс різного електроустаткування можуть бути внесені корективи у встановлені системою ПЗР нормативи періодичності й

обсягу ТО і Р. При подальшому глибокому розвитку й впровадженні методів і засобів технічної діагностики можна буде відмовитися від регламентного календарного планування термінів ремонту, замінивши його на календарне планування діагностичних перевірок

Одним з головних завдань господарства електрифікації та електропостачання є підтримка обладнання в працездатному стані в умовах наростання темпів і обсягів його старіння. Так, більшість ТП потребує модернізації, бо значна частина експлуатованого устаткування вже вичерпала свій ресурс і потребує поетапної реконструкції, оновлення або заміни. Тому підтримка працездатності, підвищення ефективності використання наявного обладнання ТП та застосування нових методів діагностування його технічного стану є одним з актуальних завдань.

Метою діагностування є забезпечення раціональної експлуатації електроустаткування при заданих показниках надійності й скорочення витрат на його технічне обслуговування та ремонт. Ця мета досягається шляхом управління технічним станом електроустаткування в процесі експлуатації, що дозволяє виконувати технічне обслуговування та ремонт відповідно до даних діагностування.

Основне завдання технічного діагностування полягає в отриманні достовірної інформації про технічний стан електрообладнання в процесі експлуатації. Воно вирішується на основі вимірювання, контролю, аналізу й обробки кількісних і якісних значень параметрів електрообладнання, а також шляхом управління обладнанням відповідно до алгоритму діагностування.

Аналіз причин виникнення та прояву дефектів різних типів електрообладнання ТП свідчить про те, що технічний стан (ТС) кожного з них характеризується як індивідуальними, так і спільними ознаками. Для кожного типу обладнання характерні свої типові дефекти, які багаторазово трапляються в експлуатації. Об'єднавши всі дефекти й ознаки їх появи в окремі групи, отримаємо структуру діагностування електрообладнання, яка складається з трьох рівнів і підсистем: перевірки функціонування, виявлення дефектів, оцінки та прогнозування працездатності. При цьому кожний наступний рівень використовує результати попередніх. Технічне діагностування електрообладнання включає в себе два основні напрямки – оперативну та ремонтну діагностику.

Основними завданнями оперативної діагностики є:

- раннє виявлення дефектів на працюючому або виведеному з роботи для обстеження (але нерозібраному) обладнанні;
- прогнозування розвитку дефектів, оцінка їх небезпеки, оцінка

загального стану обладнання;

– підготовка рекомендацій щодо подальшої експлуатації й технічного обслуговування обладнання (наприклад, негайне виведення в ремонт, зсув термінів планових ремонтів, робота без обмежень і т. д.).

Ремонтна діагностика здійснюється на виведеному з роботи в ремонт обладнанні. Серед її основних завдань:

– локалізація дефектів обладнання;
– визначення обсягу ремонтно-відновних робіт (можливо, з рекомендаціями про доцільність заміни обладнання).

Враховуючи існуючі тенденції підвищення надійності діагностичного контролю за рахунок автоматизації процесу вимірювань і реєстрації, зменшення кількості обслуговуючого персоналу й отримання оперативної інформації про технічний стан електрообладнання ТП, реалізація систем діагностики стає ефективною в режимі моніторингу діагностичних параметрів контрольованого електрообладнання.

На етапі модернізації й реконструкції електрифікованих залізниць України необхідно враховувати рівень інноваційного розвитку всіх суб'єктів електропостачання на основі передових технологій. Наприклад, у Європі, США цей термін має досить конкретне значення: це електричні мережі, оснащені необхідними сучасними засобами телекомунікації, що забезпечують двосторонні взаємодії всіх учасників виробництва, розподілу й споживання електроенергії. Концептуальне визначення Smart Grid вказує на важливу роль інтелектуальної мережі в технологічному, економічному й екологічному розвитку системи електропостачання. Зараз активно реалізується низка проектів побудови гнучкої електричної мережі, зокрема:

– проект “FENIX” (Flexible Electricity Networks to Integrate the expected Energy Evolution). Передбачає створення гнучкої електричної мережі, основними цілями якої є: розробка механізмів функціонування загальноєвропейської енергосистеми, зокрема розробка концепції віртуальних електростанцій (VPP); розробка алгоритмів включення в загальну систему розподілених джерел генерації (DER) і поновлюваних джерел енергоресурсів (RES); розробка нових програмно-апаратних платформ для втілення в життя концепції VPP; техніко-економічне обґрунтування застосування VPP; демонстрація розробок на полігонах в Іспанії і Великобританії. Цей проект об'єднав провідних гравців європейського енергетичного ринку, таких як: Iberdrola, Electricite de France, EDF Energy Networks, Red Electrica de Espana, National Grid Transco, Siemens PSE, Areva T&D і ін.;

– проект “ADDRESS” (Active Distribution network with full integration of Demand and distributed energy RESources). Він є складовою європейської концепції мереж майбутнього Smart Grids European Technology Platform і об’єднує роботу 25 компаній з 11 країн Європи, включаючи EDF, ABB, Enel, Kema, Philips та ін.;

– проекти побудови Microgrids окремих енергомережових структур, що розташовані на невеликій території, мають власні генеруючі джерела й здатні взаємодіяти з центральною мережею для вирішення завдань покриття максимуму пікових навантажень. Проекти успішно реалізуються у Європі (консорціум 14 компаній з 7 країн на чолі з Національним технологічним університетом Афін (NTUA)), США (консорціум CERTS, компанія GE), Канаді, Японії;

– проект побудови інтелектуальної енергетичної інфраструктури (розподілена генерація, поновлювані джерела енергії, засоби акумуляції енергії, центри диспетчерського управління) у трьох префектурах Японії, що реалізовується компанією Mitsubishi Electric.

Як бачимо, технології інтелектуальних мереж Smart Grid охоплюють різні аспекти розвитку системи електропостачання, у тому числі управління й моніторингу стану електротехнічного устаткування електрифікованих залізниць, які можна описати такими ознаками:

– підвищення надійності електропостачання залізниць і безвідмовності роботи системи електропостачання;

– підвищення ефективності витрати енергоресурсів зі збереженням необхідних параметрів якості електричної енергії;

– управління й діагностика стану електротехнічного устаткування ТП;

– перехід на технічне обслуговування і ремонт електротехнічного устаткування ТП за фактичним технічним станом;

– велика кількість датчиків, які вимірюють поточні режимні параметри для оцінки стану ТП у різних режимах роботи електропостачання;

– система збору й обробки даних (високоінтегровані комплекси оперативного управління в режимі реального часу з урахуванням експертних розрахункових систем прийняття рішень), а також засоби управління активними елементами системи тягового електропостачання й нетягових споживачів;

– наявність приладів і механізмів, які дозволяють у режимі реального часу змінювати топологічні параметри системи електропостачання;

– засоби автоматичної оцінки поточної ситуації й побудови прогнозів роботи ТП;

– висока швидкодія автоматизованої системи управління електропостачанням, інформаційного обміну;

– створення високонадійних магістральних каналів зв'язку управління і дубльованих цифрових каналів обміну інформацією між об'єктами ТП і диспетчерським управлінням.

Утримання технічного обладнання на високому експлуатаційному рівні неможливе без об'єктивної інформації про його фактичний стан. Об'єкти залізничного транспорту містять велику кількість пристроїв, тривала експлуатація яких без належного діагностування технічного стану може привести до виходу їх зладу та значних матеріальних збитків. Для ефективного діагностування цих пристроїв необхідна інтелектуалізація електричних мереж. Під час розробки проєктів з інтелектуалізації електричних мереж слід враховувати досвід мереж Smart Grid. Управління повинно здійснюватися всією електричною мережею системи тягового електропостачання залізниць, яка, зрештою, повинна стати повністю автоматичною, а всі наявні автоматизовані системи (АСДУ, АСКТП, системи моніторингу, системи управління даними, системи діагностування тощо) є лише інструментом для досягнення поставлених цілей. Інтегровані в єдину платформу існуючі автоматизовані інформаційні системи дистанції електропостачання дозволять повному підходити до побудови електричних мереж та контролю їх роботи. Інтелектуальна електрична мережа залежно від умов, що склалися, у автоматичному режимі повинна здійснювати переконфігурацію системи електропостачання з метою досягнення мінімуму витрат енергоресурсів без зниження надійності роботи, у тому числі: управління системою електропостачання дистанції, діагностування стану електротехнічного обладнання ТП, а також організацію, планування та виконання технічного обслуговування і ремонту.

Регламентоване обслуговування, що проводиться згідно з інструкціями на обладнання, у цілому призначене забезпечувати його працездатність. Проте інколи таке обслуговування приводить до невиправданих витрат, оскільки реальний технічний стан пристрою в момент виконання робіт може й не вимагати технічного обслуговування, а замінювані деталі могли ще не досягти критичної міри зносу. Однак поступове старіння парку устаткування і зниження запасів міцності гостро ставлять питання оцінки його стану і міри ризику його експлуатації за межами нормованого терміну служби. Розвиток вільного ринку електроенергії і збільшення фінансового тиску стали додатковими чинниками, які, з одного боку максимально

підсилюють необхідність продовження термінів служби устаткування, а з іншого боку, направлені на зниження експлуатаційних витрат на його технічне обслуговування і ремонти. Необхідність вирішення даного протиріччя приводить до формування нового підходу до оцінки стану устаткування

У основі нових пропонованих методів управління і ухвалення рішень, що формуються в даний час, лежить аналіз ризиків експлуатації старого устаткування або устаткування з певними дефектами (обслуговування устаткування за фактичним технічним станом). Метою ТО і Р за фактичним технічним станом є забезпечення необхідного рівня надійності при зниженні експлуатаційних витрат. При цьому призначають необхідні роботи по ТО і Р залежно від реального технічного стану конкретного об'єкту і передбачуваної зміни його стану в процесі експлуатації. Даний метод полягає в контролі за технічним станом устаткування з використанням сучасних засобів технічної діагностики та проведенням ремонтних робіт лише тоді, коли вони дійсно необхідні.

Однак планування ТО і Р пристроїв ТП досить складне у зв'язку з тим, що стан кожного з об'єктів контролюється множиною показників, і за кожним з них повинна розраховуватися дата наступного ТО і Р або іншого виду обслуговування. В існуючій на ТП системі ТО і Р необхідно шукати резерви для скорочення витрат. У цьому напрямку, у першу чергу, необхідно забезпечити прозорість і обґрунтованість ремонтної програми:

1. Прозорість витрат на ТО і Р – це розуміння того, на що, на які об'єкти і які роботи плануються засоби ремонтного фонду, скільки коштує кожна з цих робіт.

2. Обґрунтованість витрат на ТО і Р – це усвідомлений вибір між витратами на підтримку працездатності устаткування і розміром ризику в разі не виконання ремонту.

Для забезпечення прозорості і обґрунтованості витрат на ТО і Р ТП необхідно:

- впровадити пооб'єктне планування ремонтного фонду;
- прив'язати витрати на ремонт до технічного стану і фактичного завантаження обладнання;
- впровадити оцінку ризику невиконання ремонтів і систему ухвалення рішень на основі ризиків.

Для якісного і ефективного вирішення розглянутих вище проблем та завдань необхідне створення інтелектуальної системи моніторингу і діагностування обладнання ТП.

Інтелектуальні системи ТО і Р, моніторингу та діагностування ТП повинні передбачати комплекс організаційних і технічних заходів щодо управління технологічними процесами на ТП, моніторингу і діагностуванню устаткування, плануванню, підготовці і реалізації ТО і Р обладнання ТП за фактичним технічним станом.

Основні концептуальні підходи з вирішення цієї проблеми:

- контроль фактичного стану об'єктів інфраструктури ТП та своєчасна діагностика з використанням інформації різних діагностичних систем;

- аналіз роботи обладнання ТП і дій технічного персоналу відповідно до регламентів для ухвалення управлінських рішень, скорочення часу відновлення і експлуатаційних витрат;

- проведення аналізу ефективності використання діагностичних засобів;

- розробка автоматизованої системи управління ТО і Р ТП, а також автоматизованого робочого місця чергового персоналу ТП (АРМ ТП), з урахуванням таких напрямів: паспортизація обладнання; реєстрація аварійних ситуацій і заявок на обслуговування об'єктів ТП; нормування робіт з ТО і Р; планування матеріалів і запчастин; планування і аналіз витрат на ТО і Р; планування ТО і Р; управління роботами; контроль якості виконаних робіт тощо.

11.2 Аналіз засобів контролю технічного стану та сучасні методи діагностування електрообладнання

Велика різноманітність видів устаткування і завдань технічного діагностування привела до того, що нині застосовуються засоби діагностування різних принципів побудови й призначення. Усі ці засоби розрізняються за такими ознаками: способами технічної реалізації; конструктивним виконанням; розташуванням відносно об'єкта діагностування; ступенем автоматизації; універсальністю; принципами дії на об'єкт діагностування; формою обробки й подання інформації про стан об'єкта; режимами роботи тощо. На рис. 11.2 відображено класифікацію технічних засобів діагностування.

До апаратурних засобів діагностування відносять різні пристрої: прилади, пульти, стенди, спеціальні промислові комп'ютери. Апаратурні засоби, що утворюють з об'єктом діагностування конструктивне єдине ціле, є вбудованими апаратурними засобами діагностування. Прикладами таких засобів можуть бути прилади вимірювань електричних величин (струму, напруги, потужності, частоти й тому подібне), пристрої індикації технічного стану елементів

(реле, світловипромінювальні діоди, неонові лампи й т. ін), пристрої контролю ізоляції тощо.

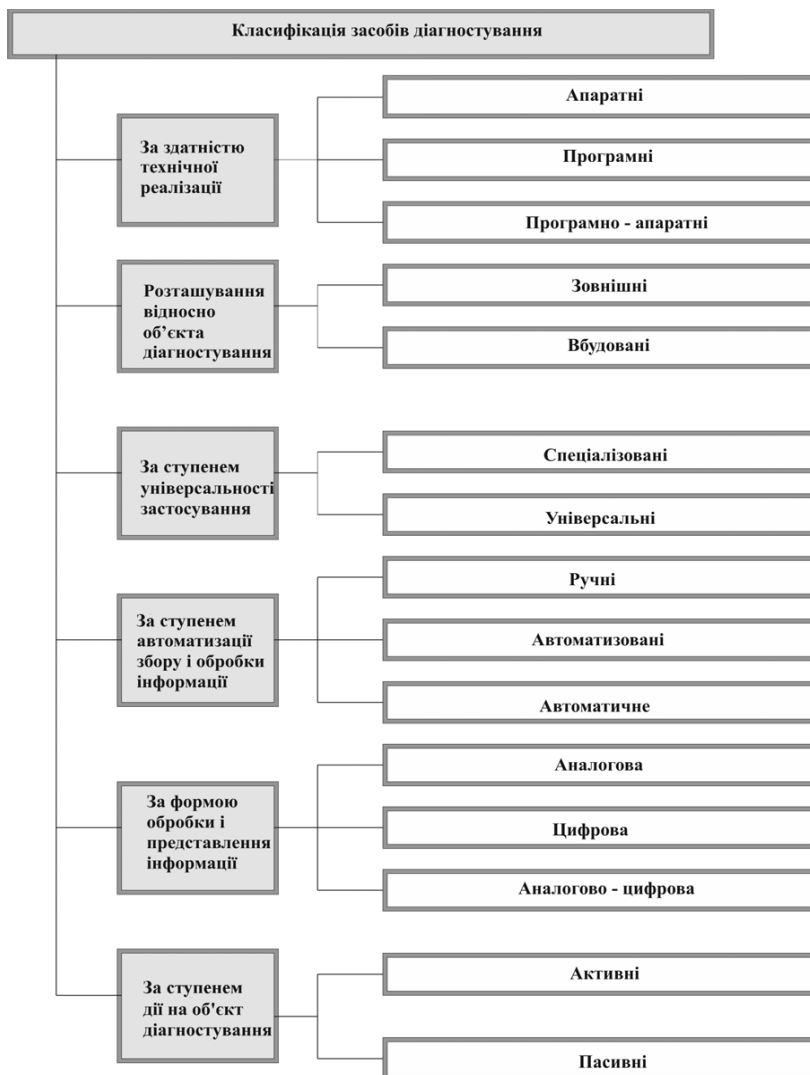


Рисунок 11.2 – Класифікація технічних засобів діагностування

Якщо в схемах експлуатації електроустаткування вбудовані засоби діагностування не передбачені або їх недостатньо для діагностування з необхідною достовірністю, то застосовують зовнішні апаратні засоби діагностування, що виконані окремо від конструкції устаткування і підключаються до нього лише в процесі діагностування. Простими прикладами зовнішніх апаратних засобів можуть бути комбіновані прилади для вимірювань в колах постійного і змінного струму, тестери логічного стану, електронно-променеві й цифрові осцилографи, переносні вимірювальні комплекти й т. ін.

Коли апаратні засоби діагностування призначені тільки для однотипного устаткування, то вони є спеціалізованими, а якщо для устаткування різного конструктивного виконання і функціонального призначення, то універсальними.

Зовнішні спеціалізовані засоби діагностування, це пристрої, використовувані, наприклад, для перевірки працездатності окремих елементів або вузлів електроустаткування на стадіях технічного контролю після виконання ремонтних робіт.

До вбудованих спеціалізованих засобів діагностування можуть входити спеціально розроблені обчислювальні пристрої з жорстко запрограмованими алгоритмами діагностування конкретної системи електроустаткування.

Програмні засоби діагностування є комп'ютерними програмами, які керують роботою устаткування відповідно до алгоритму діагностування. Вони застосовні, наприклад, для програмованих контролерів, мікропроцесорних систем управління релейним захистом та інших. Програми забезпечують технічне діагностування устаткування як у процесі використання його за прямим призначенням (робочі програми), так і при короткочасній перерві функціонування об'єкта (спеціальні, випробувальні програми). Програмні засоби у поєднанні з апаратними утворюють програмно-апаратні засоби діагностування, що дозволяють вирішувати завдання самодіагностування устаткування, наприклад, на основі сучасних SCADA-систем.

Універсальні засоби діагностування технічно складніші і, як правило, побудовані на базі серійних промислових комп'ютерів.

За ступенем автоматизації засоби діагностування можуть бути ручними, автоматизованими й автоматичними. Застосування ручних засобів потребує участі людини-оператора і в підключенні засобів до об'єкта діагностування, і в прийнятті рішень про його технічний стан. Такий підхід знижує продуктивність і об'єктивність діагностування. Як правило, ручні засоби виконуються спеціалізованими.

Автоматизовані засоби вимагають часткової участі оператора для їх підключення до устаткування і вибору режимів діагностування. Основна ж процедура діагностування, включаючи видачу інформації про технічний стан устаткування, здійснюється автоматично.

Автоматичні засоби (мікропроцесорні комплекти, мікро- і міні-ЕОМ) вирішують завдання діагностування без втручання людини. Автоматизовані й автоматичні засоби можуть бути як спеціалізованими, так і універсальними, вони мають високу швидкодію і достовірність діагностування. Залежно від форм обробки і представлення інформації технічні засоби діагностування можуть бути розділені на аналогові, цифрові й цифро-аналогові.

За дією на об'єкт діагностування технічні засоби можуть бути активними й пасивними. Активні впливають на об'єкт, посилаючи в нього сигнал, що викликає реакцію об'єкта, яка потім і аналізується. Збудуючі сигнали можуть бути імпульсними, ступеневими, гармонійними та ін. Пасивні засоби виконують лише вимірювання, обробку й оцінку сигналів, що характеризують стан об'єкта.

З усього різноманіття засобів діагностування в енергетиці найбільше застосування нині знаходять апаратні засоби для визначення працездатності й несправності окремих складальних одиниць електроустаткування. Програмні й програмно-апаратні засоби діагностування набувають широкого впровадження з поширенням мікропроцесорних систем і обчислювальної техніки.

Методи діагностування електрообладнання. Особливості, методичні та інформаційні засади методів діагностування електрообладнання досить різноманітні й детально описані в спеціальній літературі. Тому далі зробимо лише загальний огляд найбільш поширених у сучасній практиці методів контролю.

Найбільш вживаними й перспективними методами діагностування силового електрообладнання системи тягового електропостачання є такі:

– для силових трансформаторів – хроматографічний аналіз газів, розчинених у маслі; температурний контроль; контроль зносу контактів РПН; тепловізійний контроль трансформатора; реєстрація часткових розрядів в ізоляції;

– вимикачів високої напруги – контроль комутаційного й механічного ресурсу; оцінка стану контактної системи; контроль характеристик приводу; контроль стану ізоляторів; контроль витоку дугогасного середовища (повітря, елєгаз);

– розподільного пристрою і струмопроводу – тепловізійний контроль стану електричних контактів та ізоляторів; дуговий захист;

– електродвигунів – діагностика обриву стержнів короткозамкненого ротора; контроль виткових замикань; вібраційний контроль обмотки статора; контроль підшипникового вузла; контроль і захист від неуспішних пусків; контроль ексцентриситету повітряного зазору між ротором і статором; контроль неповнофазних режимів; контроль напрямку обертання; безперервний селективний контроль активного опору ізоляції; температурний контроль; оцінка витрати ресурсу на основі контролю пускових і тривалих режимів роботи;

– повітряних та кабельних ліній – дистанційна тепловізійна діагностика контактів і підвісної ізоляції; контроль часткових розрядів; діагностика опор ЛЕП; контроль стану ізоляції кабелів.

11.3 Розробка процесно-орієнтованого підходу діагностування та прогнозування технічного стану електрообладнання

Аналіз сучасних методів підвищення ефективності функціонування підприємств показує, що вирішення проблеми вдосконалення управління якістю ТО і Р та діагностування технологічного обладнання повинне здійснюватися на основі застосування досягнень сучасного менеджменту, у тому числі менеджменту якості, який передбачає широке використання принципів процесного підходу і стандартизацію відповідних видів діяльності. Практичне застосування процесного підходу передбачає детальний аналіз та опис виробничого процесу підприємства у вигляді єдиної та узгодженої мережі процесів з урахуванням всіх компонентів, необхідних для якісного функціонування кожного зі складових процесів. При цьому необхідне визначення основного змісту та мети кожного процесу, власника й керівника процесу, нормативів, входів, виходів і ресурсів процесу, вимірюваних параметрів і показників результативності та ефективності процесу, а також опис процесів постачальників і споживачів електроенергії. На сьогодні існують загальні рекомендації щодо впровадження процесного підходу на підприємстві та розробки необхідних для цього стандартів, що утворюють документацію системи керування якістю. Однак вони не враховують специфіку процесу ТО і Р обладнання і тому повинні бути розвинені в напрямку відображення особливостей експлуатації обладнання системи. Тому на цей час є актуальним завдання розробки методу організації та стандартизації процесу ТО і Р обладнання відповідно до принципів процесного підходу з метою підвищення якості робіт, виконуваних ремонтними службами дистанцій електропостачання.

Процесно-орієнтований підхід полягає в тому, що організація розглядається як система взаємопов'язаних видів діяльності. Застосування в організації системи процесів разом з їх ідентифікацією та взаємодією, а також менеджмент процесів спрямований на отримання бажаного результату.

Сам процес – це сукупність взаємопов'язаних видів діяльності з метою перетворення входів у виходи (рис. 11.3).

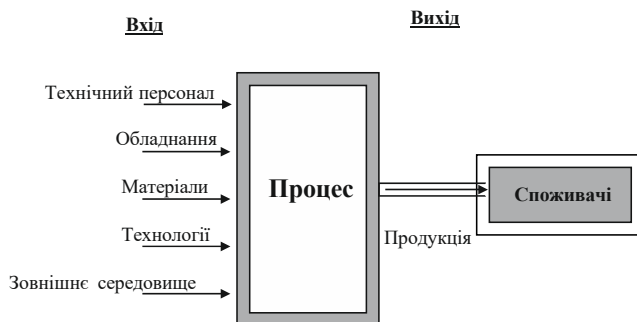


Рисунок 11.3 – Структурна схема процесно-орієнтованого підходу

Пріоритетність процесів і методи, що використовуються для поліпшення діагностування та ТО і Р обладнання ТП, залежать від їх якості та значущості. У першу чергу необхідно покращувати процеси, що мають першочергове значення для підвищення якості показників функціонування ТП. Основними методичними інструментами процесно-орієнтованого управління є оптимізація і інжиніринг бізнес-процесів, збалансована система показників, комплексна діагностика і вдосконалення системи управління, система мотивації персоналу, управління операційними ризиками, цілий ряд інформаційних технологій. На сьогодні існує велика кількість методів діагностування обладнання на ТП і загалом в енергетиці, але не всі вони зручні, точні й практичні. Тому ефективна та якісна діагностика займає актуальне місце в сучасній енергетиці, у тому числі це стосується силового обладнання ТП.

У сучасних економічних умовах експлуатації силового електрообладнання ТП необхідно розробляти та використовувати нові принципи, методи та моделі, що забезпечать якість системи ТО і Р обладнання ТП. Система ТО і Р основного електрообладнання ТП являє собою складну ієрархічну структуру, схильну до впливу великої кількості експлуатаційних факторів. Також практично існують два процеси: з одного боку – забезпечення електроенергією споживачів, пов'язане з

якістю експлуатації обладнання ТП; з іншого – необхідність утримання обладнання в працездатному стані. У цих умовах завдання безперебійного і якісного електропостачання ЕРС залізниць значною мірою залежить і визначається системою ТО і Р, якій належить ключова роль в забезпеченні якісного технічного стану обладнання, що відповідає вимогам до дистанції електропостачання, і тим самим сприяє досягненню вказаної мети.

Застосування процесного підходу діагностування та ТО і Р силового електрообладнання ТП дозволить виявити фактори, що впливають на якість їх функціонування за допомогою різних методів (математичних, статистичних, оптимізаційних, експертних), а також дозволить вдосконалити процес ТО і Р за рахунок впровадження новітніх технологій та методів моніторингу, діагностики, ТО і Р та підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Одним із таких методів є графічний метод, який передбачає побудову причинно-наслідкової діаграми, яка забезпечує простоту, наочність та візуалізацію процесів оперативного контролю якості. Такий підхід запропоновано японським вченим К. Ісікавою, спеціалістом у теорії управління якістю.

Згідно з теорією К. Ісікави та враховуючи проведені дослідження, надійне функціонування ТП можна оцінити питомою пошкоджуваністю обладнання, яка вказує на основні порушення нормальної роботи ТП за рахунок недосконалості:

- системи ТО і Р пристроїв ТП;
- системи діагностики ТП;
- технічного забезпечення та методів ТО і Р пристроїв ТП;
- роботи зовнішньої енергосистеми;
- людського фактора.

Враховуючи розглянуте, побудуємо причинно-наслідкову діаграму Ісікави (рис. 11.4) аналізу порушень у роботі тягової підстанції.

Причинно-наслідкова діаграма Ісікави показує найбільш вагомі фактори, які впливають на порушення нормальної роботи обладнання. Як бачимо з рис. 11.4, до них можна віднести: недоліки методів вимірювання та діагностування, недосконалість системи ПЗР, відсутність сучасного інструментарію діагностування параметрів роботи обладнання ТП, недостатній рівень автоматизації процесів діагностування та ТО і Р, відсутність сучасних вимірювальних приладів для виконання якісних робіт з діагностування обладнання.

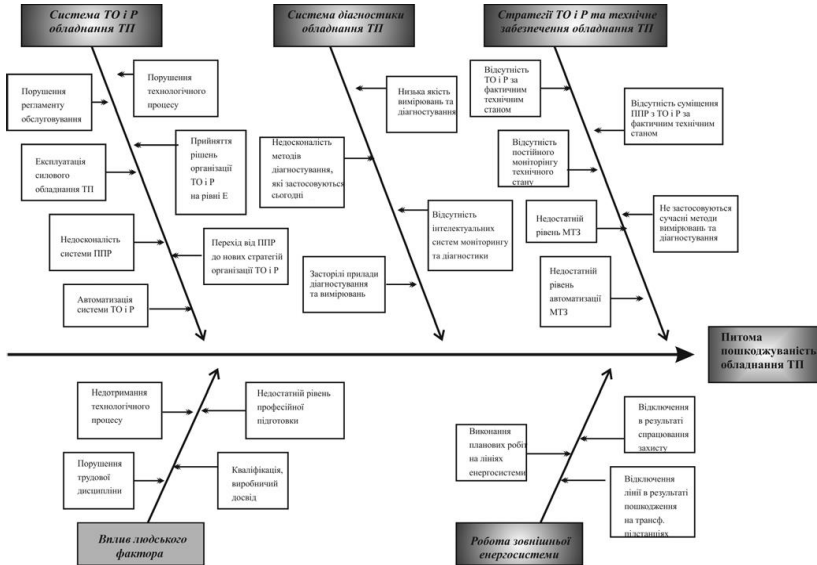


Рисунок 11.4 – Причинно-наслідкова діаграма Ісікави аналізу порушень нормальної роботи ТП

Застосування тягової підстанції. У результаті діагностування електрообладнання в процесі експлуатації здійснюється раннє виявлення дефектів і визначається його технічний стан у поточний момент часу. З позиції вибору оптимальної стратегії технічного обслуговування і ремонту потрібно здійснювати прогноз розвитку дефектів і перспективну оцінку технічного стану на наступний період експлуатації. Прогнозування технічного стану підвищує ефективність діагностування. Методи прогнозування реалізуються на підставі алгоритмів і програм діагностування електрообладнання. Описані в літературі різні методи, що застосовуються при прогнозуванні технічного стану машин і механізмів, можна розділити на *аналітичні*, *ймовірнісні* та *розпізнавання образів*.

Метод *аналітичного* прогнозування дозволяє отримувати параметри обладнання, розмірність яких відповідає розмірності контрольованих параметрів. При цьому значення обчислених параметрів характеризують перебіг процесу в часі. Цей метод, як правило, застосовується, коли відома аналітична залежність функції зміни діагностичного параметра в часі.

Особливістю методу *ймовірнісного* прогнозування є визначення ймовірності збереження працездатності обладнання у

функції часу, тобто результат прогнозу визначає ймовірність виходу або невиходу контрольованого діагностичного параметра за допустимі межі. При цьому визначаються ймовірнісні характеристики: щільність розподілу значень параметрів, математичне сподівання і дисперсія.

Метод розпізнавання образів (статистичної класифікації) полягає в тому, що прогнозування можна починати з моменту здійснення одноразового контролю обладнання, що діагностується. У результаті прогнозу контрольований об'єкт відносять до того чи іншого класу технічного стану, який встановлюють заздалегідь за критерієм працездатності або довговічності й приймають за еталон (образ). Потім, виходячи із закономірності зміни параметрів даного класу, вирішують, як буде змінюватися цей параметр у майбутньому.

Вибір методу прогнозування багато в чому визначається необхідною точністю і достовірністю. Отримати абсолютно точний прогноз технічного стану проблематично. Це зумовлено безліччю факторів, що впливають на процес прогнозування. До основних із них можна віднести: ступінь вивченості досліджуваного діагностичного процесу, глибину і частоту діагностування, точність вимірюваних параметрів, вибраний метод прогнозування та ін. Тому точність прогнозування технічного стану електрообладнання можна оцінити тільки орієнтовно. У результаті цього випадкова складова у змінах діагностичних параметрів є визначальною.

При прогнозуванні технічного стану електрообладнання вирішуються такі завдання:

- виявляються складальні одиниці електроустаткування, технічний стан яких значно зміниться в наступний період експлуатації;
- контролюються параметри і ознаки зміни технічного стану електрообладнання; здійснюється порівняння діагностичних параметрів з величинами їх нормативних значень;
- нормуються значення діагностичних параметрів;
- фіксується момент, абсолютне значення і тривалість виходу діагностичних параметрів електрообладнання за допустимі межі;
- виконуються накопичення, відображення і реєстрація обробленої інформації;
- проводиться первинна обробка діагностичної інформації про технічний стан устаткування;
- обчислюються поточні та перспективні значення узагальнених ресурсних показників технічного стану контрольованого електрообладнання;
- призначаються терміни проведення профілактичних робіт, спрямованих на підвищення рівня працездатності електрообладнання;

– надається інформація персоналу про технічний стан та рекомендації про доцільні зміни процесу експлуатації кожної одиниці електрообладнання.

Опис математичного апарату деяких найбільш простих і застосовуваних методів прогнозування технічного стану та ресурсу електрообладнання наведено. До них належать такі методи прогнозування: лінійний; багатоступеневий лінійний; за середнім статистичним зміни параметра; за реалізацією зміни параметра та ін. Методи прогнозування ґрунтуються на результатах контролю технічного стану та реалізуються за допомогою алгоритмів і програм діагностування електрообладнання.

11.4 Подальший розвиток інтелектуальних систем моніторингу та діагностування силового електрообладнання

Застосування інтелектуальних систем моніторингу та діагностування (ІСМД) у світовій практиці стало загальноприйнятим при модернізації діючих та будівництві нових підстанцій. Однак існуючий підхід до впровадження ІСМД зводиться в більшості випадків тільки до діагностування індивідуально силового електрообладнання (трансформатори, автотрансформатори, реактори) або до впровадження розрізнених систем діагностики силового, вимірювального, захисного обладнання.

Цей підхід до впровадження ІСМД не дозволяє забезпечити високі вимоги до достовірності діагностичної інформації, оскільки використання розрізнених систем, як правило, призводить до недостатності інформації від первинних датчиків у системах і необґрунтованого подорожчання системи діагностування через необхідність дублювання первинних датчиків і засобів вимірювання.

На наш погляд, інтелектуальна система моніторингу та діагностування силового електрообладнання ТП повинна здійснювати достовірну, процесну, багатоаспектну оцінку технічного стану обладнання з використанням нових методів і критеріїв оцінки, які підвищують оперативність і якість організації ТО і Р електрообладнання. ІСМД повинна являти собою комплекс організаційних і технічних заходів з управління технологічними процесами на ТП, моніторингу та діагностування обладнання ТП, планування, підготовки та реалізації ТО і Р.

ІСМД повинна забезпечити: інформаційну та методичну підтримку персоналу при організації обслуговування електрообладнання на основі їх фактичного технічного стану. У режимі діалогу за формалізованим запитом надаються відповідні дані (від

загально технічних і паспортних джерел інформації) щодо до рекомендацій обсягу та періодичності ремонтів.

Для отримання характеристик надійності обладнання в умовах експлуатації, аналізу причин виникнення відмов і несправностей, розробки заходів щодо подальшої експлуатації обладнання необхідна вичерпна інформація про технічний стан електрообладнання ТП. Актуальність цього завдання зумовлюється також збільшенням кількості електроустановок, термін служби яких перевищує розрахунковий.

Аналізуючи досвід, пропонуємо структуру системи збору та обробки інформації ІСМД (рис. 11.5), яка складається з таких взаємопов'язаних підсистем (програмних комплексів), в основу їх покладено єдине інформаційно-технічне забезпечення, що відображає специфіку їх функціонування:

- інформація про фактичний технічний стан електрообладнання ТП;
- розрахунок і аналіз експлуатаційної надійності обладнання;
- підвищення залишкового терміну служби силового обладнання ТП.

Задача ІСМД забезпечувати експлуатаційний персонал даними про дійсний фактичний технічний стан силового електрообладнання ТП, про його пошкоджувальність і ремонтно-технічне обслуговування. Також ІСМД дозволяє провести аналіз експлуатаційної надійності обладнання, розрахувати показники безвідмовності, ремонтпридатності та довговічності, дати рекомендації щодо зниження аварійності та підвищення залишкового терміну служби електрообладнання ТП. Вихідною ланкою інформаційної системи є первинні форми обліку інформації про надійність обладнання.

Підсистема «Інформація про технічний стан електрообладнання ТП» (див. рис. 11.5) забезпечує введення, коригування, перегляд і друк паспортних даних та статистичної інформації з експлуатації та ремонтно-технічного обслуговування, профілактичних випробувань встановленого електрообладнання.

Підсистема «Розрахунок і аналіз експлуатаційної надійності електрообладнання ТП» (рис. 11.5) дозволяє реалізувати на програмному рівні завдання оцінки технічного стану обладнання.

Рекомендації щодо підвищення залишкового терміну служби електрообладнання ТП передбачають пропозиції щодо зниження кількості автоматичних відключень, вдосконалення ремонтного обслуговування, продовження терміну служби.



Рисунок 11.5 – Структура системи збору та обробки інформації ІСМД ТП

Вирішення вищезазначених завдань можливе за рахунок:

1. Організації безперервного контролю та аналізу умов експлуатації контрольованого обладнання ТП, у тому числі в попередній період часу, аналіз функціональних елементів (вузлів) обладнання при різних режимах роботи, зокрема з урахуванням електричних, теплових, механічних та інших впливів, а також з урахуванням метеорологічних умов.

2. Вимірювання в реальних умовах експлуатації діагностичних параметрів всіх елементів контролюваного обладнання.

Виконання даних завдань можливе за допомогою використання систем безперервного контролю стану обладнання, що дозволить значною мірою знизити витрати на ремонт обладнання, за рахунок переходу від ремонту в нормативно встановлені терміни до проведення ремонтів залежно від фактичного стану обладнання.

3. Спільного аналізу результатів попередніх етапів роботи. Тут слід особливо виділити корисність аналізу динаміки зміни в часі діагностичних параметрів і пошуку кореляційних зв'язків між характеристиками впливів і контрольованих параметрів.

Такий аналіз свідомо ефективніший від простого порівняння результатів вимірювань з офіційними нормами НТД.

З урахуванням запропанованої системи збору та обробки інформації можна розглянути варіант ІМСД безперервного контролю та оцінки фактичного технічного стану силового електрообладнання тягової підстанції (рис. 11.6).

Комплексна система безперервного контролю фактичного технічного стану силового електрообладнання ТП, включає в себе три рівні:

1 – первинні датчики, сигналізатори, вимірювальні системи з аналоговим або цифровим виходом, встановлені на обладнанні;

2 – блок моніторингу з контролерним обладнанням, що виконує функції збору даних від датчиків, їх обробку, зберігання та передачу даних на верхній рівень по оптоволоконній мережі. Конструктивно блок моніторингу повинен являти собою сталеву шафу зовнішньої установки з системою клімат – контролю та встановлюється безпосередньо біля одиниці силового електрообладнання;

3 – АРМ оператора автоматизованої системи безперервного контролю, сервер АІС ТП, що виконують функції візуалізації значень параметрів, відображення сигналів спрацьовування аварійної та попереджувальної сигналізації, а також для роботи з накопиченими архівами і зв'язку з АРМ енергодиспетчера вищої ланки.

За допомогою системи безперервного контролю силових трансформаторів (автотрансформаторів) здійснюється:

1. Контроль теплового стану трансформаторного обладнання:
 - контроль температури верхніх шарів масла;
 - контроль температури найбільш нагрітої обмотки;
 - визначення кратності й тривалості допустимих перевантажень.
2. Контроль вмісту в маслі газів.
3. Контроль вмісту вологи масла.

4. Контроль стану РПН.
5. Контроль стану високовольтних вводів.
6. Ступінь старіння ізоляції.
7. Температура утворення бульбашок.
8. Реєстрація та аналіз підвищень напруги за часом.
9. Оцінка стану ефективності системи охолодження.

Системи безперервного контролю трансформаторів струму і високовольтних вводів. Вимірювальні трансформатори є однією з найбільш аварійно-небезпечних ланок енергосистем, у більшості випадків аварії трансформаторів струму високої напруги (ТС) супроводжуються повним руйнуванням апарату, а іноді й сусіднього обладнання. Аналіз даних про відмови свідчить про те, що найбільш характерними дефектами для ТС є місцеві дефекти, розвиток яких призводить або до теплового пробою, або до появи часткових розрядів і електричного пробою основної ізоляції. Такі дефекти на ранній стадії розвитку можуть бути виявлені вимірами тангенса кута діелектричних втрат під робочою напругою і тепловізійними вимірами.

Система безперервного контролю виткової ізоляції вимірювальних трансформаторів напруги. Ця система може використовуватися як окремо, так і як підсистема моніторингу підстанційного обладнання спільно із системами контролю основної ізоляції вводів і трансформаторів струму. Існуючі системи являють собою готові до використання програмно-апаратні комплекси. Кількість підключених ТН до системи – від 1 до будь-якої необхідної кількості. Збільшення кількості підключених ТН позитивно позначається на точності системи, тому дає можливість відрізнити несиметрію напруг від аварійної ситуації.

Система здійснює вимірювання таких сигналів:

– безперервне вимірювання діючого значення основної гармоніки напруги $3U_0$;

– безперервне вимірювання діючого значення 3-ї гармоніки напруги $3U_0$.

Основні функції системи:

– реєстрація всіх вимірних значень у базу даних;

– реєстрація кількості та тривалості короточасних періодичних несиметрій напруги, що наявні на початковому етапі розвитку дефекту;

– видача аварійних повідомлень за встановленими користувачам уставками;

– часові затримки спрацьовування уставок;

- видача дискретних сигналів («сухий контакт») у разі перевищення уставок;
- самодіагностика системи.

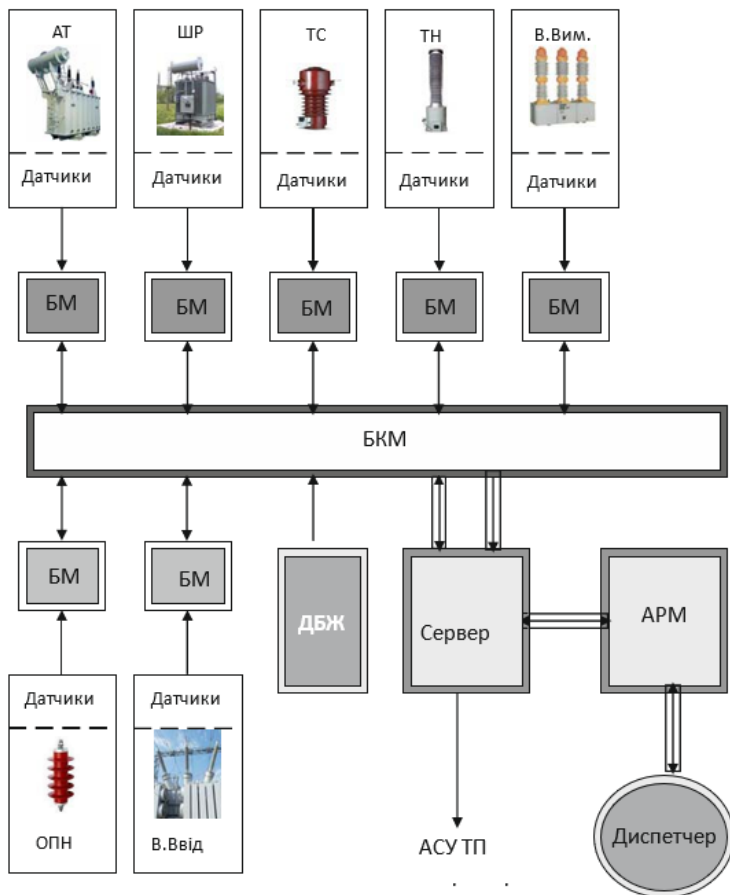


Рисунок 11.6 – Структурна схема комплексної системи безперервного контролю силового електрообладнання ТП: АТ – автотрансформатор;

ШР – шунтуючий реактор; ТС – трансформатор струму; ТН – трансформатор напруги; В.Вим. – високовольний вимикач; ОПН – обмежувач перенапруги; В.Ввід – високовольний ввід; БМ – блок моніторингу; БKM – блок концентрації мережі; ДБЖ – джерело безперервного живлення; АРМ – автоматизоване робоче місце

Система повинна комплектуватися повним набором програмного забезпечення, яке надає користувачеві інформацію у вигляді мнемосхем поточного стану обладнання; історичних і динамічних трендів параметрів обладнання; попереджувальних, аварійних сигналів, службової та діагностичної інформації.

Система здійснює:

- реєстрацію інформації про нормальні, передаварійні та аварійні події; зберігання архівів усіх параметрів у контролері на твердотільній незалежній пам'яті за період 30 років;

- надання всіх даних (поточних та історичних) як локальним користувачам на підстанції, так і віддаленим користувачам.

Система безперервного контролю стану високовольтних обмежувачів перенапруг (ОПН) [27, 28]. Призначена для діагностики стану, визначення зносу варисторів ОПН і ступеня забрудненості поверхні ізолятора.

Діагностичні методи базуються на аналізі гармонійних складових струму провідності, з урахуванням робочої напруги ОПН.

У цілому, оцінюючи діагностичні можливості систем безперервного контролю, можна зробити висновок:

- ІСМД не дає таких докладних і «глибоких» діагностичних висновків, як комплексне обстеження трансформатора, але завдяки оперативності та «безперервності» режиму діагностики дозволяє своєчасно контролювати зміну технічного стану трансформаторного устаткування;

- актуальність діагностичних висновків, одержуваних ІСМД, зазвичай вище, ніж за результатами комплексного обстеження трансформатора. Це пояснюється «безперервним» режимом роботи системи безперервного контролю та діагностики стану трансформаторного устаткування;

- дані, одержувані ІСМД, можуть бути піддані додатковій обробці та аналізу, якщо залучати до цього кваліфікованих експертів. Так чинять в тому випадку, коли виникає необхідність прийняття важливих рішень, що накладають обмеження на режими роботи трансформаторного обладнання, або при необхідності виведення його з режиму експлуатації;

- системи безперервного контролю ізоляції ТС і високовольтних вводів покликані забезпечити зниження аварійності, а також накопичення даних, необхідних для вдосконалення системи діагностики, автоматизацію вимірювань і аналізу, зменшення обсягу робіт персоналу, зниження впливу людського фактора, автоматичного запису і зберігання даних вимірювань, виявлення тенденцій і швидкості

зміни параметрів і своєчасного отримання сигналів про відхилення, якчерговим персоналом підстанції, так і службами діагностики залізниці. Вони повинні дозволити планувати ремонти обладнання при необхідності, проводити термінове відключення об'єктів, що знаходяться в передаварійному стані.

Застосування комплексних автоматизованих систем діагностики обладнання тягових підстанцій є ефективним і економічним та дозволяє виявити дефекти в стадії їх розвитку з визначенням першопричин зміни стану електрообладнання. ІСМД дає можливість поряд з плануванням термінів проведення ремонту, чітко визначити обсяг технічної програми ТО і Р. Таким чином, можна запобігти виникненню аварійних режимів, викликаних випадковою зміною стану електрообладнання, визначати залишковий ресурс та достовірно прогнозувати життєвий цикл силового електрообладнання ТП. Також використання ІСМД дозволяє забезпечувати необхідною інформацією для прийняття рішень від персоналу підстанції до фахівців служби електропостачання залізниці.

З вищезрозглянутого можна зробити висновок, що при комплектації тягових підстанцій ІСМД доцільно розглядати тягову підстанцію (економічно та технічно) як об'єкт діагностики в цілому. У цьому випадку питомі витрати на кожен об'єкт діагностики будуть мінімальними. Однак, з урахуванням обмежень у фінансуванні, доцільно встановлювати апаратуру та датчики діагностування на найбільш дорогому й відповідальному електрообладнанні ТП з можливістю подальшого розширення переліку контрольованого обладнання. На початковому етапі впровадження такий підхід призведе до незначного подорожчання системи безперервної діагностики, приблизно на 10–15 %, з подальшою окупністю при подальшому нарощуванні числа підсистем. Створення та впровадження комплексних систем діагностування електрообладнання ТП є основою для створення інтелектуальних електроенергетичних систем тягового електропостачання залізниць. Досвід багаторічної роботи в області безперервної діагностики, яка використовується провідними експлуатуючими організаціями та виробниками обладнання України визначають основні типи обладнання, стан якого доцільно безперервно контролювати в процесі експлуатації, а також критерії оцінки стану вказаного обладнання та первинні датчики, необхідні для цього. Комплексна система безперервного контролю повинна будуватися з використанням єдиного центрального сервера (див. рис. 11.6), який виконує функції збору, обробки, зберігання та видачі діагностичної

інформації, а також необхідної кількості вторинних перетворювачів та первинних датчиків (без дублювання).

Таким чином, комплексний підхід до моніторингу основного силового електрообладнання ТП дозволяє отримати такі переваги:

- виключити дублювання первинних датчиків і відповідно зменшити їх загальну кількість приблизно на 40 %;

- зменшити сумарну кількість вхідних каналів вторинних засобів вимірювання приблизно на 30–50 %;

- підвищити достовірність діагностики за рахунок використання додаткової інформації, отриманої від інших підсистем (наприклад, сигнали від вимірювальних обмоток трансформаторів напруги завжди заводяться в систему діагностування силового трансформатора і, як правило, не заводяться в системи контролю ізоляції вводів і трансформаторів струму, а використання цього сигналу в зазначених системах значно підвищить точність діагностичної інформації);

- підвищити зручність і ефективність діагностики за рахунок можливості використання єдиного сервера з комплексною програмною оболонкою для видачі інформації персоналу підстанції та можливістю інтеграції в системи планування ремонтів і обслуговування (АСУ ТО і Р) верхнього рівня (рис. 11.6).

Впровадження концепції інтелектуальної системи ТО і Р, моніторингу та діагностування силового електрообладнання ТП дозволить:

- підвищити основні показники системи ТО і Р;

- забезпечити прозорість та обґрунтованість ТО і Р ТП;

- знизити технологічні порушення та забезпечити запобігання аварій;

- забезпечити всю вертикаль управління достовірною інформацією про технічний стан устаткування ТП в масштабі реального часу;

- отримувати і обробляти масиви діагностичної інформації про стан електроустаткування підстанції, необхідної і достатньої для організації ремонтно-експлуатаційного обслуговування устаткування за фактичним технічним станом та якісного використання ресурсу силового обладнання ТП;

- знизити витрати на експлуатацію силового устаткування;

- підвищити надійність електропостачання та знизити аварійність силового устаткування за рахунок:

- виявлення потенційно небезпечних режимів роботи силового і комутаційного обладнання ТП;

оперативного контролю ресурсу силового устаткування, своєчасного попередження про його зниження, запобігання його аварійним uszkodженням;

контролю своєчасності планово-профілактичних перевірок і ремонтів силового устаткування;

можливості переходу від планово-попереджувальною системи ТО і Р до системи обслуговування і ремонтів за фактичним технічним станом;

- централізованого обліку відмов силового устаткування;

отримати економічний ефект, основними складовими якого є:

- скорочення витрат на необґрунтоване оновлення устаткування і його комплексне обстеження;
- скорочення чисельності персоналу в результаті впровадження автоматизованих методів діагностики;
- зниження витрат на проведення ТО і Р;
- скорочення випадків відключення подачі електроенергії з причини відмови устаткування;
- скорочення випадків штрафних санкцій з боку споживачів за заподіяний збиток при виході з ладу електроустаткування, тощо.

11.5 Наукове обґрунтування та розробка методу підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання

Для зниження економічних втрат і підвищення терміну експлуатації електрообладнання ТП необхідно отримати інформацію щодо експлуатаційної надійності цього обладнання, на підставі якої слід розробити заходи щодо більш коректної та відповідальної експлуатації електрообладнання ТП, а також скласти методичні вказівки щодо вдосконалення системи ТО і Р з метою продовження терміну служби.

Величини, що характеризують надійність (показники надійності) конкретного обладнання або технологічної системи, мають ймовірнісний характер. Це означає, що той чи інший показник надійності досить точний лише стосовно великої кількості зразків або одного зразка, але за умови, що спостереження за ним ведеться так довго, що є можливість спостерігати велику кількість відмов.

Ймовірнісний характер показників надійності зумовлений тим, що більшу частину свого терміну служби технічний об'єкт перебуває на етапі нормальної роботи, коли відмови відбуваються раптово, тобто мають випадковий характер.

Однак і на етапі зносу і старіння, незважаючи на те що наближення відмови того чи іншого об'єкта можна передбачити (тобто

він має не випадковий, а закономірний характер), сам момент відмови точно передбачити неможливо. Звідси, час безвідмовної роботи так само, як і на етапі нормальної роботи, є випадковою величиною. Враховуючи це, визначимо основні напрямки у визначенні фактичних значень показників, які характеризують експлуатаційну надійність електрообладнання ТП на стадії експлуатації.

Експлуатаційна надійність розглядається як складна властивість, яка включає такі показники: безвідмовність, працездатність, довговічність, ремонтпридатність та значною мірою залежить від умов експлуатації. Під експлуатаційною надійністю електрообладнання розуміється його здатність зберігати працездатність у ході використання протягом певного часу.

В умовах експлуатації кількісну оцінку безвідмовної роботи системи тягового електропостачання отримують за результатами обробки експлуатаційних даних шляхом розрахунку відношення кількості об'єктів системи, які безвідмовно пропрацювали до моменту часу t , до кількості об'єктів, працездатних у початковий момент часу.

Розрізняють плановані й фактичні значення показників експлуатаційної надійності. Відповідно їх прив'язують до року експлуатації електрообладнання ТП (1-й, 2-й і т.д.) і умов роботи (природно-кліматичні та вид виконуваних робіт). Також слід мати на увазі, що рівень надійності окремого обладнання зменшується за роками експлуатації. Особливо інтенсивно це спостерігається після 3-4 років використання.

На практиці широко застосовуються ефективні інформаційні системи, що дозволяють визначати показники надійності окремого обладнання за певний календарний проміжок часу.

Щодо кращих світових зразків обладнання стосовно конкретної моделі техніки, можна розрізнити «високий», «середній» і «низький» рівні експлуатаційної надійності з певними значеннями показників надійності.

Цілком очевидно, що в досягненні певного рівня експлуатаційної надійності обладнання ТП беруть участь підприємства (підрозділи), що здійснюють його проектування, виготовлення та експлуатацію.

Пропонована схема формування рівня експлуатаційної надійності електрообладнання ТП у своєму складі має такі групи заходів:

- група заходів з індексом «В», яка впливає на здатність електрообладнання працювати без зупинок з технічних причин;
- група заходів з індексом «С», яка впливає на тривалість

зупинок електрообладнання з технічних причин.

Використовуючи досвід підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання, визначимо ефективний склад комплексних заходів груп «В» і «С».

Визначений ефективний склад комплексних заходів групи «В» (можливість роботи електрообладнання без зупинки внаслідок порушення його працездатності) такий:

В1 – забезпечення безвідмовності й довговічності;

В2 – забезпечення ремонтпридатності обладнання (присосованість до ТО і діагностування);

В3 – забезпечення якості виготовлення електрообладнання ТП;

В4 – забезпечення науково-технічною та експлуатаційною документацією. Правильна експлуатація;

В5 – організація експлуатації електрообладнання ТП;

В6 – організація технічного сервісу (підтримка працездатності обладнання ТП).

Забезпечення безвідмовності й довговічності електрообладнання ТП (В1)

Для вирішення цієї проблеми можна запропонувати такі дії:

– розробка вимог, пропозицій та стратегій ТО і Р для підвищення довговічності й безвідмовності обладнання ТП в цілому, її систем і елементів;

– розробка якісної конструкторської та технологічної документації, виконання положень якої забезпечує довговічність та безвідмовність обладнання;

– оцінка ступеня виконання встановлених вимог до надійності на експериментальних зразках елементів електрообладнання за допомогою стендових випробувань та випробувань дослідних зразків обладнання в експлуатаційних умовах дистанцій електропостачання;

– коригування нормативно-технічних документів ТО і Р за результатами випробувань;

– поступове підвищення рівня безвідмовності й довговічності елементів електрообладнання на основі результатів його експлуатації, а також за інформацією про відмови, що надходять від інших дистанцій електропостачання;

– впровадження автоматизованих систем збору, обліку інформації про відмови й результатів діагностування електрообладнання ТП в умовах експлуатації та розробка пропозицій щодо підвищення рівня безвідмовності й довговічності електрообладнання ТП тощо.

Приспосованість електрообладнання до технічного обслуговування та діагностики (B2)

У цьому напрямку необхідно забезпечити:

- вільний доступ до найважливіших агрегатів ТП для обслуговування та очищення;
- виведення на пульт управління ТП індикаторів, покажчиків, звукових сигналів і ін., які оперативно інформують оператора про стан елементів електрообладнання;
- по можливості групування в єдині вузли точок обслуговування й візуальних покажчиків;
- можливість установки автоматизованої системи змащення;
- зручну позу технічного персоналу під час обслуговування;
- спрощений ефективний набір інструментів і пристроїв та ін.;
- наявність пристроїв для підключення переносних діагностичних засобів;
- можливість установки на основне силове електрообладнання пристроїв для збору інформації про напрацювання і його технічний стан;
- наявність комп'ютера, який дозволяє оперативно оцінити стан систем основного силового електрообладнання ТП та ін.

Забезпечення якості виготовлення електрообладнання (B3)

Передбачає сукупність дій, які гарантують з необхідною ймовірністю, що електрообладнання буде відповідати встановленим вимогам.

На якість виготовлення електрообладнання впливають:

- організація виробництва (використовуване обладнання, кваліфікація персоналу, технологія виконання робіт, методологія, здійснення менеджменту та ін.);
- контроль якості, що включає:
 - вхідний контроль якості, комплектуючих і матеріалів;
 - вихідний контроль;
 - статистичний контроль якості процесів;
 - коригувальні дії за результатами контролю та ін.;
- забезпечення поліпшення якості виготовлення за результатами експлуатації електрообладнання.

Забезпечення НТД та експлуатаційною документацією. Правильна експлуатація (B4)

У цьому напрямку необхідно забезпечити:

- документацію, що поставляється на ТП разом з обладнанням, повинна включати настанови для інженерно-технічного персоналу, каталог запасних частин і настанови із сервісу (склад робіт з ТО і Р та

діагностування; діагностичні параметри; використовувані прилади, обладнання та інструменти; логічні схеми пошуку причин несправностей (відмов) та ін.);

- рекомендації з організації ефективної роботи інженерно-технічного персоналу, а також детальні інструкції щодо їх роботи;

- програмне забезпечення з планування ТО і Р та аналізу результатів діагностування тощо;

- рекомендації з технології виконання монтажних робіт;

- спеціальні інструкції, наприклад, з виконання робіт при низькій температурі повітря, зі зберігання та ін.;

- рекомендації з розрахунку продуктивності електрообладнання і витрат на його експлуатацію (у т.ч. ТО і Р).

Для властивості електрообладнання «В» зі складу розглянутої документації найбільш важливе значення мають рекомендації для інженерно-технічного персоналу для всіх можливих робочих ситуацій і зі щоденного технічного обслуговування, рекомендації для інженерно-технічного персоналу з проведення ТО і Р та діагностування, рекомендації для інженерного персоналу ТП з технології виконання робіт.

Організація експлуатації електрообладнання ТП (В5)

Повинна включати:

- транспортування;

- монтаж і демонтаж;

- зберігання;

- умови роботи електрообладнання:

- природно-кліматичні умови;

- часовий режим роботи електрообладнання (протягом дня, тижня, місяця, року);

- параметри робочого майданчика;

- особливості споруджуваних електротехнічних об'єктів; використання електрообладнання за призначенням:

- підбір технічного персоналу, його навчання та підвищення кваліфікації (у передовій практиці в навчанні бере участь виробник або дилер);

- установку змінних завдань технічного персоналу, у тому числі на основі рекомендацій виробника за розрахунком продуктивності електрообладнання;

- управління роботою технічного персоналу;

- організацію взаємозв'язку обладнання в комплексі системи тягового електропостачання;

організацію обліку роботи силового електрообладнання ТП тощо.

Комплекс послуг з технічного сервісу електрообладнання ТП (В6)

Усі з перерахованих робіт з технічного сервісу основного силового електрообладнання ТП можуть виконуватися тільки дилером або частина з них виконується тільки дилером, а інша частина самим споживачем або із залученням сторонніх організацій. Наукові дослідження та досвід експлуатації і ремонту технічного обладнання вказують на використання стратегії, за якою:

- значна увага приділяється заходам профілактичного характеру, спрямованим на максимально можливе зменшення відмов електрообладнання;

- необхідність своєчасного здійснення ремонту агрегатів, поки цей ремонт не трудомісткий, не ускладнений і не потребує великих витрат і тривалого простою електрообладнання.

За цієї стратегії найбільшої важливості набувають такі ефективні заходи з підтримки працездатності електрообладнання: технічне обслуговування й ремонт за фактичним технічним станом (у т.ч. при введенні в експлуатацію) та діагностування з визначенням максимально реальних параметрів обладнання. Розходження в затратах на ремонт при прогресивній стратегії та при поширеній на сьогодні роботі до відмови може досягати трикратного значення.

Роботи з підтримки працездатності електрообладнання повинні виконуватися висококваліфікованими сертифікованими фахівцями, які використовують сучасні технології і мають високоякісне обладнання. Провідні виробники здійснюють підготовку (підвищення кваліфікації) сервісного персоналу й беруть участь в оснащенні приладами, пристроями та інструментом.

До складу профілактичних заходів з технічного сервісу також входить забезпечення мастильними матеріалами та охолодними рідинами, що включає:

- придбання мастильних матеріалів, мастильних та охолоджувальних рідин (провідні зарубіжні виробники поставляють фірмові високоякісні експлуатаційні рідини спеціального виготовлення);

- організацію зберігання та підтримання запасів експлуатаційних рідин;

- періодичну очистку масел маслonaповненого силового електрообладнання, у тому числі з використанням мобільних засобів.

Висока якість профілактичних заходів характеризується такими показниками: відхилення від графіка технічного обслуговування $\pm 10\%$, ступінь плановості ремонтів 80–90 %.

Визначений ефективний склад комплексних заходів групи «С» (можливості електрообладнання з відновлення його працездатності) такий:

С1 – забезпечення ремонтпридатності обладнання:

– знаходження несправностей (відмов) та їх причин;

– зручність ремонту.

С2 – організація технічного сервісу (відновлення працездатності електрообладнання).

С3 – забезпечення запасними частинами.

С4 – забезпечення НТД та експлуатаційною документацією (дії з відновлення працездатності електрообладнання та її елементів).

Ефективні конструктивні рішення з ремонтпридатності електрообладнання (С1) включають:

– пристосованість конструкції до знаходження несправності (відмови);

– рішення, що забезпечують зручність ремонту:

– можливість легкого доступу до пошкоджених елементів електрообладнання; можливість швидкого зняття непрацездатних елементів, що не мають складних зв'язків із сусідніми (модульність конструкції);

– можливість використання високоефективних інструментів і пристроїв, у тому числі тих, що поставляються провідними виробниками;

– зручність пози сервісного персоналу при ремонті тощо.

Заходи технічного сервісу з відновлення працездатності електрообладнання (С2). Для виконання ремонту електрообладнання в польових умовах агрегатним методом використовуються спеціально виготовлені мобільні майстерні, оснащені малогабаритним краном високої вантажопідйомності, кузовом для перевезення агрегатів, генератором, зварювальною установкою, компресором, комплексом інструментів і запасних частин та ін.

Стаціонарні майстерні повинні мати:

– прийнятні площі;

– мостові крани достатньо високої вантажопідйомності;

– необхідний набір стендів, обладнання та інструментів;

– можливості з навантаження та доставки;

– обладнання для фарбування та мийки та ін.

Сервісні служби працюють 7 днів на тиждень, 24 години на добу. Є також обмінний фонд агрегатів для виконання ремонту агрегатним методом. Сервісна служба дилера у разі потреби надає кваліфіковані консультації сервісним службам споживача.

У передовій практиці відсоток виконання замовлень на ремонт у місці роботи машини становить: протягом дня – 85 %, протягом доби – 95 %.

Забезпечення запасними частинами сервісних служб (С3) здійснюється з власних складів. При цьому під запасною частиною розуміється складова частина електрообладнання (деталь або складальна одиниця), призначена для заміни такої самої частини, що перебуває в експлуатації.

У складі постачальників можуть бути зовнішні (у т.ч. виробники електрообладнання) і внутрішні (підрозділи, що здійснюють відновлення працездатності агрегатів і деталей електрообладнання).

На складах дилера зберігаються запасні частини, які користуються великим попитом. При цьому на початковому етапі формування запасів запасних частин дилером виробник допомагає визначити оптимальні запаси за номенклатурою і кількістю запасних частин. Надалі виробник допомагає дилеру правильно спроектувати склад, а також сприяє отриманню дилером сучасного програмного забезпечення для обліку запасних частин та управління їх запасами. За контрактом з виробником на основі замовлень здійснюється регулярна поставка запасних частин, що користуються середнім і малим попитом, вони поставляються за замовленням дилера через Інтернет екстреним порядком (у передовій практиці за 24 години). Таким чином, забезпечується мінімальний термін доставки запасних частин для ремонту (ТО) електрообладнання при мінімальних їх запасах.

У практиці відсоток задоволення попиту на запасні частини зі складів дилера протягом доби становить 90–95 %. Коефіцієнт оборотності запасів протягом року досягає 2–3.

Експлуатаційна і сервісна документація (С4), яка розробляється виробником (згадувалася вище (В4)), повинна містити методичні матеріали:

- зі знаходження несправностей (відмов) та їх причин;
- швидкого і якісного відновлення працездатності машин, у тому числі схему розбирання та складання; склад дій і використовувані інструменти, пристрої; нормативи трудових затрат та ін.

Враховуючи особливості названого складу заходів формування рівня експлуатаційної надійності електрообладнання (ТП), можна зробити висновок, що для покупця електрообладнання також доцільно

отримати відповідь на таке запитання: «Як оцінити з позиції надійності пропонуване декількома виробниками електрообладнання, що поставляється за допомогою дилерів?». Отримати відповідь на це питання можна з використанням поширеного в практиці методу рангів. Важливість суттєвого підвищення рівня експлуатаційної надійності електрообладнання ТП повинні усвідомити як керівники служб електропостачання, виробники обладнання, так і дилери. При цьому повинні бути встановлені раціональні відносини між ними на основі розглянутих вище методик.

В умовах, коли заміна у великій кількості старіючого силового устаткування ТП практично неможлива, використання цього устаткування зводиться до проблеми підвищення довговічності устаткування. Підвищення довговічності повинне передбачати підвищення надійності, як однієї з основних її властивостей. Проте шляхи вирішення цієї проблеми істотно відрізняються від відомих методів підвищення безвідмовності і ремонтпридатності. Проблема підвищення довговічності зводиться до підвищення залишкового терміну служби. Трудність вирішення цієї проблеми полягає в тому, що методи оцінки залишкового терміну служби для електроустановок на цей час вивчені недостатньо повно.

Стратегія ПЗР в умовах розвитку ринкових відносин в області ТО і Р у багатьох випадках не забезпечує ухвалення оптимальних рішень. Це пов'язано з тим, що призначення профілактичних робіт здійснюється відповідно до регламенту і не залежить від фактичного технічного стану силового електрообладнання (СЕО) ТП, що призводить до появи додаткових матеріальних і трудових витрат, які на цей час повно і вчасно не забезпечуються.

У цих умовах основним напрямом в розвитку системи ТО і Р є розробка сучасних методів, що базуються на індивідуальному спостереженні зареальними змінами технічного стану устаткування в процесі експлуатації і комплексній оцінці фактичного технічного стану СЕО.

У цьому напрямі, згідно із пропонуваним алгоритмом і математичною моделлю зменшення втрат системи тягового електропостачання (СТЕ) електрифікованих залізниць від відмов силового електроустаткування ТП за рахунок удосконалення системи ТО і Р, одним з індивідуально важливих параметрів експлуатаційної надійності є залишковий ресурс електроустаткування. Порівнюючи набуте значення залишкового ресурсу з допустимими межами його зміни, можна дати рекомендації про необхідність виведення електроустаткування в ремонт (відновлення ресурсу) або про

продовження його експлуатації. Ресурс можна розглядати як інтегральну оцінку технічного стану устаткування, вимірювану в одиницях напрацювання. Для різних типів електроустаткування напрацювання вимірюється в різних одиницях. Якщо використовуються одиниці виміру ресурсу напрацювання за часом, то нормативний ресурс відповідає встановленому терміну служби, а фактичний ресурс – фактичному терміну служби. У нормативних умовах експлуатації фактичний ресурс електроустаткування приймається рівним нормативному, встановленому в його паспортних даних.

Причиною зміни ресурсу силового електроустаткування ТП є не лише фактичний час його експлуатації, але і ряд експлуатаційних факторів, наприклад: підвищені робочі температури при експлуатації; перевантаження електрообладнання; перехідні процеси в електрообладнанні; низька якість ТО і Р та ін., кожен з яких певним чином впливає на зміну технічного стану устаткування. Залежно від їх інтенсивності, характеру умов і режимів роботи відбувається зменшення ресурсу на певну величину. Очевидно, що чим більше відхилення кожного з визначальних параметрів від номінального значення, під впливом експлуатаційних факторів, тим інтенсивніше спрацьовується технічний ресурс обладнання.

Причиною зміни ресурсу силового електроустаткування ТП є не лише фактичний час його експлуатації, але і ряд експлуатаційних факторів, наприклад: підвищені робочі температури при експлуатації; перевантаження електрообладнання; перехідні процеси в електрообладнанні; низька якість ТО і Р та ін., кожен з яких певним чином впливає на зміну технічного стану устаткування. Залежно від їх інтенсивності, характеру умов і режимів роботи відбувається зменшення ресурсу на певну величину. Очевидно, що чим більше відхилення кожного з визначальних параметрів від номінального значення, під впливом експлуатаційних факторів, тим інтенсивніше спрацьовується технічний ресурс обладнання.

З існуючих методів прогнозування залишкового ресурсу найбільш ефективним є метод індивідуального прогнозування для конкретних типів устаткування. Хоча, застосування цього методу вимагає певних витрат, пов'язаних з використанням діагностичних засобів, випробувального устаткування, техніки для обробки отриманої інформації, програмного забезпечення і побудови математичної моделі, проте ці витрати окупаються, враховуючи економічний ефект від отриманих результатів. Складність проблеми прогнозу залишкового ресурсу електрообладнання, яке вже відпрацювало призначений термін

експлуатації, пов'язана в першу чергу з розробкою принципів побудови алгоритму і опису математичної моделі прогнозу. Вказана модель має бути деякою сукупністю фізичних властивостей і характеру процесів деградації устаткування в часі за увесь період експлуатації.

Для визначення технічного стану конкретного силового електроустаткування ТП, автором запропонований коефіцієнт відносної оцінки технічного стану (спрацьованого ресурсу) по визначальному параметру, який можна вичислити для кожного визначального параметра електрообладнання, шляхом порівняння виміряного в даний момент часу значення цього параметра з початковим і граничним значеннями.

Для якісної оцінки значення залишкового ресурсу приймемо деякі умови:

– устаткування при дотриманні необхідних умов експлуатації зможе прослужити проектний термін, при цьому його технічний стан у кінці проектного терміну експлуатації буде близьким до граничного;

– можлива реальна оцінка технічного стану показала, що у кінці проектного терміну експлуатації ресурс устаткування не вичерпався і є відносний залишковий запас, рівний;

– приймемо значення залишкового ресурсу з урахуванням обмеження по K_{\min} , при якому для запобігання відмові подальша експлуатація має бути припинена.

Функціонування системи ТО і Р включає в себе моніторинг технічного стану обладнання, аналіз отриманих результатів, своєчасне проведення ремонтів з частковим або повним відновленням ресурсу обладнання при прийнятному рівні матеріальних і фінансових витрат. Однак сьогодні існує суттєве зниження ефективності використовуваної системи ПЗР обладнання СТЕ. Це викликано недосконалістю планування в сучасних умовах експлуатації та організації ремонтних робіт у частині необґрунтованого зменшення витрат на проведення технічного обслуговування та ремонту, відсутністю якісних запасних частин тощо. Тому актуальним стає питання розробки і впровадження сучасних методів і способів підвищення ефективності існуючої системи, одним з яких є формування на підприємствах електрифікованих залізниць України системи внутрішнього контролю та управління ризиками експлуатації обладнання тягових мереж.

У сучасних умовах експлуатації обладнання СТЕ увага з боку керівництва підприємства до управління ризиками зумовлена необхідністю посилення контролю над незапланованими матеріальними і фінансовими витратами при експлуатації обладнання, а також зниженням збитку від виходу його з ладу.

Управління ризиками – це логічний і систематичний процес, який можна застосовувати для вибору шляху подальшого вдосконалення експлуатації обладнання, підвищення ефективності функціонування системи ТО і Р і який передбачає ретельний аналіз технічного стану пристроїв СТЕ для прийняття рішень.

Ризик-менеджмент включає в себе стратегію і тактику управління.

Під стратегією управління розуміють напрям і спосіб використання засобів досягнення поставленої мети. Під тактикою – конкретні методи і прийоми для досягнення стратегічної мети в конкретних умовах. Завданням тактики управління є вибір оптимального рішення і найбільш прийнятних методів і прийомів управління.

Головним принципом побудови системи ризик-менеджменту діяльності дистанції електропостачання електрифікованих залізниць є комплексне урахування ризику при прийнятті рішень з планування діяльності, оцінка загальних результатів діяльності, а також діяльності підрозділів дистанції електропостачання та конкретних керівників.

Реалізація системи ризик-менеджменту передбачає:

- організацію ризик-менеджменту (формування спеціальних функцій і процедур в управлінні процесами підприємства та забезпечення їх виконання);
- формування необхідного методологічного забезпечення діяльності з управління ризиками;
- розробку інформаційно-аналітичних систем ризик-менеджменту і їх практичну реалізацію.

Система управління ризиками повинна ґрунтуватися на таких принципах:

- цілеспрямоване постійне усвідомлення й відстеження ризиків;
- оцінка ймовірності та наслідків виникнення тієї чи іншої несприятливої ситуації;
- формування і постійне оновлення інструментарію управління ризиками;
- встановлення лімітів ризику (максимально точне визначення межі збитку);
- розробка рекомендацій щодо формування стратегії і ефективного розподілу ресурсів з урахуванням ступеня ризику;
- повнота і своєчасність відображення величин ризиків у системах управлінської інформації (інформаційних системах).

В основу процесу аудиту та управління ризиками експлуатації обладнання тягових мереж покладена якісна і вартісна ідентифікація ризик-індикаторів. Ризик, який може застосовуватися в питаннях гарантування безпеки руху поїздів, у трактуванні ризик-менеджменту може мати властивості операційного ризику.

Операційний ризик можна визначити як агреговане поняття, що об'єднує технічні, технологічні, інформаційні ризики, які виникають в поточній операційній діяльності, ризики неадекватної поведінки персоналу та ін.

Операційні ризики можна розбити на такі групи:

– техногенний (виробничий) ризик – це ризик, фактори якого мають техногенне походження, джерелом якого є техніка і обладнання, що використовується у виробництві;

– ризик персоналу – ризик втрат, пов'язаний з можливими помилками співробітників, шахрайством, недостатньою кваліфікацією, нестійкістю штату організації, можливістю несприятливих змін у трудовому законодавстві та ін.;

– ризик організаційної структури управління – ризик втрат, пов'язаний з неправильним вибором організаційної структури процесів. Проявляється, насамперед, у додаткових фінансових затратах та організаційних труднощах у зв'язку з нечітким розподілом зон відповідальності між підрозділами підприємства.

Класифікація ризиків має строго прикладне призначення при формуванні прозорого і аналітично обробленого матеріалу з метою адекватного опису ризиків з подальшою побудовою системи управління ними. Таким чином, класифікація ризиків описує певне коло діяльності дистанції електропостачання залежно від мети та завдань керівництва (табл. 11.2).

Таблиця 11.2 – Класифікація ризиків

Класифікаційна ознака	Вид ризику	Характеристика ризику
Залежно від етапу вирішення проблеми	На етапі прийняття рішення	Помилки в застосуванні методів визначення рівня ризику через нестачу інформації або її низьку якість, використання дезінформації
	На етапі реалізації рішення	Помилки в реалізації правильного рішення, несподівані зміни суб'єктивних умов

За масштабами	Локальний	Ризик окремого підприємства рівня ЕЧЕ
	Регіональний	Охоплює роботу підприємства на рівні ЕЧ
	Галузевий	Ризик, пов'язаний зі специфікою функціонування підприємства
За ступенем допустимості	Мінімальний	Рівень можливого збитку СТЕ в межах 0-25 %
	Підвищений	Рівень можливого збитку СТЕ в межах 25-50 %
	Критичний	Рівень можливого збитку СТЕ в межах 50-70 %
	Недопустимий (катастрофічний)	Рівень можливого збитку СТЕ в межах 75-100 %

Діагностика ризиків являє собою аналіз технічних процесів підприємства з метою виявлення факторів ризику й реалізується в ході ризик-аудиту. Це комплексний аналіз параметрів технічного обладнання та напрямів діяльності підприємства з метою ідентифікації, опису та класифікації ризиків. Найбільш поширений метод при діагностиці ризиків базується на статистичних спостереженнях, які є найбільш об'єктивними і точними. Виявлення ризиків є пріоритетним етапом, фундаментом побудови системи управління ризиками. На ньому ґрунтуються всі інші процедури ризик-менеджменту, оскільки, зрештою, якісна діагностика визначає успішність управління ризиками та рівень ефективного управління в цілому.

Процес управління ризиками на підприємстві можна зобразити у вигляді схеми (рис. 11.7).

Розглянемо структурну схему процесу управління ризиками.

Взаємодія та консультування. На кожному етапі процесу управління ризиками необхідно проводити обмін інформацією з внутрішніми і зовнішніми учасниками цього процесу.

Визначення контексту ризик-менеджменту. Визначаються зовнішні та внутрішні параметри функціонування організації та процесу ризик-менеджменту. Також необхідно визначити вимоги за критеріями оцінки ризиків, їх структури і методів аналізу.

Ідентифікація ризиків. На даному етапі відбувається конкретизація ризикової ситуації стосовно досягнення поставленої мети.

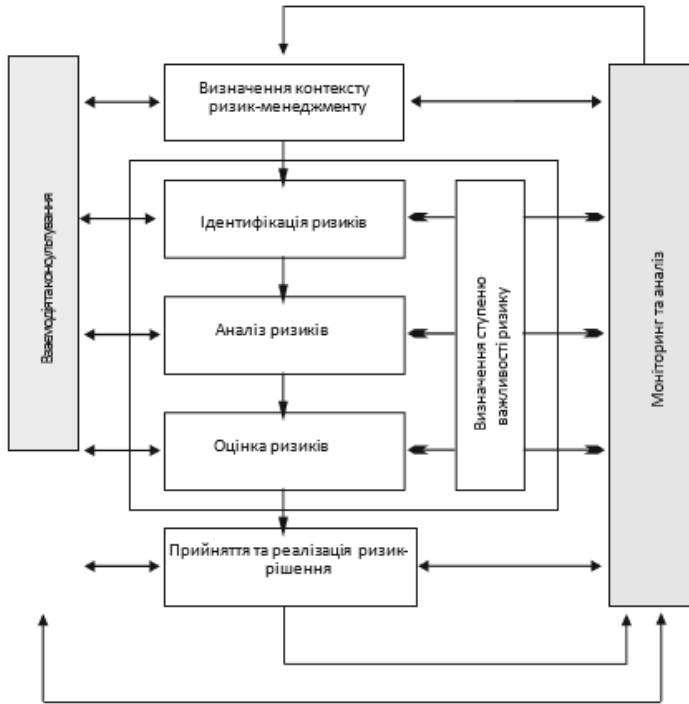


Рисунок 11.7 – Алгоритм процесу управління ризиками

Аналіз ризиків. Визначається рівень ризику через ймовірність виникнення ризику і наслідки ризикової ситуації. Виявляються причини і фактори виникнення ризику, масштаби наслідків, конкретизуються і оцінюються моделі й методи контролю ризиків (рис. 11.8).

Оцінка ризиків. На даному етапі відбувається порівняння рівня ризику до встановлених критеріїв. Визначається баланс між потенційною вигодою і негативними наслідками ризикової ситуації. Проводиться оцінка масштабу керівного впливу на ризик і характеристики цього впливу.

Прийняття та реалізація ризикового рішення. Здійснюється розробка та впровадження керівних впливів, мета яких – збільшення потенційних вигод і зниження потенційних витрат відносно до ризикових ситуацій.

Моніторинг та аналіз. Відстеження та аналіз ефективності процесу управління ризиками. Проводиться на кожній стадії процесу управління.

Діагностичні параметри технічного стану повинні задовольняти дві основні вимоги:

- параметр служить індикатором працездатності обладнання;
- параметр відновлюється до вихідного (близького до вихідного) значення в результаті проведення ТО і Р.

Умови експлуатації Фактичний стан обладнання

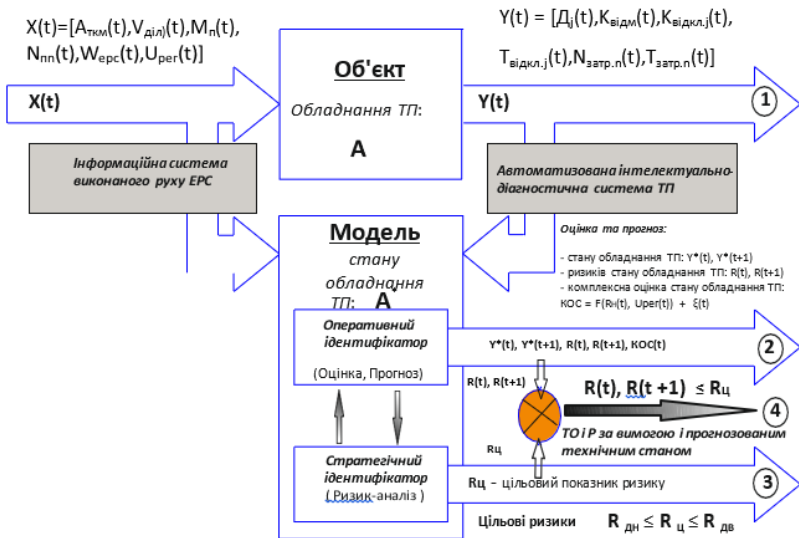


Рисунок 11.8 – Модель ризик-аналізу та прогнозування технічного стану обладнання ТП

Для встановлення ДПТС необхідне проведення комплексу робіт з аналізу проектної документації і даних з експлуатації об'єкта, аналізу результатів контролю його технічного стану тощо. Методику встановлення ДПТС наведено на рис. 11.9.

У блоках 1, 2, 12 показані початковий та кінцевий етапи встановлення ДПТС обладнання ТП. У дужках літерами від *a* до *e* вказані дані, на основі яких приймається відповідне рішення з визначення ДПТС обладнання. Процедура визначення ДПТС обладнання полягає в такому. Якщо показник технічного стану не є числовим, після перевірки необхідності його врахування виконується аналіз на можливість експертного прогнозування даного параметра

технічного стану обладнання. Якщо така можливість відсутня, ставиться завдання з розробки відповідних методик, засобів діагностики, які дозволяють чисельно оцінити параметр технічного стану або забезпечують можливість його експертного прогнозування. Далі перелік ДПТС уточнюється й процедура визначення ДПТС повторюється.

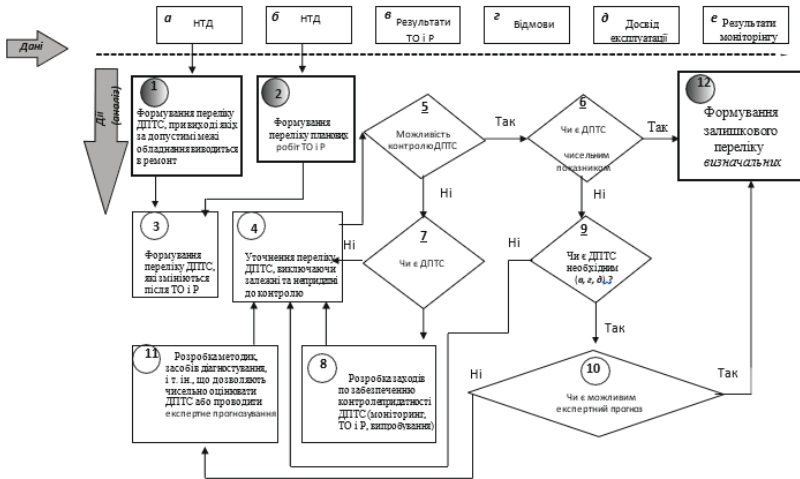


Рисунок 11.9 – Алгоритм встановлення визначальних діагностичних показників технічного стану обладнання тягових підстанцій

Перший вихід схеми об'єкта ризик-моделювання (див. рис. 11.9) характеризує фактичний стан якості експлуатації обладнання ТП $Y(t)$. У модель дані про фактичний технічний стан устаткування $Y(t)$ надходять з інформаційних систем.

Другий вихід моделі характеризується вектором оцінок показників. Як інтегральний показник збитку по господарству електрифікації. Прийнятий $A_{з,ткм}$ – збиток у поїзній роботі від затримки поїздів (за видами вантажних, пасажирських, приміських), який формується з показників входу і виходу. на другому виході моделі формується показник комплексна оцінка стану обладнання.

На *третьому виході* моделі формуються обчислювані нормативно допустимі верхні $R_{дв}$ і нижні $R_{дн}$ межі діапазонів ризиків у рамках обраної довірчої ймовірності.

На *четвертому виході* моделі аналізується виконання цільових показників ризику.

Функціональна стратегія управління ризиками спрямована на подальше вдосконалення експлуатації обладнання ТП, регламентує підвищення якості й ефективності системи ТО і Р на базі виявлення потенційних областей ризику та їх оцінки, запобігання виникненню ризиків на основі їх систематичного прогнозування та оцінки технічного стану пристроїв ТП для прийняття рішень. Запропонована модель ризик-аналізу стану обладнання тягових мереж спрямована на оцінку рівня якості його обслуговування і прийняття стратегії обслуговування при зіставленні поточних і цільових показників ризиків порушень та їх наслідків.

Аналіз ризиків експлуатації обладнання дозволяє оцінити ефективність і контроль реалізації управлінських рішень, спрямованих на вдосконалення правил експлуатації, системи технічного обслуговування та ремонту обладнання СТЕ електрифікованих залізниць.

Контрольні запитання за лекцією 11

1. Поняття розрахункової та експлуатаційної надійності.
2. Якість експлуатації електротехнічних пристроїв
3. Експлуатаційну надійність електрообладнання.
4. Узагальнена оцінку ефективності роботи електрообладнання.
5. Технічні заходи інтелектуальних систем ТО і Р, моніторингу та діагностування.
6. Методи діагностування силового електрообладнання.
7. Методи прогнозування технічного стану при експлуатації електрообладнання
8. Складові комплексного підходу до моніторингу основного силового електрообладнання.
9. Вимоги до діагностичних параметрів технічного стану електрообладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Світлична Т. І., Дріль Н. В. Конспект лекцій з дисципліни «Прогнозування»; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. Х: ХНАМГ, 2010. – 112 с.
2. Єріна А. Статистичне моделювання і прогнозування. Навч. посібник. К.: КНЕУ, 2001. – 215 с
3. Грабовецький Б. Є. Економіко-статистичні моделі і методи: теоретико-прикладні аспекти. - Вінниця : ВНТУ, 2013. – 230 с.
4. Максишко Н. К., Перепелица В. А. Анализ и прогнозирование эволюции экономических систем. Запорожье: Полиграф, 2006. – 248 с.
5. Столяров Г. С., Емшанов Д. Г., Ковтун Н. В. ARM статистика. Навч. посібник. К.: КНЕУ, 1998. – 206 с.
6. Науменко В., Панасюк Б. Впровадження методів прогнозування і планування в умовах ринкової економіки. К.: Глобус, 1995. – 245 с.
7. Наконечний С. І., Терещенко Т. О., Романюк Т. П. Економетрія: Навч. посібник. К.: КНЕУ, 1997. – 520 с.
8. Авакумов В. Г. Постановка и решение электроэнергетических задач исследования операций. Киев: Вища школа, 1983. – 240 с.
9. Таран В. П. Техническая диагностика при эксплуатации электрооборудования. К.: Урожай, 1978. – 152 с.
10. Таран В. П. Диагностирование электрооборудования. К.: Техніка, 1983. – 200 с.
11. Кутін В. М., Ілюхін М. О., Кутіна М. В. Диагностика електрообладнання: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2013. – 161 с.
12. Кутін В. М., Матвієнко С. В., Травінський В. О., Пritула Ю. М. Вибір стратегії відновлювальних дій складних електротехнічних систем. Вісник Керменчуцького державного політехнічного університету. 2004. № 2 (25). С. 48-49.
13. Павленко Т. П., Шавкун В. М., Козлова О. С. Сучасні електромехатронні комплекси і системи: підручник. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 265 с.
14. Ивахненко А. Г., Мюллер Й. А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Наукова думка. 1985. – 221с.
15. Павленко Т. П., Шавкун В. М., Козлова О. С., Лукашова Н. П. Сучасні електромехатронні комплекси та системи: навч. Посібник. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 102 с.

16. Грабченко А. И., Клепиков В. Б., Доброскок В. Л. и др. Введение в мехатронику: учеб пособие. Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – 264 с.
17. Яцун М. А., Яцун А. М. Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів: навч. Посібник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 228 с.
18. Лудченко О. А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: організація і управління : підручник. Київ: Знання-Прес, 2004. – 478 с.
19. Черняк О. І., Ставицький А. В. Динамічна економетрика: Навчальний посібник. К.: КВІЦ, 2000. – 120 с.
20. Електронні ресурси: <http://infomine.ucr.edu> – віртуальна бібліотека електронних видань.
21. Бабічева О. Ф. Єсаулов С. М. Навчальний посібник з дисципліни «Автоматизоване проектування електромеханічних систем». Харків: ХНАМГ, 2009. – 286 с.
22. Матусевич О. О. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій: монографія. Дніпропетровськ: Дніпропр. нац. ун – тет заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 295 с.
23. Статистика: Підручник / С. С. Герасименко, А. В. Головач, А. М. Єріна та ін.; за наук. ред. д-ра екон. наук С. С. Герасименка. 2-ге вид., перероб. і доп. К.: КНЕУ, 2000. – 467 с.
24. Монтаж електрообладнання та систем керування. Частина І: навч. посіб. для студентів вищ. навч. закл. / М. П. Кунденко, Ю. М. Федюшко, О. О. Плахтир, Д. Л. Кошкін, Л. В. Вахоніна, О. М. Циганов, О. С. Садовий. Харків: ХНТУСГ, 2017. – 282 с.
25. Луг М. Т., Мірошник О. В., Трунова І. М. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК: навч. підручник для студентів вищих навчальних закладів. Харків: Факт, 2008. – 438 с.
26. Моркун В. С., Тонкошкур Л. С., Гарковенко Е. Е. Електроустаткування і електропостачання гірничих підприємств: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Кривий Ріг: Мінерал, 2005. – 269 с.
27. Правила улаштування електроустановок. Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
28. Спеціальні питання електропостачання та електрозахисту електричних мереж залізрудних кар'єрів. Підручник / О. М. Сінчук, І. О. Сінчук, А. В. Пироженко, М. Л. Барановська. – Кременчук: ЧП Щербатих, 2019. – 320 с.

29. Сучасний ринок електричної енергії. Підручник. Курс лекцій / І. О. Сінчук, Т. М. Берідзе, В. О. Федотов, М. Л. Барановська, Л. В. Сменова, А. В. Пироженко; за редакцією доктора технічних наук, професора О. М. Сінчука. Кременчук: ЧП Щербатих А.В., 2021. – 331 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Берідзе Тетяна Михайлівна
Сінчук Ігор Олегович
Федотов Владислав Олександрович
Барановська Міла Леонідівна
Пересунько Ігор Ігорович

**ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ**

Підручник. Курс лекцій.

Subscribe to print 07/02/2023. Format 60×90/16.
Edition of 300 copies.
Printed by “iScience” Sp. z o. o.
Warsaw, Poland
08-444, str. Grzybowska, 87
info@sciencecentrum.pl, <https://sciencecentrum.pl>



ISBN 978-83-66216-76-1



9 788366 216761