

Міністерство освіти і науки України  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

На правах рукопису

**ОСОВИК ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 625.151.32 + 519.711.2

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРКІВ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТРІЛОЧНИХ  
ПЕРЕВОДІВ З УРАХУВАННЯМ СТАНУ ІНФРАСТРУКТУРИ**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник  
Скалозуб Владислав Васильович  
д.т.н., професор

Дніпропетровськ – 2015

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 Проблеми автоматизованої експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів з урахуванням параметрів поточного стану та інфраструктури	15
1.1 Аналіз технологій експлуатації стрілочних електроприводів і завдання підвищення стійкості та безпеки залізничних перевезень на основі засобів автоматизації	15
1.2 Основні види відмов та діючі технології і засоби діагностування параметрів стрілочних електроприводів у процесах експлуатації	21
1.3 Проблеми і завдання автоматизації процесів експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів на основі обліку параметрів поточного стану	30
Висновки по розділу 1	37
РОЗДІЛ 2 Розвиток автоматизованої технології управління процесами експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів з урахуванням параметрів поточного стану та інфраструктури	40
2.1 Характеристика завдання автоматизованої експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів	41
2.2 Постановка завдання автоматизованої експлуатації парків електродвигунів залізничних стрілочних переводів	44
2.3 Розробка автоматизованої технології діагностування і управління парком електричних двигунів	49
2.3.1. Розробка структури та функцій системи автоматизованої експлуатації парків технічних систем за параметрами поточного стану та інфраструктури	49
2.3.2. Аналіз автоматизованих засобів моніторингу та діагностування технічного стану електричних двигунів стрілочних переводів	63

## 2.4 Критерії та основні завдання автоматизованої експлуатації парків залізничних технічних систем на основі параметрів поточного стану 67

Висновки по розділу 2	72
РОЗДІЛ 3 Розробка засобів автоматизованої експлуатації парків електродвигунів стрілочних переводів з урахуванням поточного стану та інфраструктури	74
3.1 Формування індивідуальних інтелектуальних моделей процесів експлуатації парків електричних двигунів за параметрами поточного стану	74
3.1.1. Призначення та основні властивості індивідуальних інтелектуальних моделей процесів експлуатації електродвигунів	75
3.1.2. Структури індивідуальних моделей для процесів моніторингу, діагностування та ремонтів	79
3.1.3. Прогнозування часових, експлуатаційних параметрів електродвигунів і ресурсу на основі даних індивідуальних моделей і методів екстраполяції та кластеризації	81
3.2 Моделі і методи для автоматизації розрахунку черговості діагностування, обслуговування та ремонту парку електричних двигунів	84
3.2.1. Багатокритеріальна ієрархічна модель із визначення пріоритетів обслуговування електричних двигунів з урахуванням неоднорідності об'єктів інфраструктури	84
3.2.2. Визначення пріоритетів обслуговування технічних систем на основі методів кластеризації	87
3.3. Управління процесами експлуатації парків електродвигунів на основі інтелектуальних методів та експертних систем	87
3.3.1. Формування баз знань нечітких експертних систем для прогнозування параметрів електричних двигунів у процесах експлуатації	87
3.3.2. Процедура типу Такагі-Сугено з аксіоматичним нелінійним управлінням експлуатацією парку електродвигунів	93
3.4 Нечітка модель планування розподілу електричних двигунів між ремонтними базами з урахуванням спеціалізації і кооперації	104

3.5	Моделі управління процесами експлуатації парків електричних двигунів стрілочних переводів з урахуванням невизначеності та повноти даних	109
3.5.1	Багатокритеріальна модель управління процесами експлуатації парків технічних систем при залежних ресурсах	109
3.5.2	Двохетапна модель управління процесами експлуатації з урахуванням умов ризику	115
3.5.3	Нечіткий двохетапний метод управління процесами експлуатації парків технічних систем	117
	Висновки по розділу 3	122
	РОЗДІЛ 4 Обґрунтування та дослідження технолого-економічної ефективності системи автоматизованої експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів	125
4.1	Розробка методики і оцінка техніко-економічної та інвестиційної ефективності автоматизованої експлуатації парків електродвигунів	126
4.2	Узагальнена методика технолого-економічної оцінки автоматизованої системи експлуатації парків електродвигунів з урахуванням розвитку та поетапного впровадження	136
	Висновки по розділу 4	140
	ВИСНОВКИ	142
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	144
	ДОДАТКИ	
	ДОДАТОК А Акти впровадження результатів дисертації	156
	ДОДАТОК Б. Характеристики планово-попереджувальної та автоматизованої експлуатації парків стрілочних електродвигунів на основі параметрів поточного стану	159

ДОДАТОК В. Визначення пріоритетів стрілочних електродвигунів на основі методу аналітичних ієрархій для обслуговування парків за параметрами поточного стану	163
ДОДАТОК Г. Приклади та класифікація спектрограм струмів електричних двигунів постійного струму з різними видами відмов	167
ДОДАТОК Д. Оцінка адекватності моделей прогнозування параметрів об'єктів парку стрілочних електродвигунів	171

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АПК	апаратно-програмний комплекс
АЕПЕД	автоматизована система експлуатації парків електричних двигунів стрілочних переводів
АЦП	аналого-цифровий перетворювач
БДПЕД	база даних парку електродвигунів
БЗНП	база знань нечітких правил
БЛЕ	багатовимірна лінійна екстраполяція
БП	база правил
ЗВО	задачі векторної (багатокритеріальної) оптимізації
ШПФ	швидке перетворення Фур'є
ІМД	індивідуальна модель процесів діагностування двигуна
ІМР	індивідуальна модель процесів ремонту двигуна
ІС	інтелектуальна система
МП	модель парку
НДМОП	нечітка двохетапна модель оптимального планування
Т-СУ	нечітке управління Такагі-Сугено
ПЕД	парк електричних двигунів стрілочних переводів
СП	стрілочний перевод
УЗ	Укрзалізниця
ЕД	електричний двигун
ЕС	експертна система
ЕПСД	експлуатація «по поточному стану» двигунів
ЕЦ	електрична централізація
MLP	багатошаровий перцептрон
RBF	радіальна базисна функція
SOM	Мережа Кохонена
ІТС	інтелектуальні транспортні системи
ІНС	штучні нейронні мережі

## ВСТУП

Характерними рисами та вимогами до сучасних залізничних перевезень являються підвищення їх ефективності, безпеки руху поїздів і процесів експлуатації технічних систем, збільшення пропускнуої спроможності перегонів і станцій, а також зниження впливу транспорту на навколишнє середовище. Важливим фактором забезпечення стійкості процесів залізничних перевезень являється підвищення надійності технічних засобів залізничної інфраструктури. Підвищення ефективності процесів експлуатації, зменшення експлуатаційних витрат не можливе без розвитку комунікаційних та інформаційних технологій, формування комплексних систем автоматизації у сфері експлуатації парків технічних систем, зокрема удосконалення експлуатації парків електродвигунів (ЕД) залізничних стрілочних переводів (СП).

**Актуальність теми.** В теперішній період в Укрзалізниці (УЗ) на основі планово-попереджувального методу експлуатується близько 30 тис. ЕД, з них на Південно-Західній залізниці – понад 6800, експлуатація яких здійснюється шляхом нормування. При цьому дані про параметри ЕД не систематизуються, не використовуються при плануванні наступних процесів обслуговування, автоматизація технологій експлуатації - недостатня. Як цілісний специфічний об'єкт управління парки ЕД в діючих інструктивних документах і системах автоматизації процесів експлуатації представлені обмеженим чином.

В дослідженнях проблеми експлуатації парків ЕД в останні роки отримані певні результати, призначені для створення елементів автоматизованих систем управління на основі дистанційного моніторингу і діагностування параметрів поточного стану ЕД (АЕПЕД). В них визначені фактори складності створення АЕПЕД і встановлюється, що сучасне вирішення завдання із підвищення ефективності експлуатації парків стрілочних електродвигунів вимагає формування багатокритеріального управління експлуатацією парків ЕД на основі аналізу робочих струмів, а також обліку невизначеності стану ЕД та інфраструктури процесів перевезень, враховуючи обмеже-

ні ресурси. При цьому в системі АЕПЕД необхідно прогнозувати стани та встановити раціональну черговість оглядів та ремонту ЕД, розподілити роботи з обслуговування між виконавцями тощо. Автоматизоване вирішення комплексу таких нових завдань визначає сутність організаційно-технічних заходів підвищення ефективності експлуатації парків стрілочних електродвигунів.

Таким чином у теперішній час підвищення ефективності процесів багатокритеріальної автоматизованої експлуатації парків електродвигунів стрілочних переводів на основі оцінок їх поточного і прогнозованого стану, а також умов невизначеності параметрів інфраструктури процесу перевезень, являється актуальним науково-практичним завданням залізничного транспорту України.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки (затверджена Наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 14 жовтня 2008 р. № 1259), Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року, яку схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. №1555-р.

Обраний напрямок досліджень пов'язаний з виконанням науково-дослідних робіт в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Робота виконувалась в рамках держбюджетної науково-дослідної теми «Інформаційно-аналітичні технології управління в інтелектуальних транспортних системах багатокритеріальними і багатопродуктовими потоками в умовах неоднорідної невизначеності параметрів процесів» (номер держреєстрації 0113U000695), де автор був співвиконавцем. Також він приймав участь у виконанні проекту «CITISSET» програми TEMPUS «Комунікаційні і інформаційні технології для забезпечення безпеки та ефективності транспортних потоків: Європейсько-Російсько-Українська магістерська і докторська PhD програми по інтелекту-



альним транспортним системам» (№ 517374-TEMPUS -1-2011-1-RU-TEMPUS-JPCR ).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вирішення науково-практичного завдання щодо підвищення ефективності процесів експлуатації парків стрілочних електричних двигунів шляхом удосконалення систем автоматизованого дистанційного моніторингу та діагностування їх поточного стану, а також урахування стану інфраструктури при плануванні технічного обслуговування та ремонтів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- провести аналіз методів і засобів експлуатації парків стрілочних електродвигунів, в тому числі на основі процедур дистанційного діагностування і обслуговування, визначити шляхи їх удосконалення;

- дослідити питання достовірності інформаційного та ефективності організаційного забезпечення процесів технічної експлуатації парків стрілочних електричних двигунів, а також критерії ефективності діючих процесів управління;

- розробити удосконалену структуру системи автоматизованого багатокритеріального управління експлуатацією парків стрілочних електродвигунів, яка враховує невизначеність станів ЕД та інфраструктури у виробничих процесах, сформулювати комплекс науково-технічних завдань що забезпечують її реалізацію;

- розробити систему індивідуальних інтелектуальних моделей, які забезпечують автоматизацію завдань експлуатації парків електричних двигунів за параметрами поточного стану, з урахуванням діючих технологічних процесів;

- розробити багатокритеріальні моделі і процедури для автоматизації розрахунків черговості діагностування, обслуговування та ремонту парку електричних двигунів, які ураховують різну форму невизначеності даних про стан парку та інфраструктури процесів перевезень;

- сформувати моделі управління процесами експлуатації парків стрілочних електричних двигунів з урахуванням статистичних і нечітких вихідних даних;

- розробити нечіткі моделі планування розподілу електричних двигунів парку між ремонтними базами з урахуванням спеціалізації та кооперації;

- обґрунтувати та дослідити технологічно-економічну ефективність впровадження системи автоматизованої експлуатації парків стрілочних електричних двигунів.

*Об'єкт дослідження* – процеси експлуатації парків технічних систем залізниць.

*Предмет дослідження* – процедури експлуатації парків стрілочних електричних двигунів на основі оцінок параметрів поточного стану за умов невизначеності параметрів інфраструктури перевезень.

**Методи дослідження.** Результати дисертації отримані за допомогою прикладних методів системного аналізу та теорії оптимізації, методів моніторингу та спектрального аналізу робочого струму електродвигунів, нейронного та нечіткого моделювання та управління, методів математичної статистики і процедур прогнозування. Завдання моніторингу технічного стану електродвигунів реалізовано методами спектрального аналізу на основі швидкого перетворення Фур'є. Нейронні мережі Кохонена використані для діагностування несправностей електродвигунів, а також формування загальних моделей експлуатації парку ЕД. Методами теорії нечітких величин вирішувались завдання формування моделей діагностики станів електродвигунів, автоматизованого планування процесів діагностування і обслуговування парку ЕД. Методом аналізу ієрархій визначено пріоритети об'єктів інфраструктури. Методи векторної оптимізації застосовані для формування багатокритеріального управління експлуатації парку електродвигунів. Прогнозування оцінок параметрів стану двигунів виконано методами екстраполяції

та класифікації. Перевірка адекватності розроблених моделей виконана методами математичної статистики.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у новому вирішенні науково-прикладного завдання щодо підвищення ефективності експлуатації парків електричних двигунів стрілочних переводів на основі оцінки їх поточного стану в умовах невизначеності параметрів інфраструктури перевезень. При цьому

*вперше:*

- визначені відмінності та специфіка комплексу завдань багатокритеріального управління експлуатацією парків стрілочних електричних двигунів в умовах невизначеності параметрів інфраструктури перевезень;

- розроблено векторну модель управління технічною експлуатацією парків стрілочних електродвигунів «по поточному стану» без вилучення із технологічних процесів, яка базується на комплексі індивідуальних інтелектуальних моделей окремих технічних систем і загальній моделі парку, що забезпечує раціональний розподіл ресурсів при експлуатації парку;

*удосконалено:*

- нейронно мережеву модель Кохонена, призначену для класифікації окремих індивідуальних процесів експлуатації електродвигунів «по поточному стану», що забезпечує прогнозування розвитку несправностей і підвищує точність та ефективність управління процесами моніторингу, діагностування і планування ремонтів двигунів;

- індивідуальні моделі окремих процесів експлуатації (діагностування, ремонт ін.) парків стрілочних електродвигунів, призначені для визначення черговості технічного обслуговування, які враховують поточні та очікувані стани як окремих, так і груп систем (станція ін.), що підвищує ефективність порядку обслуговування;

- метод визначення пріоритетів стрілочних переводів (двигунів) в завданнях технічного обслуговування, який відзначається формуванням комплексних оцінок поїзоділянок з використанням процедур аналітичних

ієрархій та кластеризації, що забезпечує багатокритеріальну оцінку інфраструктури перевезень;

- двохетапні статистичні моделі оптимізації та нечіткого управління процесами експлуатації парків на основі процедур прогнозування та діагностування стрілочних електродвигунів засобами інтелектуальних (метод Такагі – Сугено) і експертних систем, що дозволяє підвищити точність оцінки їх стану та виконувати розрахунки параметрів керувань при нечітких поточних і апріорних даних;

*знайшла подальший розвиток:*

- модель планування розподілу ремонтів електродвигунів у залежності від виявлених несправностей з урахуванням спеціалізації виконавців робіт, а також формування компромісу для кооперації виконавців робіт щодо процесів експлуатації, що дозволяє зменшити експлуатаційні витрати для парку електродвигунів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати розробок представляють нове вирішення завдання із підвищення ефективності експлуатації парків стрілочних електродвигунів на основі оцінки їх технічного стану та урахування параметрів інфраструктури залізничних перевезень. Автоматизована технологія і система експлуатації парків ЕД АЕПЕД дозволяє перейти до обслуговування парку ЕД по фактичному та прогнозованому технічному стану. Перевагами системи АЕПЕД являються: моніторинг і діагностика технічного стану двигуна в режимі робочого навантаження, багатокритеріальне управління експлуатацією парків ЕД, забезпечення прогнозування типу несправності і періоду до можливої відмови, що підвищує ефективність технічного обслуговування.

Отримані результати і висновки використані в підрозділах Південно-Західної залізниці, в науково-дослідних роботах ДНУЗТ, що виконувалися для УЗ.

Результати роботи використовуються для підготовки магістрів за міжнародними TEMPUS-програмами з інтелектуальних транспортних систем та з інтероперабельності, сертифікації і безпеки на транспорті.

Практичне значення результатів підтверджується актами впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертації отримані особисто автором або за його безпосередньої участі. В написаних у співавторстві публікаціях здобувачеві належать:

[7] – розд. 9, 10; [65] – кооперативна векторна модель планування робіт кількох виконавців що узагальнює модель задачі «цілерозподілу»; [69] – формування інтелектуальних моделей для окремих процесів експлуатації електродвигунів (діагностування, ремонт); [72] – векторна модель автоматизованого управління процесами експлуатації парків електродвигунів; [81] – двохетапна нечітка модель управління процесами експлуатації парків електродвигунів. Роботи [66 – 68, 92] написані одноосібно.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації доповідалися, обговорювалися і схвалені на науково-технічних конференціях:

1. На 74, 75 Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» - 2014, 2015, ДНУЗТ., - м. Дніпропетровськ.

2. На 27, 28 Міжнародних конференціях «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті». –2014, 2015, УкрДУЗТ. – м. Харків.

3. На XII Міжнародній науковій конференції «Проблеми економіки транспорту», – 2014, ДНУЗТ. – м. Дніпропетровськ.

4. На III Міжнародній науково-практичній конференції «Современные проблемы развития интеллектуальных систем транспорта». 27.01-31.01.2014 р., ДНУЗТ. – м. Дніпропетровськ.

5. На Міжнародній конференції «Коммуникационные и информационные технологии для обеспечения безопасности и эффективности транспортных потоков», TEMPUS-проект CITISET. МИИТ, - 2014. – м. Москва, Росія.

6. На Міжнародній науково-практичній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» – 2015. ДВЗ УДХТУ, - м. Дніпропетровськ.

Дисертацію в повному обсязі розглянуто та схвалено на розширеному засіданні кафедри «Комп'ютерні інформаційні технології» ДНУЗТ.

**Публікації.** Відповідно до теми дисертації опубліковано 17 наукових праць, з яких 1 монографія, 7 статей (з них 3 без співавторів), що опубліковані у фахових виданнях затверджених Міністерством освіти і науки України (2 статті включені до міжнародних наукометричних баз, одна опублікована за кордоном – Республіка Білорусь), 1 стаття додаткова; отримане свідоцтво про реєстрацію авторського права; 8 праць апробаційного характеру.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота містить вступ, 4 розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Повний обсяг роботи становить 178 сторінок, обсяг основного тексту складає 143 сторінки друкованого тексту, 37 ілюстрацій, 11 таблиць, список використаних джерел інформації складається з 105 найменувань, в роботі також 5 додатків.

## РОЗДІЛ 1

# ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ПОТОЧНОГО СТАНУ ТА ІНФРАСТРУКТУРИ

### 1.1 Аналіз технологій експлуатації стрілочних електроприводів і завдання підвищення стійкості та безпеки залізничних перевезень на основі засобів автоматизації

Удосконалення процесів експлуатації парків складних технічних систем залізничного транспорту (вагонів, локомотивів, стрілочних переводів, електродвигунів та ін.) або складових компонентів, з урахуванням параметрів поточного стану, являється актуальною науково-технічною проблемою [1, 2, 3]. Вона є надзвичайно важливою для залізничного транспорту України, який налічує десятки і сотні тисяч одиниць такого роду експлуатованих систем [4 – 6].

В роботі в якості об'єктів аналізу розглянуті парки електродвигунів (ЕД) постійного струму, що використовуються в залізничних стрілочних переводах – високо відповідальних системах управління процесами перевезень. Зазначимо, що електродвигуни широко використовуються в промисловості і на транспорті. Так зараз на Укрзалізниці експлуатується близько 30 тис. ЕД, на Південно-Західній залізниці – понад 6800 ЕД; кілька років тому на Придніпровській залізниці було встановлено: стрілочних приводів – близько 8000 шт., автоматичних шлагбаумів близько 1100 шт., тягових двигунів і головних тягових генераторів рухомого складу близько 14000 шт. Електричні машини - це дороге устаткування при закупівлі, експлуатації, ремонті [6, 7].

Питання підвищення ефективності методів і засобів експлуатації залізничної автоматики, в нашому випадку електричних двигунів стрілоч-

них переводів (ЕД СП), були і залишаються в центрі уваги багатьох дослідників. Це зв'язано і з тим, що стрілочні переводи знаходяться на другому місці в ряду відмов базових елементів електричної централізації (ЕЦ) (після рейкових кіл). Значний внесок у вирішення завдання діагностики залізничних стрілочних переводів внесли багато вчених: Бойнік А. Б. [8], Гаврилюк В. І. [9, 10], Дмитренко І. Є. [11, 12], Загарій Г.І. [8], Переборов А. С. [13], Пернікіс Б. Д. [14], Разгонов А. П. [15, 16], Резніков Ю.М. [17], Чилікін М. Г. [18], Ягудін Р. Ш. [14]. Удосконалення методів виявлення несправностей в ЕД залізничних стрілочних переводів отримано в роботах Бальтета Л. І. [19], Гриля А. І. [20], Маловічка В. В. [21 – 23], Парфьонова В. І. [24, 25], Руденка А. Б. [16. 24 – 25], Семьянских А. І. [26], Скалозуба В. В., Унтерова С. Н. [27] ін.

Останнім часом на основі розвитку сучасних методів систем автоматизації і штучного інтелекту має розвиток завдання створення автоматизованих систем управління експлуатації парків технічних систем, в тому числі ЕД СП, на основі отримання та використання для раціональної організації робіт, оцінок параметрів поточного стану [28. 29]. В рамках цього напрямку знаходять новий розвиток проблеми організації та інтеграції даних моніторингу, діагностування, а також узагальнення результатів експлуатації парку ЕД. Встановлено, що підвищення результативності цих методів і відповідних технологій їх реалізації з урахуванням поточного стану можливо на основі використання засобів інтелектуальних систем: моделей кластеризації, методів штучних нейронних мереж, нечітких і нечітко-статистичних моделей, експертних систем [29, 30]. Значний внесок у розвиток моделей і методів інтелектуальних систем внесли вчені: Дилигенський Н. В. [32], Заде Л. [33], Згуровський М.З. [34]. Кохонен Т. [35, 36]. Рутковський Л. [37. 38]. Рутковська Д. [37], Пегат А. [39. 40]. Скалозуб В. В. [41, 42, 43], Хайкін С. [44] та ін.

В даний час на УЗ технічне обслуговування стрілок електричної централізації виконується за графіком планово-попереджувальних робіт,



згідно [2, 45 – 47]. Обслуговування виконується електромеханіком і електромонтером, які перевіряють стан електроприводу і елементів СП візуальним оглядом. Нижче викладені використовувані на УЗ методи і технології експлуатації стрілочних переводів [46, 47 – 49].

Відповідно інструкції [45] в даний час процеси експлуатації ЕД здійснюються на основі планово-попереджувального методу, з урахуванням нормування. При цьому суттєво те, що процедури оцінки поточного стану пристрою передбачають виключення ЕД з реальних процесів, щоб організувати комплекс робіт щодо огляду елементів та виконання вимірювань значень їх параметрів. Вилучення ЕД з процесів експлуатації, як правило, впливає на оцінки значень параметрів станів, а також вимагає суттєвих додаткових фінансових, матеріальних та інших видів витрат.

За діючою технологією планово-попереджувальної експлуатації СП передбачається періодичне обстеження, яке відбувається відповідно до складеного графіка [45, 46]. До процесу технічного обслуговування входить і контроль основних параметрів апаратури та її регулювання в умовах експлуатації або в ремонтно-технологічній дільниці дистанції сигналізації та зв'язку. Основними недоліками існуючої технології обслуговування СП відносяться значні витрати часу, виконання операцій в ручному режимі, значна роль людського фактору. Разом з цим відсутній безперервний контроль параметрів СП, що унеможливорює своєчасне виявлення та ліквідацію несправностей. Також при перевірці стану СП негативним фактором являється недостатня кількість параметрів, які перевіряються, візуальне визначення і контроль показань при вимірюваннях робочого струму, струму роботи стрілки на фракцію ін. Удосконалення технологій планово-попереджувального методу експлуатації СП, а також парків відповідних ЕД, можливе шляхом автоматизації як процесів дистанційного діагностування основних параметрів, так і організації процесів управління експлуатацією парків технічних систем. Актуальність завдання автоматизованого

обслуговування СП і ЕД зростає в умовах впровадження високошвидкісного руху поїздів.

Слід зауважити, що діючі на УЗ інструктивні матеріали з обслуговування ЕД, по суті не можуть бути безпосередньо віднесені до «парку ЕД» як деякого цілісного самостійного об'єкту експлуатації. В значній мірі в них лише вказуються процедури експлуатації окремо взятих ЕД, незалежно від стану і властивостей інших технічних систем, в тому числі ЕД. Певні відмінності між ЕД встановлюються виходячи з місця розміщення на залізничних ділянках, що відповідає різній інтенсивності вичерпання ресурсу.

У роботах [28, 50 – 51] представлена інтелектуальна автоматизована система, яка призначена для забезпечення управління процесами експлуатації парків ЕД на основі отримання оцінок параметрів їх поточного стану, без вилучення пристроїв з виробничих процесів.

В [50, 52] був проведений збір інформації про відмови обладнання на підставі даних експлуатації електричної централізації Придніпровської залізниці, а також з [19, 24 – 27, 48]. При цьому фіксувалися характер і причина відмов, що представлено у розд. 1.2.

На дорогах Укрзалізниці за даними служби Ш в 2010 і 2011 роках число відмов стрілочних переводів склало 53 і 40 відповідно. Стрілки з електроприводом знаходяться на другому місці в ряду відмов базових елементів після рейкових кіл (28,4%). Середня інтенсивність відмов стрілок з електроприводом досягає  $6,58 \cdot 10^{-5}$  1 / год. Було встановлено [16, 46], що на великих станціях значення інтенсивності відмов стрілок істотно вище (до 1,5 - 1,7 разів). При експлуатації заміна електродвигунів всіх типів виконується не рідше ніж один раз на вісім років [45, 52]. З урахуванням того, що стрілочні електродвигуни працюють у важких неоднорідних умовах зовнішнього впливу механічних і кліматичних факторів, встановлена диференціація термінів заміни, яка залежить від інтенсивності динамічних режимів роботи електроприводів: стрілки, встановлені по головному ходу,

виконують переклад приблизно в 1,5 разів частіше, ніж стрілки, встановлені на бічних коліях.

Як зазначено в роботах [49, 53 – 54], існуючі методи, системи контролю та діагностики електроприводів стрілок електричної централізації не дозволяють виявляти багато несправностей ЕД. Слід враховувати, що відмови електроприводів становлять понад 28% із загального числа відмов ЕЦ, а частка відмов у електродвигунах постійного струму стрілочних електроприводів становить від 19 до 25% [1]. Хоча відмови автоперемикачів мають більшу частку, але на відміну від ЕД вони досить повно перевіряються електромеханіком при планових діагностичних роботах [48].

На залізницях України застосовуються електроприводи типів СП-ТС, СП-3М, СП-6, СПВ-6М, а також нові - ВСП-150, які використовуються відносно рідко. В [52, 53, 60] розвинені методи та програмно-апаратні засоби, які дозволяють встановити раціональні параметри і режими діагностування та виявлення несправностей ЕД постійного струму моделей ДП-0,18, ДП-0,25, МСП-0,15 і МСП-0,25.

Численні дослідження [52, 56 – 58] та інші показують, що витрата ресурсу електроприводів відбувається нерівномірно, а залежить від місця установки в горловині станції, від інтенсивності поїзної і маневрової роботи ін. Згідно [53], на станціях з кількістю стрілок до 30 одиниць при інтенсивності руху до 75 пар поїздів на добу тільки одна стрілка переводиться до 40 разів за добу, приблизно половина - стрілок не більше 5, 18% стрілок від 6 до 9 разів, 8% стрілок 12 разів і 5% стрілок 18 разів за добу. Враховуючи, що за встановленими нормативами у стрілочних електроприводах СП-3, СП-3М ресурс становить  $10^5$  переведень, СПВ-6М -  $6 * 10^5$  переведень.

Аналіз оцінок кількості переведень, які виконують стрілочні електроприводи, в середньому за 8 років роботи, показує значний і нерівномірний запас залишкового ресурсу (навіть при 20% його запасі) стрілочного електроприводу. Це свідчить про значні можливості економії експлуатаційних

витрат при створенні систем автоматизації обліку та діагностики парків ЕД. При цьому, використовуючи дані про оцінки очікуваної кількості переведень, можна розрахувати час, коли слід виконувати заміну електродвигунів стрілочних переводів, виходячи з їх ресурсу. Розрахунки показують, що при числі переведень стрілок до 40 разів на добу заміну ЕД необхідно виконувати через 16-18 років, до 80 переведень на добу - через 10 років.

Розвитком завдання щодо перегляду періодичності заміни двигунів стрілочних електроприводів, з урахуванням оцінок інтенсивності переведень на кожній окремій проміжній станції, ділянках розташування стрілки в горловині великої станції ін., є завдання оцінки поточного стану конкретного пристрою, за рахунок створення і використання засобів автоматизації. Рішення завдання по автоматизації процесів експлуатації парків ЕД дозволить більш раціонально використовувати їх ресурс до його капітального ремонту або списання. Аналіз свідчить, що перехід до автоматизованої експлуатації парків ЕД є економічно вигідним, дозволяє підвищити надійність стрілочних електроприводів, навіть з урахуванням відмов, які проявляються лише при приробітку стрілочного переводу. Такий висновок повною мірою відповідає світовим тенденціям щодо впровадження систем дистанційного діагностування та автоматизованих робочих місць (АРМ) при обслуговуванні пристроїв СЦБ. Розробка та впровадження таких автоматизованих систем дозволяє, в тому числі, контролювати число переведень стрілок, формуючи індивідуальний графік заміни електродвигунів для кожного з стрілочних електроприводів.

У роботі [51] представлені результати із створення інтелектуальної автоматизованої системи, що забезпечує управління процесами експлуатації парків залізничних технічних систем (електричних двигунів) на основі отримання оцінок параметрів їх поточного стану, без вилучення пристроїв з виробничих технологічних процесів. Досліджено кілька завдань щодо удосконалення автоматизованих систем управління експлуатацією парків

електричних двигунів залізничних стрілочних переводів: урахування вектору показників, за якими оцінюється ефективність процесів експлуатації, розділення процедур визначення черговості діагностування технічних систем і їх ремонтів, урахування різної відповідальності окремих залізничних ділянок і систем що їх обслуговують, формування моделі автоматизованого управління парком, з урахуванням координації підсистем і розвитку автоматизованої системи, застосування інтелектуальних методів аналізу та управління на основі нейронних мереж, а також методів екстраполяційного прогнозування часових і технічних характеристик ін. Саме цей напрям удосконалення управління процесами експлуатації парків ЕД представлено у дисертаційній роботі. Виконаний аналіз технологій експлуатації ЕД і СП та типів відмов СП показує, що частка відмов стрілок з електроприводом серед інших базових елементів електричної централізації досить велика. Удосконалення методів діагностики та експлуатації електродвигунів стрілочних переводів є актуальним завданням, яке спрямоване на зменшення експлуатаційних витрат, збільшення надійності стрілок і підвищення безпеки залізничного транспорту, в першу чергу в умовах запровадження високошвидкісного руху поїздів.

## 1.2 Основні види відмов та діючі технології і засоби діагностування параметрів стрілочних електроприводів у процесах експлуатації

Складні умови і висока відповідальність роботи стрілочних переводів, експлуатованих тривалий період на залізницях України, впливають на виникнення і характер дефектів СП, надійність їх роботи. Дефекти в кінцевому рахунку ведуть до порушення нормальної роботи стрілочних переводів і, як наслідок, до зменшення пропускної спроможності залізничних ділянок, зриву графіка руху поїздів. Розробка засобів технічної діагностики стрілочних переводів набуває ще більшого значення у зв'язку зі збільшенням швидкостей руху поїздів.

Умовно дефекти стрілочних переводів розділяють на два види: механічні та електричні [5, 13, 14]. До механічних відносять дефекти, пов'язані з викришуванням металу головки вістряка або шийки рамної рейки, дефекти елементів стрілочних гарнітур [25, 60] та ін., які далі в роботі не розглядаються. Електричні дефекти пов'язані з відмовами стрілочних електроприводів через втрату контакту в автоперемикачах, несправності щітково-колекторних вузлів електродвигуна, виходом з ладу випрямного блоку та ін. Для електродвигунів постійного струму характерними відмовами є наступні: забруднення колектора вугільним пилом від щіток; зниження ізоляції обмоток через присутність пилу і вологи; вигорання ізоляції між ламелями колектора внаслідок неякісного їх виготовлення; нещільне притискання щіток; пробої ізоляції колектора внаслідок дефектів ізоляції при виготовленні ін.

Таблиця 1.1

## Аналіз відмов стрілочних переводів через електричні дефекти

№ п/п	Причина відмови	Кількість відмов у системах, шт.	
		ЕЦ	ГАЦ
1	Обрив секцій якірної обмотки або обмотки збудження	38	1
2	Погане регулювання контрольних тяг (втрата контролю положення стрілки під поїздом)	20	4
3	Нестабільна робота фрикції	9	6
4	Злам колодок автоперемикача	18	-
5	Слабке / занадто сильне ненормоване натискання щіток колектора	3	1
6	Наявність втоми пружин автоперемикача (повільне перекидання ножів)	7	2

Статистичний аналіз дефектів магістральних СП деяких великих станцій і сортувальних гірок Південно-Західної і Придніпровської залізниці показав, що при добовій пропускній здатності 90-100 пар поїздів середня частота перемикань стрілки ЕЦ становить від 80 до 120, а на сортувальних гірках - до 350. [27, 48, 49]. Аналіз відмов СП свідчить, що протягом року за механічними дефектами з ладу виходить кожна шоста станційна стрілка,

а на сортувальній гірці - практично кожна друга. У системах ЕЦ в середньому за рік виходить з ладу приблизно кожен восьмий електропривід, в ГАЦ - кожен третій. У табл. 1.1 наведена статистика відмов СП з причини виникнення електричних дефектів.



Рисунок 1.1 Аналіз відмов електродвигунів типу МСП-0,25 на Південно-Західній залізниці

На рис. 1.1 представлено результати аналізу відмов стрілочних двигунів типу МСП-0.25, виявлених при планово-попереджувальному методі (ППМ) обслуговування парку ЕД на Південно-Західній залізниці у 2013 – 2015 р.р. На діаграмі показані пропорції різних головних видів відмов ЕД:

- 1) обрив обмотки якоря в місці пайки до колектору (73%);
- 2) міжвиткове замикання обмотки збудження (5%);
- 3) занижений рівень опору обмотки якоря (10%);
- 4) заклинювання щітки в щіткотримачі (12%).

Загальна кількість відмов ЕД перевищила 40, незважаючи на виконання всіх вимог ППМ за інструкції [45].

Один із небезпечних наслідків відмов ЕД полягає у можливості порушення нормальної роботи пристроїв електричної централізації (ЕЦ), а саме до неможливості автоматичної установки маршруту. Наприклад, у

2013 р. через обрив обмотки якоря в електродвигуні МСП-0,25 була затримка двох приміських поїздів більше ніж на 1 годину. Також у тому році через міжвиткове замикання обмотки збудження в електродвигуні МСП-0,25 на іншій станції було затримано три пасажирських поїзда на 48 хвилин, а у 2015 р. через обрив обмотки якоря ЕД МСП-0,25 затримали три пасажирських поїзда на 2 год. та ін. Попередження цих та інших відмов за рахунок удосконалення процесів експлуатації парків ЕД дозволило би не тільки уникнути економічних збитків залізниці, а й сприяти зростанню її кокурентноспроможності.

В даний час на полігоні залізниць України застосовуються такі методи діагностики ЕД СП, як омметра, мегометра, трансформатора, імпульсний і метод осцилографа-самописця. При діагностиці ЕД методами омметра, мегометра, трансформатора, імпульсне вимірювання проводяться на вимкненому двигуні. Це не дозволяє визначити багато несправностей, притаманних тільки номінальному робочому навантаженню. Робочий струм двигуна також може досліджуватися методом осцилографа-самописця. Все ж цей метод має низьку здатність і вимагає висококваліфікованого розшифрувальника [47, 60, 61].

В [24, 25] розроблено спосіб дистанційної діагностики стану механічної частини СП з електроприводом постійного струму, за яким виділяють осцилограму і аналізують криву споживаного струму двигуна. Миттєвий аналіз кривої струму, проводиться за допомогою швидкого розкладання в ряд Фур'є. На основі виявлення в спектрі гармонік певного діапазону роблять висновок про стан механічної частини стрілочного переводу. Недоліками способу є неможливість прогнозування виникнення відмов. Також до недоліків слід віднести малу кількість контрольованих параметрів, які не повною мірою дозволяють визначати поточний стан стрілочного переводу.

Можливості перевірки станів стрілочного ЕД постійного струму і частково стану СП за допомогою аналізу кривої струму переведення стрілки розглядалися раніше в роботах [13, 17, 22]. При цьому стверджувалося, що



вимірювання струму приладами візуального відліку дає не досить точні результати, внаслідок короткочасних процесів і інерційності приладів.

Дистанційне виявлення деяких несправностей в стрілочному ЕД постійного струму виконує перехідний пристрій [17], який складається з реле типу АСШ-200 без випрямляча, подільника напруги, резистора гасіння, навантажувального резистора, контрольного амперметра і пускової кнопки. Недоліками даного методу є низька точність отриманих результатів, необхідність використання додаткового обслуговуючого персоналу та ін.

В [55] розроблена автоматизована система вимірювання та контролю параметрів ЕД постійного струму стрілочних електроприводів, в якій виконується реєстрація струму ЕД під час робочого переведення стрілки, перетворення його в цифрову форму і передача даних для обробки в мікроконтролер. При перевищенні сигналом порогових рівнів, мікроконтролер видає повідомлення про несправності. При цьому електромеханік може використовувати візуальний або більш точний спектральний аналіз, заснований на алгоритмі швидкого перетворення Фур'є. По спектральному складу струму визначаються такі несправності, як обрив обмоток якоря, погана пайка, міжвиткове замикання, замикання колекторних пластин, іскріння.

В [24] були розроблені способи і технічні засоби безперервної дистанційної діагностики СП. Зокрема, спосіб діагностики переведень стрілок, який дозволяє з високою достовірністю виявляти такі дефекти: люфт якорних підшипників і шарикопідшипників в підшипниковому вузлі, забруднення або відсутність змазування башмаків стрілки.

При використанні цього способу для діагностики СП отримують в аналоговій формі струм, споживаний електродвигуном, потім апаратними засобами виконують дискретний аналіз форми кривої струму. Поява в спектрі гармоніки в діапазоні 10-150 Гц з амплітудою, що змінюється, свідчить про наявність люфтів якорних шарикопідшипників і підшипників вузла. Забруднення (відсутність) змазування башмаків стрілки, пружність вістряків проявляється при стрибкоподібній зміні швидкісної частоти. Швид-

кісна частота виникає в результаті неодночасного закорочування пластин колектора щіткою в процесі обертання якоря, який викликає зміна електричних параметрів в паралельних областях обмотки якоря, а також є причиною виникнення частоти, пропорційної швидкості обертання останнього.

В [23, 25] також запропоновано спосіб діагностики електричних дефектів стрілочних електроприводів з двигунами постійного струму. Він дозволяє виявляти такі дефекти ЕД: обриви і коротке замикання секції якоря; розпаювання (обрив) і коротке замикання пластин колектора; люфт і кількість дефектних щіток електродвигуна; дефекти пускової апаратури; зниження рівня ізоляції та опору жили кабелю живлення. Для виявлення названих вище дефектів також проводять аналіз спектра кривої струму. Несправностям електричних параметрів двигуна відповідає поява в спектрі певних гармонік. Так люфт щітки фіксується по появі в спектрі гармоніки швидкісної частоти, при цьому кількість дефектних щіток визначається числом цих гармонік. Пошкодження в обмотках, коротке замикання (КЗ) якоря супроводжуються появою в спектрі гармоніки кратної швидкісній частоті. Обриви в обмотці якоря викликають стрибкоподібну зміну амплітуд гармонік і т.д.

Аналіз відмов об'єктів залізничної автоматики дозволив виявити наступні основні їх причини: неякісне виконання робіт з технічного обслуговування та ремонту пристроїв і приладів СЦБ (11%), відмови пристроїв ПОНАБ, вихід із ладу пристроїв через фізичне старіння, несправності апаратури систем автоматичного контролю технічного стану рухомого складу, вплив грозових і комутаційних перенапруг ін. [56, 57]. При цьому відзначається значний відсоток причин виникнення транспортних подій, зв'язаних із порушенням технологій виконання робіт, а також із невиконанням робіт з технічного обслуговування пристроїв. При цьому має місце значний відсоток відмов серед елементів стрілочних електроприводів

(25%), який займають порушення роботи електродвигуна, а також порушення контакту автоперемикача (45%).

Особливістю діючих процесів експлуатації стрілочних переводів також являються способи виявлення найбільш поширених дефектів, де значне місце займає візуальне спостереження. Візуальним спостереженням визначають наступні дефекти СП: пошкодження ротора двигуна, дефекти підшипників двигуна, люфти в з'єднанні робочої тяги стрілки, злам основи кріплення двигуна, відсутність зазору в корені гостряка стрілки, віджим рамної рейки, засипання стрілочного переводу сипучими матеріалами, забруднення подушок стрілки ін. [52, 58, 60, 61].

Істотними недоліками візуальних перевірок при обслуговуванні СП та ЕД персоналом, без використання вимірювальних приладів, є неточності фіксації відмов, суб'єктивності оцінок стану та висновків про відповідність нормам того чи іншого вузла, залежність результатів від способу обліку. Результати огляду стрілки електромеханік заносить в блокнот, після перевірки всіх стрілок записи переносяться у відповідний журнал. При обмеженому часі на перевірку і великій кількості СП записують тільки перевищення основних норм головних параметрів. При цьому частина важливої інформації про поточний стан СП втрачається, не використовується в подальшому для організації процесів експлуатації парків ЕД. Недоліком існуючого технічного обслуговування СП, крім суб'єктивної точності результатів вимірювання, також є необхідність реєстрації додаткових факторів, які впливають на результат перевірки (марка хрестовини стрілки, тип двигуна ін.).

За узгодженням з черговим по станції перевірку внутрішнього стану електроприводу виконують електромеханік з електромонтером при переведенні стрілки. При такій методиці стрілку необхідно виключати з поїзної роботи на значний час, адже повна перевірка стрілочного електроприводу займає близько години. Оскільки роботи виконуються на коліях, перевірку виконують дві людини, що збільшує експлуатаційні витрати.

Залежно від типу стрілочного переводу, марки хрестовини, а також типу стрілочного електроприводу та ЕД, норму струму для кожної стрілки визначають за нормативною документацією [45 – 47]. Струм електродвигунів МСП і ДП вимірюють при нормальному переводі стрілки і при роботі на фрикцію. Струм нормального переведення стрілки визначають по максимальному відхиленню стрілки амперметра. Різниця значень струмів ЕД при роботі електропривода на фрикцію при переводі стрілки в плюсове і мінусове положення не повинна перевищувати 10% середнього арифметичного значення обох струмів. Одночасно з цим виконується перевірка стрілок на щільність притиснення гостряків. Для визначення справності стрілочного ЕД також перевіряється стан ізоляції його обмоток від корпусу, опір обмоток збудження і якоря, стан колектора і щіткового вузла, а також цілість корпусу, муфти та виводів.

При перевірках для визначення відповідності всіх параметрів заданим нормам необхідно мати професійні навички і знання обслуговуючого персоналу. Для оцінки результативності існуючої технології експлуатації СП та ЕД слід враховувати недостатньо високу точність результатів вимірювань, що дозволяє виявити тільки явно виражені несправності [22, 59].

Разом з цим багато дефектів визначаються на основі вимірювання токів вимірювальних приладів: завищений струм переведення стрілки, завищений/ занижений струм роботи на фрикцію, коротке замикання в статорі двигуна. Вище указаний дефект із засипання СП також визначається через завищені показання амперметра на пульті керування.

Діагностичними ознаками відмов елементів СП, які визначаються на основі часової залежності, вимірювання та аналізу частотного складу струму переводу стрілки, також являється наступне [56, 58]:

- присутність у спектрі значущих частот у області від 0 до 8кГц відповідає розриву одного/ декількох стрижнів ротора;

- додаткові сплески в спектральному складі біля гармоніки 50 Гц відповідають за ексцентриситет ротора;
- початок руху ротора при завищеній напрузі, чим у справного ЕД, свідчить про пошкодження в обмотці статора;
- нестабільність зміни амплітуди сигналу кривої струму під час переведення стрілок, ривки та звуки тертя ЕД свідчать про дефекти підшипників електродвигуна та ін., всього 16 різновидів відмов СП.

Вищеназвані та інші ознаки відмов ЕД та інших елементів СП являються основою для створення автоматизованих засобів діагностування і раціональної організації процесів експлуатації парків ЕД стрілочних переводів.

У роботах [52, 62] запропонована технологія експлуатації ЕД постійного струму залізничних СП, яка не вимагає вилучення двигуна з приводу, дозволяє виконувати безперервну дистанційну діагностику. Вона дозволяє усунути багато недоліків застосовуваних на УЗ методик обслуговування стрілок електричної централізації. А саме: підвищити точність вимірюваних параметрів, скоротити час перевірки стану стрілок електричної централізації, знизити вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу і зменшити час його перебування в області підвищеної небезпеки на залізничних коліях, автоматизувати процеси діагностики ЕД і ведення журналів та інше.

Розробці та створенню локальних підсистем майбутньої автоматизованої системи експлуатації стрілочних переводів і парків ЕД присвячені роботи [9, 22, 56, 58], в яких удосконалено технологію обслуговування централізованих стрілок з електроприводом змінного струму в умовах експлуатації. В них розроблено методи і засоби діагностування стрілочних переводів, створено систему автоматизованого діагностування СП, розроблено і випробувано дослідний зразок автоматизованого апаратно-

програмного комплексу для діагностування параметрів СП без виключення їх з експлуатації. Розробка дозволяє підвищити надійність експлуатації та підвищити безпеку руху поїздів.

У цілому аналіз статистики даних про причини відмов залізничних СП показав, що значна частка відмов припадає на електропривід. Для створення автоматизованих систем експлуатації парків ЕД принципово важливо, що несправності в стрілочному електроприводі, а також багато несправностей, викликаних механічними дефектами стрілочного переводу, впливають на форму робочого струму двигуна. Таким чином, аналіз спектральних характеристик струму ЕД дозволяє збільшити кількість діагностованих несправностей, підвищити достовірність діагностики, а також відкриває можливості для прогнозування різних видів відмов електродвигунів. З урахуванням того, що на основі аналізу спектрів струмів ЕД можна оцінити тенденції розвитку певних видів відмов, актуальним завданням експлуатації парків ЕД є прогнозування часу до виникнення відповідної відмови і оцінки ймовірностей таких подій. Вирішення цього завдання для підвищення ефективності експлуатації парків ЕД представлено в роботі нижче.

### 1.3 Проблеми і завдання автоматизації процесів експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів на основі обліку параметрів поточного стану

Удосконалення процесів експлуатації парків складних технічних систем залізничного транспорту (вагонів, локомотивів, стрілочних переводів, електродвигунів та ін.), а також їх складових компонентів, з урахуванням параметрів поточного стану, є актуальною науково-технічною проблемою для залізниць України, що мають десятки тисяч одиниць таких ТС [1, 15, 52]. Виконаний у попередніх розділах аналіз технологій і систем забезпечення процесів експлуатації парків ЕД стрілочних переводів дозволяє дати

оцінку ефективності діючого в УЗ планово-попереджувального методу [11 – 14, 45], а також встановити напрямки і завдання щодо його удосконалення. В першу чергу далі розглядаються і формуються завдання, спрямовані на автоматизацію управління процесами експлуатації парків ТС, а саме – електричних двигунів.

В розд. 1.1 відзначалося що в даний час експлуатація ЕД на Укрзалізниці здійснюється за планово-попереджувальним методом (ППМ). При цьому дані про оцінки параметрів ЕД, визначені при запланованих оглядах, не систематизуються і не використовуються при подальшому плануванні процесів експлуатації, автоматизація цих процесів являється недостатньою. Оскільки експлуатація кожного ЕД розглядається поза зв'язками з іншими, вони лише формально (за призначенням, за виділеними ресурсами) складають «парк». Як цілісний самостійний об'єкт управління (технічного та економічного) «парк» ЕД в діючих нормативних документах представлений в значній мірі формально, лише в обмеженому вигляді. Відмінності між ЕД встановлюються у залежності від місця його розміщення на залізничних ділянках із різною пропускнуою здатністю, різною інтенсивністю вичерпання ресурсу. Через недостовірне визначення стану конкретного ЕД, а також відсутність або невикористання на практиці методів і засобів прогнозування його зміни, планування і управління процесами експлуатації на основі параметрів «поточного стану» в рамках ППМ не може бути реалізоване.

Численні дослідження [19, 26 – 29, 52] та інші показують, що витрата ресурсу електроприводів відбувається *нерівномірно*, а залежать від місця установки в горловині станції, від інтенсивності поїзної і маневрової роботи ін. Тому застосування методу ППМ із нормованою періодичністю контролю і діагностування стану окремих ЕД, з одного боку являється надто витратним, з іншого – все ж не гарантує забезпечення надійності перевізного процесу. Перехід до автоматизованих технологій управління експлуатацією парків ЕД «за параметрами поточного стану» полягає саме в вирі-

шенні завдання щодо урахування нерівномірності витрат ресурсів ЕД, що потребує складання окремого плану контролю та діагностування та ремонту для кожного ЕД, при обліку станів та ресурсів усіх інших ТС парку.

Розвитком завдання щодо перегляду періодичності заміни двигунів стрілочних електроприводів, з урахуванням оцінок інтенсивності переведень на кожній окремій проміжній станції, ділянках розташування стрілки в горловині великої станції ін., є завдання оцінки поточного стану конкретного пристрою, за рахунок створення і використання засобів автоматизації. Рішення завдання по автоматизації процесів експлуатації парків ЕД дозволить більш раціонально використовувати їх ресурс до його капітального ремонту або списання. Аналіз свідчить, що перехід до автоматизованої експлуатації парків ЕД є економічно вигідним, дозволяє підвищити надійність стрілочних електроприводів, навіть з урахуванням відмов, які проявляються лише при приборітці стрілочного переводу.

У роботах [24, 25] та ін. встановлена можливість виявлення процесів розвитку несправностей ЕД за досить довгий період часу до виходу двигунів із ладу. Такі дослідження і розробки забезпечують широкі можливості для удосконалення процедур експлуатації множин ЕД, відповідно до комплексу конкретних характеристик систем і вимог перевізного процесу. Для підвищення ефективності і реалізації завдань експлуатації на такій інформаційній та теоретичній основі необхідно, по перше, розділити процеси моніторингу ЕД з метою забезпечення достовірності параметрів поточного стану, а також процеси планування і організації ремонтів, по друге, формалізувати процеси раціонального обслуговування парків ЕД. В першу чергу це стосується визначення послідовностей виконання процедур діагностування та ремонту на основі спеціалізації виконавців. При цьому необхідно ураховувати можливості отримання і обробки відповідних достовірних даних, які мають різну «природу» невизначеності і відносяться до різних категорій математичних моделей їх обліку і розрахунків. Вирішення цих завдань виконано у дисертаційній роботі.



Завдання із автоматизованого управління експлуатацією парків ЕД формулюється наступним чином [63 – 65]. Розглядається множина техніко-технологічних об'єктів однакового призначення (ЕД), парк технічних систем, в процесах експлуатації. Об'єкти парків характеризуються наборами властивостей, що вказують на їх певний «поточний» стан, який відображає їх придатність та можливості подальшої експлуатації. Технічний стан ЕД визначається за сигналами, що отримують без виключення з процесів експлуатації. Для парку відомі необхідні ресурси (технічні, матеріальні ін.), призначені для забезпечення експлуатації об'єктів. Необхідно забезпечити та підвищити ефективність експлуатації парку об'єктів шляхом створення інтелектуальної автоматизованої технології дистанційного діагностування параметрів поточного стану (моніторинг технічного стану), кожного ЕД. Результатом моніторингу є оцінка приналежності об'єкта до класу справного або до класів несправного. Для виявленого несправного об'єкта треба визначити вид несправності і отримати оцінку його достовірності. На основі накопичених даних моніторингу параметрів станів об'єктів потрібно встановити раціональну черговість відновлення ЕД, з урахуванням вимог щодо функціонування транспортної системи та обмежених ресурсів процесів експлуатації. Вирішення поставленої задачі по автоматизації процесів експлуатації парків ЕД дозволить контролювати технічний стан електродвигунів, забезпечить підвищення провізної спроможності та безпеки транспортної системи в цілому. Своєчасна діагностика дозволить знизити витрати, викликані простоєм елементів системи, зменшити витрати на їх відновлення. Прогнозування технічного стану ЕД дозволить реалізувати оптимальне планування процесів експлуатації парків ЕД стрілочних переводів «по поточному стану».

Подібне завдання та технологія експлуатації ЕД *постійного струму* залізничних СП запропонована і розвинена у [52, 66]. Ця технологія та запропоновані засоби дозволяють виконувати безперервну дистанційну діагностику ЕД, також не вимагають вилучення двигуна з приводу. Потребує

удосконалення практичних методик обслуговування стрілок електричної централізації. Зазначені розробки ураховують і усувають недоліки ППМ що застосовуються на УЗ. Це в свою чергу підвищує точність і скорочує час перевірки стану стрілок, дозволяє автоматизувати процеси діагностики ЕД ін.

На даному етапі актуальним стає завдання узгодження та ув'язки наведених розробок із головними завданнями управління парками ЕД, сформульованими вище. Необхідно виконати їх інтеграцію з урахуванням потреб щодо змін нормативної документації, розвитку та подальшої інтелектуалізації автоматизованих систем експлуатації парків ЕД стрілочних переводів тощо. Модель автоматизованого діагностування та реалізації елементів експлуатації парків ЕД постійного струму по параметрам поточного стану [67 – 69] приведено у додатку Б.

Розвиток технології моніторингу та діагностування ЕД стрілочних електроприводів відкриває нові можливості для створення автоматизованих систем управління парками ЕД, без вилучення пристроїв із перевізного процесу. Також необхідно урахувувати постійне удосконалення моделей і методів визначення дефектів ЕД на основі аналізу часової залежності, вимірювання та аналізу частотного складу струму переведення стрілки [24, 57, 58].

На рис. 1.1 - 1.3 представлені спектральні характеристики ЕД залізничних стрілочних переводів моделей МСП-0,25, відповідні різним видам несправностей, які перевірялися на стенді. Види несправностей ЕД визначалися експертом, Руденком А. Б., згідно з методикою [16, 24, 25]. На рис. 1.1 представлена спектрограма справного електродвигуна. На спектрограмах по осі абсцис відкладається час, а по осі ординат – частота гармонік спектру. На спектрограмі амплітуда гармонік спектру робочого струму позначається за допомогою кольору: чим більше амплітуда гармоніки, тим ближче колір до червоного. На спектрограмі праворуч представлена кольорова шкала амплітуд гармонік.

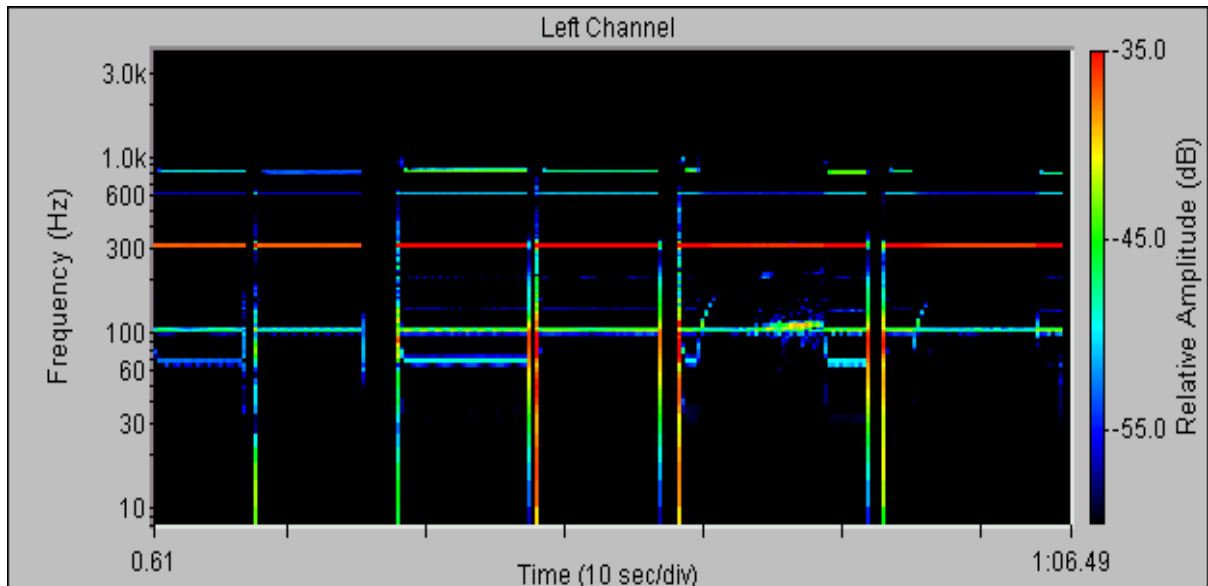


Рисунок 1.1 Спектрограма справного електродвигуна моделі МСП-0,25

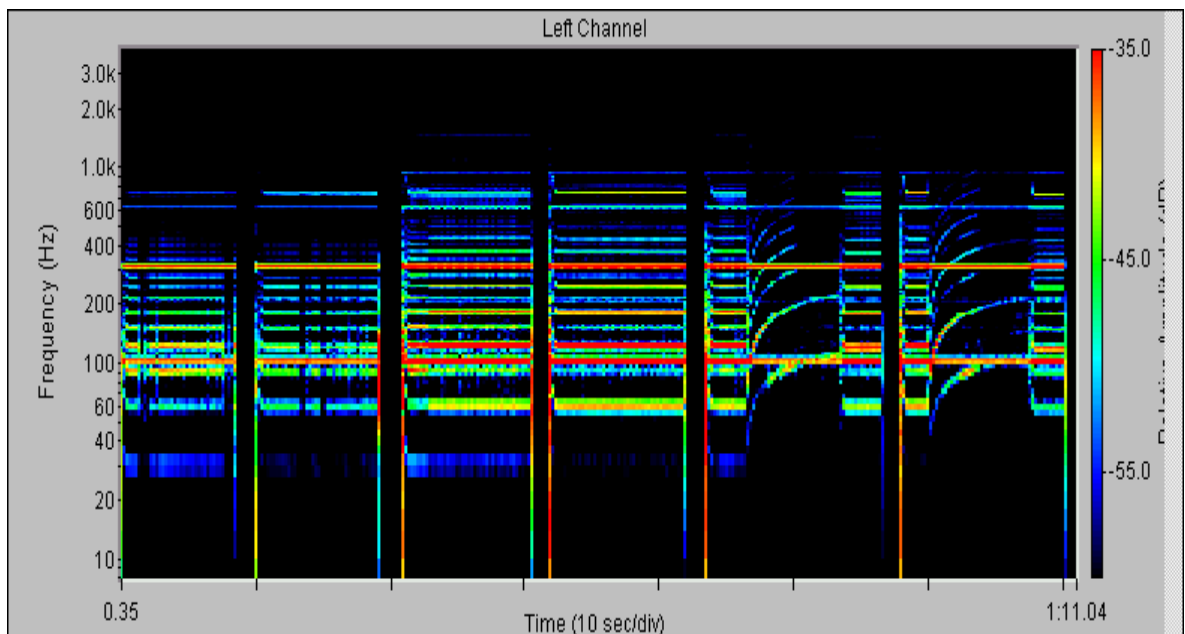


Рисунок 1.2 Спектрограма двигуна моделі МСП-0,25: два обрива якоря і коротке замикання пластин колектора

Відзначається, що сукупність несправностей рис. 1.2 виявлено лише за допомогою розрахунків на основі аналізу спектрів. Жоден статичний метод вимірювання (омметра, трансформатора, імпульсний, мегомметра) не можуть змоделювати весь комплекс зовнішніх і внутрішніх факторів,

які впливають на місце пошкодження ЕД. Надійною може бути тільки діагностика електричної машини в динаміці.

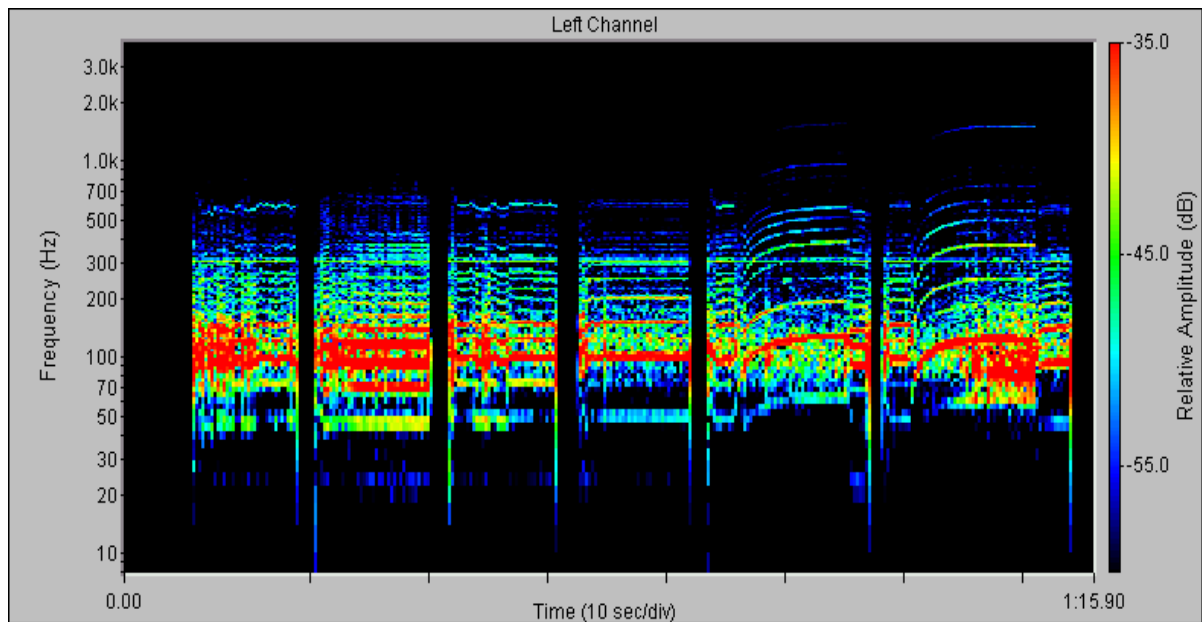


Рисунок 1.3 Спектрограма двигуна МСП-0,25: чотири місця обриву секцій якоря

Представлені на рис. 1.1 – 1.3 спектрограми свідчать про ефективність і значні можливості запровадження дистанційного контролю ЕД на основі аналізу спектрів, що забезпечить достовірність і результативність процедур управління експлуатацією парків. Також треба урахувувати що діагностика ЕД в умовах робочих навантажень, в динаміці, виконана на основі аналізу струму з використанням розрахункових методів, дає можливості точно визначити більшу кількість несправностей, що не забезпечується застосуванням осцилографічних та інших методів. Побудова при цьому в автоматизованих системах індивідуальних моделей процесів експлуатації ЕД, запропонована у [16, 66, 69], дозволяє визначати можливості формування певних дефектів ЕД за досить значний період часу до виникнення відмови. Наявність таких даних дозволяє встановлювати необхідну

періодичність або черговість проведення обстежень та ремонтів ЕД парків, тобто на новому рівні виконувати планування робіт ін.

Формування спектрограм виду рис. 1.1 – рис. 1.3, тобто графічного зображення сукупного поточного стану ЕД, відкриває можливості застосування новітніх методів і інтелектуальних засобів оброблення, класифікації зображень з використанням технологій нейронних мереж. Зокрема, застосовувати технології глибинного багаторівневого прямого аналізу складних зображень, які реалізуються нейронними мережами [70].

### Висновки по розділу 1

1. Виконаний в розділі аналіз досліджень і розробок в галузі технологій експлуатації і технічного обслуговування залізничних стрілочних електроприводів, а також основних видів відмов та діючих технологій і засобів діагностування параметрів СП у процесах експлуатації, дозволив встановити наступне. За діючою на Укрзалізниці методикою планово-попереджувальне обслуговування ЕД відбувається за попередньо складеним графіком, відсутній безперервний контроль стану електроприводів, значна кількість дефектів оцінюється візуальним спостереженням, СП необхідно вилучати із технологічних процесів експлуатації. Заміна електродвигунів стрілок згідно періодичності, встановленої прийнятими на Укрзалізниці нормативами, веде до небажаного передчасного капітального ремонту двигуна з невикористаним ресурсом. Нерівномірність вироблення ресурсів електроприводів приводить до зайвих експлуатаційних витрат, причому без гарантії надійності СП і стійкості процесів залізничних перевезень. Рівень автоматизації процесів експлуатації СП залишається низьким.

2. Огляд існуючих методів технічної діагностики електродвигунів стрілочних електроприводів дозволив виявити найбільш ефективні. Серед них для двигунів постійного струму відзначається такий, що передбачає

визначення стану електродвигуна і несправностей по кривій робочого струму з використанням спектрального аналізу на основі швидкого перетворення Фур'є.

3. У теперішній час розроблені і частково запроваджені окремі методи і засоби, які дозволяють виконувати дистанційну діагностику СП і їх електродвигунів постійного і перемінного струму. Вони показали свою спроможність щодо підвищення ефективності процесів експлуатації. За їх допомогою на даний час можлива автоматизація окремих завдань технічного обслуговування СП. Розробки комплексних систем автоматизації процесів експлуатації обмежені.

4. В діючих інструктивних документах з експлуатації електродвигунів СП відсутнє поняття «парк технічних систем» як цілісний об'єкт, не сформовані і не закріплені за ним специфічні ознаки, функції та головні завдання щодо його ефективної експлуатації.

5. Досвід експлуатації ЕД стрілочних переводів і виконані широкі дослідження цих процесів переконливо показують необхідність проведення неперервного контролю та діагностування дефектів електродвигунів в умовах реальних навантажень, динамічно. За рахунок цього забезпечується можливість на основі аналізу струму з використанням розрахункових методів визначити більшу кількість дефектів або несправностей ЕД, знизити загальні експлуатаційні витрати, забезпечити автоматизацію управління на основі оцінок «поточного стану».

6. На залізничному транспорті України на основі досліджень сформовані системи змістовних правил, що з високою достовірністю дозволяють встановлювати зв'язки між дефектами ЕД та їх ознаками при обслуговуванні СП, які розроблені для електродвигунів з постійним і перемінним струмом. Можливості раннього виявлення дефектів, а також прогнозування розвитку станів ЕД і термінів до виникнення несправності, являються резервом для вирішення завдань раціонального управління парками електродвигунів.

7. Розвиток технології моніторингу та дистанційного діагностування ЕД стрілочних електроприводів відкриває нові можливості для створення автоматизованих систем управління парками ЕД на основі параметрів поточного стану, без вилучення пристроїв із процесів експлуатації, при урахуванні невизначеності параметрів перевізного процесу та інфраструктури.

Результати розділу опубліковані у роботах [7, 64, 74, 83, 99].

## РОЗДІЛ 2

### РОЗВИТОК АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ

#### Вступ

Характерними рисами та вимогами до сучасних залізничних перевезень являються підвищення їх ефективності та конкурентноспроможності, а також безпеки процесів експлуатації технічних систем, зниження впливу транспорту на навколишнє середовище в умовах зростаючої інтенсивності транспортних потоків, посилення взаємодії різних видів транспорту при вирішенні логістичних та інших технологічних завдань, розвиток і застосування методів і технологій інтелектуальних транспортних систем залізничного транспорту ін. [72 – 74].

У розділі виконано розробки, спрямовані на забезпечення стійкості залізничних перевезень на основі підвищення ефективності процесів експлуатації та надійності автоматизованих підсистем транспортної інфраструктури, в тому числі за умов виникнення відмов і обмежень пропускної спроможності поїздоділянок. Предметом аналізу являються залізничні стрілочні переводи, а також процеси експлуатації парків ЕД що в них використовуються (моделі ДП 0.18, ДП 0.25, МСП 0.15, МСП 0.25 ін.). Виходячи з потреби забезпечення стійкості процесів залізничних перевезень, виконано удосконалення технологій і системи автоматизованої експлуатації парків ЕД (далі АЕПЕД): Для досягнення цієї мети сформульовано удосконалені завдання щодо побудови моделей планування черговості діагностування ТС та їх ремонтів з урахуванням впливу на стійкість параметрів пропускної спроможності та ефективність процесів перевезень, різної відповідальності окремих залізничних ділянок і систем що їх обслуговують. Зазначені постановки завдань, їх математичні моделі і відповідні методи автоматизованого управління процесами експлуатації парків ТС також



ураховують різну можливу форму апріорної інформації про технічний стан засобів транспортної системи (статистична [75 - 77], нечітка [78 – 80], умови невизначеності ін.), а також можливості адаптації параметрів процедур планування, застосування інтелектуальних нейронно-нечітких методів управління АЕПЕД.

## 2.1 Характеристика завдання автоматизованої експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів

Підвищення ефективності процесів експлуатації залізничних СП на основі автоматизації та дистанційного діагностування параметрів поточного стану їх ЕД являється сучасним актуальним науково-технічним і технологічним завданням залізничного транспорту. Визначення характеристик досягнутого рівня діючих систем автоматизації УЗ дозволяє сформулювати завдання щодо підвищення їх ефективності, в першу чергу при управлінні парками ЕД стрілочних переводів. Як встановлено у розд. 1, такий аспект автоматизованого управління експлуатацією ТС зараз лише починає розвиватися [52, 72, 81 – 83].

Відмінними властивостями інтелектуальної автоматизованої системи (АСЕД), що виконує управління процесами дистанційного діагностування та вирішує окремі завдання експлуатації парків ЕД являються наступні [52, 60, 61]. В АСЕД виконуються вимірювання характеристик двигунів, які знаходяться під впливом номінальних, робочих значень напруги, струмів, магнітних полів, відцентрових сил та ін., що дозволяє виявляти більше несправностей, ніж при використанні статичних методів діагностування [25]. В [51, 52] для реалізації безпосередніх процедур управління парком ЕД з урахуванням їх технічного стану розроблена дворівнева система математичних моделей, верхній рівень якої представляє головні контрольовані властивості парку у цілому, забезпечує визначення оцінок параметрів поточного стану і обмежене прогнозування їх значень. На нижньому рівні формуються індивідуальні для ЕД інтелектуальні математичні

моделі (ІМ) окремих об'єктів, які представляють еволюцію станів конкретних електродвигунів. Розвитком цих досліджень являється удосконалення моделей кожного із рівнів. А саме, за допомогою ІМ необхідно для удосконалення управління парком ЕД прогнозувати такі параметри, як очікуваний час до появи несправності, оцінки витрат на відновлення ЕД тощо. На нижньому рівні необхідно формувати не одну, а декілька індивідуальних ІМ для окремих процесів, наприклад, діагностування, ремонту тощо.

Автоматизована технологія АСЕД базується на аналізі частотного спектра робочого струму двигуна, що реалізовано за допомогою швидкого перетворення Фур'є [84 – 86]. Для кожного ЕД у ІМ також зберігають характеристики справного стану, необхідні для отримання оцінок достовірності несправностей, виявлених при діагностуванні. Розпізнавання можливих несправностей ЕД виконується нейронними мережами Кохонена [35, 36, 71]. Аналіз взаємного розташування кластерів на топологічній карті Кохонена дозволяє виявляти подібності або відмінності між різними класами несправностей. Використання мережі Кохонена дозволяє виявляти і нові види несправності ЕД [52]. При цьому вхідні зразки нових видів несправностей будуть розміщені на топологічній карті поза відомих кластерів. Вхідний шар мережі Кохонена складається з 256 елементів, на кожен з яких подаються величини інтенсивності гармонік перетворення Фур'є струму ЕД. Вихідний шар мережі являє собою топологічну карту. В результаті експериментів кращу здатність до кластеризації показала топологічна карта розмірністю 3 на 5 елементів [64, 65]. На основі поточного і прогнозованого технічного стану кожного ЕД визначають черговості їх ремонту.

Розвитком цих моделей і процедур автоматизації при управлінні парком ЕД являється, по перше, планування послідовностей кількох процесів (наприклад, встановити раціональну черговість контролю і відновлення елементів, з урахуванням вимог щодо безпеки транспортної системи та обмежених ресурсів процесів експлуатації, до яких віднесено час ремон-

ту, персонал, запасні частини, грошові кошти ін.), по друге, урахування різних видів вихідних даних, що характеризують умови невизначеності, а також використовують при формуванні ІМ та інших моделей процесів (наприклад, статистична, нечітка, інтервальна, набори подібних прикладів ін.). Ці завдання нижче досліджені в роботі.

Виконані дослідження і розробки [9, 16, 22 – 25, 52, 58] дозволяють перейти від планово-попереджувального методу експлуатації до обслуговування парків СП по фактичному технічному стану ЕД. До основних експлуатаційних властивостей та характеристик зазначених систем моделювання та автоматизації (разом із віддаленою діагностикою без виключення СП з процесів експлуатації; прогнозування відмови ЕД на основі індивідуальних моделей) відносяться наступні: самонавчання і адаптація моделей об'єктів; простота експлуатації; потенційна можливість застосування до інших технічних систем (ТС) або їх елементів (інші типи ЕД, дизельні тягові, двигуни локомотивів тощо). Необхідно відзначити, що для реалізації таких проектів потрібно встановити технічні можливості та організувати процеси дистанційного діагностування станів ТС у процесах експлуатації, сформувати для кожної ТС наведені вище завдання визначення черговості обслуговування та ремонтів, прогнозування на основі індивідуальних моделей експлуатації ЕД.

У даній роботі для подальшого переходу від планово-попереджувального методу експлуатації до обслуговування по фактичному технічному стану СП і ЕД, необхідно отримати розвиток наступних методів і засобів автоматизованої системи моніторингу та управління процесами експлуатації парків елементів технічних систем залізничного транспорту АСЕД, запропонованої в [51, 52]. Подальше удосконалення системи АСЕД визначається наступним.

1. Формування індивідуальних ІМ процесів експлуатації ЕД на основі даних моніторингу параметрів поточного стану без виключення з

технологічних процесів та їх використання для планування, як черговості ремонтів, так і контрольних оглядів ЕД, їх діагностування тощо.

2. Планування ремонтів і контрольних оглядів об'єктів парків ЕД на основі модифікованої моделі транспортної задачі (облік вимог спеціалізації шляхом застосування моделі «цілерозподілення» з обмеженими пропускними здатностями [87, с. 139]), представленої у формі лінійного програмування (ЛП) з нечіткими та інтервальними коефіцієнтами [89].

3. Адаптивне використання статистичних даних (та експертної інформації в термінах лінгвістичних змінних про несправності ЕД) в процедурах прогнозування оцінок часів до відмов конкретних видів. Реалізація завдань прогнозування технічного стану з використанням методів штучного інтелекту [90].

4. Багатокритеріальної моделі планування процесів експлуатації парків однорідних технічних систем (безпека, ефективність, витрати ін.), а також облік неоднорідних умов невизначеності і значень параметрів поточного стану об'єктів [88, 92, 93].

## 2.2 Постановка завдання автоматизованої експлуатації парків електродвигунів залізничних стрілочних переводів

Актуальність постановки удосконаленого завдання із формування автоматизованого управління процесами експлуатації парків електродвигунів (АЕПЕД) стрілочних переводів, на основі характеристик і вимог, наведених у розд. 2.1, обумовлена в першу чергу обмеженістю діючих на УЗ технологій і планово-попереджувального методу, роботи [45, 53, 47]. В них парк систем, ЕД або СП, як окрема техніко-технологічна сутність фактично не визначено, на основі відповідних вимог, критеріїв, функцій, тощо. Перехід до автоматизованої експлуатації парків ТС «на основі параметрів поточного стану» також необхідно виконувати на системній основі з ура-

хуванням усієї сукупності зв'язків, існуючих між системами перевезень, забезпечення руху поїздів, технолого-економічного управління ін. Таким чином існує декілька аспектів щодо підвищення ефективності експлуатації парків і відповідних варіантів постановки завдання АЕПЕД.

Змістовно завдання із автоматизованого управління експлуатацією парків технічних систем (в першу чергу ЕД) або їх компонентів, формулюється таким чином. Розглядається та автоматизовано контролюється певна множина складних техніко-технологічних об'єктів однакового призначення (зокрема ЕД), парк технічних систем, а також процеси їх експлуатації. Об'єкти парків характеризуються наборами властивостей, значення яких вказують на їх певний «поточний» стан, що відображає хід і можливості подальшої експлуатації кожної з систем. Технічний стан об'єкта на даному етапі його експлуатації визначається за «сигналами», що знімаються з нього, причому дистанційно, без виключення з процесів експлуатації. Дані про параметри поточного стану, які надходять, відповідним чином обробляються, аналізуються і узагальнюються, а також накопичуються в системі управління процесами експлуатації. Також вважаються відомими ресурси (технічні, матеріальні, трудові та ін.), необхідні або ж виділені для експлуатації парку об'єктів. Ставиться завдання щодо забезпечення реалізації сукупності залізничних транспортних технологій, відповідно до призначення парку ТС, а також підвищення ефективності процесів експлуатації парку об'єктів на основі створення інтелектуальної автоматизованої технології та системи управління процесами експлуатації парку технічних об'єктів по поточному стану, з урахуванням усіх істотних зв'язків між системами перевезень, забезпечення руху поїздів, технолого-економічного управління. При цьому потрібно безперервно визначати поточний технічний стан компонентів системи (виконати раціональний моніторинг технічного стану), а також забезпечити раннє виявлення явних і прихованих несправностей. Результатами моніторингу є оцінки параметрів поточного стану, а також визначення приналежності об'єкта до класу справного або до класів неспра-

вних. При виявленні несправних станів об'єкта необхідно визначити вид несправності і отримати оцінку достовірності. На основі даних моніторингу об'єктів та попередніх даних про процеси експлуатації, представлених в детермінованих термінах або з урахуванням характеристик невизначеності технологічних чи експлуатаційних процесів, потрібно спрогнозувати можливі зміни технічного стану елементів системи, а також встановити раціональні черговості діагностування та відновлення елементів парку, з урахуванням вимог щодо безпеки транспортної системи та обмежених ресурсів процесів експлуатації. Визначені черговості обслуговування об'єктів парку повинні забезпечити багатокритеріальну ефективність процесів автоматизованого управління парком ТС, тобто за встановленим векторним показником, на заданому часовому інтервалі виконання процесів залізничних перевезень.

Наведена постановка із створення АЕПЕД розширює та конкретизує зміст завдань розд. 1 щодо автоматизованого управління процесами дистанційного діагностування електродвигунів СП, з урахуванням вимог розд. 2.1. Рішення поставленої задачі по автоматизованій експлуатації парків технічних систем дозволить своєчасно оцінити технічний стан контрольованих елементів систем, забезпечить можливість підвищення безпеки як окремих об'єктів, так і транспортної системи в цілому. Своєчасне та раціонально організоване діагностування ЕД дозволить знизити експлуатаційні, а також можливі додаткові витрати, викликані простоєм елементів транспортної системи і зменшити витрати на відновлення. Прогнозування технічного стану об'єктів дозволить реалізувати оптимальне, а у загальному випадку – багатокритеріальне, планування процесів експлуатації парків ЕД залізничних стрілочних переводів на основі обліку параметрів поточного стану.

Як зазначалося, розробка та удосконалення системи забезпечення руху поїздів АЕПЕД повинні виконуватися на системній основі, узгоджено з існуючими на УЗ системами перевезень, технолого-економічного управ-

ління ін. Розглянемо фактори впливу технологічних та економічних аспектів реалізації перевезень на формування засад АЕПЕД., а також потреб щодо їх обліку і формального представлення у створюваній системі. Наведені у розд. 2.1 вимоги до засобів автоматизації мають бути представлені засобами відповідних вимог та завдань економіко-математичного моделювання та оптимального управління процесами експлуатації парків ЕД. Реалізація цих завдань визначатиме всі властивості АЕПЕД.

По перше, зазначимо відмінність і складність необхідних для автоматизованої системи моделей та методів планування і управління, яка полягає в урахуванні різноманітних умов невизначеності, які виникають на практиці. У зв'язку із обмеженою і несистематизованою інформацією про об'єкти (ЕД) та процеси їх експлуатації у нашому випадку, як і у багатьох дослідженнях вважається, що умови невизначеності можливо представити у вигляді інтервалів значень параметрів систем та у формі розмитих або нечітких величин [33, 34, 79]. У разі наявності достатніх статистичних даних також формуються статистичні моделі процесів експлуатації парків ЕД.

Наступна особливість вирішуваних питань економіко-математичного планування процесів експлуатації парків ЕД полягає у постановках завдань із визначення послідовностей обслуговування (оглядів, діагностування, ремонтів) елементів з урахуванням наближених оцінок їх поточного стану (значень набору параметрів). Це повинно суттєво вплинути на показники надійності, технологічної та економічної ефективності експлуатації парку ЕД. На показники ефективності виконання робіт також впливає спеціалізація виконавчих систем або технологій. Питання розподілу робіт між виконавцями за умов неповної інформації є важливими при плануванні процесів експлуатації парків ТС. Формалізацію завдання із розподілу робіт з об'єктами з урахуванням спеціалізації, ТС зокрема ЕД, тобто між можливими виконавцями, враховуючи умови невизначеності у формі нечіткості [65, 66, 81], що виникає при прогнозі параметрів стану,

зовнішніх факторів ін., також необхідно включити до технологій автоматизації АЕПЕД.

По третє, для отримання загальної оцінки результатів розробок також необхідна методика економічної ефективності створення засобів автоматизації управління парками ЕД в умовах невизначеності.

Формування завдання із створення засад системи управління парками ЕД АЕПЕД головним чином має урахувати вимоги перевізного процесу залізниць. Відомо, що завдання управління пропускною спроможністю залізниць тісно пов'язане з надійністю виконання технології організації перевізного процесу на поїздоділянках [94]. Під надійністю (стійкістю функціонування) будемо розуміти властивість системи зберігати у часі значення всіх визначених параметрів, що характеризують придатність до виконання необхідних функцій при встановлених умовах, в заданих межах. Прикладом такого параметра являється значення максимальної кількості поїздів на деякій ділянці при забезпеченні встановленого рівня експлуатаційної надійності процесу перевезень. Основна функція для залізничної ділянки – це пропускання поїздопотоку із заданою точністю продовж заданого інтервалу часу. Комплексна характеристика надійності визначається набором показників з урахуванням умов експлуатації. Для залізничних ділянок параметром, що визначає стійкість процесу функціонування, являється показник відхилення реального і відповідного нормативного графіка проходження поїздів, а відмовою виступає, наприклад, затримка прибуття/відправлення поїздів. При цьому відмови можуть бути викликані технічними засобами інфраструктури, які визначають технічну надійність пропускної спроможності ділянки (колія, стрілочні переводи, пристрої СЦБ і зв'язку ін.), а також організаційно-технологічними причинами [94]. Затримки поїздів на мережі виникають та залежать від пріоритетності поїздів, насиченості графіка руху, розташування поїздів різних категорій на ділянках, забезпечення технічної надійності та багатьох інших випадкових і невизначених факторів. Зараз при визначеності пропускної спроможності по суті ураховується технічна надійність. Саме питанням підвищення рівня цієї складової стійкості процесів залізничних перевезень необхідно приділити значну увагу у системі АЕПЕД, див. розд. 3. Завдання із підвищення



стійкості перевезень на основі показників технічної надійності стрілочних переводів або їх компонентів (ЕД), що представлено як управління експлуатацією парка ТС. Реалізація постановок завдань щодо автоматизації процесів експлуатації парків електродвигунів СП, виконана у розділі, служить основою для переходу від планово-попереджувального методу обслуговування ЕД до експлуатації парків ЕД на основі параметрів поточного стану.

### 2.3. Розробка автоматизованої технології діагностування і управління парком електричних двигунів

У розділі отримано розвиток автоматизованої технології діагностування двигунів постійного струму і управління деякими процесами експлуатації парку ЕД [52, 68], схематично представленої у додатку Б, на рис. Б.1. При цьому головна увага приділяється створенню можливостей системного управління парком ЕД на основі уточнення параметрів поточного стану, розробці відповідних моделей і функцій в системі АЕПЕД, необхідних для раціонального багатокритеріального планування технічних та технологічних завдань, з урахуванням невизначеності значень параметрів ЕД стрілочних переводів та умов інфраструктури.

#### 2.3.1. Розробка структури та функцій системи автоматизованої експлуатації парків технічних систем за параметрами поточного стану та інфраструктури

В загальному плані технологія і структура автоматизованої системи дистанційного діагностування ЕД рис. Б.1, на основі аналізу спектру струму в умовах робочих навантажень, а також застосування штучних нейронних мереж (ШНМ) Кохонена [44, 51, 95, 96], опис яких подано у розд. 1.3, показали свою придатність та ефективність. Їх основні елементи, технології і процедури можуть бути застосовані у АЕПЕД. Це забезпечує достовірне вирішення досить значної кількості базових завдань дистанційного діагностування ЕД, спектрального аналізу струму, моделювання процесів класифікації дефектів та відображення їх розвитку, що виконується за допомогою ШНМ тощо.

На рис. 2.1, рис. 2.2 подано приклади графіків спектрів струму ЕД моделі МСП-0,25, як приклади типових вихідних даних для систем нейронно-мережевого моделювання, для таких типів несправностей, як

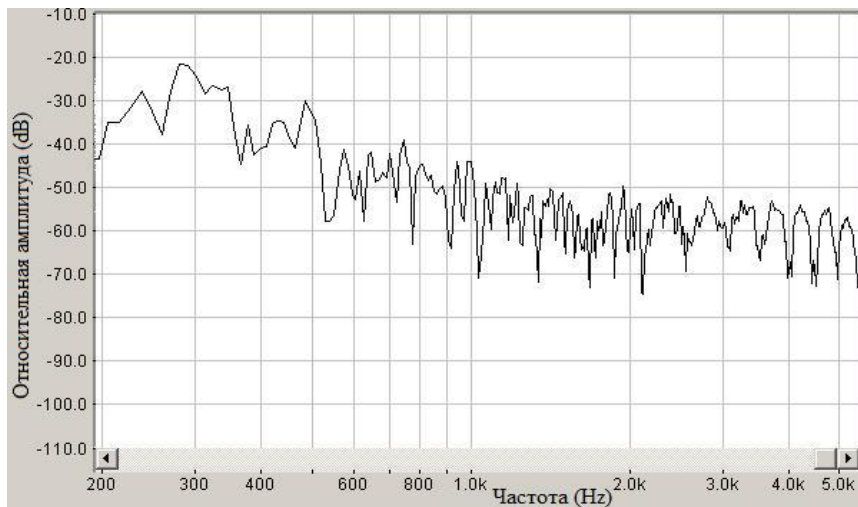


Рисунок 2.1 Графік спектра струму електродвигуна моделі МСП-0,25: коротке замикання секції якоря

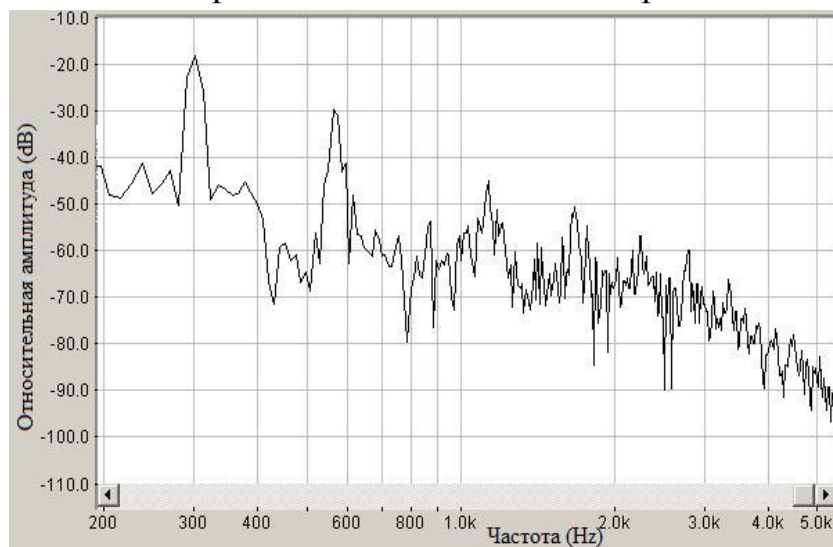


Рисунок 2.2 Графік спектра струму електродвигуна моделі МСП-0,25: коротке замикання пластин колектора

коротке замикання секції якоря та коротке замикання пластин колектора. Подібні графіки спектрів струму відповідають іншим несправностям ЕД (круговий вогонь по колектору, обрив секції якоря ін.), зазначеним у розд. 1, а також додаток Г.

Нижній рівень системи АЕПЕД, призначений для виконання функцій дистанційного моніторингу станів ЕД, блок БДМ, представлено на рис. 2.3. Для електродвигунів СП можливий моніторинг технічного стану без вилучення з стрілочного приводу. Для цього кабелі, що живлять стрілочні дви-

гуни, зводяться на станції в релейну. При знятті кривої струму електродвигуна в релейній можливий постійний контроль технічного стану всіх стрілочних електродвигунів станції. Відповідно рис. 2.3 сигнали від СП передаються до виділеного вузла, релейної, де виконуються процедури аналізу токів ЕД, отриманих в умовах робочого навантаження. Дискретизація робочих токів ЕД і отримання їх спектральних характеристик засобами перетворення Фур'є (ШПФ) виконується у блоці аналого-цифрового перетворення, АЦП-ШПФ, рис. 2.3.

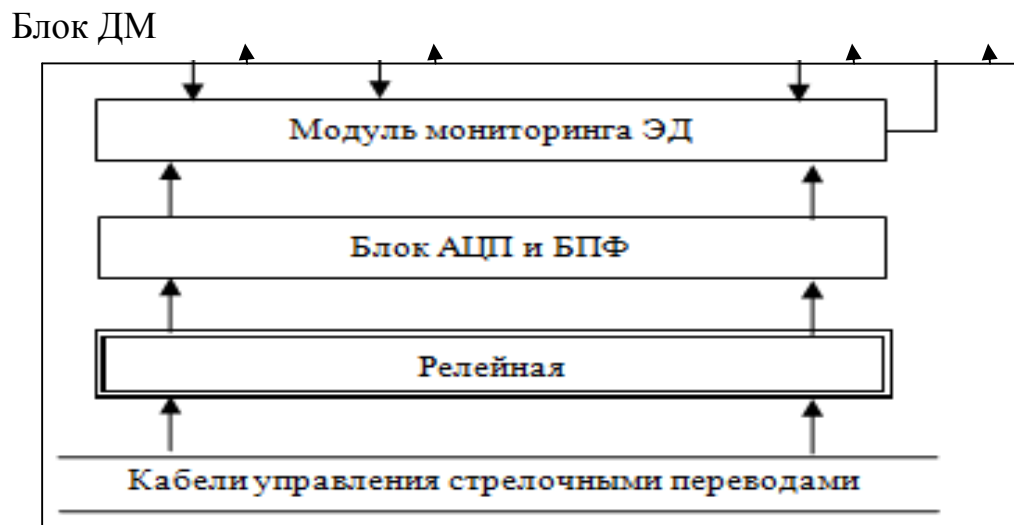


Рисунок 2.3 Нижній рівень структури автоматизованої системи АЕПЕД: блок дистанційного моніторингу ЕД (БДМ)

На основі вихідних даних модуля моніторингу ЕД, представлених у формі частотного спектру, блок АЦП-ШПФ, в подальшому на наступних рівнях моделі АЕПЕД для кожного електродвигуна формується одна із індивідуальних моделей – модель процесів діагностування (ІМД), яка також зберігає спектральні характеристики справного стану двигуна. На відміну від системи рис. Б.1, додаток Б, у АЕПЕД формуються кілька індивідуальних моделей ІМ для кожного ЕД, які використовують для різних процесів управління експлуатацією парків ЕД. Іншими джерелами формування моделей ІМ, крім дистанційного діагностування, являються дані про параметри оглядів електромеханіком при обслуговуванні СП та ін. Дані модуля БДМ використовують для процедур моніторингу кожного ЕД, а за його результатами в свою чергу формують розширені ІМД та інші моделі процесів експлуатації парків ЕД – МП, що вказують подвійні стрілки рис. 2.3.

Завдання з автоматизації управління процесами експлуатації парку ЕД з контрольованими поточними станами вирішується на основі побудови дворівневої нейронно-мережевої моделі (карти Кохонена [35, 36, 71]). В ній моніторинг станів ЕД і аналізу їх динаміки реалізується в рамках індивідуальної моделі двигуна (ІМД). Пропонована в роботі удосконалена модель керування експлуатацією парку ЕД, формалізована у розд. 3, полягає в об'єднанні можливостей індивідуальної моделі зміни станів ЕД з моделлю експлуатації всього парку [69]. Одночасно з використанням моделі парку (МП) контролюються можливі зміни поточного стану ЕД, що відображають відповідні різні типи несправностей. Як початкові використовуються експлуатаційні дані всього парку ЕД – гармоніки певної частоти і інтенсивності в спектрі струму для електродвигунів з раніше виявленими станами (зразки), а також відповідні параметри досліджуваного електродвигуна.

Процедура моніторингу порівнює спектр справного стану ІМ зі спектром, отриманим з блоку ШПФ, і при виявленні їх «істотних відмінностей» виконується модуль діагностування несправностей ЕД. На виході модуля діагностування отримують типи виявлених несправностей, а також оцінки достовірності цих подій. Розраховані спектри та оцінки зберігаються в ІМ ЕД, формуючи упорядковану послідовність спостережень, зокрема - часовий ряд. Ці дані далі використовуються для прогнозування параметрів технічного стану ЕД в процедурах планування ремонтів та ін. Значення параметрів поточного стану кожного ЕД і прогнозовані (за даними ІМ) на заданий часовий інтервал використовуються для визначення раціональної черговості ремонту електродвигунів, враховуючи інформацію про парк в цілому.

В системі автоматизації АЕПЕД передбачена побудова моделі статистичних даних про процеси експлуатації, як карти ознак Кохонена [35]. Зміна розташування відображення поточного стану на карті Кохонена ха-

рактизує динаміку процесів, в даному випадку – вироблення ресурсу ЕД і необхідності проведення відповідного несправностям ремонту.

Мережі Кохонена ( self-organizing maps = SOM, Kohonen maps) або карти що самоорганізуються призначені для вирішення завдань автоматичної класифікації, коли навчальна послідовність образів відсутня.[35, 36]. SOM це двошарова нейромережа, що містить вхідний шар (шар вхідних нейронів) і шар Кохонена (шар активних нейронів). Шар Кохонена (L-S) може бути: одновимірним, двовимірним, як у роботі, або тривимірним. Через відсутність навчальної послідовності образів, визначення вагів нейронів L-S засновано на використанні алгоритмів самонавчання, автоматичної класифікації (кластеризації).

Принцип роботи SOM наведено на рис. 2.4, на якому наведено приклад топологічної карти SOM, що містить вхідний шар з  $n$  вхідних нейронів і шар Кохонена з  $m$  вихідних нейронів, розташованих у вигляді прямокутника. Нейрони вхідного шару служать для введення значень ознак розпізнаваних образів. Активні нейрони L-S призначені для формування областей (кластерів) різних класів образів, причому число цих кластерів апіорі не відомо. На рис. 2.4 показані зв'язки всіх вхідних нейронів лише з одним нейроном шару Кохонена. Кожен нейрон шару Кохонена з'єднаний також з сусідніми нейронами. Введемо наступні позначення:

$$\mathbf{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jn})^T, j=1, 2, \dots, m \quad (2.1)$$

вектор вагових коефіцієнтів  $j$ -ого нейрона шару Кохонена

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (2.2)$$

вхідний вектор і вектор значень ознак вхідного образу.

На стадії навчання (самонавчання) SOM вхідний вектор  $\mathbf{x}^c$  попарно порівнюється з усіма векторами  $\mathbf{w}_j$  всіх нейронів шару Кохонена. Вводиться функція близькості (евклідова відстань). Активний нейрон з номером  $s$  шару Кохонена, для якого значення функції близькості  $d(\mathbf{x}, \mathbf{w}^c)$  між

вхідним вектором  $x$ , що характеризує деякий образ, і вектором  $w_c$  максимально, оголошується "переможцем". При цьому образ, який характеризується вектором  $x$ , відноситься до класу, який представляється нейроном-переможцем". У результаті здійснюється перетворення  $n$ -мірного вхідного простору  $R^n$  на  $m$ -мірну сітку (шар Кохонена).

По завершенні процесу самонавчання на стадії реального використання мережі Кохонена невідомі вхідні образи відносяться до одного з виявлених кластерів (класів).

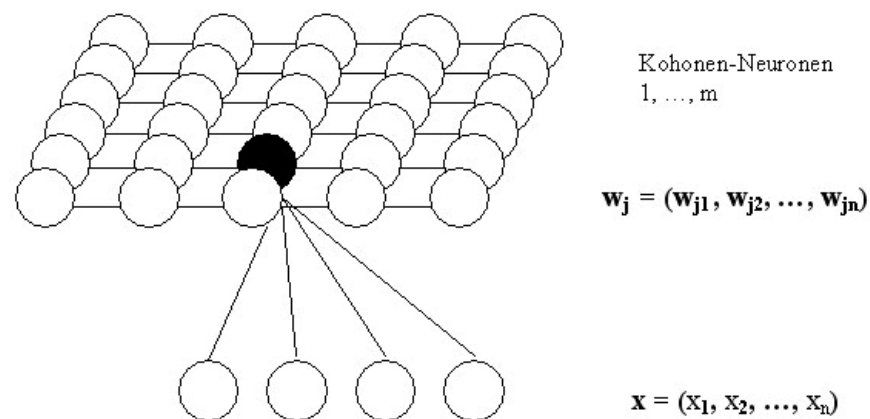


Рисунок 2.4 Топологічна карта мережі Кохонена з  $n$  вхідними і  $m$  вихідними нейронами:

При визначенні відстані між вхідним вектором  $x$  (2.2) і ваговим вектором  $w_j$  (2.1)  $j$ -го нейрона шару Кохонена використовують різні функції близькості (зазвичай евклідова відстань). При цьому "виграє" нейрон «с» з ваговим вектором  $w_c$ , найбільш близьким до вхідного вектора  $x$ :

$$[x - w_c] = \min_j [x - w_j] \quad (2.3)$$

При використанні скалярного добутку для нормованих векторів (одиничної довжини).

$$x'w_j = \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} = net_j = z_j \quad (2.4)$$

"виграє" нейрон з максимальним значенням цього скалярного добутку.

На стадії самонавчання SOM здійснюється корекція вагового вектора не тільки нейрона-"переможця", але й вагових векторів інших активних нейронів шару Кохонена, в істотно меншій мірі – залежно від віддалення від нейрона-"переможця". При цьому форма і величина околу навколо нейрона- "переможця", вагові коефіцієнти нейронів якої також коригуються, у процесі навчання змінюються. Спочатку починають з дуже великої області – вона, зокрема, може включати всі нейрони прошарку Кохонена. Зміна вагових векторів здійснюється за правилом:

$$w_j(t+1) = w_j(t) + \eta(t) d_{cj}(t) [x(t) - w_j(t)], j=1,2,\dots,m \quad (2.5)$$

де

$w_j(t)$  - значення вагового вектора на t-му кроці самонавчання мережі,  $d_{cj}(t)$  - функція близькості між нейронами прошарку Кохонена,  $\eta(t)$  - змінюваний у часі коефіцієнт корекції. В якості  $\eta(t)$  зазвичай вибирається монотонно зменшувана функція ( $0 < \eta(t) < 1$ ), т. Е. Алгоритм самонавчання починається порівняно великими кроками адаптації і закінчується відносно невеликими змінами. В ідеальному випадку при використанні процедури (5) вагові вектори нейронів шару Кохонена рівномірно розподіляються в просторі вхідних ознак.

Модель даних про парки ЕД (МП) у вигляді карт Кохонена (МКК) також використовується для вирішення завдань аналізу і управління процесами експлуатації парків. Представлення процесів МП у формі топологічних карт демонструють рис. 2.5 – рис. 2.6. При навчанні МКК (5000 епох) використовувалися представники ЕД з наступними контрольованими станами: І (справний); КЗО (коротке замикання обмотки); КЗПК (коротке замикання пластин колектора); ОСЯ (обрив секції якоря); КПК (круговий вогонь по колектору). У моделі експлуатації парку реалізований механізм «розфарбовування» вузлів мережі відповідно до заданих ознак об'єктів, які досліджуються при аналізі сукупності даних. Після «розфарбовування»

отримують зони моделі, які відповідають заданим кольоровим «ознакам типа вузлів».

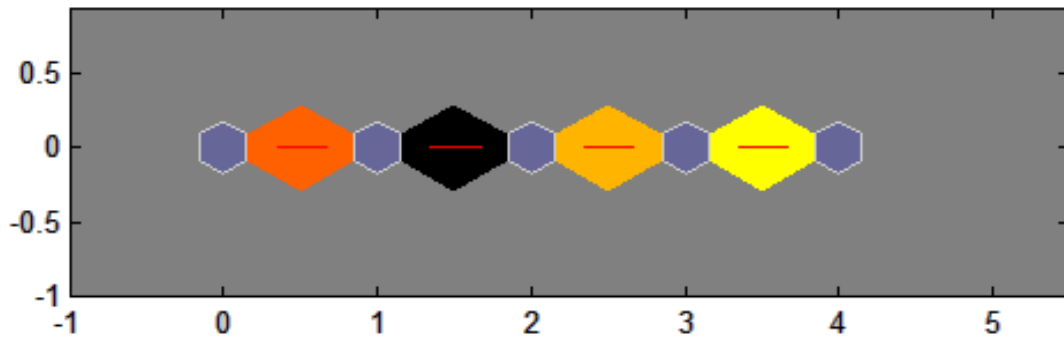


Рисунок 2.5 Схематичне відображення потужностей зв'язків між кластерами індивідуальних інтелектуальних моделей ЕД засобами карт Кохонена

При аналізі нових даних, або нових ЕД, попадання параметрів деякого об'єкту при класифікації на основі МКК в певну зону говорить про його очікувані властивості. За рахунок побудови моделі статистичних даних як карти ознак Кохонена, а також маючи інформацію про частину досліджуваних об'єктів, можна досить достовірно прогнозувати поведінку інших об'єктів [35, 71]. На рис. 2.5 подана карта Кохонена загальної моделі станів ЕД. Малі шестикутники – нейрони карти Кохонена, а колір великих – відображує близькість груп об'єктів. Чим темніше колір шестикутника, тим сильніше відрізняються об'єкти кластерів.

Для наочного відображення динаміки процесів експлуатації парку ЕД «за розфарбуванням» встановлено наступні ознаки зміни станів, які відповідають контрольованим типам відмов:  $fail_r^{(s)}$  – відмова типу ( $r$ ) для підрозділу ( $s$ );  $h_r^{(s)}(t)$ ;  $h_r^{(s)}(t-1)$  – число ЕД з відповідною відмовою на етапах ( $t$ ), ( $t-1$ );  $cond_r^{(s)}(t)$  – критичне значення пристроїв для відображення зміною кольору  $colour_r^{(s)}(t)$ ;  $percent_r^{(s)}(t)$  – процент пристроїв



від критичного, для вдображення заповнення області вузла типу відмови. Ознаки (2.6) формуються для окремих виконавців (s).

Згідно рис. 2.6 в шестикутниках за ознаками карти Кохонена вказаний розподіл двигунів на даний момент (23, 22, 23, 10, 22), зверху, в жовтих прямокутниках, – попередній розподіл (23, 25, 20, 10, 22). Колір шестикутника визначається таким чином. Якщо сталася зміна кількості елементів в кластері – колір зелений, а якщо число елементів перевищує деяке задане число (тут – 22) – колір червоний, інакше колір є стандартним, синім, яким заповнюється частина шестикутника відповідно параметру  $\text{percent}_r^{(s)}(t)$ .

Такий аналіз (рис. 2.6) дозволить ефективно здійснювати диспетчерський моніторинг за станом парку ЕД при його експлуатації, своєчасно встановлювати потреби в здійсненні ремонтів або оновленні підсистеми парку технічних систем, які виконуються спеціалізованим підрозділом. Для цього на рис. 2.6, (2.6) у дужках зображено множини змінених станів ЕД, які віднесені для кожного спеціалізованого підрозділу, див. розд. 3.4.

$$\{ (\text{fail}_r^{(s)}; h_r^{(s)}(t); h_r^{(s)}(t-1); \text{cond}_r^{(s)}(t); \text{colour}_r^{(s)}(t); \text{percent}_r^{(s)}(t) \} \quad (2.6)$$

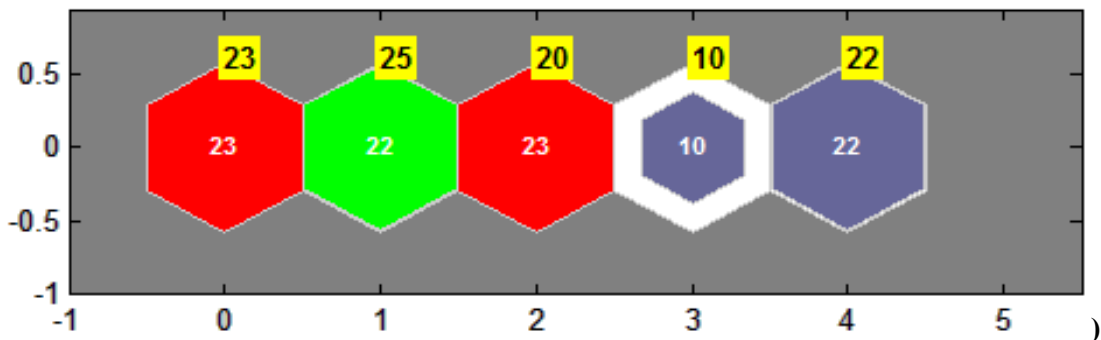
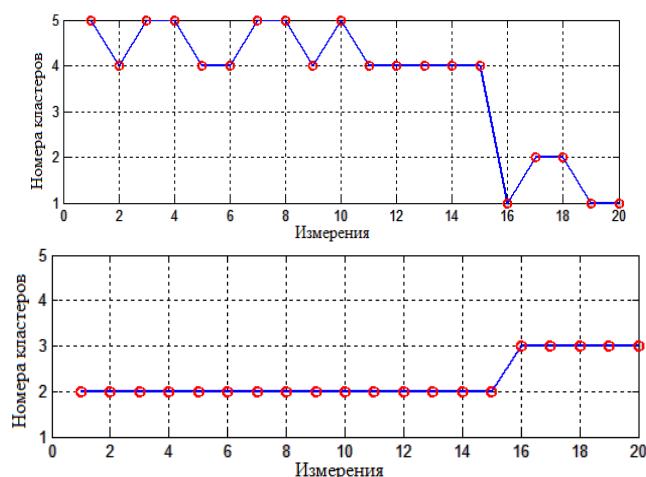


Рисунок 2.6 Відображення зміни станів підсистеми парку ЕД, яка обслуговується спеціалізованим підрозділом, на основі карт Кохонена

Моделі МКК застосовуються для кластеризації спектральних характеристик електродвигунів, наочно указуючи приблизні межі кластерів, які характеризують технічний стан ЕД. Знаками «+» позначено положення

вхідних зразків на карті, щоб оцінити їх близькість до центрів кластерів МКК і між собою. Позначення кластерів відповідає станам і типам несправностей. А саме: справний - 1, коротке замикання обмотки - 2, коротке замикання пластин колектора - 3, обрив секції якоря - 4, круговий вогонь по колектору - 5. На основі виконання процедур навчання МКК було встановлено, що вхідні зразки, відповідні справному ЕД, добре локалізовані, повністю відповідають одному нейрону топологічної карти. Кластери інших типів несправностей мають невеликі перекриття. Ці властивості вихідних даних про стани ЕД необхідно урахувати при розробці процедур діагностування станів електродвигунів стрілочних переводів.

Використання в АЕПЕД дворівневої нейронно-мережевої моделі дозволяє одночасно виконувати аналіз зміни станів окремих ЕД, доповнюючи їх ІМ, а також засобами моделі парку МП-МКК контролювати стани, відповідні виникненню різних типів несправностей ЕД. Приклад наочного представлення процесів експлуатації деякого ЕД за допомогою ІМ і МП наведено на рис. 2.7. На рис. 2.7 (а зверху) справному стану відповідає кластер 5 ІМ; в кластері 4 технічний стан погіршується. Кластери 1 і 2 ІМ відповідають виникненню короткого замикання обмотки.



(а) (б)

Рисунок 2.7 Графік процесу експлуатації ЕД як переміщення станів по кластерах індивідуальних моделей в часі

На ІМ-моделі ЕД рис. 2.7 (б знизу) показаний перехід деякого електродвигуна з справного стану (кластер 2) у стан короткого замикання обмотки (кластер 3).

В цілому автоматизована технологія і система автоматизованої експлуатації парків електродвигунів залізничних стрілочних переводів АЕПЕД дозволяє перейти від планової, встановленої нормативами заміни двигунів з невикористаними експлуатаційними ресурсами, до обслуговування парку ЕД по їх фактичному технічному стану, з урахуванням умов невизначеності електричних двигунів та інфраструктури.

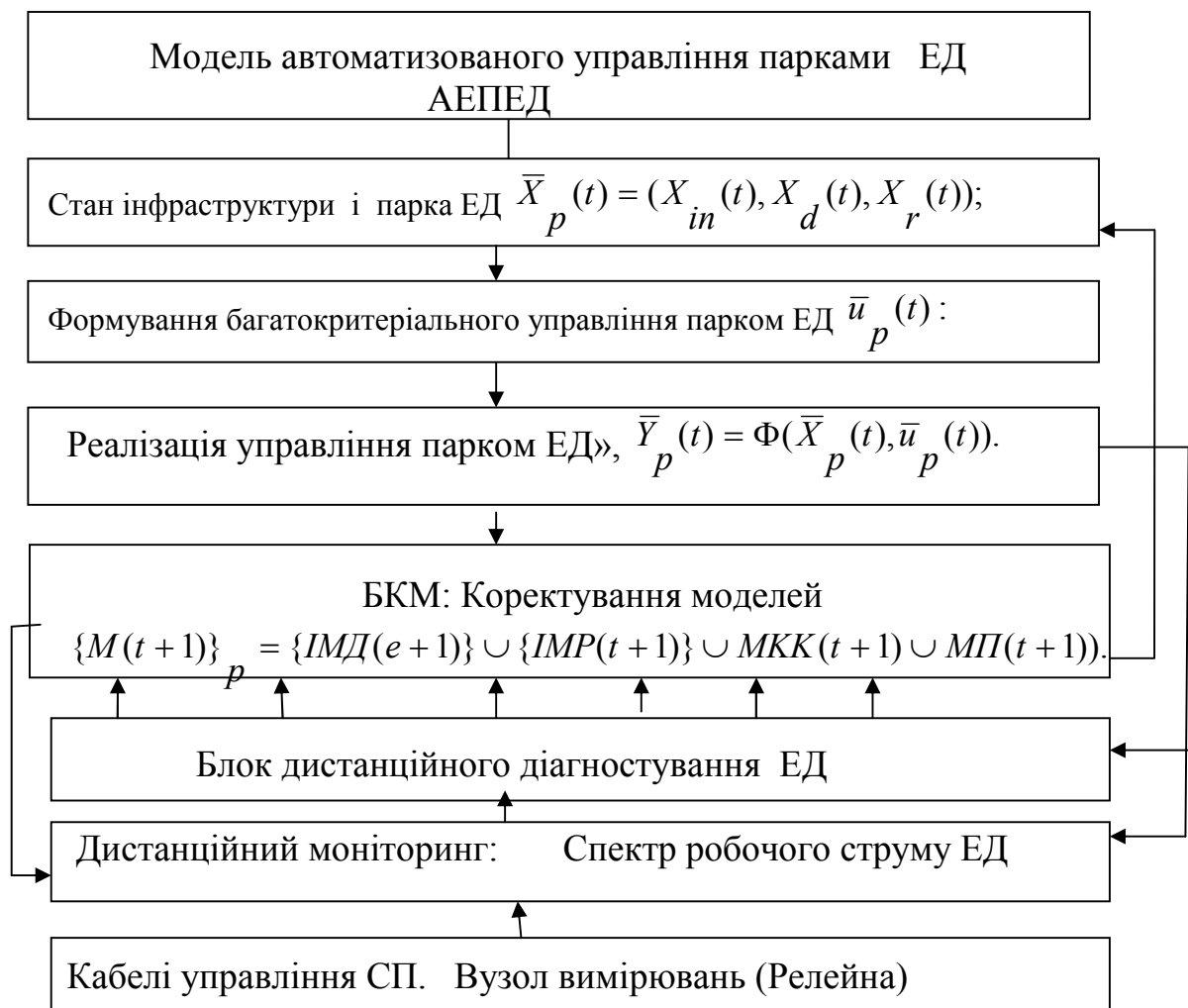


Рисунок 2.8 Структура моделі автоматизованого управління парками ЕД

З урахуванням раніше зазначених завдань і функцій узагальнена структура моделі автоматизованого управління парками ЕД може бути представлена у вигляді рис. 2.8. В основі автоматизованого управління

процесами експлуатації парку ЕД, рис. 2.8, покладено систему індивідуальних моделей (процесу діагностування – ІМД, ремонтів – ІМР ін.). З урахуванням і на основі формування цих моделей контролюються і відображаються зміни станів, ресурсів ЕД у часі (за етапами обслуговування). Процеси моніторингу, діагностування, ремонтів кожного ЕД впливають на відповідні ІМ. За даними ІМ, а також їх різних узагальнень, необхідних для представлення парку ЕД як цілісної сутності, виконуються процедури багатокритеріального аналізу станів і управління парком ЕД.

Розглянемо докладно зміст окремих модулів системи АЕПЕД рис. 2.8. Модуль «Стан інфраструктури і парку ЕД» відповідає за отримання даних про поточний стан системи перевезень та поточний стан кожного ЕД на кроці « $t$ » процесу управління парком. Поточний стан на етапі ( $t$ ) представляє композиційний вектор (2.7),

$$\bar{X}_p(t) = (X_{in}(t), X_d(t), X_r(t)); \quad (2.7)$$

вектор станів парку  $\bar{X}_p(t)$  містить наступні складові:  $X_{in}(t)$  – набір поточних значень параметрів інфраструктури,  $X_d(t)$  – набір значень параметрів процесів діагностування,  $X_r(t)$  – набір значень параметрів процесів ремонту.

На основі даних (2.7) за допомогою процедур прогнозування та багатокритеріального аналізу і вибору, модуль «Формування багатокритеріального управління парком» рис. 2.7, розраховується вектор оптимального керування процесами експлуатації парку ЕД  $\bar{u}_p(t)$ :

$$\bar{u}_p(t) = (u_d(t), u_r(t)); \quad (2.8)$$

складові (2.8) відповідають (2.7), в яких указані упорядковані послідовності проведення на етапі планування ( $t$ ) процедур діагностування, компонента  $u_d(t)$ , та ремонтів ЕД парку, компонента  $u_r(t)$ . Сутність, моделі і методи виконання процедур прогнозування та багатокритеріальної оптимізації представлено у розд. 3.

Результати реалізації вектору управління (2.8)  $\bar{Y}_p(t)$  отримують у модулі «Реалізація управління парком ЕД», рис. 2.8.

$$\bar{Y}_p(t) = \Phi(\bar{X}_p(t), \bar{u}_p(t)). \quad (2.9)$$

Відповідно рисунку, вказано стрілками, у ході виконання процедур реалізації управління з узагальненим оператором  $\Phi(\bar{X}_p(t), \bar{u}_p(t))$  вибірково і в установленому порядку  $u_d(t)$  відбувається діагностування ЕД, результати якого використовуються для формування ІМД наступних етапів управління парками ЕД. Значення параметрів (2.9) представляють фактично відповідні величини (2.7), зокрема  $X_d(t)$ , для наступного кроку,  $(t+1)$  етапу управління, експлуатацією парку ЕД. Така залежність відображає динаміку процесів експлуатації.

Сукупність процедур перетворення індивідуальних моделей ІМД та ін. у системі АЕПЕД представляє модуль «Корегування індивідуальних моделей та моделей парку ЕД» (БКМ) рис. 2.8. В результаті процедур коригування системи індивідуальних моделей ІМ електродвигунів і моделей парку ЕД МКК і МП отримують перетворені моделі процесів експлуатації для наступного етапу автоматизованого управління  $(t+1)$

$$\{M(t+1)\}_p = \{IMD(t+1)\} \cup \{IMP(t+1)\} \cup \{MKK(t+1)\} \cup \{MP(t+1)\}. \quad (2.10)$$

Позначення типів моделей (2.10) приведено у розділі вище.

Необхідно зазначити що модуль «Блок дистанційного моніторингу» відповідає рис. 2.3. У ньому виконується дискретизація робочих токів ЕД і отримання їх спектральних характеристик (блок АЦП-ШПФ) [84, 97, 98].

Для отримання спектру робочий струм двигуна був дискретизований частотою  $f_d = 11025$  Гц. розрядність вибірки – 16 біт. Послідовність дискретних значень записувалась в wav-файли [Ш]. Було встановлено, що максимальної частоти спектру  $f_{\max}$  ( $f_{\max} = 0.5 * f_d = 5512.5$  Гц) достатньо для відображення фізичних процесів в двигунах. Розмір блоку для ШПФ Фур'є був обраний розміром  $f_s = 512$ . Тобто струм ЕД був представлений  $N_h = 0,5 * F_s = 256$  гармоніками ШПФ, а частотний дозвіл гармонік спектру при цьому складав

$$\Delta f = f_{\max} / N_h \approx 21,5 \text{ Гц.} \quad (2.11)$$

У множині гармонік  $\{f_i\}$  перетворення Фур'є струму двигуна кожна гармоніка представлена парою коефіцієнтів  $(\text{Re}_i, \text{Im}_i)$  і має частоту

$$f_i = \Delta f * i \text{ Гц, } i = \overline{1, N_h} \quad (2.12)$$

Інтенсивність частоти  $I_i$  кожної гармоніки перетворення Фур'є обчислюється згідно:

$$I_i = \sqrt{\text{Re}_i^2 + \text{Im}_i^2}, \quad i = \overline{1, N_h}. \quad (2.13)$$

Разом з цим треба вказати суттєві функціональні відмінності розробленої удосконаленої системи, які стосуються модуля БДМ. Двосторонні зв'язки блоків БДМ і корегування БКМ рис. 2.8 указують на залежність процесів дистанційного діагностування від поточного і деяких попередніх станів індивідуальних моделей ІМД, а також на систематичне використання отриманих при моніторингу і діагностуванні відповідно  $X_d(t)$  нових даних про значення параметрів ЕД для корегування моделей (2.10) у БКМ.

Наступна відмінність полягає у визначенні та інтерпретації векторів  $\{ X_d(t), u_d(t) \}$ . У створюваній системі АЕПЕД передбачається, що у разі отримання низьких або суперечливих оцінок достовірності виявлення несправностей засобами дистанційного діагностування, також виконуються стандартні процедури оцінки працездатності ЕД вручну за інструкцією [45, 46]. Результати обох процедур обслуговування ЕД, представлених у різному вигляді, надходять до блоку корегування БКМ.

Таким чином рис. 2.8 являє загальну структуру автоматизованої системи управління процесами експлуатації парків електродвигунів АЕПЕД.

### 2.3.2. Аналіз автоматизованих засобів моніторингу та діагностування технічного стану електричних двигунів стрілочних переводів

Сучасні потреби зменшення експлуатаційних витрат разом із підвищенням вимог до надійності технічних систем забезпечення руху поїздів, в першу чергу в умовах організації їх високошвидкісного руху, забезпечення стійкості залізничних перевезень ін., все ширше застосування інтелектуальних технологій на транспорті, в свою чергу вимагають підвищення ефективності автоматизованих систем залізниць. Методи і засоби автоматизації процесів моніторингу та діагностування технічного стану електродвигунів постійного і перемінного струму СП також отримують постійний розвиток [22, 52, 58, 99].

В [52, 62] розроблено макетний зразок апаратно-програмного комплексу з автоматизації дистанційної діагностики ЕД постійного струму СП, який був випробуваний на Придніпровській залізниці. Ця розробка (АСОЕ ПЕД) значною мірою визначила вимоги та ефективні засоби щодо автоматизації процесів експлуатації ЕД. У АСОЕ ПЕД вимірюються характеристики ЕД, що знаходяться під впливом робочих значень напруги, струму, магнітного поля і відцентрових сил. Це робить можливим у подальшому виконати заміну електродвигуна до його повного виходу з ладу.

Розроблені моделі діагностування можуть бути автоматично налаштовані на виявлення нових видів несправностей шляхом завдання еталонів струму двигунів з несправностями. У АСОЕ ПЕД були реалізовані наступні основні вимоги по експлуатації парку ЕД: прогнозування процесу розвитку несправностей електродвигунів за 3-5 місяців до повної відмови двигуна; виявлення несправностей електродвигунів, які вилучаються завдяки профілактиці (Інструкції ЦШЕОТ-0012-98 [46]), що повинно здійснюватися з достовірністю не менше 0,9; пристрій узгодження АСОЕ ПЕД і схеми управління стрілкою виконано без відключень монтажних проводів в точках підключення запобіжників; в АСОЕ ПЕД було необхідним реалізувати пошук несправностей із зазначенням стану ЕД, характеру несправності, величини параметра прогнозування; інформація про параметри, отримана в процесі діагностики, повинна була зберігатися в базі даних дистанції сигналізації та зв'язку, періодичність профілактики ЕД могла встановлюватися «за станом об'єкта», на відміну від графіка планово-попереджувальних робіт [Інстр]. Діагностика ЕД також могла проводитися на стенді під час планового огляду, а результати діагностування повинні виводитися на друкувальний пристрій. Ці вимоги і застосовані методи діагностування і аналізу струмів використані в подальших розробках систем автоматизації процесів експлуатації ЕД.

Задачам вдосконалення технічної експлуатації парків ЕД стрілочних переводів засобами інтелектуальних систем [44, 34, 37, 38] присвячені роботи [52, 63, 65, 66]. У них розроблена автоматизована технологія діагностування для управління експлуатацією парку ЕД постійного струму «по поточному стану». Виявлення несправностей у ЕД проводиться на основі дослідних даних, відповідних зразкам двигунів з еталонними несправностями, розрахунки виконуються на основі дискретизації робочого струму двигуна. У зазначених роботах обґрунтований вибір і виконані випробування архітектур штучних нейронних мереж (ШНС) [79, 80]. У них отримали розвиток задачі діагностування несправностей ЕД засобами ШНС.



Діагностування несправностей проводилося на основі таких нейронних мереж, як багат шаровий персептрон, радіальна базисна функція, мережі Кохонена [44, 70, 71, 96]. Досліджено можливості зазначених та інших методів штучного інтелекту (ШІ). При цьому виконано аналіз можливостей діагностування ЕД постійного струму на основі методів експертних систем [30, 31], нечітких і нечітко-статистичних моделей об'єктів управління [42, 52, 62]. Також для управління експлуатацією парку ЕД залізничних стрілочних приводів за поточним станом була розроблена дворівнева структура нейронно-мережевої моделі.

Методи автоматизованої діагностики ЕД [28, 29, 65] мають ряд переваг в порівнянні з вже існуючими методами (виявлення більшої кількості несправностей, діагностика в режимі робочого навантаження, моніторинг технічного стану двигуна, автоматизована настройка системи на розпізнавання нових видів несправностей та ін.). Численні експерименти з ШНС показали перспективність їх використання для діагностики технічного стану ЕД. Найкращі результати при виявленні несправностей ЕД постійного струму залізничних СП показали ШНС типу багат шарових персептронів. Використання мереж Кохонена виявилось ефективним при аналізі схожості різних видів відомих несправностей і виявлення нових. В [42, 62] також був розроблений метод та експертна система діагностування ЕД, заснована на базі нечітко-статистичних правил та процедур нечіткого управління. Нечітко-статистична (Н-С) модель об'єкта дозволяє комбінувати дослідні дані спостережень зі знаннями експерта, використовуючи їх для класифікації несправностей ЕД, У ній нечітка складова відбиває знання експерта, а статистична - дані про фактичний стан об'єктів. Автоматизована адаптація бази правил цієї ЕС здійснюється в процесі навчання на множині еталонних об'єктів, ЕД з різними типами несправностей. Працездатність Н-С моделі також підтверджена при вирішенні завдань діагностики електродвигунів СП.

В [56 – 58] удосконалено технологію обслуговування централізованих стрілок з електроприводом *змінного струму* в умовах експлуатації шляхом розробки методів і засобів автоматизованого діагностування СП. При цьому розроблено дослідний зразок апаратно-програмного комплексу для діагностування параметрів СП в умовах експлуатації, без виключення із технологій процесів залізничних перевезень.

В [6, 52, 65 – 67] розроблені методи і засоби, призначені для дистанційного моніторингу та діагностування при автоматизованому управлінні експлуатацією парку елементів технічних систем залізничного транспорту. Її функціонування сприятиме переходу від планово-попереджувального методу експлуатації до обслуговування ЕД по фактичному технічному стану. При цьому в системі широко застосовуються методи автоматизації на основі штучного інтелекту. Система має наступні основні експлуатаційні властивості: дистанційна діагностика без вилучення ЕД з робочих процесів, прогнозування відмов на основі індивідуальних моделей та їх адаптація, простота конфігурації для інших типів електричних машин і можливість застосування загальних процедур для інших ТС, наприклад, до тягових двигунів локомотивів ін. Основними техніко-економічними показниками цих автоматизованих систем являються: підвищення безпеки та зменшення кількості затримок у русі поїздів; раннє виявлення несправностей, за 3 - 6 місяців до відмови ЕД; зменшення вартості процесів експлуатації - відновлення двигуна з меншими витратами, вартість поточного або середнього ремонту в 4 - 6 разів менше нового електродвигуна; висока достовірність виявлення несправних двигунів. Обмеженість цих розробок полягає у частковому врахуванні наявної інформації про парки ЕД, про умови експлуатації і параметри інфраструктури, а також в обмеженості набору показників, використовуваних для планування процесів управління ін.

Аналіз діючих, а також в певній мірі запропонованих систем автоматизації процесів експлуатації ЕД, дає підстави вважати, що розроблена у

розд. 2.3.1 структура системи АЕПЕД має суттєві переваги. Вони в першу чергу полягають у системності створюваних засобів автоматизації, а також у повноті обліку експлуатаційних умов ЕД, параметрів перевізного процесу та інфраструктури, застосуванням комплексних оцінок ефективності управління парком ЕД.

#### 2.4. Критерії та основні завдання автоматизованої експлуатації парків залізничних технічних систем на основі параметрів поточного стану

Реалізація багаторівневої моделі автоматизованого інтелектуального управління процесами експлуатації парків електродвигунів СП рис. 2.8 потребує розробки системи математичних та інформаційних моделей аналізу, прогнозування та планування технічних і технологічних процесів, урахування умов невизначеності щодо станів систем та елементів, умов та даних, а також цілей функціонування АЕПЕД. Невизначеність цілей, багатокритеріальність або векторність задачі оптимального управління, як відомо [41, 101], приводить до необхідності застосування процедур системного аналізу [33, 34, 72, 77, 88, 102] для формування адекватної вимогам «моделі цілі». У залежності від доступної інформації, а також процедур її отримання, мають бути сформовані різноманітні моделі реалізації векторної цілі.

У роботі при визначенні ефективних рішень відповідно управлінню експлуатацією парків ЕД в АЕПЕД в більшості комплексних завдань використовуються наступні часткові показники:  $E$  – експлуатаційні витрати,  $P$  – рівень надійності системи управління експлуатацією,  $DZ$  – додаткові витрати при відмовах у системі. У розділі 3 розроблено систему математичних моделей багатокритеріального планування для різноманітних умов невизначеності. Зокрема запропоновано застосування аксіоматичного методу ВО для зазначеної системи часткових показників оптимальності керувань, що потребує дослідження властивостей сукупності складових ( $E$ ,  $P$ ,  $DZ$ ) [41]. Для реалізації управління відповідно моделі рис. 2.8, з урахуванням

можливостей отримання інформації про важливість часткових показників та інформаційні властивості завдань, у розд. 3 розроблені наступні моделі та методи: багатокритеріальна модель управління процесами експлуатації парків технічних систем при залежних ресурсах, двохетапна модель управління процесами експлуатації з урахуванням умов ризику, нечіткий двохетапний метод управління процесами експлуатації парків, який враховує наявні дані про процеси технічної експлуатації парків ЕД.

При розробці засобів автоматизованої експлуатації парків стрілочних ЕД з урахуванням поточного стану та інфраструктури відповідно рис. 2.8 в першу чергу необхідно виконати завдання щодо формування індивідуальних ІМ процесів їх експлуатації. Для цього необхідно встановити можливі категорії, призначення та основні властивості ІМ, а також визначити структуру індивідуальних моделей для процесів моніторингу, діагностування та ремонтів відповідно. Необхідно урахувувати різні можливі форми моделювання процесів експлуатації ЕД, а також об'єми необхідних для цього даних. При малій кількості спостережень відмов, відповідно роботі [53, 71, 76, 103], доцільно виконувати оцінки надійності технічних систем на основі моделі Вейбула. Розробка таких ІМ представлена у розд. 3. Одним із сучасних методів побудови ІМ для процесів діагностування дефектів ЕД являється їх формування на основі моделювання відеозображень з використанням нейронних мереж [44, 96] тощо.

Для автоматизованого управління процесами експлуатації парків ЕД на основі даних індивідуальних моделей і виділених ресурсів необхідно побудувати процедури прогнозування часових, експлуатаційних параметрів ЕД з використанням методів екстраполяції та кластиризації.

Структура управління рис. 2.8 передбачає розробку моделей і методів для автоматизації розрахунку черговості діагностування, обслуговування та ремонту парку електричних двигунів. Для цього має бути розроблена багатокритеріальна ієрархічна модель, яка урахує різноманітну форму даних щодо визначення пріоритетів обслуговування

ЕД парків з урахуванням неоднорідності об'єктів інфраструктури. Також необхідно розглянути питання щодо можливості визначення пріоритетів обслуговування ТС на основі методів кластеризації [38].

Складність і різноманітність задач діагностування ЕД, разом із накопиченням досить значного експериментального матеріалу стосовно несправностей ЕД постійного струму та ін., дають можливості для організації управління процесами експлуатації електродвигунів на основі методів експертних систем. Для реалізації такого підходу щодо систем автоматизації відповідно рис. 2.8 необхідно виконати формування баз знань різних типів, що відповідає різним формам представлення факторів невизначеності. У розд. 3 виконано розробку нечітких експертних систем для прогнозування параметрів ЕД у процесах експлуатації. Також для підвищення ефективності процесів експлуатації парку ЕД та зменшення експлуатаційних витрат побудована нечітка модель планування розподілу електричних двигунів парку між ремонтними базами з урахуванням спеціалізації.

Ефективна реалізація багаторівневої моделі автоматизованого управління процесами експлуатації парків ТС, в роботі ЕД, потребує також створення загальносистемних та універсальних інтелектуальних процедур аналізу та прогнозування параметрів технологічних процесів. Для цього у розд. 3 розглядаються питання щодо застосування процедури агрегування для аналізу та оперативного прогнозування параметрів недетермінованих технологічних процесів залізничного транспорту, сформовано задачі кооперативного управління, наведені для умов процесів вантажних залізничних перевезень, розвинуто методи інтелектуальних транспортних систем (ІТС) [64, 65, 72], які застосовуються у завданнях управління експлуатацією парків технічних систем.

В табл. 2.1 систематизовано критерії створення та основні задачі експлуатації парків стрілочних електродвигунів. При цьому визначається сутність завдання, яке необхідно вирішити для забезпечення ефективної

експлуатації парку ЕД, характеризується зміст проблеми що існує, указується необхідний для реалізації додатковий ресурс або засоби, наводиться очікуваний результат вирішення завдання управління експлуатацією парку ЕД. Для моделі експлуатації парку ЕД рис. 2.8 головними являються завдання 1 – 3 табл. 2.1, разом з цим завдання 4-8 забезпечують реалізацію базових завдань.

Узагальнена схема процесу експлуатації парків електродвигунів, представлена через вирішення зазначених вище завдань у моделі рис. 2.8 складається із наступних етапів:

1. Формування індивідуальних моделей процесів експлуатації стрілочних електродвигунів, а також загальної моделі експлуатації парку.
2. Вимірювання, дистанційний моніторинг, спектральний аналіз робочого струму, діагностування поточного стану ЕД.

Таблиця 2.1

**Критерії та основні задачі автоматизованої експлуатації парків стрілочних електродвигунів**

<b>№</b>	<b>Найменування задачі</b>	<b>Проблема</b>	<b>Ресурс реалізації</b>	<b>Результат</b>
1	Багатокритеріальне управління експлуатацією парку стрілочних ЕД	Складність об'єкта, Компромісний вибір	Властивості показників ефективності	Єдиний ефективний розв'язок
2	Прогнозне управління: упорядкування обслуговування ЕД на основі оцінок їх поточного і прогнозного стану	Неоднорідність парку та умов експлуатації	Індивідуальні моделі ЕД, відбір «подібних» систем	Вибір раціонального порядку обслуговування ЕД парку
3	Скорочення експлуатаційних витрат для парку за рахунок спеціалізації і кооперації виконавців робіт	Різна ефективність обслуговування ЕД парку	Урахування спеціалізації і кооперації при плануванні робіт	Скорочення експлуатаційних витрат
4	Прогнозування характеристик процесів експлуатації ок-	Обмеженість, Невизначеність даних	Відбір «подібних» ЕД, адаптація, екстраполяція	Оцінки очікуваних характеристик ЕД, корекція планів

	ремех електродвигунів парку			
5	Урахування неоднорідності умов експлуатації ЕД, їх значимості для мережі	Оцінка важливості окремих ЕД для мережі	Кластеризація ЕД, облік вектора властивостей мережі	Встановлено пріоритет кожного ЕД парку
6	Урахування невизначеності характеристик станів інфраструктури перевезень, ЕД, відмінність типів даних	Множинність типів (ймовірність, нечіткість ін.)	Комбіновані методи оцінки, експертизи	Повнота моделей, підвищення точності результатів
7	Формування та адаптація індивідуальних моделей процесів експлуатації ЕД	Облік процесів, завдання управління парком, розвиток і адаптація	Структури даних, процедури обробки, вибір виду представлення	Забезпечення завдань управління експлуатацією парку
8	Моделі управління експлуатацією парку ЕД	Множинність складових	Нейромережі, Експертні Системи	Вибір управліннь

3. Визначення параметрів і стану інфраструктури, прогнозованих характеристик парку ЕД.

4. Формування багатокритеріального управління черговості обслуговування парку ЕД, розподіл робіт між виконавцями з урахуванням спеціалізації та кооперації.

5. Реалізація управління етапу «t» , виконання та облік робіт із експлуатації парку ЕД.

6. Корегування індивідуальних моделей ЕД та моделі парку. До 2. Формування та реалізація засобів рис. 2.8 із вирішення завдань табл. 2.1, що визначає відмінність процесів експлуатації парків ЕД, становить сутність наукової новизни і зміст отриманих результатів роботи.

## Висновки по розділу 2

У розділі отримано розвиток автоматизованої технології дистанційного управління процесами експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів з урахуванням параметрів їх поточного стану та інфраструктури – АЕПЕД. На основі аналізу попередніх досліджень виконано розробку удосконаленої структури системи автоматизованої експлуатації, а також постановку відповідного багатокритеріального завдання по автоматизованому інтелектуальному управлінню експлуатацією парків ЕД, яка засобами окремих індивідуальних моделей ураховує процеси діагностування і ремонтів, а також спеціалізацію виконавців робіт по обслуговуванню систем. Сформовано базові принципи і визначено головні науково-технологічні завдання щодо створення автоматизованої системи управління експлуатацією парків стрілочних електродвигунів АЕПЕД.

1. Аналіз діючих систем і технологій управління експлуатацією ЕД залізничних СП показав їх суттєві обмеження стосовно застосування системного підходу управління процесами експлуатації парку ЕД. При розвитку технологій автоматизованої експлуатації парків ЕД головна увага приділяється створенню можливостей системного управління парком ЕД на основі уточнення параметрів поточного стану, розробки відповідних моделей і функцій системи АЕПЕД, необхідних для раціонального багатокритеріального планування технічних та технологічних завдань, з урахуванням невизначеності значень параметрів ЕД стрілочних переводів та умов інфраструктури.

2. Розроблена структура та функції системи АЕПЕД – автоматизованої експлуатації парків ЕД технічних систем – відзначається наступним:

- Формування сукупності індивідуальних моделей (ІМ) ЕД, які використовуються для різних процесів управління експлуатацією парків ЕД. Джерелами формування ІМ являється дистанційне діагностування ЕД і дані про параметри оглядів ЕД електромеханіком при обслуговуванні СП.



- дані про дистанційний моніторинг кожного ЕД використовуються для формування адаптованих ІМД та інших моделей експлуатації парків – МП.

- для вирішення завдань аналізу і управління процесами експлуатації парків використовується модель МП виду карти Кохонена (МКК), що застосовується для кластеризації спектральних характеристик електродвигунів і прогнозування параметрів ЕД.

3. Автоматизована технологія і система експлуатації парків ЕД АЕПЕД дозволяє перейти від планової, встановленої нормативами заміни двигунів з невикористаними експлуатаційними ресурсами, до обслуговування парку ЕД по їх фактичному технічному стану, з урахуванням умов невизначеності електричних двигунів та інфраструктури.

4. Порівняльний аналіз автоматизованих засобів дистанційного моніторингу та діагностування технічного стану електричних двигунів стрілочних переводів показав наступні переваги розробленої удосконаленої технології і системи АЕПЕД в порівнянні з вже існуючими методами: виявлення більшої кількості несправностей, моніторинг і діагностика технічного стану двигуна в режимі робочого навантаження, автоматизоване налагодження на розпізнавання нових видів несправностей, багатокритеріальне управління процесами експлуатації парків ЕД, забезпечення процесів прогнозування періоду до відмови ЕД.

5. Сформована система показників ефективності і критеріїв, а також основні завдання автоматизованої експлуатації парків залізничних технічних систем на основі параметрів поточного стану та умов функціонування інфраструктури процесів залізничних перевезень.

Результати розділу опубліковані у роботах [66, 68, 69, 82].

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРКІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ З УРАХУВАННЯМ ПОТОЧНОГО СТАНУ ТА ІНФРАСТРУКТУРИ

Підвищення ефективності та стійкості процесів експлуатації та безпеки перевезень на залізницях, зменшення експлуатаційних витрат неможливі без розвитку комплексних систем автоматизації, в тому числі призначених для експлуатації парків технічних систем – АЕПЕД. У розділі виконано удосконалення АЕПЕД в частині розвитку методів аналізу поточного стану ЕД і планування черговості діагностування та ремонтів ЕД залізничних СП з урахуванням умов недетермінованості. Удосконалені технологіко-економічні моделі, за якими виконується автоматизоване управління АЕПЕД, також ураховують різну форму інформації про технічний стан пристроїв та умови функціонування транспортної системи (зокрема нечітку). При цьому передбачається, що моделі повинні забезпечувати можливості адаптації параметрів і більшої результативності процедур планування для парку ЕД, з метою підвищення ефективності залізничних перевезень у цілому. Дослідження проведені з використанням даних процедур моніторингу та діагностування ЕД, які знаходилися під впливом робочих навантажень. Управління експлуатацією парків ЕД виконується на основі формування набору індивідуальних інтелектуальних моделей, а також мереж Кохонена, побудованих на спектральних характеристиках струму ЕД, а також за даними планових перевірок електромеханіками. При плануванні ремонтів ураховується пріоритетність поїздоділянок із СП і спеціалізація виконавців робіт. Розроблено багатокритеріальні процедури управління експлуатацією парків ЕД, призначені для різних категорій невизначеності умов планування і управління.

3.1 Формування індивідуальних інтелектуальних моделей процесів експлуатації парків електричних двигунів за параметрами поточного стану.

Автоматизована технологія діагностування та управління парком ЕД заснована на формуванні індивідуальних інтелектуальних моделях, побудованих на основі аналізу частотного спектру робочого струму електродвигунів рис. 1.1 [29, 52, 65, 72]. Система управління проводить вимірю-

вання характеристик двигуна, що знаходиться під впливом номінальних, робочих значень напруги, струму, магнітних полів і відцентрових сил. Це дозволяє виявляти більше несправностей, ніж при використанні статичних методів діагностики, і робить можливим заміну електродвигуна до його повного виходу з ладу. В ній моделі діагностування можуть автоматично настроюватися для виявлення нових видів несправностей на основі аналізу струму двигунів з еталонними несправностями. Застосування системи не вимагає висококваліфікованого інженера електромеханіка, як для настройки, так і для експлуатації. При управлінні парком вирішується одна з основних підзадач експлуатації ЕД залізничних СП - визначення черговості ремонтів тих електродвигунів, при діагностиці яких встановлено різні приховані типи несправностей.

### 3.1.1. Призначення та основні властивості індивідуальних інтелектуальних моделей процесів експлуатації електродвигунів

Вхідними даними модуля моніторингу електродвигунів рис. 1.1 є частотний спектр струму ЕД. Отримання спектральних характеристик струму ЕД реалізоване за допомогою швидкого перетворення Фур'є [86, 97]. Для кожного ЕД сформована ІМ зберігає поточні спектральні характеристики та спектральні характеристики справного стану двигуна.

Модуль моніторингу порівнює спектр, отриманий з блоку ШПФ, зі спектром справного стану, прочитаного з відповідної ІМ ЕД. При виявленні істотних відмінностей у цих спектрах модуль моніторингу передає спектральні характеристики аналізованого ЕД в модуль діагностування. На виході модуля діагностування отримуємо оцінки достовірності виявлених несправностей електродвигуна. Ці оцінки зберігаються в ІМ ЕД, формуючи часовий ряд, який використовується для прогнозування технічного стану електродвигуна. Поточний і прогнозований технічні стани кожного ЕД з модуля діагностування передаються в модуль черговості ремонту електродвигунів, який дає рекомендації про порядок ремонту ЕД.

Завдання з автоматизації керування процесом експлуатації парку ЕД з контрольованими поточними станами вирішується на основі побудови дворівневої нейронно-мережевої моделі (карти Кохонена [35, 36]). Модель із керування експлуатацією парку двигунів (МП) об'єднує ІМ зміни станів

ЕД. Для вирішення задачі за експлуатаційними даними (спектри струмів ЕД) була побудована МП можливих станів електродвигунів у формі карти Кохонена. При навчанні мережі (10000 епох) використовувалися відібрані ЕД з наступними контрольованими станами: І (справний); КЗО (коротке замикання обмотки); КЗПК (коротке замикання пластин колектора); ОСЯ (обрив секції якоря); КВК (круговий вогонь по колектору). У моделі експлуатації парку реалізований механізм «розфарбовування» вузлів мережі відповідно до заданих ознак об'єктів. При аналізі нових даних, або нових ЕД, попадання параметрів деякого об'єкту при класифікації на основі карти Кохонена в певну зону відповідає певній інформації про його очікувані властивості. За рахунок побудови моделі статистичних даних як карти ознак Кохонена, а також маючи інформацію про частину досліджуваних об'єктів, можна досить достовірно прогнозувати поведінку інших об'єктів [71, 103].

Приклад зображення зміни станів ЕД парку показано на рис. 2.5. У шестикутниках вказаний розподіл двигунів на даний момент (23, 22, 23, 10, 22). Зверху в прямокутниках подано попередній розподіл (23, 25, 20, 10, 22). Колір шестикутника визначає процес. Якщо сталася зміна кількості елементів в кластері – колір зелений, а якщо число елементів перевищує деяке задане число (тут – 22) – колір червоний, інакше колір є стандартним, синім.

На топологічній карті рис. 3.1 [51, 65] наближено показані межі кластерів технічного стану двигунів. Знаками «+» позначено положення вхідних зразків на карті, їх близькість до центрів нейронів і між собою. Кластери позначені таким чином: справний - 1, коротке замикання обмотки - 2, коротке замикання пластин колектора - 3, обрив секції якоря - 4, круговий вогонь по колектору - 5. Вхідні зразки, відповідні справним ЕД, добре локалізовані, а кластери деяких типів несправностей мають невеликі перекриття.

Використання інтелектуальних індивідуальних моделей процесів експлуатації ЕД, а також моделей парку МП, сформованих на основі даних діагностування, з використанням нейронних мереж Кохонена, які передбачають подальше застосування процедур адаптації параметрів, дозволяє

підвищити надійність інфраструктури і стійкість залізничних перевезень у цілому.

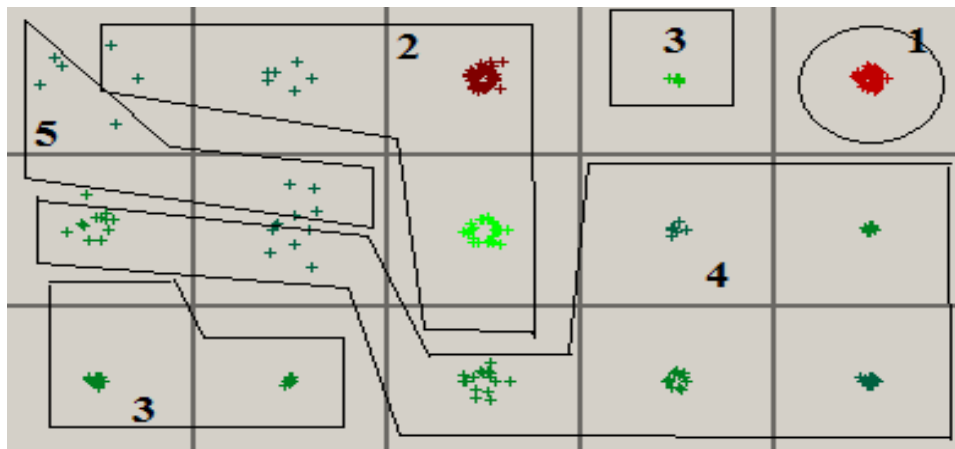


Рисунок 3.1 Приклад формування топологічної карти Кохонена для кластеризації спектральних характеристик струму за типами несправностей електродвигунів

Наведені вище призначення, технологія і процедури формування і використання індивідуальних моделей процесів експлуатації ЕД мають деякі обмеження, що відзначаються на універсальності, функціональності та ефективності АЕПЕД. Змістовно вони були зазначені і ураховані в розд. 2.3.1 при розробці удосконаленої структури автоматизованої системи АЕПЕД. Головним обмеженням існуючих ІМ являється їх «загальність», відсутність спеціалізації ІМ у відповідності до особливостей процесів експлуатації, які моделі забезпечують. Як показано у розділі, індивідуальна модель двигуна складається із сукупності спектрів на різних етапах ( $t$ ) життєвого циклу ЕД –  $\{Sp_k(t)\}$ , встановлених за спектрами оцінок ступеня достовірності різних можливих видів несправностей, а також початкового спектру справного ЕД  $Sp_k(0)$ , як еталона. Разом з тим така інформація являється дуже об'ємною, потенційно дозволяє вирішувати різноманітні завдання автоматизованого дистанційного діагностування ЕД, але недостатньо ефективно виконувати кожного разу окремі розрахунки. При цьому мають місце її наступні недоліки:

- в упорядкованих наборах спектрів  $\{Sp_k(t)\}$  крок окремих етапів ( $t$ ) може бути різним, що суттєво ускладнює процедури їх використання для аналізу станів і прогнозування значень параметрів, очікуваних значень амплітуд різних гармонік струмів на встановленому часовому інтервалі тощо;

- такі індивідуальні моделі не враховують дані про технічні огляди ЕД стрілочних переводів електромеханіком, що мають першочергове значення для практики та достовірності процесів експлуатації парків електродвигунів; дані про поточний стан ЕД при таких процедурах обслуговування мають в певній мірі суб'єктивних характер, потребують застосування іншої форми представлення та опрацювання, наприклад, у вигляді нечітких величин [37, 38. 40, 96].

В роботі запропоновано для кожного ЕД парку формувати набір спеціалізованих індивідуальних моделей, елементи якого відповідають тим процесам що за допомогою їх автоматизуються (моніторинг, діагностування, ремонт ін.). У таким чином сформованих моделях також необхідно враховувати зв'язки ЕД із сукупністю інших – з моделями парку ЕД, рис. 2.7.

Виходячи з потреб ефективної автоматизації парку АЕПЕД пропонується наступна система побудови удосконалених інтелектуальних індивідуальних моделей експлуатації ЕД на основі функціонального принципу, при збереженні частини спектральних моделей життєвого циклу ЕД  $\{Sp_k(t)\}$ , розпочинаючи із деякого встановленого моменту  $(t_0^k)$ ,  $k$  – обліковий номер двигуна. Також до початкового, базового рівня системи моделей, віднесемо дані, отримані при обслуговуванні СП електромеханіком, які представляють всю відповідним чином організовану сукупність результатів вимірювань параметрів ЕД.

Для організації процесів експлуатації парку на етапі ( $t$ ) необхідно мати уяву про тенденції щодо розвитку процесів виникнення несправностей і оцінки періоду ( $L$ ) можливого виникнення несправностей різних видів на кроці  $(t + L)$ . За отримання такої інформації на основі  $\{Sp_k(t)\}$ , як було показано раніше, відповідає модель кластеризації у формі карт Кохо-

нена [65, 66, 71]. Це двовимірне узагальнення даних про стани парку ЕД являє наступний рівень системи індивідуальних моделей ЕД, які графічно відображають поточні дані етапу ( $t$ ). Верхній рівень ІМД представляють моделі, які забезпечують прогноз оцінок періодів ( $L$ ) до можливого виникнення конкретних типів відмов ЕД через несправності. Таким чином сформована система інтелектуальних індивідуальних моделей забезпечує ефективну експлуатацію парку стрілочних електродвигунів.

### 3.1.2. Структура індивідуальних моделей для процесів моніторингу, діагностування та ремонтів електродвигунів

Систему індивідуальних моделей процесів експлуатації ЕД парку для наочності представимо у вигляді ієрархії, рис. 3.2. У цілому рівні моделей сформовані на основі функціонального принципу побудови і відповідають зазначеним у розд. 3.1.1 загальним вимогам щодо призначення. На рисунку системи індивідуальних моделей експлуатації ЕД позначені наступним чином.

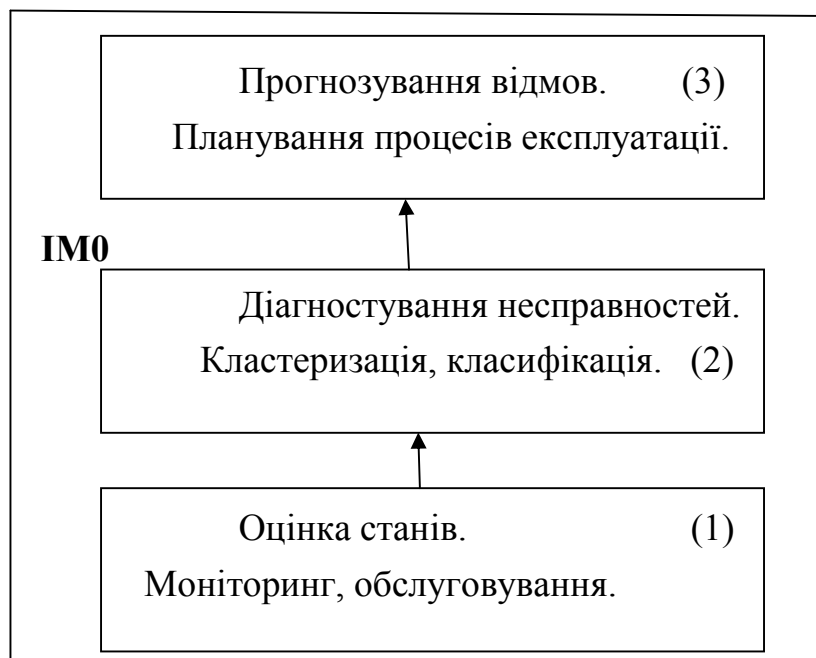


Рисунок 3.2. Система інтелектуальних індивідуальних моделей процесів управління експлуатацією парку електродвигунів

ІМ0 – попередня сукупність моделей системи автоматизації відповідно [52, 48, 61, 64, 66], без функціональної спеціалізації запропонованої в роботі, розд. 2.3. Перший рівень ІМ забезпечує даними процедури визначення поточного стану парку ЕД на основі вимірювань та спектрального аналізу робочого струму, а також за даними технічного обслуговування відповідно діючої методики УЗ [45 – 47].

Потреба у наборі складових в ІМ електродвигунів рис. 3.2 викликана також Інструкцією ЦШ-0060 [45] щодо порядку обслуговування електродвигунів. В ній указані нормативи щодо проведення різних видів виконання перевірок ЕД та термінів їх виконання. Моделі рівня (1) представляють наступні процедури експлуатації:

- перевірка один раз в чотири тижні стрілочних ЕД постійного струму на стрілках у маршрутах приймання та відправлення поїздів;
- перевірка один раз в квартал ЕД на інших стрілках;
- вимір один раз на два роки напруги на електродвигуні при нормальному переводі стрілки і при роботі на фрикцію;
- перевірка один раз на рік стану електродвигуна з вимірюванням опору ізоляції обмоток від корпусу.

Моделі другого рівня на основі процедур кластеризації і подальшої класифікації даних [38] про спектри ЕД  $\{Sp_k(t)\}$  дають можливість визначити несправності, що вже виникли в пристроях або поки що приховані, але мають тенденцію до розвитку на наступних етапах роботи парку ЕД. Виявлені на основі цих моделей безпосередні чи потенційні несправності аналізують моделями прогнозування і планування процесів експлуатації, рівень (3). Оцінки параметрів моделей парку ЕД рівня (3) на основі процедур прогнозування використовуються в подальшому для вирішення багатокритеріальних завдань щодо визначення черговості діагностування та ремонтів ЕД ін.

Укажемо особливість деяких процедур прогнозування (Рівень 3), які зв'язані з моделями накопичення даних про процеси експлуатації ЕД виду

$$((\{Sp_k(t)\}, Sp_k(t_0), (t_0^k), (t \geq t_0^k)), k = 1, 2, \dots, N_e). \quad (3.1)$$

де



спектр ЕД номер  $k$  на етапі  $(t_0)$ , який прийнято за еталон для подальших етапів процесів експлуатації,  $N_e$  – кількість ЕД в парку. Через складність і можливу нерегулярність послідовностей  $\{Sp_k(t)\}$  для прогнозування наступних параметрів пропонується застосовувати інтелектуальні процедури пошуку подібних станів ЕД парку, значення параметрів яких далі використовуються для екстраполяційних процедур прогнозування [99, 104]. Таким чином, в якості індивідуальної моделі деякого ЕД на кроці  $(t)$  виступає набір значень спектрів інших ЕД парку з подібними видами несправностей і характеристиками спектру. Для них вже відомі характеристики спектрів наступних етапів. Саме така інформація використовується для процедури лінійної екстраполяції, представленої у розд. 3.1.3. Іншим джерелом для прогнозування очікуваних параметрів ЕД на кроці  $(t + 1)$  являються карти Кохонена, розд. 2.3. побудовані для кожної несправності окремо. Формування нечітких процедур прогнозування параметрів процесів експлуатації ЕД розглянуто у наступних розділах.

### 3.1.3. Прогнозування часових, експлуатаційних параметрів електродвигунів і ресурсу на основі даних індивідуальних моделей і методів екстраполяції та кластеризації

Модель екстраполяційного прогнозування часових і технічних характеристик об'єктів парку залізничних систем реалізується наступною процедурою. На основі багатовимірної лінійної екстраполяції БЛЕ [104] вирішується завдання оцінки прогнозних значень параметрів ЕД за інформацією, що накопичена у подібних або «аналогічних» системах. Зокрема до них відносять системи приналежні одному кластеру карти Кохонена, побудованої методами [35, 36]. Розглянемо процедуру прогнозування докладніше. Нехай ефективність прогнозу визначається функцією векторних аргументів  $X$  та  $Y$

$$Q = Q(X, Y) \quad (3.2)$$

де

$Y = (y_1, \dots, y_m)$  - вектор параметрів об'єкту і  $X = (x_1, \dots, x_n)$  - вектор ситуації, який визначає специфіку об'єкта та його середовища, що треба враховувати при прогнозуванні. Для невеликої кількості ситуацій  $X_i (i = \overline{1, k})$  відомі значення векторів рішень  $Y_i^* (i = \overline{1, k})$  та значення  $Q$ . Вирішується завдання визначення оцінок вектора  $Y_{k+1}$ , «близького» до вектору  $Y_{k+1}^*$ , оптимального у заданій новій ситуації  $X_{k+1}$  (наприклад, через встановлений інтервал часу).

У роботі виконується процедура прогнозування [99, 104], коли число  $k$  еталонів об'єктів мале і недостатнє для побудови навіть лінійної моделі рівняння  $Y^* = L(X)$ ,  $k < n + 1$ . При цьому будується лінійна модель на підпросторах  $\{X'\}$   $\{Y'\}$ , утворених «аналогами», що належать одному кластеру. З використанням гіпотези щодо лінійної функції на просторах  $\{X\}$  та  $\{Y\}$  отримуються рівняння для гіперплощин  $\{X'\}$  і  $\{Y'\}$ , які мають вигляд

$$\{X'\} = X_1 + \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i (X_{i+1} - X_1); \quad (3.3)$$

$$\{Y'\} = Y_1 + \sum_{i=1}^{k-1} \mu_i (Y_{i+1} - Y_1) \quad (3.4)$$

На основі прийнятої гіпотези про лінійність перетворення  $\{X'\} \rightarrow \{Y'\}$  отримують ( $\lambda_i = \mu_i$ ,  $i = \overline{1, k-1}$ ). Для розрахунку єдиного рішення вводиться функцію  $\Phi(X, X') = \|X - X'\|^2$ , де  $X \in \{X\}$ ,  $X' \in \{X'\}$ , яка кожній парі ситуацій  $X$  та  $X'$  ставить у відповідність число, що характеризує їх близькість. Далі кожному вектору ситуації  $X \in \{X\}$  ставиться у відповідність його ортогональна проекція  $X''$  на лінійний підпростір  $\{X'\}$ . Параметри  $\lambda_i$  отримують із системи рівнянь  $\partial\Phi / \partial\lambda_i = 0, i = \overline{1, k-1}$ , враховуючи що  $\{X'\} = \sum_{i=1}^k \lambda_i^* X_i$ , тобто

$$\Phi(X' - X_0) = \sum_{i=1}^n [\lambda_i^* X_i - X_0]_i^2. \quad (3.5)$$

Мінімізуючи (3.5) знаходять параметри  $\lambda_i$ , а отже і прогноз значень  $Y_{k+1}$ . Графічна схема методу на прикладі двох опорних векторів представлена на рис. 3.3.

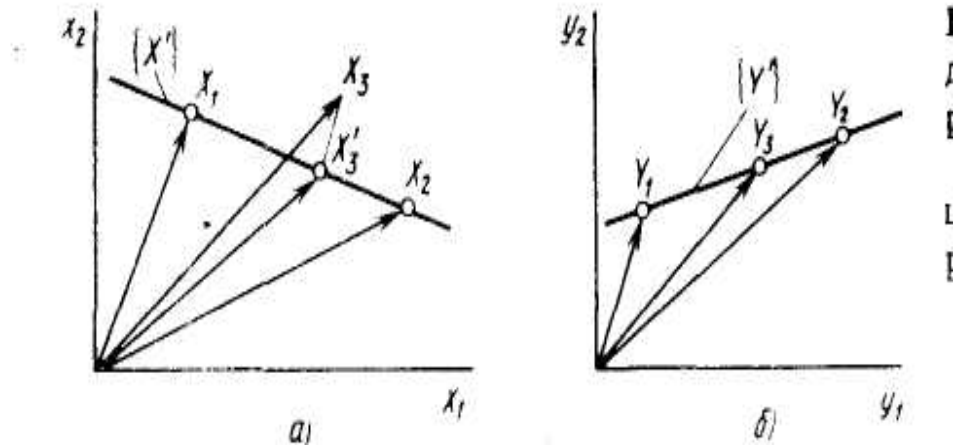


Рисунок 3.3. Схема методу лінійної екстраполяції. Екстраполяція по двох векторах аналогах. – а) простір ситуацій, - б) простір рішень

Параметри  $\lambda_i$ , які визначають вектор  $X' \in \{X'\}$ , найближчий у відповідності із функцією (3.5) до вектору  $X \in \{X\}$ , знаходять із системи рівнянь (3.3), (3.4).

На основі отриманих прогнозних значень техніко-економічних параметрів ЕД в подальшому виконуються процедури керування експлуатацією парків – остаточно визначаються черговості діагностування ЕД, їх ремонту ін.

Як зазначалось одним із важливих завдань ефективного управління парком ЕД являється визначення черговості виконання процедур їх обслуговування на основі оцінок параметрів поточного стану кожного ЕД на етапах  $(t)$ . При плануванні черговості (діагностування, ремонтів ін.) важливою являється інформація про прогнозований часовий період  $(t_d^k)$  до відмови конкретного ЕД через деякий прихований дефект, який розвивається при експлуатації (позначено:  $d$  – тип дефекту,  $k$  – номер двигуна). У роботі розрахунок прогнозу  $(t_d^k)$  виконується на основі аналізу бази даних

спектрів  $\{Sp_k(t)\}$  не лише  $k$ -ого ЕД, а на основі даних про всі подібні двигуни парку. Із цієї сукупності відбираються на основі співставлення визначена множина «схожих». До параметрів множини «схожих» ЕД як шаблонів прогнозування застосовуються процедури нечіткого управління типу Такагі-Сугено [37, 40, 105], подані в подальшому в роботі. Відмінність запропонованих процедур полягає у тому, що функціями правих частин, розрахунку прогнозних оцінок часу, являються процедура БЛЕ (3.2) – (3.5). Результати таких розрахунків узагальнюються необхідним чином, у відповідності до ступеня «схожості» шаблону і параметрів поточного стану  $k$ -ого ЕД, і дають прогнозну оцінку часового періоду  $(t_d^k)$ .

Приклади розрахунків із застосуванням процедури БЛЕ представлені у розд. 3.3.2, в якому, зокрема, реалізуються завдання прогнозування параметрів поточного стану ЕД на основі модифікованого методу Такагі – Сугено, з використанням даних про подібні системи.

## 3.2. Моделі і методи для автоматизації розрахунку черговості діагностування, обслуговування та ремонту парку електричних двигунів

### 3.2.1. Багатокритеріальна ієрархічна модель із визначення пріоритетів обслуговування електричних двигунів з урахуванням неоднорідності об'єктів інфраструктури

У розділі досліджено питання щодо формування технологічних і відповідних математичних моделей із урахуванням неоднорідності об'єктів інфраструктури, призначених для вирішення завдань автоматизованого керування процесами експлуатації парків технічних систем, електродвигунів СП. Важливою складовою ефективного керування парками технічних систем (ТС) являється урахування неоднорідності окремих об'єктів, як технічно, так і технологічно, через нерівноцінність зв'язків підсистем із рештою елементів інфраструктури – їх призначенням, відповідальністю, наявними ресурсами ін. Зазначена неоднорідність окремих елементів парку впливає на реалізацію завдань із визначення раціональної черговості діагностування, їх ремонтів тощо. Постановка таких завдань планування та управління парками ТС можлива лише в умовах автоматизованого управління, яке реалізується на основі оцінки параметрів поточного стану, а також прогнозування можливих значень на наступних етапах

управління. При експлуатації парків ЕД на основі планово-попереджувального методу можливості застосування таких процедур досить обмежені.

Стосовно експлуатації парків ЕД необхідно ураховувати відмінність процедур контролю параметрів та ремонту двигунів різних типів, часові та вартісні показники, технічну базу ін. В умовах обмеженого ресурсу урахування названих чинників, безумовно, впливає на загальну ефективність планування і виконання робіт. Неоднорідність ТС передбачає формування математичних моделей планування процесів діагностування і ремонтів ЕД парку з урахуванням впливу на безпеку і стійкість процесів перевезень, а також супроводу окремих видів ІМ процесів експлуатації ЕД.

В АЕПЕД неоднорідність керованих ТС ураховується шляхом формування і застосування моделей методу аналітичних ієрархій (МАІ) [102], а також кластеризації [38]. В першу чергу модель МАІ призначена для оцінки важливості технологічних поїздоділянок, де використовуються окремі стрілочні переводи і ЕД, яким призначається показник відносної важливості ділянок. При визначенні важливості окремої ділянки (відповідного ЕД) ураховується її вплив на пропускну спроможність мережі, види перевезень (вантажні, пасажирські, місцеві ін.), напруженість та відповідальність (число поїздів, напрямок слідування), період року, місце знаходження (можливість заміни маршруту при відмові), період відновлення тощо. Багатопараметричні оцінки важливості окремих технологічних поїздоділянок (і відповідних ЕД) розраховуються на основі процедури МАІ [102]

$$L_i = \{h_i^1, h_i^2, \dots, h_i^k, h_i^{k+1}, \dots, h_i^K\} \quad (i = \overline{1, L}), \quad (3.6)$$

де

$h_i^k$  - відносна значимість  $k$  – ого параметру  $i$  – ої технологічної ділянки.

Загальна аналітична структура моделі МАІ для розрахунку показників важливості виду (3.6), може бути представлена за рахунок вкладення вузлів. Така модель ієрархії має наступний вигляд:

$$MI = (P(S1, S2, S3, S4, S5), G(S1, S2, S3, S4, S5), PM(S1, S2, S3, S4, S5)), \quad (3.7)$$

де вузол нульового рівня МІ – корінь ієрархічної моделі. Графічна структура моделі (3.7) подана на рис. 3.4.

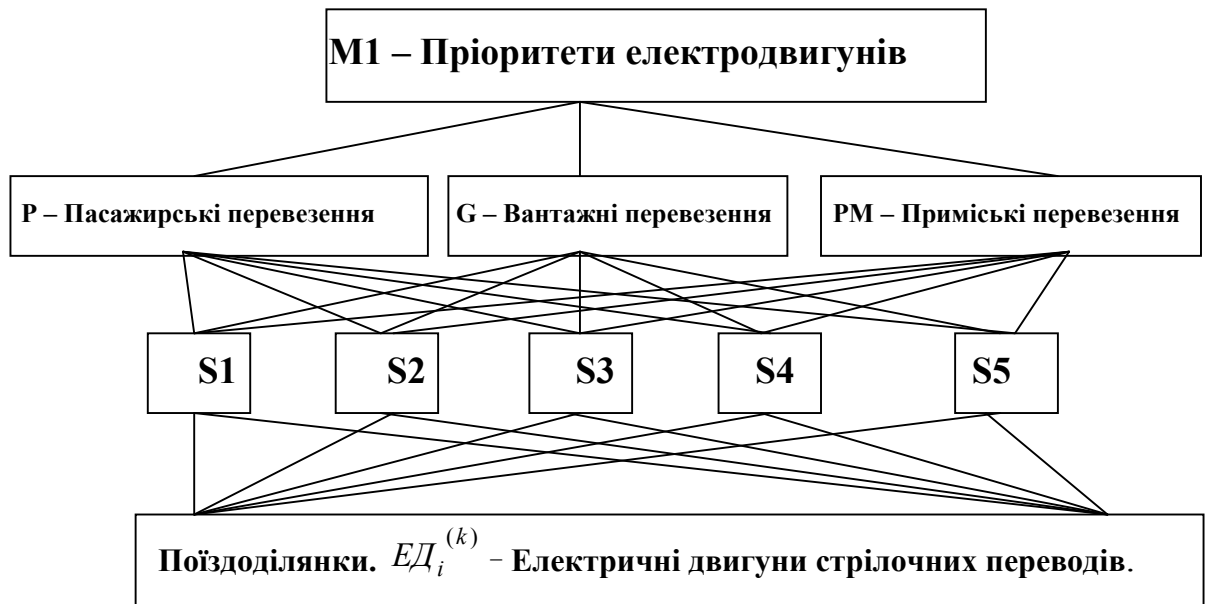


Рисунок 3.4 Модель аналітичної ієрархії для розрахунків пріоритетів електродвигунів

Зміст елементів моделі ієрархії (3.7) та рис. 3.3 наступний. Вузол МІ представляє всю ієрархічну модель МАІ. Вузли першого рівня Р, G, РМ визначають пасажирські, вантажні та приміські перевезення, відповідно; їх підвузли другого рівня ієрархії S1, S2, S3, S4, S5 значать наступне: категорія поїзда, період, місце знаходження (місця простою: перегін, станція), напруженість ділянки, період необхідний для відновлення транспортної мережі. За допомогою моделі (3.7) оцінюється важливість окремих категорій ділянок  $h_i$  на мережі із стрілочними переводами. Модель цілі рис. 3.4 у завданнях порівняльного аналізу ділянок інфраструктури, зрозуміло, враховує не всі чинники, що визначають умови на конкретних полігонах залізниць. Наприклад, до показників другого рівня можна додати «род тяги» (електротяга або автономна) - S6.

Отримані оцінки важливості ділянок (і відповідних ЕД) використовуються у моделях планування для упорядкування електричних двигунів та визначення черговості діагностування і ремонту ЕД. В системі АЕПЕД процедура МАІ реалізована засобами окремої функції. Результати прикладу розрахунків пріоритетів ЕД наведено в додатку В.

### 3.2.2. Визначення пріоритетів обслуговування технічних систем на основі методів кластеризації

Інша математична модель з урахування неоднорідності об'єктів у завданнях оцінювання показників важливості  $h_i$  (3.6) множини поїздоділянок  $PRL_i$ , реалізована в засобах автоматизованої експлуатації АЕПЕД, базується на процедурах кластеризації [38]. Відповідно до неї поїздоділянкам мережі  $PRL_i$  співставляють значення їх характеристик:  $h_i (S1, S2, S3, S4, S5)$ , зазначених на рис. 3.3. Виконується кластеризація  $\{h_i ((S1, S2, S3, S4, S5))\}$ , тобто групування  $PRL_i$  на задане число кластерів, елементи в яких «подібні» - близькі за значеннями  $h_i (S1, S2, S3, S4, S5)$ ; між елементами різних кластерів існують суттєві відмінності. Далі на основі процедури МАІ оцінюється відносна важливість отриманих кластерів, значення якої присвоюється ТС цих ділянок (стрілочним переводам, електродвигунам ін.). Приклад застосування процедури кластеризації, яка включена до складу АЕПЕД, наведено у додатках.

### 3.3. Управління процесами експлуатації парків електродвигунів на основі інтелектуальних методів та експертних систем.

#### 3.3.1. Формування баз знань нечітких експертних систем для прогнозування параметрів електричних двигунів у процесах експлуатації

Вирішення завдань автоматизації процесів експлуатації парків технічних систем виконаємо на основі методів експертних систем (ЕС). В роботах [52, 95] представлена експертна система класифікації об'єктів за даними їх частотного спектру. Основою ЕС є база нечітко-статистичних правил (БНСП) [42, 62] та метод нечіткого управління [37, 40]. Нечітка компонента БНСП відображає суб'єктивні знання експерта про частотні діапазони об'єктів. Статистична складова БНСП відображає фактичний частотний спектр еталонних об'єктів класифікації і формується автоматично в процесі

адаптації ЕС. На рис. 3.5 представлена структура експертної системи нечітко-статистичної класифікації об'єктів по частотному спектру.

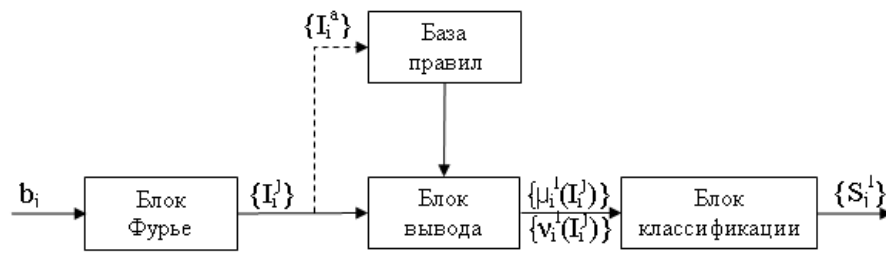


Рисунок 3.5. Структура експертної системи класифікації об'єктів управління

Експертна система рис. 3.5 виконує класифікацію об'єктів управління по частотному спектру на основі адаптивної бази нечітко-статистичних правил та узагальнення методу нечіткого управління [62, 104]. В ЕС рис. 3.5 блок Фур'є реалізує швидке перетворення Фур'є (ШПФ), а також процедури фазифікації [37, 40, 70] характеристик вхідних сигналів.

Знятий з об'єкта сигнал подається на аналого-цифровий перетворювач (АЦП) для дискретизації. Частотний спектр сигналу об'єкта отримують за допомогою ШПФ, результатом якого є представлення об'єкта множиною гармонік  $H = \{h_i\}, i = \overline{1, N_H}$  перетворення Фур'є. Частотна роздільна здатність гармонік  $\Delta f$  при цьому становить  $\Delta f = \frac{f_{\max}}{N_h}$  Гц, де  $f_{\max}$  - максимальна частота спектра дискретизованого сигналу досліджуваного об'єкту. Частота  $h_i$  гармоніки дорівнює  $f_i = i * \Delta f, i = \overline{1, N_H}$  Гц. Кожна гармоніка в множині  $\{h_i\}$  представляється парою коефіцієнтів  $(\text{Re}_i, \text{Im}_i), i = \overline{1, N_H}$ . Для кожної гармоніки перетворення Фур'є обчислюється інтенсивність частоти  $I_i$  відповідно

$$I_i = \sqrt{\text{Re}_i^2 + \text{Im}_i^2}, i = \overline{1, N_H}. \quad (3.8)$$

Для побудови бази правил ЕС були застосовані метод Мамдані, метод нечітко-статистичного управління (НСУ) і метод нечіткого управління Такагі-Сугено [37, 40] і [80]. В рамках методу НСУ для обчислення



приналежності вхідної величини до нечітких множин використовується функція щільності  $V$ , побудована на основі обробки статистичних даних вхідної величини, використовуючи методику [79].

Для кожного класу станів об'єктів  $c_l$  існує своє правило, що визначає ступінь належності об'єкта  $b_j$  до класу  $c_l$ . Правила представлені в наступному вигляді .:

$$R^{(l)} : IF \left( (I_1^j \text{ is } I_1^l) AND (I_2^j \text{ is } I_2^l) .. AND (I_{N_H}^j \text{ is } I_{N_H}^l) \right) \\ THEN S_j^l = f^{(l)}(\{\mu_i^l(I_i^j)\}, \{\nu_i^l(I_i^j)\}), \quad i = \overline{1, N_H}, \quad (3.9)$$

де  $I_i^l$  – нечіткі множини інтенсивності  $i$ -ої гармоніки  $j$ -го класу об'єктів, представлені функціями належності  $\mu_i^l$  та функціями щільності  $\nu_i^l$ ;  $f^{(l)}$  – функція розрахунку значень степені належності  $S_j^l$  об'єкта  $b_j$  до класу  $c_l$ .

Для формування БНСП необхідно встановити функції  $\mu_i^l$  та  $\nu_i^l$   $l = \overline{1, N_C}, i = \overline{1, N_H}$ . Функції  $\mu_i^l$  визначаються експертом суб'єктивно на основі його знань щодо частотного спектру досліджуваних об'єктів. Для отримання функцій  $\nu_i^l$  ЕС повинна бути «навчена» на множині навчальних даних про об'єкти  $P$ . Частотний спектр кожного такого об'єкта множини навчання  $P_a$  представляється множинами інтенсивності гармонік  $\{I_i^a\}, i = \overline{1, N_H}$ . Діапазон фактичних значень  $I_i^a$  розбивається на  $N_T^l$  рівних інтервалів. Кожний об'єкт навчальної множини  $P_a$  належить певному класу об'єктів  $c_l$ . В свою чергу, кожному  $c_l$  відповідає своє значення числа інтервалів  $N_T^l, l = \overline{1, N_C}$ .

ЕС класифікації об'єктів по частотному спектру на основі адаптивної БНСП була використана для розробки програмно-апаратного комплексу діагностики електродвигунів [52, 50]. За допомогою БНСП проводилась діагностика ЕД постійного струму залізничних стрілочних переводів моделей ДП 0.18, ДП 0.25, МСП 0.15 і МСП.

Розглянемо питання формування бази правил експертної системи діагностування ЕД. Далі як приклад представлено формування конкретної

бази правил (БП) експертної системи (ЕС) для діагностики електродвигунів постійного струму залізничних стрілочних переводів МСП 0.25. При формуванні бази правил були досліджені зразки двигунів, що мали різний технічний стан: справний, коротке замикання обмотки, коротке замикання пластин колектора, обрив секції якоря, круговий вогонь по колектору, див. додаток С. Був отриманий частотний спектр струмів цих зразків. Як вище зазначено, частотний спектр двигуна був представлений 256 інтенсивностями гармонік швидкого перетворення Фур'є.

Для формування БП були досліджені середні арифметичні значення інтенсивності гармонік різних зразків електродвигунів. Далі через  $M(i; k)$  буде позначатися середнє арифметичне інтенсивності гармонік з індексами від  $i$  до  $k$  ( $i < k$ ). На рис. 3.5 представлений один з характерних графіків значень  $M(1; 64)$ , отриманих для різних зразків двигунів. Діапазони номерів зразків відповідали наступним класам технічного стану електродвигунів: [1; 56] - справний, [57; 160] - коротке замикання обмотки, [161; 211] - коротке замикання пластин колектора, [212; 283] - обрив секції якоря, [284; 293] - круговий вогонь по колектору.

Аналіз значень величини  $M(1; 64)$ , в кінцевому рахунку, дозволив виділяти серед множини зразків ЕД два класи електродвигунів: «справний», несправні, серед яких і «круговий вогонь по колектору» (див. рис. 3.6). На рис. 3.6 по осі  $Ox$  відкладені номери зразків електродвигунів із різними типами несправностей. Узагальнені, нечіткі правила для діагностування зразків ЕД різних категорій мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \text{IF } ( M(1; 64) \text{ is } \textit{Less90} ) \quad \text{THEN } \textit{IsOK} \\ \text{IF } ( M(1; 64) \text{ is } \textit{More70} ) \quad \text{THEN } \textit{Is - Round - Light} . \end{aligned} \quad (3.9)$$

Вони являються правилами бази нечітких знань у формі (2), або у формі моделі Такагі – Сугено [Рут], поданими у спрощеній формі, яка відповідає досліджуваному процесу. В правилах (3.9) указані нечіткі величини  $\textit{Less90}$ ,  $\textit{More70}$ ,  $\textit{IsOK}$ ,  $\textit{Is - Round - Light}$ . Змістовно вони відповідають детермінованим величинам, приведеним нижче у (3.10). Загальна форма баз знань і процедура цього методу для завдань управління експлуатацією ЕД подана у розд. 3.3.2.

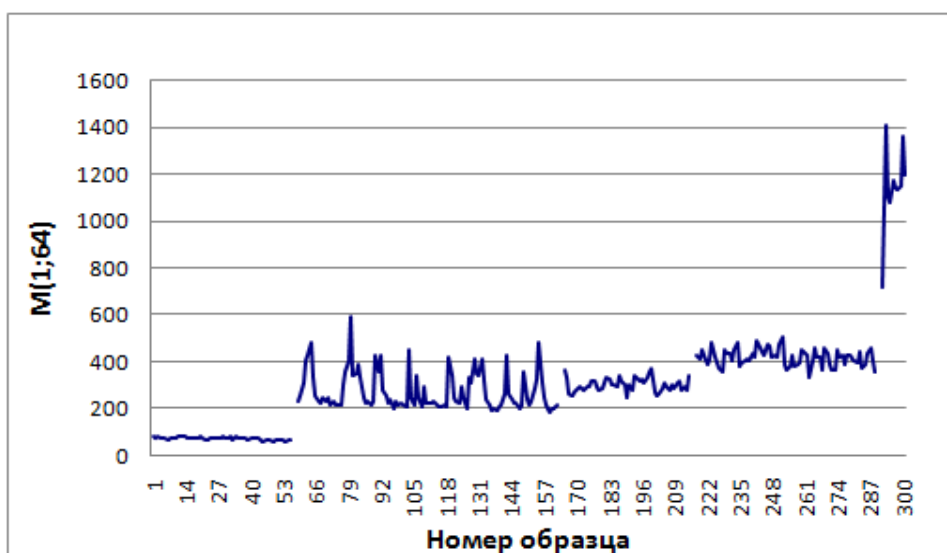


Рисунок 3.6. Значення інтенсивності гармонік  $M(1; 64)$  для різних типів зразків електродвигунів

Для порівняння наведемо детерміновану форму правил моделі бази знань експертної системи діагностування ЕД [16, 28, 29, 65]. А саме:

IF (  $M(1; 64) < 90$  ) THEN «Справний»  
 IF (  $M(1; 64) > 700$  ) THEN «Круговий вогонь по колектору» (3.10)

Наведені правила містять чіткі множини інтенсивностей гармонік, які представляють відповідні типи несправностей (при (  $M(1; 64) > 700$  круговий вогонь ін.). Але, наприклад, в умовах розвитку при експлуатації ЕД кількох типів несправностей детерміновані вимоги, нерівності, можуть порушуватися. Праві частини, висновки правил (3.10), являються табличними функціями, указують діагностовано класи несправності ЕД.

Подібним чином модифіковані також інші правила діагностування ЕД, виконані дослідження чітких і нечітких значень величини  $M(26; 30)$  дали можливість діагностувати електродвигуни з наступними видами несправностей: «коротке замикання обмотки», «коротке замикання пластин колектора» і «обрив секції якоря». Представлені в зручній для викладу формі правила експертної системи для виявлення цих видів несправностей мають, наприклад, вигляд (3.11).

На рис. 3.7 графічно показано відмінності детермінованих (фрагмент – (а) [52]) і нечітких (фрагмент – (б) [99]) елементів правил діагностування

станів ЕД на основі спектральних характеристик струмів, визначених виразами (3.11). У детермінованому варіанті правил рис. 3.7 (а) визначено границі діапазонів величин інтенсивностей гармонік  $M(26; 30)$ . При цьому навіть незначна зміна рівня інтенсивності може приводити до діагностування різних можливих типів несправностей ЕД, що не повністю відповідає практичним спостереженням. По суті, не можливо також відстежувати «розвиток несправності». Нечітка форма правил діагностування (3.11), рис. 3.7 – (b), (c) використовує «розмиті» області діагностування несправностей, які подані трапецієвидними і трикутними функціями належності, що визначають відповідні області  $More30$ ,  $Less200$ ,  $Less200$ ,  $Less990$  та ін. Рис. 3.7 – (c) містить частину термів із (b). Із змінами інтенсивностей гармонік  $M(26; 30)$  буде змінюватися показник ступеня належності поточного стану ЕД до області із відповідним типом несправності.

Зазначена методика автоматизованої діагностики станів ЕД моделі МСП 0.25 засобами експертної системи виявилася досить ефективною. З урахуванням деяких опущених тут несуттєвих деталей формування БП, представлена методика автоматизованої діагностики несправностей ЕД дозволила вірно визначати всі типи несправностей для кожного з наявних варіантів даних.

$$\begin{aligned}
 & \text{IF ( [ } M(26; 30) \text{ is } More600 \text{ ] AND [ } M(26; 30) \text{ is } Less990 \text{ ] )} \\
 & \quad \text{THEN } Is - K3\bar{O} \text{ «Коротке замикання обмотки»} \\
 & \text{IF ( [ } M(26; 30) \text{ is } More30 \text{ ] AND [ } M(26; 30) \text{ is } Less200 \text{ ] )} \quad (3.11) \\
 & \quad \text{THEN } Is - K3\bar{P}\bar{K} \text{ «Коротке замикання пластин колектора»} \\
 & \text{IF ( [ } M(26; 30) \text{ is } More200 \text{ ] AND [ } M(26; 30) \text{ is } Less430 \text{ ] )} \\
 & \quad \text{THEN } Is - O\bar{S}\bar{Y} \text{ «Обрив секції якоря»}.
 \end{aligned}$$

Підвищення достовірності нечітких правил виду (3.11) у порівнянні із детермінованими, приклад представлений у (3.10), пояснюється також наступним. При детермінованих моделях діагностування властивостей (3.11) область (430; 600) інтенсивностей гармонік  $M(26; 30)$  не відповідає жодному типу несправності (тобто, в ній стан ЕД «справний», рис. 3.7 – (a)). При нечітких моделях (3.11), рис. 3.7 – (b), в цій області «розвиваються» процеси пошкодження («Коротке замикання обмотки» або «Обрив секції якоря»), що визначається показником належності  $\mu(M)$ .

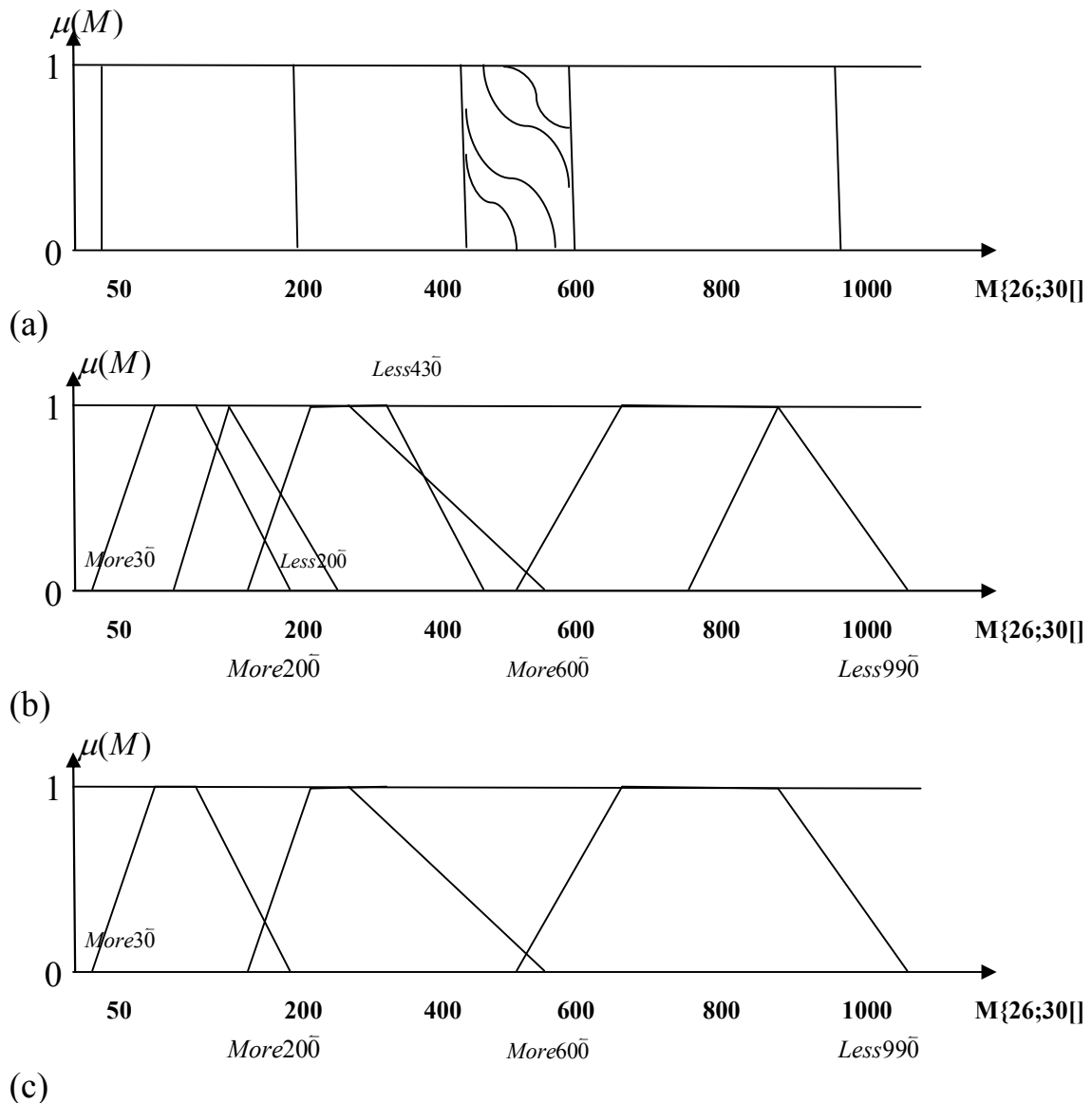


Рисунок 3.7 Представлення детермінованих (а) і нечітких (b)-(c) правил бази знань експертної системи діагностування несправностей ЕД

### 3.3.2. Процедура типу Такагі-Сугено з аксіоматичним нелінійним управлінням експлуатацією парків електродвигунів

Управління складними технологічними процесами і об'єктами на практиці у багатьох випадках здійснюється в умовах багаторазової невизначеності і при відсутності загальних математичних моделей їх функціонування [15, 16, 105]. При цьому оцінка ефективності реалізації дій проводиться за значеннями набору параметрів нормативного, статистичного, нечіткого та іншого характеру. У розділі досліджуються питання математичного моделювання та управління процесами експлуатації ЕД у випадках, коли одночасно мають місце кілька різних видів невизначеності: випадко-

вість, неточність, нечіткість, їх комбінації. Так в нашому випадку результати спектрального аналізу струмів ЕД можна вважати стохастичними або інтервальними величинами, а представлені електромеханіками дані - нечіткими. У більшості досліджень [40, 70] моделювання та управління здійснюється на основі однорідних по виду відображень невизначеності величин, або шляхом переходу до них. При таких перетвореннях неминуча втрата або ж спотворення вихідної інформації.

Для випадків, коли управління експлуатацією парку ЕД вимагає врахування одночасно кількох різних видів невизначеності [88 – 90], далі у розділі пропонується процедура реалізації задачі векторної оптимізації ЗВО в умовах багаторазової невизначеності, що узагальнює метод нечіткого управління Такагі-Сугено, згідно [42, 43]. Формування моделі, що становить багатокомпонентну невизначеність, індекс достовірності  $d(x)$ , пропонується виконувати у вигляді середнього геометричного нормованих моделей окремих компонентів:

$$d(x) = \left[ d_{D_1^N}(\bar{x}_1) \cdot d_{D_2^N}(\bar{x}_2) \cdot \dots \cdot d_{D_n^N}(\bar{x}_n) \right]^{1/n}. \quad (3.12)$$

Таке подання в кінцевому рахунку відповідає більшості відомих способів формалізації умов невизначеності різних типів (статистична, нечітка та ін.) [42, 51]. Крім того (3.12) дозволяє побудувати моделі керованих процесів за схемами нечіткого [38 – 40], нечітко-статистичного [42] або інших типів недетермінованого управління. Показник достовірності, індекс  $d(x)$ , використовується в процедурах виведення, подібно ступені приналежності при обробці нечітких величин [40, 79]. В якості методу вибору управління, узагальнюючого результати окремих правил, використовується аксіоматика компромісу «відносна поступка» [41]. У класичній схемі управління Такагі-Сугено (Т-С) [105, 37] застосовується лінійна модель компромісу - «абсолютна поступка». У модулі багаторазово невизначеного управління Т-С використовується база правил такого вигляду:

$$R^{(1)} : IF(x_1 \text{ is } D_1^1 \text{ AND } x_2 \text{ is } D_2^1 \dots \text{ AND } x_n \text{ is } D_n^1), \text{ THEN } y_1 = f^{(1)}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.13)$$

$$R^{(N)} : IF(x_1 \text{ is } D_1^N \text{ AND } x_2 \text{ is } D_2^N \dots \text{ AND } x_n \text{ is } D_n^N), \text{ THEN } y_N = f^{(N)}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

де

$R^{(k)}$  – окремі правила;  $D_s$  – узагальнені форми невизначених (нечіткостатистичних [42] або багатокомпонентних) множин, які різні для правил. У правій частині правил THEN вказані функції для вхідних «сигналів»  $X_j$ , відповідають вхідним  $x_j$ . Для управління на основі (8) необхідно обчислити оцінку для значень  $X_j$ , а також розрахувати «вагу» кожного з правил  $R^{(k)}$ .

Відповідно схемі Т-С управління розраховуються «степені виконання правил» – методи Мамдані, Ларсена:

$$W^1 = \begin{cases} \min \{d_{D_1}(\bar{x}_1), d_{D_2}(\bar{x}_2), \dots, d_{D_n}(\bar{x}_n)\} \\ \text{или} \\ d_{D_1}(\bar{x}_1) \cdot d_{D_2}(\bar{x}_2) \cdot \dots \cdot d_{D_n}(\bar{x}_n) = \prod_j d_{D_j}(\bar{x}_j) \end{cases} \quad (3.14)$$

Далі по оцінках вхідних сигналів  $X_j$  розраховують функції у правих частинах (3.15), рис. 3.8 для приклада з лінійними функціями

$$\bar{y}_1 = f^{(1)}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n). \quad (3.15)$$

В стандартному управлінні Т-С формування виходу, фактично розв'язання конфлікту окремих правил (3.15), виконується відповідно [5]:

$$\bar{y} = \sum_{k=1}^N w^k \bar{y}_k / \sum_{k=1}^N w^k. \quad (3.16)$$

Компроміс (3.16) прийнятний для лінійних систем, не містить вимоги щодо відношень між результатами  $R^{(k)}$  (3.15) в рішенні (3.16).

Розглянемо мультипликативну модель компромісу (3.15), відповідну принципу відносної поступки з аксіоматично встановленим набором властивостей рішень [41]. При формулюванні моделі «справедливого» компромісу  $\{Y_j(k)\}_m$  враховуються такі властивості: симетрія (рівноправність  $Y_j$ ), характеристика відхилення групової оцінки, величин кожного показника  $Y_j : Y_j^*(k_j)$ . Для формування компромісу  $Y_j(k)$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  визначаються

$$\lambda_j = (Y_j^*(k_j) - Y_j^c(k_c)) / \max\{Y_j^*, Y_j^c\}, \quad (3.17)$$

по яких розраховується узагальнена функція виду добутку

$$\prod_{i=1}^b \lambda_i = \prod_{i=1}^m Y_i^c(k_c) \Rightarrow \max_{k_c} \quad (3.18)$$

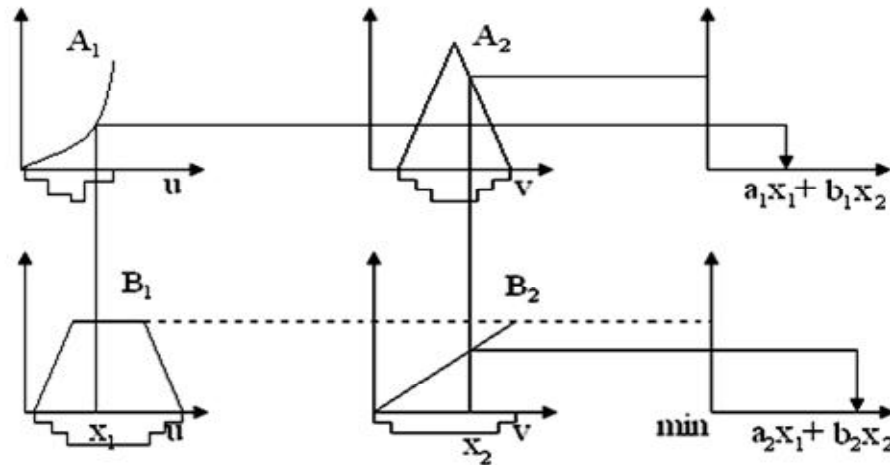


Рисунок 3.8 Графічна схема нечітко-статистичного управління типу Такагі-Сугено, форма управління при неоднорідній невизначеності параметрів керування

значення (3.18) далі максимізують в задачах вибору оптимального управління. В (3.17), (3.18) через величини  $Y_j$  позначено значення функції згідно (7),  $k_c$  - номер ітерації компромісної моделі (9), для управління Т-С  $k_c = 1$ . З урахуванням (10), (11) отримують модифікований метод типу Т-С:

$$Y = \sum_i \omega_i \sqrt{\prod_{i=1}^n y_i^{\omega_i}} \quad (3.19)$$

де

$n$  – кількість правил  $R^{(k)}$ ;  $Y_i$  – функції вихідних величин, отриманих в результаті виводу по правилу  $i$ ;  $\omega_i$  – ступінь невизначеності правила « $i$ » (3.15). При нормуванні ступенів невизначеності відповідно  $\omega_i / \sum \omega_i$  модель (3.18) спрощується, а саме приймає вид (3.19). Слід зазначити, що моделі управління (3.17) – (3.19) реалізують нелінійну апроксимацію нечітких (багатокомпонентних невизначених - (3.15)) величин.

Відзначимо ще одну важливу властивість моделей (3.18), (3.19), яка дозволяє застосовувати їх для формування компромісних рішень задач векторної оптимізації (ЗВО). Для цього у правих частинах бази правил (3.15) розраховують не одну, а вектор цільових функцій для поточного вхідного



вектору «сигналів»  $X_j$ .. Значення оцінок (3.18) або (3.19) необхідно максимізувати (мінімізувати), причому будуть забезпечуватися зазначені вище аксіоматичні властивості оптимального для ЗВО компромісного рішення. Таким чином пропонується процедура реалізації ЗВО в умовах багаторазової невизначеності, узагальнююча метод нечіткого управління Такагі-Сугено.

Модифіковане управління типу Такагі-Сугено (Т-С управління) реалізується згідно узагальненої схеми, представленої на рис. 3.6. Нечіткі або недетерміновані величини інших типів (всі форми багаторазової невизначеності) присутні тільки в множині посилок правил управління (3.15), завершальне рішення вибирається на основі детермінованих функцій, зокрема БЛЕ, на відміну від лінійних форм, рис. 3.6. Ступені невизначеності, індекси достовірності (3.12), що характеризують досліджувані стани ЕД, оцінюються ваговими коефіцієнтами при обчисленні інтегрального показника (3.16), який враховує результати застосування кожного з окремих правил (3.15). В модулі Т-С управління рис. 3.9 для кожного з правил замість ступенів належності правил  $\mu_F(\hat{X}_* \in \tilde{A}_k(X))$  використовуються узагальнені значення  $d(x)$  (3.12), тоді як інші алгоритми обчислення достовірності правил зберігаються. Якісно новим є метод вибору інтегрованого управління, який узагальнює результати окремих правил і побудований на аксіоматиці моделі компромісу «відносна поступка» [41], замість моделі компромісу «абсолютна поступка», неявно використовуваної в класичній схемі Т-С управління [37, 40, 79].

У моделі рис. 3.9 ураховано особливість даних про процеси експлуатації ЕД, які використовуються для прогнозування на основі модифікованого Т-С управління. А саме вхідні дані представляють набори параметрів «подібних» електродвигунів, які отримані на основі аналізу Бази даних всього парку ЕД (БДПЕД). Для розрахунку прогнозних значень (3.19) використовується процедура багатовимірної екстраполяції БЛЕ, розд. 3.1.3. Тобто функцію (3.15) правил Т-С реалізує безпосередньо процедура БЛЕ. У випадку відсутності серед даних БДПЕД подібних до стану досліджуваного ЕД, використовуються особисті дані його двох попередніх етапів (t-2), (t-1).

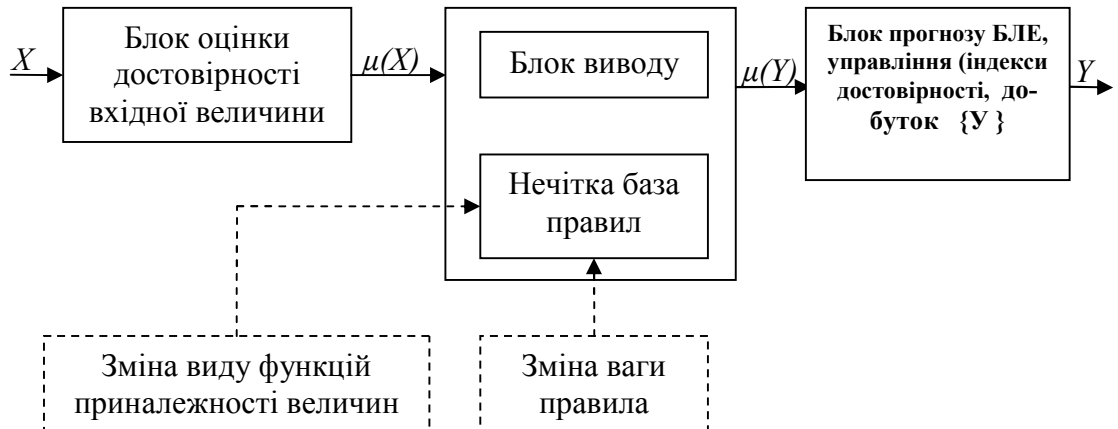


Рисунок 3.9 Модифіковане управління Такагі-Сугено на основі індексів достовірності

Розглянемо питання застосування моделей бази знань АЕПЕД (3.12), (3.13), (3.14) для прогнозування параметрів станів парку ЕД. Змістовно вирішується наступне завдання оцінки параметрів ЕД на деякому етапі ( $t$ ) процесу експлуатації. Управління експлуатацією відбувається на основі системи індивідуальних моделей, поданих раніше, що накопичують ряди спостережень спектрів робочого струму ЕД у часі та ін. Процедура моніторингу, вимірювання струму та побудови спектрів, виконується постійно, за встановленим регламентом. За спектрами виконується діагностування стану ЕД (визначення типів можливих несправностей, або встановлення та розвитку відповідних процесів, і оцінка ступеня достовірності таких подій). Процедури діагностування на етапі ( $t$ ) застосовують не до всіх ЕД, а лише для їх встановленої підмножини, попередні дані яких, спектральні характеристики, за прогнозними оцінками станів знаходяться у зонах певних відомих типів несправностей; також іноді діагностування на даному кроці для парку ЕД є обов'язковим. За даними діагностування корегують індивідуальні моделі ІМ двигунів, а також визначають необхідності процедур ремонтів та упорядковують послідовності черги їх виконання.

Для реалізації зазначеної методики управління експлуатацією парку ЕД необхідно мати можливість визначати оцінки прогнозних величин певних характеристик (очікуваний термін до виникнення несправності певного типу, очікувана вартість ремонту ЕД на поточному етапі, очікувана вартість відмови СП через проблеми з ЕД, яка визначається його впливом на

провізну спроможність поїздоділянки ін.). Саме для вирішення таких завдань використовують методи нечіткого діагностування (3.12) та Такагі – Сугено (3.13), (3.14). При цьому для реалізації прогнозування застосовують не лише дані ІМ конкретного ЕД, а усіх «подібних» систем парку на різних етапах експлуатації. Таким чином розширюється розрахункова база для процедур прогнозування (виведення наслідків процесів у ЕД при експлуатації).

При формуванні баз знань виду (3.13), (3.14) – (3.16) ураховуються наступні вхідні  $\{X_k\}$  та вихідні  $\{Y_j\}$  параметри процесів експлуатації ЕД.

Вхідні параметри:

- $X_1$  – період часу після обслуговування ЕД електромеханіком;
- $X_2$  – період часу після останнього діагностування;
- $X_3$  – висота щіток на основі огляду;
- $X_4$  – характеристики діагностування спектру на кроці  $(t-1)$ ;
- $X_5$  – характеристики діагностування спектру на кроці  $(t-2)$ ;
- $X_6, X_7$  – інтенсивності поїздопотоку на етапах  $(t-2), (t-1)$ ;
- $X_8, X_9, \dots$  – оцінки достовірностей типових видів несправності ЕД.

Вихідні параметри:

- $Y_1$  – очікуваний період до відмови ЕД. Як мінімальний із можливих періодів різних типів несправності;
- $Y_2 Y_3$  – очікувана величина вартості ремонту ЕД, відмови стрілочного перевodu через проблеми з ЕД;
- $Y_4 Y_5, \dots$  – оцінки достовірності щодо визначення станів ЕД.

Позначені вище параметри в дійсності мають різну форму представлення, являються величинами різних типів (детермінованих, нечітких ін.), що буде встановлено при визначенні конкретних правил розрахунку, наприклад у формі моделі Такагі – Сугено (3.13) – (3.18). Представимо типові правила для прогнозування  $\{Y_j\}$  у табличному вигляді, табл. 3.1. В ній у стовпцях наведені вхідні змінні із множини  $\{X_k\}$ , а також один з результуючих параметрів  $\{Y_j\}$ , значення якого розраховують процедурами екстраполяції БЛЕ.

Таблиця 3.1

Структура правил із прогнозування параметрів станів ЕД для нелінійної моделі управління типу Такагі – Сугено

$N_{rule}$	$Y_{oute}$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_8$
1	$Y_5(OK)$		$+(4\bar{0})$		$+(3\bar{0})$	$+(5\bar{5})$		
2	$Y_4(KZO)$	$+(8\bar{0})$			$+(73\bar{0})$	$+(82\bar{0})$	$+(3\bar{0})$	
3	$Y_5(OCЯ)$	$+(7\bar{0})$	$+(2\bar{0})$		$+(36\bar{0})$			$+(0.8\bar{0})$
4	$Y_1(K3PK) \approx 2\bar{0}$		$+(3\bar{0})$	$+(4\bar{0})$	$+(12\bar{5})$	$+(7\bar{5})$		$+(0.9\bar{0})$
5	$Y_2(Рем) \approx 220\bar{0}$		$+(1\bar{0})$	$+(3\bar{0})$			$+(4\bar{0})$	$+(0.9\bar{5})$
6	$Y_3(Відм) \approx 3000\bar{0}$	$+(6\bar{0})$	$+(3\bar{0})$	$+(3\bar{5})$			$+(3\bar{0})$	$+(0.9\bar{0})$

У таблиці наведено дані для ЕД постійного струму залізничних стрілочних переводів МСП 0.25, які подані у експертному представленні, через сукупність змінних. Відповідне правило для рядка 6 буде

$$R^{(6)} : IF(x_1 \text{ is } 6\bar{0} \text{ AND } x_2 \text{ is } 3\bar{0} \dots \text{AND } x_8 \text{ is } 0.\bar{9}) \\ THEN Y_5(\text{Відмова}) = f_{БЛЕ}^{(6)}(x_1, x_2, \dots, x_8), \quad (3.20)$$

в якому права частина (очікувана вартість відмови СП) розраховується процедурою БЛЕ-екстраполяції, на основі даних відібраних прецедентів.

В табл. 3.1 позначені «формули» правил, знак «+» указує на входження змінної до правила, в дужках записані нечіткі множини, як приклади типових областей значень параметрів, сукупність яких відповідає виконанню правила.

Як зазначалося, перед процедурами прогнозування виконується відбір «подібних ЕД», стани яких характеризуються «достатньо близькими» значеннями характеристик, що встановлюється пошуком по індивідуальним моделям ІМ всіх ЕД парку для попередніх етапів експлуатації.

Табл. 3.2 містить результати застосування процедури БЛЕ для оцінки величин прогнозованих станів деяких ЕД парку. Сутність вхідних і результуючих параметрів, а також структура правил відповідає табл. 3.1. В якості вихідних параметрів, що використовуються для управління експлуатацією парку ЕД, обрані наступні:

Таблиця 3.2

## Прогнозування параметрів станів ЕД на основі екстраполяції

$N_{вар}$	$Y_{оуте}$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_8$
B1,1	$Y_4(KZO)=0.93$	+(100̄)			+(630̄)	+(780̄)	+(30̄)	+(0.90̄)
B1,2	$Y_4(KZO)=0.87$	+(80̄)			+(730̄)	+(820̄)	+(20̄)	+(0.80̄)
B1,3	$Y_4(KZO)=0.78$	+(60̄)			+(680̄)	+(750̄)	+(40̄)	+(0.720̄)
<b>B1-E</b>	$Y_4(KZO)=\mathbf{0.86}$	(70̄)			700̄	770̄	34̄	0.85̄
B2,1	$Y_1(KЗПК) \approx 20̄$		+(30̄)	+(40̄)	+(125̄)	+(75̄)		+(0.90̄)
B2,2	$Y_1(KЗПК) \approx 30̄$		+(10̄)	+(30̄)	+(145̄)	+(95̄)		+(0.85̄)
B2,3	$Y_1(KЗПК) \approx 14̄$		+(20̄)	+(35̄)	+(175̄)	+(115̄)		+(0.93̄)
<b>B2-E</b>	$Y_1(KЗПК) \approx \mathbf{0 !}$		<b>35</b>	<b>24</b>	<b>160</b>	<b>94</b>		<b>0.88</b>
B3,1	$Y_2(Рe) \approx 2200̄$		+(10̄)	+(30̄)			+(40̄)	+(0.95̄)
B3,2	$Y_2(Рe) \approx 2700̄$		+(20̄)	+(35̄)			+(20̄)	+(0.88̄)
B3,3	$Y_2(Рe) \approx 1900̄$		+(15̄)	+(40̄)			+(32̄)	+(0.80̄)
<b>B3-E</b>	$Y_2(Рe) \approx \mathbf{2170}$		<b>12</b>	<b>32</b>			<b>26</b>	<b>0.90</b>

- оцінки достовірності визначення станів ЕД (Коротке Замикання Обмотки), варіанти базових даних для прогнозування B1.1 – B1.3, результат BLE – B1–E;

- оцінка очікуваного терміну до відмови ЕД (несправність типу Коротке Замикання Пластин Колектора, КЗПК), варіанти B2.1 – B2.3, результат B2– E;

- очікувана вартість ремонту ЕД, варіанти B3.1 – B3.3, результат B3– E.

При розрахунках на основі BLE використовувалися по три прототипи, відібрані із бази індивідуальних моделей процесів експлуатації на основі значень індексів достовірності (3.12), (3.14): визначалися ЕД з найбільшими значеннями оцінок (3.12) відповідно поточного стану на даному етапі, який визначають змінні  $\{X_k\}$  таблиці 3.2. Значення параметрів виділені у таблиці. Відзначимо, що прогноз свідчить про виникнення несправності КЗПК, прогнозований термін до виникнення якої вичерпано. Результати прогнозування, стовпець  $Y_{оуте}$ , в подальшому використовуються в правилах Т-С управління, або при плануванні черговості обслуговування ЕД. Так

для ЕД варіанту В2-Е необхідно терміново ремонтувати, або провести подальше обслуговування електромеханіком.

Наведемо приклад застосування моделей формування компромісу правил (3.15) – (3.19), за якими формуються вихідні рішення процедур Такагі-Сугено. В табл. 3.3 приведено результати застосування правил виду (3.13) до даних конкретного ЕД: указані значення індексів достовірності правил та розрахункові значення функцій екстраполяції, див. табл. 3.2.

Таблиця 3.3

Результати розрахунків за правилами модуля Такагі-Сугено

N / Показники	$Y_1^{(s)}(KЗПК)$	$\omega_1^{(s)}$	$\omega_1^{(s)}$
S=1	42	0,35	0,35
S=2	34	0,17	0,1
S=3	27	0,08	0,38
<b>(3.16)</b>		<b>37,7</b>	<b>34,1</b>
<b>(3.18)-(3.19)</b>		<b>37,3</b>	<b>33,5</b>

У табл. 3.3 показано результати двох розрахунків за стандартною лінійною моделлю агрегації (3.16), а також за нелінійною (3.18), (3.19), при двох наборах індексів достовірностей правил  $\omega_1^{(s)}$ . На основі даних табл. 3.3 отримуємо прогнозовані оцінки показника  $Y_1^{(s)}(KЗПК)$ , подані у двох останніх рядках. Вони свідчать про чутливість до зміни характеристики достовірностей складових моделі (3.13), отже і про їх вплив на вихідні параметри Т-С управління.

У додатку Д представлені дані із оцінки *адекватності моделей* екстраполяційного прогнозування параметрів ЕД парків на основі моделі Такагі-Сугено (3.9), (3.13), сформованих за допомогою відбору множини «подібних» ЕД із бази індивідуальних моделей парку (3.1). При цьому виконується наступна загальна процедура оцінки результатів прогнозу наступних станів ЕД.

1. За даними ІМ (індивідуальної моделі) контрольованого ЕД відбирається множина «подібних»  $\{\bar{X}_{ЕДk}\}$ , використовуючи моделі (3.1), а також правила із лівими частинами вигляду (3.13), або кластери моделі Кохонена для парку ЕД.

2. На основі  $\{\bar{X}_{ЕДk}\}$  формується множина варіантів прогнозних за БЛЕ (3.2) – (3.5) значень заданого вихідного параметра, яка використовується для визначення статистичних параметрів прогнозування за БЛЕ.

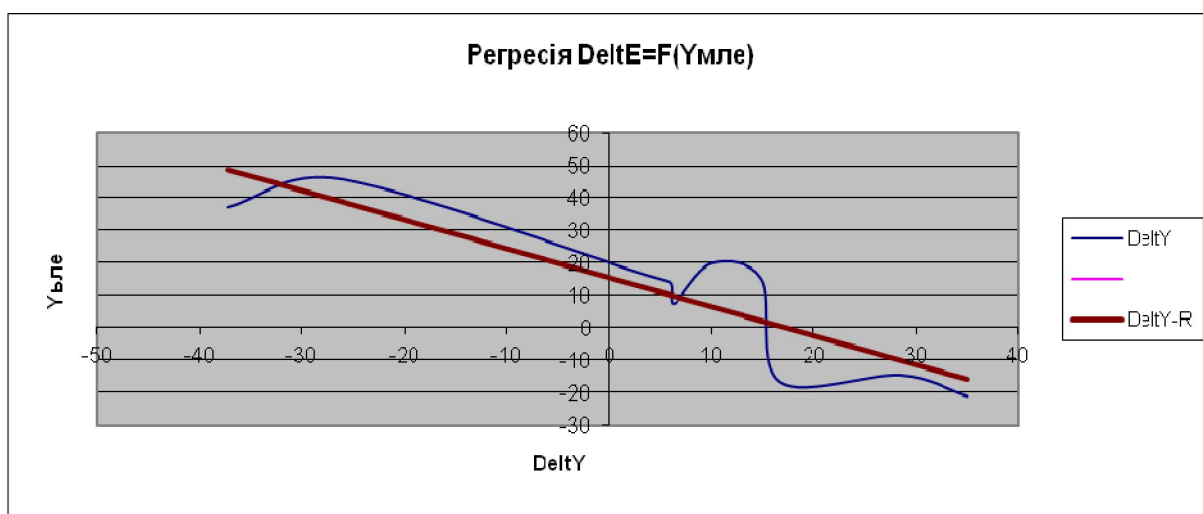


Рис. 3.10 Графіки залежності відхилень параметрів станів ЕД від прогнозів на основі моделі екстраполяції за (3.20).

3. З використанням  $\{\bar{X}_{ЕДk}\}$  формується регресійна модель (МРГ)  $\Delta Y(\bar{X}) = F(Y_{MLE}(\bar{X}))$  залежності відхилень параметрів станів ЕД від прогнозів на основі методу БЛЕ, див. рис. 3.10. Точність цієї моделі (МРГ) вважається також і точністю наступних прогнозів на основі БЛЕ з використанням набору  $\{\bar{X}_{ЕДk}\}$ .

4. Модель МРГ використовується для прогнозування станів контрольованого ЕД на основі набору  $\{\bar{X}_{ЕДk}\}$  та застосування (3.2) – (3.5).

Загальний вигляд регресійної моделі, яка використовується для розрахунків очікуваних значень для даних табл. 3.2, В.2.1 – В.2.3, В2-Е, прийнятих за прототипи для поточного стану контрольованого ЕД, представлено на рис. 3.10.

Відповідно додатку Д модель регресії має вигляд

$$\Delta Y(\bar{X}) = 15,56 - 0,9 * Y_{MLE}(\bar{X}).$$

Вона встановлює зв'язок між результатами прогнозування на основі БЛЕ (3.2) – (3.5)  $Y_{MLE}(\bar{X})$ , отриманими на основі відбору «подібних» ЕД і застосування правил (3.13), а також значеннями відповідних відхилень вихідно-

го параметру  $\Delta Y(\bar{X})$ . Такі моделі, побудовані за процедурами додатку Д, використовують для прогнозування і подальшого планування процесів експлуатації парків ЕД.

### 3.4 Нечітка модель планування розподілу електричних двигунів між ремонтними базами з урахуванням спеціалізації та кооперації.

У розділі досліджені питання щодо підвищення ефективності основних завдань експлуатації парків ЕД, планування процесів їх діагностування та ремонтів, на основі урахування спеціалізації виконавців відповідних робіт. Для забезпечення ефективності (економічної, технологічної ін.) оптимального планування таких процесів при значних обсягах парків пропонується застосування методів нечіткого математичного програмування, за допомогою яких можливо адекватно урахувати можливості отримання необхідних даних в умовах практики експлуатації парків ЕД.

Планування ремонтів (діагностування, обслуговування та ін.) об'єктів парку ЕД, з урахуванням розподілу робіт на основі спеціалізації виконавців, виконаємо за допомогою модифікованої відкритої моделі транспортної задачі про «ціле розподіл» [87] з обмеженими пропускними здатностями. Відмітна особливість пропонованої моделі полягає в тому, що в ній коефіцієнти матриці питомих вартостей заздалегідь не можуть бути точно обчислені, а представлені нечіткими величинами. Економіко-математична модель планування зазначених робіт, представлена у формі нечіткого програмування (НМП) [38, 39, 79], має наступний вигляд:

$$R(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \hat{C}_{ij} X_{ij} \rightarrow \max_{\{X_{ij}\}} \quad (3.21)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} \leq N_i, (j = \overline{1, n}) \quad \sum_{j=1}^n X_{ij} \leq \hat{d}_i^{(t)}, (i = \overline{1, m}) \quad (3.22)$$

$$X_{ij} \leq \hat{d}_{ij}, (i = \overline{1, m}); \quad X_{ij} \geq 0, (i = \overline{1, m}), (j = \overline{1, n}) \quad (3.23)$$

В (3.21) - (3.23) позначено:  $X_{ij}$  - число заявок (ЕД) типу «і», які обслуговує спеціалізована система типу «j»;  $\hat{C}_{ij}$  - матриця нечітких оцінок



питомої ефективності обслуговування;  $\hat{d}_{ij}^{(t)}$  – нечітке число заявок типу «і» в період «t». Бінарна операція «+» в моделі (3.21) - (3.23) із знаходження максимуму на заданій нечіткій області позначає додавання нечітких множин.

Рішення зазначеної задачі зводиться до вирішення низки завдань лінійного програмування, шляхом введення дискретних  $\alpha$ -рівнів для нечітких величин [40, 79]. При цьому нечіткі обмеження приймають інтервальний вигляд. Для приведення (3.21) - (3.23) до виду звичайної задачі лінійного програмування (ЛП) тепер достатньо записати нерівності окремо по лівому і правому краях інтервалів, з урахуванням знаків нерівності [80]. При цьому кількість обмежень збільшується в два рази, а отримане завдання можна вирішити симплексним методом [75, 77].

Компоненти цільової функції (3.21) являються нечіткими, тому для кожного  $\alpha$ -рівня вибирають граничні значення відповідно до правил інтервальної арифметики [89]. Якщо  $X_0$  - рішення задачі ЛП на деякій множині рівня  $\alpha$ , то число  $\alpha$  вважають його ступенем приналежності нечіткій множині рішень задачі (3.21) - (3.23).

Перебравши всілякі значення рівнів  $\alpha$ , отримують функцію приналежності нечіткого рішення задачі (3.21) - (3.23). На основі такого нечіткого представлення далі методами нечіткого управління розраховується детерміноване рішення (3.21) - (3.23) [79, 90].

Розглянемо питання щодо формування компромісної моделі кооперативної взаємодії виконавців при плануванні процесів експлуатації (ремонтів ЕД) залізничних СП, в яких беруть участь кілька обслуговуючих компаній (ОК) [66, 67, 99]. Планування виконується на основі узагальненої математичної моделі транспортної задачі (3.21) - (3.23). Головна особливість постановки завдання формування компромісної моделі кооперативної взаємодії ОК визначається наступним. Нехай планується робота для двох ОК, кожен з яких має свої виробничі ресурси. Відома матриця питомих вартостей  $\hat{C}_{ij}$  - оцінки ефективності обслуговування. Необхідно побудувати такий план розподілу ремонтів, щоб мінімізувати витрати (збільшити при-

буток) кожної обслуговуючої компанії. Зауважимо, що в класичній моделі потрібна мінімізація сумарних витрат ОК [87]. Зауважимо, що тут витрати (прибуток) деяких з ОК можуть істотно різнитися. У цьому випадку завдання планування може бути формалізоване, як багатокритеріальна модель дискретного математичного програмування з бічними платежами [41]. Бічні платежі змістовно означають можливість перерозподілу витрат поза моделі планування, після виконання робіт, що потребує додаткового узгодження між ОК.

Слід вказати, що класичну детерміновану задачу планування розподілу на основі модифікованої моделі виду (3.21) - (3.23) [87] можна розглядати як компроміс для всіх рівноправних партнерів коаліції. Для обліку нерівнозначності ОК в якості характеристик «важливості» виберемо коефіцієнти, що приймають значення в інтервалі  $[0; 1]$ , сума яких дорівнює 1. Математична модель розподільної задачі (3.21) - (3.23) у векторному вигляді, що представляє загальний випадок оптимального планування при існуванні декількох обслуговуючих компаній (виробничо-технологічних, ремонтних та ін. підрозділів), має наступний вигляд

$$R(\{\Psi_k(X)\}) = \sum_{(k)} \alpha_k \left( \sum_{i \in M(k)} \sum_{j \in N(k)} \bar{c}_{ij}^{(k)} X_{ij}^{(k)} \right) \rightarrow \max_{\{X_{ij}\}} \quad (3.24)$$

В задачі (3.24) структура системи обмежень у цілому відповідає (3.21) – (3.23), а додаткові елементи моделі означають наступне:  $\bar{c}_{ij}^{(k)}$  – оцінки питомої ефективності обслуговування та параметри управління  $X_{ij}^{(k)}$  відповідно для  $k$  – ої ОК; множини  $M(k), N(k)$  визначають число замовлень (ЕД) типу «і», які обслуговує ОК, спеціалізована система типу «j», відповідно. В (3.24) величини  $\Psi_k(X)$  та  $\alpha_k$  визначають показник ефективності та ваговий коефіцієнт ОК, одна із можливих форм якої, адитивна, наведена у правій частині рівняння (3.24).

Не лише при урахуванні умов нечіткості планування, а навіть у детермінованому випадку, при детермінованій матриці  $C_{ij}$  – питомої ефективності, модель (3.24), (3.22) – (3.23) являється новою багатокритеріальною задачею планування, яка узагальнює [77, 87], призначеною для формалізації проблеми раціональної кооперації ОК.

Вирішуючи узагальнену транспортну задачу виду (3.24), в якій витрати кожної ОК «зважені» коефіцієнтом  $\alpha_k$  (4Е), отримують деяку ефективну точку області компромісів, області Парето [101]. Розрахувавши рішення задачі виду (3.24) при різних наборах коефіцієнтів важливості ( $\{\alpha_k\}; \sum_k \alpha_k = 1$ ), будують всю компромісну (переговорну) множину, в якій далі ОК вибирають узгоджене «кооперативне» рішення.

У табл. 3.3 та на рис. 3.10 представлені результати формування області Парето, де вказані значення цільових функцій витрат (у порівнянних еквівалентах) компаній ОК (рядки ОК1, ОК2), адитивної (рядок ОК1 + ОК2) і мультиплікативної (рядок ОК1\*ОК2) компромісних моделей  $R(\Psi(X^{(*)}))$ , а також відповідні значення коефіцієнтів важливості (рядок коефіц.).

Таблиця 3.4

Компромісно оптимальні рішення планування процесів експлуатації парків ЕД на основі узагальненої розподільчої моделі транспортної задачі

ОК1	770	794	830	836	1040	1510	1734	2019	2190
ОК2	2682	2534	2390	2380	2110	1640	1495	1440	1370
ОК1+ОК2	3452	3328	3220	3216	3150	3150	3229	3459	3560
Коефіц.	1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$\alpha_k$	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ОК1*ОК2	2,065	2,011	1,98	1,989	2,194	2,476	2,592	2,907	3,00

Розрахунки показали багатоекстремальний характер такого завдання дискретної оптимізації. Так для коефіцієнтів важливості  $\alpha_k$  (0,5 і 0,5) і (0,4 і 0,6) значення адитивної згортки дорівнює  $R(\Psi(X^{(*)})) = 3150$  при істотно рі-

зних значеннях часткових цільових функціях операторів ОК1  $\Psi_1(x^*) = 1040/1510$ , ОК2  $\Psi_2(x^*) = 2120/1640$  (див. табл. 3.2),

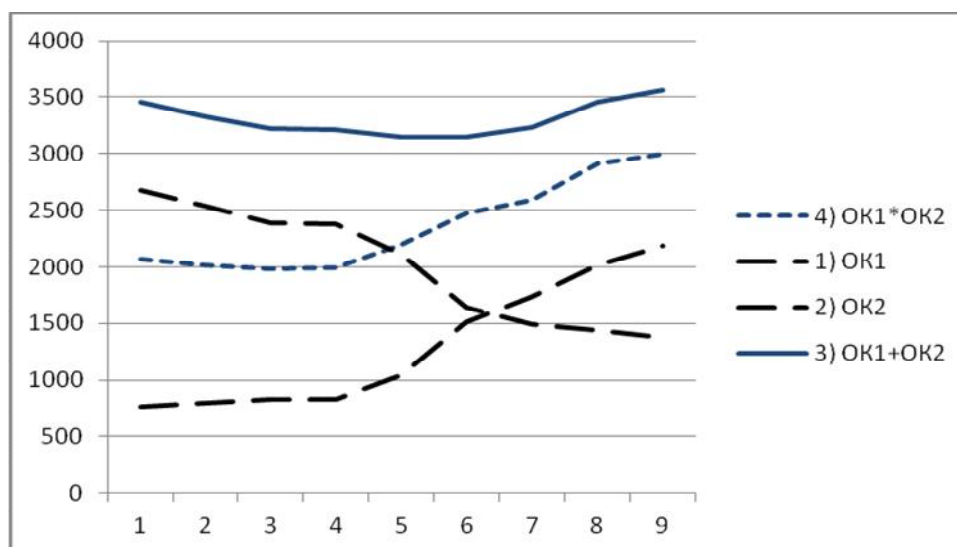


Рисунок 3.11 Графічне представлення множини компромісно-оптимальних рішень лінійної моделі кооперативного планування

як і самих векторах рішень, наборах керованих параметрів. З таблиці випливає, що області компромісів можливих значень часткових цільових функцій виконавців ОК1 і ОК2 неоднакові, причому є досить широкі можливості для вибору їх узгодженого рішення. Це показують і вектори оптимальних рішень, що характеризують плани ремонтів ОК, відповідні табл. 3.4, характеризуючи ефективність завдання організації моделей кооперативної взаємодії обслуговуючих компаній.

На рис. 3.11 показано компромісно-оптимальні рішення завдання розподілення робіт двох виконавців для моделі лінійної згортки. При цьому вагові коефіцієнти  $\alpha_k$  дорівнювали значенням табл. 3.3 (1/0, 0.8 / 0.2, 0.7 / 0.3, ....). Лінії ОК1 і ОК2 відповідають величинам обсягів робіт (витратам) окремих операторів. Лінія ОК1+ОК2 являє компроміс для різних  $\alpha_k$ . На графіку відзначається «широка» область «переговорної множини», в якій значення моделі компромісу (3.24) майже однакові.

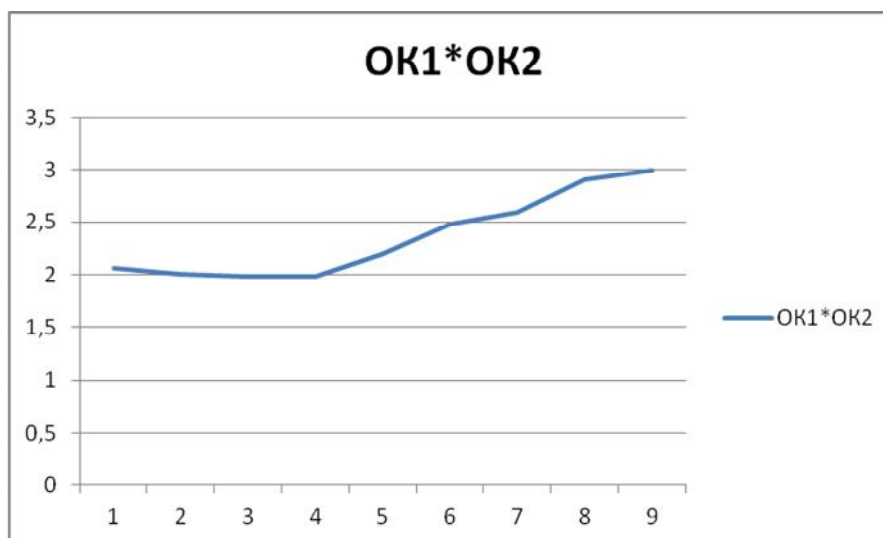


Рисунок 3.12 Множина компромісно-оптимальних рішень нелінійної моделі кооперативного планування

На рис. 3.12 показана область компромісно-оптимальних рішень нелінійної моделі кооперативного планування, представлена функцією добутку, в якій на відміну від рис. 3.12 порівнюють не абсолютні поступки показників окремих операторів, а відповідні відносні значення (поступка / рівень показника). На графіку визначається досить широка область компромісу із приблизно однаковим рівнем моделі глобального цільового показника (від 2 до 4).

### 3.5 Моделі управління процесами експлуатації парків електричних двигунів стрілочних переводів з урахуванням невизначеності та повноти даних

#### 3.5.1 Багатокритеріальна модель управління процесами експлуатації парків технічних систем при залежних ресурсах

Векторна (багатокритеріальна) модель із автоматизованого управління процесами експлуатації парків ЕД призначена для забезпечення раціонального компромісу між значеннями показників, які визначають сукупність головних вимог до ефективного керування. Наявність множини показників оптимальності рішень являється ознакою складності системи

управління парком ЕД, відображає умови невизначеності цілі завдання керування [41, 101, 102]. Для вирішення подібних завдань застосовують методологію системного підходу та системного аналізу, методів векторної оптимізації [32 – 34, 101, 102]. У більшості практичних випадків вирішення багатокритеріальних завдань управління та планування компромісу показників ефективності представляють деякою узагальненою формою цільової функції, побудованої на основі окремих, часткових показників оптимальності – скалярна модель компромісу [34, 101]. Особливість запропонованого у розділі підходу до завдань векторної оптимізації полягає у застосуванні аксіоматичного підходу до вибору моделі компромісу, структури функції згортки, в основі якого лежить урахування особливих зв'язків між всіма показниками вектору цілі – умови існування залежного ресурсу [41]. Така форма опосередкованого зв'язку притаманна не всім, а окремим групам цільових показників. У зв'язку з цим логічне обґрунтування можливості застосування узагальненого показника ефективності встановленого виду (мінімаксу) полягає у визначенні необхідної системи зв'язків між компонентами вектору цілі.

У АЕПЕД процеси управління парком ТЗ представлено як рішення задачі векторної оптимізації (ЗВО) з наступними частковими показниками: Е - експлуатаційні витрати –  $f_1(x)$ , Р - рівень надійності системи –  $f_2(x)$ , DZ - додаткові витрати при відмовах –  $f_3(x)$ . Для реалізації ЗВО використовується аксіоматичний метод скаляризації [41]. Метод полягає у виборі узагальненого мінімаксного критерію оптимальності, виду

$$\lambda^0 = \max_{x \in D} \min_{k \in N} \left\{ \lambda_k^0 = \frac{\lambda_k}{\alpha_k} = \frac{1}{\alpha_k} \frac{f_k(x) - f_k^-(x)}{f_k^+ - f_k^-} \right\} \quad (3.25)$$

який забезпечує отримання за допомогою (3/25) компромісного рішення з наступними властивостями:

- компромісне рішення єдине,
- задовольняє властивостям оптимальності по Парето [102],
- задовольняє умовам симетрії (незалежність значення від індексу показника) у вигляді

$$\lambda_p(x_c^0)\alpha_p^{-1} = \lambda_q(x_c^0)\alpha_q^{-1}, \quad \forall p, q \in N, \quad (3.26)$$

де  $f_k^-, f_k^+$  - мінімальні і максимальні оцінки при  $x \in D_x$ ,  $\alpha_k$  - коефіцієнт важливості. Виконання умов (3.26) рішення  $x_c^0$  (3.25) забезпечується властивостями взаємної суперечливості часткових показників ефективності процесів управління парком ЕД (Е, Р, DZ), що тут встановлюється логічно [41]. Існування зазначених властивостей для моделей (3.25), (3.26) служить підставою для вибору саме моделі компромісу (3.25) для управління експлуатацією парків.

Зміст векторної моделі (ЗВО) для оцінки ефективності процесів експлуатації парку ЕД пояснюється наступним. Управління процесами експлуатації парку електродвигунів, в тому числі, полягає в реалізації процедур моніторингу параметрів поточних станів ЕД, а також у вирішенні завдань по встановленню раціональної черговості проведення діагностування ЕД і їх ремонтів. В цілому ефективне управління парком ЕД може бути представлено як рішення задачі векторної оптимізації частковими показниками Е - експлуатаційні витрати (за заданий період), Р - надійність (забезпечення необхідного рівня працездатності системи), DZ - додаткові витрати на відновлення у разі відмови транспортної системи через відмови стрілочних переводів:

$$\bar{W} = (E, P, DZ) \Rightarrow \underset{x \in D_x}{opt} \quad (3.27)$$

У моделі (3.27) керовані параметри «х» вибираються з області  $D_x$ . Для реалізації багатокритеріальної моделі (3.27), розкриття змісту оператора  $opt$  (\*), використовується аксіоматичний метод скаляризації [41], згідно з яким здійснюється вибір узагальненого мінімаксного критерію оптимальності, як буде показано нижче. Слід, насамперед, вказати важливу властивість системи показників моделі (3.27) - їх взаємну суперечливість. Змістовно ця особливість полягає в тому, що поліпшення оцінок будь-якого з компонентів вектора (1) можливе лише при погіршенні інших, що враховується при формуванні скалярної моделі компромісу. Наприклад, збільшуючи експлуатаційні витрати Е, можна підвищити надійність Р і

скоротити додаткові витрати  $DZ$ . Зменшивши вимоги до надійності функціонування транспортної системи, можливо одночасно зменшити поточні експлуатаційні витрати і можливі витрати на відновлення, тому що потрібно забезпечити нижчий загальний рівень показників надійності тощо.

Для порівняльного аналізу пропонованого у роботі методу управління парком ЕД та попередніх, розглянемо це питання докладно. В роботі [52] вирішується завдання визначення черговості ремонту ЕД, яке являється частиною завдань управління парком. При цьому використаний вартісний показник відмови електродвигуна, який має вигляд:

$$C = f(R, F, Z), \quad (3.28)$$

де

$R$  - вартість ремонту електродвигуна;  $F$  - прогнозована вартість ремонту електродвигуна за індивідуальною моделлю (ІМ);  $Z$  - витрати, викликані припиненням роботи стрілочного переводу. Через складність встановлення виду функції (3.28) обирається лінійна модель, за якою узагальнена оцінка вартості відмови ЕД може бути представлена, як

$$C = \gamma_z Z + \gamma_R R + \gamma_F F, \quad (3.29)$$

де коефіцієнти важливості  $\gamma_k$  визначаються на основі методу аналізу ієрархій [102]. Формування моделі ієрархії, необхідної для обґрунтованих розрахунків значень коефіцієнтів  $\{\gamma_k\}$ , являється окремим завданням що потребує дослідження, причому така модель ієрархії не являється однозначною при різних умовах організації перевезень. Далі, для оцінки вартості ремонтів  $R$  використовується значення ймовірності несправностей, які вважаються незалежними. При цьому оцінка очікуваної вартості ремонту електродвигуна  $R$  представлена наступним чином:

$$R = \sum_{i=1}^N d_i c_i, \quad (3.30)$$

де



$d_i$  - достовірність і-ої несправності,  $d_i \in [0;1]$ ;  $c_i$  - нормативна вартість ремонту і-ої несправності;  $N$  - число несправностей, виявлених системою діагностики електродвигунів.

У АСУЕД [52, 99, 100] крім нормативних значень  $d_i$  використовуються їх оцінки, одержувані за ІМ. Для виявлення несправностей в електродвигунах за спектрами струмів використовуються штучні нейронні мережі [95, 93]. При цьому значення достовірності і-ої несправності  $d_i$  визначається значенням нейрона вихідного шару багатошарового перцептрона. Прогнозована вартість ремонту електродвигуна  $F$  обчислюється, як

$$F = \sum_{i=1}^N d_i^F c_i, \quad (3.31)$$

де

$d_i^F$  - прогнозоване значення достовірності і-ої несправності,  $d_i^F \in [0;1]$ . Система діагностики здійснює постійний (за регламентом) контроль технічного стану ЕД. Розрахунки показників  $d_i^F$  використовують результати моніторингу технічного стану конкретного двигуна, для чого використовуються дані часових рядів оцінок достовірності для кожної і-ої несправності  $d_i$  :

$$D_i = \{d_i^1, d_i^2, \dots, d_i^k, d_i^{k+1}, \dots, d_i^L\}, (i = \overline{1, N}). \quad (3.32)$$

При формуванні оцінок достовірності вважається, що з часом наступне значення  $d_i^{k+1}$  достовірності виникнення і-ої несправності часового ряду (3.32) не менше попереднього  $d_i^k$ :  $d_i^k \leq d_i^{k+1}$ ,  $(i = \overline{1, N})$ . Для обчислення оцінок  $F$  (3.31) необхідно прогнозувати значення на основі даних часового ряду (6), відповідного і-тій несправності в індивідуальній моделі ЕД. Для розрахунку оцінок значень  $d_i^F$  використовуються методи прогнозування часових рядів [Ск-Клим-Ос], або метод багатовимірної лінійної екстраполяції [9], представлений у розд. 3.1.3.

У роботі запропоновано розвиток процедури прогнозування на основі (3.32), сутність якої полягає у використанні для прогнозування оцінок  $d_i^{k+1}$  достовірності виникнення  $i$ -ої несправності не лише власних даних контрольованого ЕД, а також множини «подібних» ЕД в усьому контрольованому парку. Тобто для визначення  $d_i^{k+1}$  використовується наступна множина характеристик процесів моніторингу станів ЕД

$$\{D_i^{(r)} = \{d_i^{1,r}, d_i^{2,r}, \dots, d_i^{k,r}, d_i^{k+1,r}, \dots, d_i^{L,r}\} \mid i = \overline{1, N}\}, r \in G_i. \quad (3.33)$$

В (3.33) через  $G_i$  позначено множину двигунів, які виділені як подібні до контрольованого  $i$ -ого ЕД за своїми типом і станами (3.32). Розширення множини вихідних даних дозволяє підвищити точність оцінки достовірності виникнення несправностей.

Оцінки витрат  $Z$ , викликаних відмовою ЕД та припиненням роботи стрілочного переводу, при спрощеному аналізі параметрів пропускнуої спроможності поїздоділянки можуть бути визначені на основі середніх нормованих показників згідно

$$Z = N_p T_v C_z P_z, \quad (3.34)$$

де

$N_p$  - середнє число поїздів, що проходять через стрілочний перевід за годину;  $T_v$  - час, необхідний для відновлення роботи стрілочного переводу;  $C_z$  - вартість затримки одного поїзда на одну годину;  $P_z$  - ймовірність відмови стрілочного переводу. Без урахування взаємних впливів різних типів несправностей ЕД ймовірність  $P_z$  оцінюється як  $P_z = \max_i(d_i)$ . Як показано у попередніх розділах дисертації, для визначення оцінок витрат необхідно враховувати досить значний набір показників, що зроблено у розд. 3.2.1.

Крім знаходження рішення з аксіоматичними властивостями, також принцип оптимальності (6) – (7): - визначає повноту множини критеріїв

$\bar{W}_N$ ; - дозволяє зіставити оцінки додаткових витрат і найменших приращеннях ефективності (при рівноцінності  $W_j$ ); - дозволяє отримати оцінки коефіцієнтів важливості часткових критеріїв  $W_j$  на основі відомих аналогів (прототипів) [72, 99]. Указані властивості інтегрованих показників ( $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$ ) дають підстави для застосування моделі компромісу (3.32) – (3.33) в завданнях управління експлуатацією парку ЕД.

### 3.5.2 Двохетапна модель управління процесами експлуатації з урахуванням умов ризику

Окремим завданням щодо забезпечення стійкості залізничних перевезень являється урахування можливих (ймовірних) збоїв у реалізації графіку руху при плануванні процесів експлуатації ТС. Для цього сформуємо двохетапну модель із оптимального планування черговості ремонтів (діагностування) стрілочних переводів та їх ЕД, що відповідають кожній поїзоділянці. Змістовно формування моделі полягає у наступному. Визначається апріорна інформація планування –  $Sh_k(V_k, H_k, P_k)$  як сценарії відмов  $V_k$  у вигляді різних можливих послідовностей «збоїв» СП на ділянках. Для виконання оптимального планування оцінюють значення характерних параметрів умов невизначеності  $\theta$ , також оцінюються додаткові витрати на компенсацію збурень  $H_k$  та їх ймовірності  $P_k$ . Планування процесів експлуатації парків ЕД при урахуванні ймовірностей умов, які можуть реалізуватися, представляє планування в умовах ризику [76, 77]. На основі даних індивідуальних моделей ІМ процесів експлуатації ЕД, а також характеристик важливості поїзоділянок, розд. 3.1.3, задаються (генеруються) вектори  $X_{kj}$  послідовностей обслуговування парку ЕД, серед яких визначається оптимальний  $X_{kj^*}$  шляхом застосування двохетапної моделі планування [67, 75, 81].

Розглядаємо планування як вибір  $X_{kj^*}$  з урахуванням стохастичних факторів  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s)$  – множини випадкових станів системи експлуатації, що характеризує сценарій можливої реалізації відмови СП

$Sh_k(V_k, H_k, P_k)$ , умови щодо реалізації плану обслуговування ЕД  $X^{(t)}$ , для яких відомі (встановлюються експертним шляхом) ймовірності  $\{p(\theta_i)\}_s$ . Щоб зв'язати показники надійності технічних засобів при експлуатації парку ЕД із характеристиками стійкості перевезень, будемо визначати стани  $\theta$  «збоїв» як діапазони  $[d_i^1, d_i^2]$  значень можливих відхилень графіка руху (затримок прибуття/відправлення поїздів)

$$\theta_i = \langle [d_i^1, d_i^2], h_i(\theta_i), p(\theta_i) \rangle; \quad \sum_i p(\theta_i) = 1, \quad (3.35)$$

де

$h_i(\theta_i)$  – питомі оцінки додаткових витрат на корегування графіку перевезень в умовах  $\theta_i$ , а значить і визначення груп ЕД, надійне функціонування яких впливає на можливості реалізації перевезень. Визначення  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s)$  (3.35), опис набору випадкових параметрів моделі, а також виду функцій додаткових витрат, формалізує варіанти постановок двохетапних завдань із планування процесів обслуговування парків ЕД. Модель двохетапної задачі планування  $X_{kj}$  представимо у вигляді

$$\{\Psi(X) = B(X) + M[f_h(X, Y(X, \theta), \theta)]\} \Rightarrow \min_{X \in G_X}. \quad (3.36)$$

В (3.36) позначено: детермінована функція  $B(X)$  – вартісна оцінка вектора послідовностей ремонтів ЕД  $X_{kj}$  при виконанні графіка руху,  $f_h(*)$  – функція додаткових витрат на коректування та реалізацію графіка в умовах  $\theta$ ,  $Y(X^{(t)}, \theta)$ ,  $M[*]$  – знак математичного сподівання,  $G_X$  – область допустимих значень параметрів планів на етапі планування  $t$ ,  $X^{(t)}$ . При реалізації (3.36) методами стохастичного програмування [75] для деякого  $X' \in G_X$  і для кожного  $\theta_i \in \theta$  розраховують та узагальнюють по  $p(\theta_i)$  значення  $f_h(X', Y', \theta_i)$ , які разом із  $B(X')$  дають оцінку  $X': \Psi(X')$ , яка вимірює якість  $X' \in G_X$  у рамках двохетапного планування (3.36). Відповідно (3.36) оптимальний  $X_{kj}^*$  забезпечує мінімум суми витрат на обслуговування пар-

ку ЕД при виконанні графіка руху і очікуваних додаткових витрат за умов виникнення відмов процесу залізничних перевезень.

Запропонована модель (3.35) – (3.36) планування процесів обслуговування парків ЕД (зокрема визначення послідовностей проведення діагностування, ремонтів ін.) передбачає використання попередніх даних у вигляді (3.35), формально – статистичної природи [67]. У разі відсутності достовірних статистичних даних замість ймовірнісних моделей щодо варіантів відмови процесів залізничних перевезень на деякій мережі, можливо застосовувати нечіткі аналоги [80, 81], що базуються на формуванні нечіткого опису інформації про можливості відмов у перевізному процесі, з подальшим застосуванням методів нечіткого управління.

### 3.5.3 Нечіткий двохетапний метод управління процесами експлуатації парків технічних систем

Встановити ймовірності можливих варіантів відмов інфраструктури, а також і відповідних сценаріїв реалізації процесів перевезень при відмовах, на практиці не вдається. Разом з тим можливо встановити експертні оцінки розвитку відповідних процесів, які в наших умовах можуть бути представлені нечіткими величинами [39, 40, 78]. При цьому, в умовах визначення факторів збурень у вигляді нечітких величин, технологіко-економічне управління процесами експлуатації парків електричних двигунів може бути реалізоване на основі нечіткої двохетапної моделі планування.

В рамках технологіко-економічного управління процесами експлуатації парків ЕД необхідно ураховувати різні типи умов невизначеності (значень параметрів технічних систем, станів перевезень, можливих очікуваних схем виникнення і змін «збоїв» ін.). Виконаємо формалізацію завдання із планування на основі нечіткої двохетапної моделі оптимального планування (НДМОП), яка модифікує процедури розд. 3.5.2 і полягає у наступному. Визначається апріорна інформація за шаблонами планування –  $Sh_k(V_k, H_k, \mu_k)$  як альтернативними варіантами сценаріїв відмов  $V_k$  у вигляді різних можливих послідовностей «збоїв» на залізничних ділянках. «Збої» (можливі відхилення графіку руху, ін.) описують відповідними зна-

ченнями характерних параметрів умов нечіткості  $\mu$ , а також як і раніше оцінюють додаткові витрати на компенсацію збурень (як детермінованих  $H_k$  або нечітких  $\vec{H}_k$  функцій) і нечіткими показниками можливостей їх виникнення  $\mu_k$ . Вважаються відомими функції (детерміновані  $F(X)$  або нечіткі  $\vec{F}(X)$ ) з оцінки економічної ефективності планів  $X(Sh_k(V_k, H_k, \mu_k))$  обслуговування парків ЕД –  $\vec{F}(X)$ . Необхідно згенерувати вектори  $X(X_{kj})$  послідовностей обслуговування парку ЕД, серед яких визначити оптимальний  $X^*(X_{kj^*})$  шляхом застосування НДМОП. Модель НДМОП являє собою нечітке представлення інформації про можливості відмов у перевізному процесі, з подальшим застосуванням методів нечіткого управління.

Представимо планування  $X^*(X_{kj^*})$  як пошук і вибір  $X_{kj^*}$  з урахуванням вектора нечітких факторів  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_s)$  реалізації недетермінованих станів системи експлуатації, що характеризує  $Sh_k(V_k, H_k, \mu_k)$ , умови реалізації плану обслуговування ЕД  $X^{(t)}$ , для яких відомі нечіткі величини  $\{\mu(\mu_i)\}_s$ . Для конкретності будемо визначати стани  $\mu_i$  як детерміновані  $[d_i^1, d_i^2]$  або нечіткі  $[\hat{d}_i^1, \hat{d}_i^2]$  діапазони значень можливих відхилень графіка руху (затримок прибуття/відправлення поїздів), що виникають через «відмови» СП:

$$\mu_i = \langle [\mu_i^1, \mu_i^2], h_i(\mu_i), \mu(\mu_i) \rangle; \quad \mu_i = \langle [\hat{\mu}_i^1, \hat{\mu}_i^2], \hat{h}_i(\mu_i), \mu(\mu_i) \rangle, \quad (3.37)$$

де

$h_i(\mu_i)$ ,  $\hat{h}_i(\mu_i)$  – питомі оцінки (детерміновані або нечіткі) додаткових витрат на корегування графіку перевезень в умовах  $\mu_i$ . Представимо НДМОП планування векторів  $X(X_{kj})$  у вигляді

$$\{\Phi(X) = \hat{B}(X) + \hat{E}[\hat{f}(X, Y(X, \mu), \mu)]\} \Rightarrow \min_{X \in G_X} \quad (3.38)$$

В (3.38) позначено: детермінована  $B(X)$  або нечітка функція  $\widehat{B}(X)$  – вартісна оцінка вектора послідовностей ремонтів ЕД  $X_{kj}$  при виконанні графіка руху,  $\widehat{f}_h(*)$  – функція додаткових витрат на коректування графіка в умовах  $\mu$ ,  $Y(X^{(t)}, \mu)$ ,  $\widehat{E}[*]$  – знак операції *нечіткого висновку* відповідно величин  $\widehat{f}_h(*)$ ,  $G_X$  – область допустимих значень параметрів рішень на етапі планування  $t$ ,  $X^{(t)}$ . При реалізації (3.38) методами нечіткого висновку [37, 105] для деякого  $X' \in G_X$  розраховують та узагальнюють по  $\mu(\mu_i)$  значення  $\widehat{f}_h(X', Y', \mu_i)$ , які разом із  $\widehat{B}(X')$  дають оцінку  $X' : \Phi(X')$ , яка вимірює якість  $X' \in G_X$  відповідно (3.38). Оптимальний за (3.38) варіант плану експлуатації парку ЕД (послідовності діагностування з метою визначення несправностей ЕД, ремонти тощо)  $X(X_{kj*})$  забезпечує мінімум суми витрат на обслуговування парку ЕД при виконанні графіка руху і очікуваних додаткових витрат за умов виникнення відмов вигляду (3.37) процесу залізничних перевезень. Для реалізації завдань планування відповідно (3.38) застосовуються процедури арифметики нечітких трикутних чисел [79, 80]. Стисло розглянемо сутність і результати цих процедур.

Для реалізації (3.38) використовують процедури арифметики нечітких трикутних чисел [80]. Вважають що всі нечіткі величини (3.37), (3.38), тобто  $\widehat{B}(X)$ ,  $\widehat{f}_h(*)$ ,  $\mu(\mu_i)$ , мають форму векторів з 3-х значень  $(\alpha_w, \alpha_w, \beta_w)$ , є відповідно центрами, лівими і правими коефіцієнтами нечіткості. В рамках арифметики нечітких трикутних чисел розрахунок оцінок  $\Phi(X)$  схематично можна представити у наступному вигляді, що встановлює послідовності виконання процедур:

$$X \rightarrow \{\widehat{f}_k(X)\},$$

$$\widehat{B}(X) \rightarrow \{f_k^n(X) = \widehat{f}_k(X) \otimes \mu(\mu_k)\} \rightarrow \Phi(X) = \widehat{B}(X) \oplus \widehat{E}[f_k^n(X)] \quad (3.39)$$

Ця послідовність етапів дає узагальнений алгоритм розрахунку оцінок нечіткого управління. У ній знаки  $\{\otimes, \oplus\}$  представляють відповідно операції добутку і суми в рамках названої арифметики. Отримані при

цьому значення  $\Phi(X)$  далі використовують у процедурах НДМОП для знаходження  $X^*(X_{kj}^*)$  в умовах нечіткої невизначеності процедур планування.

Розглянемо питання щодо порівняльного аналізу двохетапних стохастичних (3.35) – (3.36) і нечітких (3.37) – (3.38) моделей оптимального планування недетермінованих процесів експлуатації парків електродвигунів СП. Для спрощення викладу, враховуючи наведені у розд. 3.5.2, розд. 3.5.3 загальні постановки завдань управління експлуатацією парку, як вибору оптимальних варіантів послідовностей ремонтів ЕД (діагностування, іншого обслуговування), виконаємо лише порівняння результатів планування з використанням стохастичної (3.35), (3.36) та нечіткої (3.37) – (3.38) двохетапних моделей. Основні параметри стохастичної (умови ризику при плануванні) моделі (3.35), (3.36) зведено у табл. 3.5. Вона містить наступне: порівнюються два вектори упорядкування обслуговування  $X$ . Для них шляхом попередніх розрахунків визначено основні витрати  $V(X)$  (у відносних величинах), ймовірності можливих відмов  $\{P1, P2, P3\}$  і відповідні додаткові витрати  $\{f1(X), f2(X), f3(X)\}$ , які також задані у відносних порівнюваних величинах. Змістовно додаткові витрати відповідають таким затримкам руху поїздів у годинах  $\{0.5, 1.0, 1.5\}$ . При цьому отримано наступні оцінки показника ефективності моделі (3.36):  $Y1 = 16.8$ ;  $Y2 = 16.3$ . Тобто перевагу має упорядкування 2. Для  $V(X1) = 10$ ,  $V(X2) = 8.8$  отримано  $Y1 = 11.8$ ;  $Y2 = 11.1$  відповідно.

Таблиця 3.5

Параметри стохастичної моделі

X	V	P1/f1	P2/ f2	P3/ f3
1	15	0,5 / 1	0.2 / 3	0.1 / 7
2	14	0,4 / 1.2	0.25/ 2.8	0.15 / 7.5

Розрахунки по нечіткій моделі (3.37) – (3.38), сформованій за допомогою трикутних чисел [8], для зручності порівнянь також виконаємо на основі табл. 3.5, але при заміні значень параметрів їх нечіткими трикутними аналогами. По перше, замість детермінованих ймовірностей  $\{P1, P2, P3\}$ , значення яких практично встановити складно, використаємо їх нечіт-



кі трикутні моделі, а саме:  $(0.4; 0.1; 0.15)$ ,  $(0.25; 0.05; 0.15)$ ,  $(0.15; 0.05; 0.05)$ . При цьому отримано наступні трикутні значення  $Y_2 = (16.30; 0.63; 0.98)$ . рис.3.13.

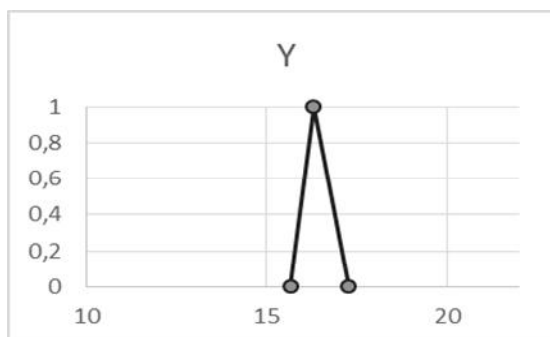


Рисунок 3.13. Нечітка трикутна величина значення результатів планування  $Y$ , модель (3.37)

У разі представлення даних  $X_2$  табл. 3.5 нечіткими трикутними величинами, відповідно  $(14; 3; 3)$ ,  $(0.4; 0.1; 0.15)$ ,  $(0.25; 0.1; 0.15)$ ,  $(0.15; 0.05; 0.05)$ ,  $(1.2; 0.2; 0.2)$ ,  $(2.8; 0.3; 0.2)$ ,  $(7.5; 0.5; 1.0)$ , отримаємо вихідну величину (3.39)  $Y_2 = (16.30; 3.8; 4.37)$ , рис. 3.13. Тобто для вхідних нечітких функцій отримано суттєві збільшення коефіцієнтів нечіткості трикутних величин  $Y$ , рис. 3.14. Нечітка двохетапна модель планування на основі трикутних чисел (3.37) – (3.38) дозволяє отримати результати, які також подані трикутними числами, причому їх центри дорівнюють значенням стохастичній моделі (3.35), (3.37), а ліві і праві коефіцієнти невизначеності результату залежать від відповідних параметрів операндів операцій  $\{\otimes, \oplus\}$  у (3.37), (3.38).

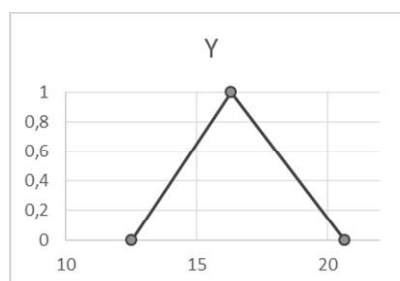


Рисунок 3.14. Нечітке значення моделі (3.37) результатів планування  $Y$  при нечітких функціях оцінок витрат

Такі нечіткі представлення результату, рис. 3.13, рис. 3.14, по перше, можуть бути використані в подальшому для процедур нечіткого управлін-

ня, представлених нижче, по друге, на їх основі шляхом встановлення  $\alpha$ -рівнів (наприклад, 0.8; 0.9) визначають діапазони очікуваних оцінок критерію. Порівняння інтервалів для  $\alpha$ -рівнів рис. 3.13 – рис. 3.14 (0.8) показує їх збільшення. Саме інтервальна, а не точкова оцінка результуючого показника при цьому є «платою» за нечітку форму подання факторів невизначеності. Разом з цим різним діапазонам можливих значень вихідного показника  $Y$  рис. 3.12 відповідають різні  $\alpha$ -рівні. Для остаточного визначення цього параметра необхідно використовувати процедури «скаляризації» методів нечіткого управління, наприклад, центр ваги ін. [39, 79]. На основі порівняння цих узагальнених, «скалярних», оцінок вихідних параметрів реалізують процедуру оптимального вибору варіантів управління (черговості обслуговування ЕД).

### Висновки по розділу 3

У розділі удосконалено формалізовані засоби автоматизації та інтелектуального управління процесами експлуатації парку ЕД залізничних стрілочних переводів по параметрах поточного стану в умовах невизначеності різних категорій (багатокритеріальності, нечіткості, стохастичності ін.). Виконано формування структури і процедур індивідуальних інтелектуальних моделей процесів експлуатації електричних двигунів; удосконалені моделі і методи для автоматизації розрахунку черговості діагностування, обслуговування та ремонту парку ЕД з урахуванням невизначеності станів інфраструктури, а також багатокритеріального управління процесами експлуатації парків ЕД на основі методів експертних систем, з урахуванням невизначеності та повноти вихідних даних.

Розроблено моделі векторної оптимізації процесів управління, нечіткі двохетапні моделі планування черговості діагностики і ремонту електродвигунів, нечіткі моделі розподілу робіт з урахуванням спеціалізації виробництв. Управління експлуатацією парку ведеться на основі їх індивідуальних моделей, а також мереж Кохонена, побудованих по спектральних характеристиках струмів електродвигунів. Вони дозволяють перейти до

автоматизованого технічного обслуговування парку по параметрам поточного технічного стану ЕД.

1. Для забезпечення комплексної оцінки якості управління експлуатацією парків ЕД застосовується метод векторної оптимізації. При цьому частковими компонентами являються експлуатаційні витрати, надійність системи (ризик відмови), додаткові витрати на відновлення функціонування системи, показано взаємно компромісний характер відношень між цими величинами, що дозволяє застосувати аксіоматичні методи векторної оптимізації.

2. Запропоновано удосконалені моделі управління процесами експлуатації парків ЕД, які ураховують різну відповідальність окремих залізничних ділянок і систем що їх обслуговують. Для визначення важливості окремих ТС з урахуванням відповідальності та напруженості перевезень на окремих ділянках залізниць застосовуються моделі методу аналізу ієрархій, нечіткого кластерного аналізу, процедури реалізації сценарного підходу.

3. Отримало розвиток модифіковане управління Такагі-Сугено на основі індексів достовірності, що ураховує нелінійну модель агрегування результатів окремих правил і процедури екстраполяції на основі подібних екземплярів варіантів системи управління.

4. З метою підвищення ефективності управління експлуатацією парків ЕД вдосконалені технологічно-економічні моделі управління при неповній вихідній інформації, призначені для експлуатації парків ЕД залізничних стрілочних переводів. Розроблено нові нечіткі моделі і методи планування експлуатаційних процесів, які в цілому дозволяють перейти від планово-попереджувального методу експлуатації до обслуговування ЕД по «поточному стану».

5. В системі АЕПЕД створено засоби для планування обслуговування (ремонтів, діагностування ін.) об'єктів парку ЕД з урахуванням розподілу робіт на основі спеціалізації виконавців, що виконується засобами модифікованої відкритої моделі транспортної задачі про «цілерозподіл» з об-

меженими пропускними здатностями, в якій коефіцієнти матриці питомих вартостей представлено нечіткими величинами. Вперше сформована компромісна модель кооперативної взаємодії виконавців при плануванні процесів експлуатації парку ЕД. Їх застосування у значній мірі відповідає можливостям практики щодо формування моделей процедур планування.

6. Для урахування різних можливих варіантів реалізації процесів за умов невизначеності застосовуються двохетапні моделі оптимального планування, які ураховують умови ризику і нечіткості даних, базується на формалізмі нечітких трикутних чисел та ймовірнісних моделях. Виконано порівняльний аналіз результатів застосування зазначених двохетапних моделей управління.

7. Розроблені моделі, методи і засоби автоматизації АЕПЕД дають можливість її застосування для експлуатації парків інших технічних систем залізничного транспорту.

Результати розділу опубліковані у наступних роботах [65, 67, 69, 72, 73, 81, 92, 99, 100].

## РОЗДІЛ 4

### ОБГРУНТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ

У розділі розглядаються питання щодо техніко-економічної оцінки ефективності розробки системи автоматизації управління експлуатацією парків електродвигунів залізничних стрілочних переводів. Система АЕПЕД забезпечує підвищення ефективності процесів експлуатації, а також вирішення наступних нових завдань: дистанційна діагностика ЕД без виключення з процесів експлуатації; вимірювання характеристик двигуна, що знаходиться під впливом номінальних, робочих навантажень; планування черговості діагностування і ремонтів ЕД на основі параметрів поточного стану; розподіл робіт з урахуванням спеціалізації виконавців, а також кооперації; облік невизначеності умов при формуванні нечітких моделей процесів планування і управління. Зазначені властивості автоматизованого процесу експлуатації парку ЕД дозволяють виділити наступні складові оцінки економічної ефективності: скорочення числа оглядів ЕД і процедур діагностування, скорочення (упорядкування) обслуговуючого персоналу, простота експлуатації системи; зменшення вартості ремонтів парку ЕД за рахунок спеціалізації та кооперації; зменшення величини можливих додаткових витрат при збоях процесу перевезень; підвищення технічної надійності інфраструктури, стрілочних переводів, і стійкості залізничних перевезень.

Фактично усі запропоновані у дисертації удосконалення методів і засобів автоматизованої експлуатації парків ЕД спрямовані на підвищення ефективності відповідних процесів (технологічних, організаційних, економічних ін.), забезпечують зменшення експлуатаційних витрат. В цілому виконані дослідження і розробки дозволяють перейти від планово-

попереджувального методу експлуатації до автоматизованого обслуговування парку по фактичному технічному стану ЕД.

#### 4.1 Розробка методики і оцінка техніко-економічної та інвестиційної ефективності автоматизованої експлуатації парків електродвигунів.

При визначенні ефективності автоматизованої експлуатації парків стрілочних ЕД необхідно урахувати декілька складових: технічну, технологічну, економічну, організаційну, ефективність супроводу системи, можливості подальшого розвитку і застосування сучасних інформаційно-комунікаційних технологій та взаємодії з іншими автоматизованими системами залізниць ін. Методики із визначення та розрахунку деяких із наведених складових досить складні, недостатньо вивчені, потребують окремого нормування.

У першу чергу розглянемо методику оцінки складових економічної ефективності запровадження АЕПЕД. Електричні машини являються дорогим обладнанням при закупівлі, експлуатації та ремонті. При відмовах тягових двигунів і двигунів СП може відбутися збій у русі потягів, не забезпечується безпека руху поїздів, залізниці несуть прямі і непрямі збитки. Відмови стрілочних ЕД при експлуатації поділяються на дві категорії – системні або технологічні, непередбачувані або спонтанні [11, 14, 24, 52]. Системні відмови, у більшості випадків, пов'язані з порушенням процедур при ремонті та експлуатації ЕД, з внутрішніми дефектами окремих комплектуючих, вичерпанням ресурсу тощо. У загальній кількості на долю таких відмов приходить приблизно 90% випадків. Системні відмови завжди розвиваються поступово, "зріють" на протязі 3 – 4 місяців, часто цього часу достатньо для їх виявлення та локалізації. Виявлення, облік та урахування цих процесів складають основу автоматизованого управління експлуатацією парків ЕД.

Спонтанні відмови, на відміну від системних, розвиваються майже «миттєво», причини їх виникнення в основному залежать від людського

фактору. Ці категорії відмов часто дозволяють виявити лише комплексний комп'ютерний аналіз і неперервний моніторинг поточного стану ЕД.

Оцінимо складову економічної ефективності, яка досягається за рахунок зниження кількості відмов стрілочних електродвигунів. На основі раціонального планування моніторингу та діагностики ЕД забезпечуються можливості раннього визначення моментів початку формування місць деяких типів пошкоджень, не допускаючи відмови двигунів. За рахунок цього можливе відновлення двигунів з меншими витратами на ремонт (поточний, середній). Також при цьому забезпечується підвищення безпеки руху та виключення затримок поїздів.

На Південно-Західній залізниці кількість електричних двигунів – значна (понад 6800), вартість одного стрілочного електродвигуна з ПДВ становить близько 2900 грн. Враховуючи, що вартість капітального ремонту електродвигуна становить 2500 грн., вартість поточного ремонту приблизно 180 грн, вартість середнього ремонту 400 грн, при цьому середня вартість ремонту ЕД становить близько 1400 грн.

Оцінимо економію грошових коштів, які можуть бути витрачені на ремонт (при ранньому виявленні відмови ЕД), слідуючи результатам [50, 63]. Розрахункова і практична (на основі даних експлуатації) надійність стрілочних двигунів близька до 90 - 95%. За квартал, використовуючи даний метод [29], виявляється в середньому 4% несправних двигунів. Для проведення оціночних розрахунків можна прийняти, що за рік будуть виявлені приблизно 12 несправних ЕД на кожні 100 встановлених. За рік для парку з  $N_{park}$  електродвигунів оціночна очікувана кількість  $N_{find}$  заздалегідь виявлених несправних двигунів складе:  $N_{find} = 0.12 * N_{park}$ . З них (за результатами практики експлуатації ЕД) до 15% можуть вийти з ладу повністю:  $N_{out} = 0.15 * N_{find}$ . Вони підлягають списанню або капітальному ремонту.

Визначається кількість двигунів, які можливо відновити поточним і середнім ремонтом  $N_{pem} : N_{pem} = N_{find} - N_{out} = 0.85 * N_{find}$ .

Якщо не виявити несправні двигуни на ранній стадії, то всі вони повністю вийдуть з ладу, і підлягатимуть капітальному ремонту або списанню. При цьому при вартості ЕД (а також капітального ремонту)  $C_{ED}$  сума можливих фінансових втрат складе  $S_{find} = N_{find} * C_{ED}$  грн.

При автоматизованій експлуатації парку ЕД, проведенні моніторингу та діагностики, очікувані повні втрати дорівнюють  $S_{out} = N_{out} * C_{ED}$  грн.

Для одного двигуна оціночні грошові витрати при середньому та поточному ремонтах становлять  $CP_{ED}$  грн. Тоді оцінка річної фінансової ефективності автоматизованої експлуатації парку ЕД дорівнює

$$SUM_{ED} = (N_{find} - N_{out}) * (C_{ED} - CP_{ED}) \text{ грн.}$$

Таблиця 4.1

Фінансова ефективність автоматизованої експлуатації парку при 6000 ЕД

$N_{park} =$	6000	$N_{find} =$	720	$S_{find} =$	1800000
$C_{ED} =$	2500	$N_{out} =$	108	$S_{out} =$	270000
$CP_{ED} =$	400	$N_{pem} =$	612	$SUM_{ED} =$	1285200

В табл. 4.1, табл. 4.2 наведено приклади розрахунків оцінок показників фінансової ефективності системи АЕПЕД, виконаних на основі наведеної вище методики з використанням даних про парки стрілочних двигунів постійного струму Південно-Західної залізниці. При цьому в табл. 4.1 ураховане загальне число двигунів парку – 6000, а в табл. 4.2 указані лише ті ЕД, які необхідно замінити відповідно інструкції ЦШ 0060 [45].



Таблиця 4.2

Фінансова ефективність автоматизованої експлуатації парку при 1200 ЕД

$N_{park} =$	1200	$N_{find} =$	144	$S_{find} =$	360000
$C_{ED} =$	2500	$N_{out} =$	21,6	$S_{out} =$	54000
$CP_{ED} =$	400	$N_{rem} =$	122,4	$SUM_{ED} =$	257000

Остання таблиця приведена для демонстрації ефекту, який виникає через контрольовану заміну тих ЕД, які дійсно виробили свій ресурс, що встановлюється шляхом аналізу індивідуальних моделей експлуатації конкретних ЕД, а не вилучаються лише на основі процедур планово-попережувального методу. Очікувана щорічна величина лише цієї «ремонтної» складової ефективності, утвореної за рахунок заміни капітальних ремонтів середніми, має бути в діапазоні від 257000 грн до 1285200 грн.

До оцінок «ремонтної» складової фінансового ефекту необхідно додати витрати на заробітну плату персоналу при замінах ЕД, їх провірках відповідно графікових робіт за інструкції ЦШ 0060, що для Південно-Західної залізниці становить приблизно 32000 грн. Наведена оцінка витрат досить наближена через те, що начальником служби сигналізації та зв'язку може бути збільшена інтенсивність перевірки справності електродвигунів на стрілках, задіяних у маршрутах приймання та відправлення поїздів – до одного разу на квартал. Дата позачергового огляду пристроїв СЦБ встановлюється по факту, залежно від конкретних *транспортних пригод*.

Також щороку в Ремонтно-технологічних дільницях дистанцій сигналізації та зв'язку залізниці виконується ремонт стрілочних електродвигунів на суму приблизно 250 000 грн. Загальні витрати залізниці на ці потреби – 282000 грн.

Таким чином, загальний обсяг фінансового обслуговування ремонтно-відновлювальної складової парку стрілочних ЕД Південно-Західної залізни-

ці складає понад 1.5 млн грн. Зазначених витрат можливо уникнути, або суттєво зменшити в залежності від ступеня автоматизації процесів експлуатації парку ЕД на основі системи АЕПЕД.

Маючи орієнтовну вартість створення і супроводу апаратно-програмного комплексу АЕПЕД, визначають термін окупності проекту

$$T_{OK} = S_{AEPEE} / \text{SUM}_{ED} \text{ (рік)}.$$

На основі наведених у роботі статистичних даних Південно-Західної залізниці про відмови ЕД та вартості ремонтів, які відповідають зазначеній методиці оцінки ефективності, отримана оцінка окупності АЕПЕД менше ніж 1 рік.

Наведені розрахунки визначають лише одну складову загальної оцінки ефективності створення засобів АЕПЕД автоматизації процесів експлуатації парків ЕД. Розглянемо методики оцінки інших компонентів, зазначених у розділі раніше. Для оцінки технолого-економічної складової ефективності необхідно урахувати вплив рівня безпеки перевезень, в частині можливих відмов стрілочних переводів, на показники пропускної спроможності поїздоділянок і всієї залізничної транспортної системи. В певній мірі це питання вирішено у розд. 3.2., в якому сформована багатокритеріальна ієрархічна модель із визначення пріоритетів обслуговування електричних двигунів парків з урахуванням неоднорідності об'єктів інфраструктури. В результаті застосування цієї моделі, як складової процедури методики оцінки ефективності АЕПЕД, можуть бути отримані оцінки важливості поїздоділянок (і відповідних ЕД), (3.6) – (3.7), рис. 3.3, виходячи із завдань забезпечення стійкості процесу перевезень. Таким чином, будемо вважати відомими відносні показники «значимості» або «вагомості» поїздоділянок  $g_w$ , а отже і окремих напрямків і маршрутів залізничних перевезень. Для виявлення відносної важливості деякого фрагмента залізничної мережі  $P_{net}$  встановлюється її комплексний показник у вигляді добутку показників «значимості» окремих

ділянок  $P_{net} = \prod g_w$ , що являється аналогом ймовірності безвідмовної роботи мережі [77]. Подібним чином розраховують показники важливості для сценаріїв  $Sh_r(P_{net})$ ,  $r \in n_r$ , або шаблонів відмов залізничної мережі, які зв'язані із відмовами стрілочних переводів. Маючи вартісну, технологічну або іншу оцінку відмови на попередніх етапах  $Z_r(P_{net}(T))$ , зафіксовану чи визначену при відмовах, що виникали раніше  $T \leq T_{contr}$ , можливо розрахувати подібні оцінки для кожного шаблону-сценарію наступного етапу процесу експлуатації  $Z_r(P_{net}(T_{contr} + \tau))$ ,  $\tau > 0$ .

Це твердження дозволяє визначити ймовірнісну оцінку ефекту від усунення можливості виникнення відмови за шаблоном  $Sh_r(P_{net})$ . Якщо відомі (встановлені) ймовірності виникнення окремих шаблонів відмов мережі  $p_r(P_{net})$ , можливо розрахувати математичне очікування оцінки цієї складової економічного ефекту від застосування АЕПЕД, а саме

$$Z_{net} = M[Z_r(P_{net}(T))] = \sum_r Z_r(P_{net}(T)) * p_r(P_{net}). \quad (4.1)$$

За умов повної невизначеності щодо шаблонів відмов  $Sh_r(P_{net})$  застосовується принцип Бернуллі [75, 77] – всі  $p_r(P_{net})$  вважають однаковими.

При цьому розраховують середній ефект від усунення однієї відмови СП

$$Z_{1net} = \sum_r Z_r(P_{net}(T)) / n_r, \quad (4.2)$$

де  $n_r$  – число шаблонів відмов. Максимальний можливий ефект цієї компоненти економіко-технологічного ефекту дорівнює

$$Z_{net} = Z_{1net} * N_{out}, \quad (4.3)$$

якщо прийняти що всі виходи електродвигунів із ладу приведуть до відмов  $Z_r(P_{net}(T))$ .

Оціночна мінімальна величина показника (4.2) для умов Південно-Західної залізниці складає від 160 до 430 грн. Такі відмови разом з прямими економічними збитками мають і інший важливий бічний ефект – впливають на імідж, зменшують конкурентну спроможність залізничного транспорту.

При визначенні вартісної ефективності запровадженості необхідно також урахувати вимушені простої поїздів, див. розд. 1. Вартість збитку нанесеного відмовою розраховується залежно від терміну простою поїздів згідно заздалегідь розрахованим показникам за годину простою поїзда в залежності від: виду поїзда (пасажирський, приміський, вантажний), роду тяги (електротяга або автономна), місця простою (перегін, станція). Для прикладу розрахунку затримка поїздів в 2015р. призвела до наступних збитків. Питомі витрати на 1 поїздо-годину простою на станції поїздів, які курсують у внутрішньому і міждержавному сполученні, при електровозній тязі становлять 2 928 грн. Тоді за вимушений простій на станції 3 пасажирських поїздів протягом 2 год. отримуємо – 5807 грн. Ці оцінки досить наближені, вони не враховують реальні збитки пасажирів, які не змогли реалізувати свої потреби, їх додаткові витрати ін. Відповідно оцінюють інші види відмов інфраструктури та процесу перевезень.

Розглянемо наступні складові ефективності АЕПЕД – упорядкування (скорочення) обслуговуючого персоналу, зменшення вартості ремонтів парку ЕД за рахунок спеціалізації та кооперації. Питання щодо можливості скорочення обслуговуючого персоналу завжди в центрі уваги запровадження автоматизованих технологій, те ж стосується переходу від планово-попереджувального методу до експлуатації на основі оцінок поточного стану компонентів систем. В дисертації для цього призначені моделі і процедури із упорядкування обстеження, моніторингу і діагностування парку, ремонту ЕД, розд. 3.2, розд. 3.5. Планово-попереджувальний, нормативний метод організації експлуатації ЕД, являється невиправдано витратним [14, 16, 24, 45, 52]. Об'єднання всіх ЕД в «парк», проведення порівняльного аналізу

станів ЕД, їх відповідальності щодо забезпечення перевезень, а також існування досить значного часового періоду формування несправностей і виникнення системних відмов, служать достатньою базою для організації більш раціональної роботи персоналу. Розроблені у розд. 3.2, розд. 3.5 методи і засоби дозволяють зменшити кількість обстежень ЕД парку, при чому визначати саме такі ЕД, поточні і прогнозовані стани яких свідчать про виникнення в них різних можливих типів несправності. Потенційне зменшення обсягів робіт являється основою для упорядкування та скорочення обслуговуючого персоналу.

Методика оцінки техніко-економічної ефективності автоматизованої експлуатації парку ЕД урахує також зменшення вартості ремонтів за рахунок спеціалізації та кооперації. Для розрахунку показника економічної ефективності необхідно вирішити завдання оптимального управління (цілерозподілення) 3.21 – 3.24, розд. 3.4, які представляють нечіткі моделі планування розподілу робіт з урахуванням спеціалізації виконавців, а також компромісно оптимальні рішення із планування процесів експлуатації парків ЕД на основі узагальненої розподільчої моделі транспортної задачі. Різниця між вартістю традиційного виконання ремонтів парку ЕД і результатами оптимізаційного перерозподілу робіт становить ще один показник економічної ефективності, який завжди позитивний. У гіршому випадку роботи виконуються без ефекту спеціалізації.

Наступною складовою методики являється можливість представлення завдання із оцінки ефективності запровадження автоматизованої експлуатації парку ЕД, як завдання щодо визначення ефективності інвестиційного проекту її створення і подальшої експлуатації впродовж встановленого періоду (у роках) [64]. При цьому необхідно урахувувати систему показників, які характеризують додаткові витрати і грошові надходження із різних джерел, з урахуванням розподілу коштів за етапами, по роках [64, 68], метод аналізу витрат і вигод (АВВ).

На теперішній час в Україні діють декілька нормативних документів в сфері оцінки економічної ефективності інвестицій. Основними з них є: «Порядок та критерії оцінки економічної ефективності проектних (інвестиційних) пропозицій та інвестиційних проектів», затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 18.07.2012 № 684; «Методичні рекомендації з розроблення інвестиційного проекту, для реалізації якого може надаватися державна підтримка», затверджені наказом Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 13.11.2012 № 1279; «Методика проведення державної експертизи інвестиційних проектів», наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 13.03.2013 № 243.

«Порядок та критерії ...», затверджений від 18.07.2012 № 684 передбачає, що оцінка економічної ефективності інвестиційного проекту здійснюється за такими критеріями: чиста приведена вартість; внутрішня норма дохідності; дисконтований період окупності; індекс прибутковості. При цьому позитивним висновок щодо ефективності інвестиційного проекту є, якщо чиста приведена вартість є позитивною, внутрішня норма дохідності більша за нормативну ставку дисконту, індекс прибутковості перевищує 1. «Порядок» відповідає світовій практиці щодо оцінки ефективності інвестицій, на основі методу АВВ.

Із закордонного досвіду відзначаються «Методичні рекомендації з оцінки ефективності інвестиційних проектів», затверджені наказом Міністерства економіки РФ, Міністерства фінансів РФ від 21.06.1999 № 477. В них викладені основні принципи та методи оцінки ефективності та фінансової реалізованості інвестиційних проектів. В якості показників ефективності запропоновані чистий дохід, чистий дисконтований дохід, внутрішня норма дохідності, потреба в додатковому фінансуванні, індекс дохідності інвестицій, строк окупності, група показників, що характеризує фінансовий стан підприємства – учасника інвестиційного проекту. У порівнянні із вітчизняними методиками передбачається більш широкий спектр показників, серед яких основними є показники «чистий дисконтований дохід», тотожній чис-

тій приведеній вартості, внутрішня норма дохідності, строк окупності з урахуванням дисконтування, індекс дохідності інвестицій з урахуванням дисконтування. Зазначені «Методичні рекомендації..» містять характеристику вхідної інформації, потрібної для оцінки ефективності, а також методи врахування інфляційних процесів, невизначеності та ризику.

Такий підхід до встановлення економічної ефективності при виборі інвестиційних проектів також являється загальноприйнятим в країнах Євро-союзу (ЄС) при фінансуванні великих проектів, в більшості випадків інфра-структурного типу. Регламент № 1083/ 2006, стаття 40, пункт «е» зобов'язує керуючі органи надати Європейській Комісії результати аналізу проектів за методом «аналіз витрат і вигод» (АВВ). Цей метод є важливим інструмен-том при оцінці ефективності і плануванні проектів в галузі транспорту. Ме-тод є як інструментом розподілу ресурсів при інвестиціях, так і інструмен-том підтримки прийняття рішень, також він є одним з кращих методів для вимірювання доцільності економічних і соціальних проектів. Критерієм ефективності за методом АЗВ є максимум чистої приведенної вартості, вра-ховуючи залишкову вартість результатів проекту, (4.4)

$$VAN = -(I^f - I_{\text{var}}^f) + \sum_{t \leq T^f} \frac{\Delta EBE_t}{(1+i)^{(t-t_0)}} - \sum_{t \leq T^f} \frac{\Delta I_t^f}{(1+i)^{(t-t_0)}} + \frac{R^f}{(1+i)^{T^f}} \quad (4.4)$$

В (4.4) позначено:

$I$  - облікова ставка;  $T^f$  - відповідний період робіт проекту (період аморти-зації);  $EBE$  - валовий прибуток (грошовий потік);  $I^f$  - загальна вартість інвестиції оператора, в тому числі фінансові витрати на управління;  $I_{\text{var}}^f$  - поточна вартість інвестицій для оператора, відхилення;  $\Delta I_t^f$  - зміни будь-яких значних інвестицій обслуговування в рік  $T$  (які не включаються до складу операційних витрат);  $R^f$  - залишкова вартість інвестицій в кінці розрахункового періоду (може бути негативною, якщо є вартість реконстру-кції в кінці періоду життєвого циклу проекту).

Важливою складовою автоматизованої експлуатації парку ЕД також являється забезпечення можливості її подальшого розвитку із застосуванням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, в тому числі методів і технологій інтелектуальних транспортних систем [64], підвищення керованості і ефективності супроводу системи АЕПЕД, можливості організації взаємодії системи управління експлуатацією з іншими автоматизованими системами залізниць, отримавши додатковий економічний та організаційний ефект.

#### 4.2 Узагальнена методика технолого-економічної оцінки автоматизованої системи експлуатації парків електродвигунів з урахуванням розвитку та поетапного впровадження

Представлені у розд. 4.1 методики оцінки ефективності розробки та удосконалення засобів автоматизованої експлуатації парків електродвигунів АЕПЕД, в тому числі як інвестиційного проекту, не розкривають механізмів їх запровадження в умовах здійснення безперервного процесу перевезень та функціонування всіх підрозділів залізниці. Урахування цього аспекту проводиться у розділі, що дозволяє поліпшити методику із оцінки ефективності системи АЕПЕД, а також отримати пропозиції стосовно можливості її поетапного впровадження. Ефективність проекту АЕПЕД залежить і визначається можливостями його реалізації в умовах практики. Розглянемо питання поетапного переходу до експлуатації парку стрілочних ЕД, як розвитку відповідної сфери діяльності підприємства, підрозділів залізниці, виходячи із наукових положень щодо координації процесів планування та розвитку і функціонування підприємства, що базуються на принципах ієрархічного управління [86]. Підприємство як організована система підрозділів має значні запаси мінливості та пристосовування. Як у економічного суб'єкта, що має за мету отримання прибутку, у підприємств виділяють послідовність етапів життєвого циклу – функціонування з отриманням максимального



прибутку (Емпр), реорганізація деяких сфер або технологій діяльності з тимчасовою відмовою від отримання такого прибутку (Епр). На етапі Емпр ефективність функціонування оцінюють фінансовими показниками, які повинні зростати. На етапі Епр система показників ефективності змінюється, вона розділяється на три групи: показники доходів, показники сфер діяльності що реформуються, показники інших сфер діяльності. Викладені у розд. 4.1. методики в основному стосуються етапу Емпр, тобто урахування тільки економічної компоненти не є достатньою. В [86] для етапу Епр пропонується виконувати порівняння ефекту також на основі показників сфери діяльності яка реформується. Для цього необхідно створювати механізми координації цілей і задач розвитку (Зр) і завдань функціонування (Зф) підприємств.

Представимо процеси координації завдань Зр і Зф на основі принципів ієрархічного управління [86], рис. 4.1. На рис. 4.1 показана дворівнева схема ієрархічного управління підприємством, в якій позначено: КДС – керована динамічна система, процеси функціонування підприємства, яка представлена окремими напрямками; ПР – управління, ведучий рівень ієрархічного управління; ГД – ведений рівень управління, рівень генерального директора;  $S_2, S_3$  - керуючі впливи на керований рівень та рівень функціональних напрямків, які коректують їх діяльність; зворотна інформація про результати функціонування –  $Z_1, Z_2, Z_3$ , відповідно для керуючого рівня, рівня ГД, інформація про стани ГД для ведучого рівня ПР; **N** – механізм узгодження, мінімізації викривлення (також суб'єктивного) та неузгодженості інформації про КДС, через який повинні проходити усі зворотні інформаційні зв'язки системи управління. Отримання недостовірної інформації про стан системи суттєво впливає на ефективність управління. Об'єктивні дані про стан парку ЕД можливо отримати лише за умов автоматизованого управління експлуатацією створеними засобами АЕПЕД. Тож призначення механізму узгодження **N** (організаційне, інформаційне, процедурне забезпечення ін.) полягає у забезпеченні аналізу потенційної недостовірності зворотних інформа-

ційних зв'язків системи управління КДС, що дозволяє рівню ПР приймати обґрунтовані та раціональні рішення. Наприклад, корегування діяльності ГД через керування  $S_2$ , а також діяльності КДС через непрямі впливи на них  $S_2$ .

В схемі управління рис. 4.1 інформаційні зв'язки мають такий уточнений зміст [86]:  $S_2$  – показники плану розвитку;  $S_3$  – план функціонування на основі тенденцій розвитку (при автоматизованій експлуатації парку ЕД);  $Z_1, Z_2$  – зворотні зв'язки про можливості виконання плану функціонування по окремих функціональних напрямках;  $Z_3$  – інформація про можливість / неможливість виконання плану  $S_3$ ;  $Z_1^*$  – потік інформації з оцінкою достовірності зворотних зв'язків, а саме про можливості функціонування за планом  $S_2$ , про розбіжності стосовно  $S_2$  та  $Z_3$ , про розбіжності планів  $S_2, S_3$ . Зазначимо, що в процесі функціонування управління, керуючі впливи  $S_2, S_3$ , встановлюються в першу чергу через системи показників, які не однакові на різних етапах розвитку підприємства.

Схема рис. 4.1 відображає багаторівневу структуру процесу зміни сукупності головних завдань підприємства при його реформуванні або перетворенні деякої базової сфери діяльності. Аналіз дозволяє встановити, що перехід до автоматизованого управління процесами експлуатації парків ЕД на основі АЕПЕД забезпечить більш актуальну інформаційну базу відповідно схеми рис. 4.1. Для оцінки ефективності функціонування при реалізації поточних завдань необхідна своя система показників – на етапах функціонування, при завданнях  $Z_f$ , і розвитку, задачі  $Z_r$ , цілі та характеристики різні. Причому на фазі розвитку (етапі впровадження методи експлуатації «по параметрах поточного стану») можливо використовувати неекономічні, монетарні показники розподілу грошових потоків що визначають умови застосування методів (4.2), а порівняльні технологічні характеристики сфери діяльності яка розвивається (чи підрозділу підприємств). Системи показників

на етапі розвитку мають порівняльний характер, забезпечують якісну оцінку процесу удосконалення, без обов'язкової кількісної оцінки ступеня розвитку, приросту загального економічного показника ефективності, або системи таких критеріїв.



Рисунок 4.1 Ієрархічна схема управління процесом координації планування розвитку та функціонування підприємства (сфер діяльності)

Координаційна ієрархічна модель управління підприємством рис. 4.1 дозволяє включити у методику оцінки ефективності системи автоматизованої експлуатації парків АЕПЕД усі зазначені у вступі складові ефекту її запровадження (в тому числі технічні, технологічні, організаційні, показники ефективності супроводу системи та подальшого розвитку, взаємодії з іншими автоматизованими системами залізниць ін). На фазах розвитку можливо встановити зміни величин неекономічних показників діяльності, на фазах функціонування з отриманням максимального прибутку – визначити величини фінансових показників.

З точки зору забезпечення ефективності запровадження системи АЕПЕД відзначимо також наступне значення схеми управління рис. 4.1. При

створенні засобу автоматизації експлуатації парку АЕПЕД необхідно в її складі сформувати механізми (інформаційно-аналітичні та програмні) координації, які безпосередньо забезпечують ієрархічне управління системою при координації етапів планування розвитку та функціонування підприємства, використовуючи відмінні системи показників для різних етапів функціонування системи експлуатації парків ЕД.

#### Висновки по розділу 4

У розділі досліджено питання техніко-економічної ефективності системи автоматизації управління експлуатацією парків електродвигунів залізничних стрілочних переводів АЕПЕД. Зазначається що усі запропоновані у дисертації удосконалення її методів і засобів спрямовані на підвищення ефективності відповідних процесів (технологічних, організаційних, економічних ін.), що забезпечує зменшення загальних експлуатаційних витрат. При цьому виконано формування методики із оцінки техніко-економічної та інвестиційної ефективності автоматизованої експлуатації парків електродвигунів, створено структури накопичення первинних даних процесів експлуатації стрілочних електродвигунів, розроблена методика оцінки ефективності засобів автоматизації експлуатації з урахуванням розвитку та поетапного впровадження на основі дворівневої ієрархічної схеми управління. Отримані в розділі результати полягають у наступному.

1. Розроблено узгоджену з законодавством України та стандартами Євросоюзу методику оцінки технолого-економічної та інвестиційної ефективності засобів автоматизованого управління експлуатацією парків стрілочних електродвигунів на основі параметрів поточного стану, яка ураховує головні складові ефективності в частині скорочення обсягів обслуговування і персоналу, зменшення вартості ремонтів, зменшення величини можливих додаткових витрат при збоях процесу перевезень; підвищення безпеки та стійкості процесів залізничних перевезень. Використання Методики дозво-

лило встановити ефективність удосконалення процесів автоматизованої експлуатації парків ЕД.

2. Система інформаційного та організаційного забезпечення дозволяє реалізувати засоби АЕПЕД з урахуванням розвитку системи автоматизованої експлуатації і взаємодії з іншими автоматизованими системами залізниць.

3. Запропоновано дворівневу координаційну модель розвитку підприємства стосовно засобів автоматизації експлуатації парку ЕД, яка пристосована для оцінки ефективності АЕПЕД з урахуванням поетапного впровадження. Встановлено, що введення в методику оцінки ефективності різних систем показників на етапах сталого функціонування та розвитку, дозволяє підвищити точність оцінок ефективності засобів автоматизації.

4. Аналіз ефективності засобів автоматизації підтвердив технологічно-економічну ефективність результатів розробки стосовно застосування АЕПЕД для переходу від планово-попереджувального методу експлуатації до автоматизованого обслуговування парку по фактичному технічному стану ЕД.

5. Результати розробки системи АЕПЕД в частині формування відповідного інформаційного та організаційного забезпечення прийняті до впровадження в службах Південно-Західної залізниці. Теоретичні положення та розрахункові результати роботи використовуються в начальному процесі ДНУЗТ в дисциплінах підготовки магістрів з спеціалізації Інтелектуальні Транспортні Системи: «Інфраструктура, телематика та інформаційні технології ІТС», «Інформаційні технології і системи транспорту».

Результати розділу опубліковані у наступних роботах [81, 83, 93, 100].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене науково-прикладне завдання із підвищення ефективності багатокритеріальної автоматизованої експлуатації парків стрілочних електродвигунів на основі оцінок їх поточного стану, а також з урахуванням невизначеності стану інфраструктури і параметрів процесу перевезень. Виконані дослідження і розробки дозволяють перейти від планово-попереджувального методу до автоматизованої експлуатації зазначених парків по їх фактичному технічному стану. Отримані у дисертації результати та висновки полягають у наступному.

1. Проведений аналіз діючих методів і засобів експлуатації стрілочних електродвигунів дозволив визначити суттєві відмінності комплексу завдань автоматизованої експлуатації парків. На основі аналізу інформаційного та ефективності організаційного забезпечення процесів технічної експлуатації встановлені завдання щодо удосконалення експлуатації парків електродвигунів.

2. Розроблено удосконалену структуру системи автоматизованої багатокритеріальної експлуатації парків стрілочних електродвигунів, яка враховує оцінки їх поточних станів та інфраструктури. Сформульовано комплекс нових наукових завдань що забезпечують реалізацію системи експлуатації парків.

3. Розроблено удосконалену систему індивідуальних інтелектуальних моделей процесів експлуатації, які забезпечують актуальність, повноту та достовірність даних стосовно завдань експлуатації парків електричних двигунів за параметрами поточного стану в умовах діючих технологічних процесів експлуатації.

4. Розроблено систему багатокритеріальних моделей і двохетапних процедур для автоматизації розрахунків раціональної черговості діагностування та ремонту парку електричних двигунів, які ураховують статистичну і нечітку форми даних про стани парку та інфраструктури перевезень.

5. Удосконалено процедуру Такагі-Сугено для екстраполяційного прогнозування станів і планування експлуатації парків стрілочних двигунів.

6. Удосконалено моделі розподілу двигунів парку між ремонтними базами на основі спеціалізації та кооперації, які використовують нечіткі оцінки параметрів завдань планування та компромісно-оптимальний характер ефективних рішень.

7. Розроблено методика оцінки технолого-економічної та інвестиційної ефективності пропонуваніх засобів автоматизованої експлуатації парків стрілочних електродвигунів, узгоджену з законодавством України та стандартами Євросоюзу. Обґрунтована технолого-економічна ефективність впровадження удосконаленої системи автоматизованої експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів з урахуванням невизначеності даних про стан парку та інфраструктури процесів перевезень, яка прийнята до впровадження у Південно-Західній залізниці. Очікувана економічна ефективність залежно від ступеня застосування системи АЕПЕД складає від 300 тис. до 1.5 млн. грн. на рік, період окупності –1 рік.

8. На рівні значущості  $\alpha = 0,05$  за критерієм Фішера підтверджена адекватність запропонованих моделей експлуатації парку, в тому числі процедур прогнозування станів стрілочних електродвигунів і планування ремонтів.

9. Результати розробки системи автоматизованої експлуатації парків стрілочних електродвигунів прийняті до впровадження в службах Південно-Західної залізниці, а також використано в навчальному процесі ДНУЗТ, що підтверджено відповідними актами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз експлуатаційної роботи господарств галузі автоматики, телемеханіки та зв'язку Укрзалізниці за 2011 рік. Міністерство інфраструктури України. Державна адміністрація залізничного транспорту. – 2012. – 62 с.
2. Правила технічної експлуатації залізниць України. К.: Міністерство транспорту України, 2003. – 133 с.
3. Скалозуб В.В. Проблеми автоматизації процесів управління експлуатацією парків залізничних технічних систем на базі оцінки параметрів поточного стану / В.В. Скалозуб, В.М. Осовик. Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 75 Международной научно-практической конференции (Днепропетровск, 14-15 мая 2015 г.) – Д.: ДИИТ, 2015. – С. 203.
4. Босов А. А. Организация профилактики объектов железнодорожной автоматики с применением измерительного устройства / А. А. Босов, А. П. Разгонов, В. В. Холоша // Вестник ВНИИЖТ. – 1998. – № 5. – С. 25–29.
5. Вожолевский А. Л. Комплексная автоматизированная система управления хозяйством сигнализации, связи и вычислительной техники / А. Л. Вожолевский, К. О. Калюжный // Автоматика, телемеханика и связь. – 1995, № 6. – С. 28–30.
6. Скалозуб В. В. Автоматизация мониторинга и управления эксплуатацией парка электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов на основе параметров текущего технического состояния / В. В. Скалозуб, О. М. Швець // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 60–64.
7. Ейтутіс Г.Д. Економіка залізниці: історія, сьогодення, перспективи розвитку:[монографія]/ Г.Д. Ейтутіс, О.М. Кривопішин, І.П. Федорко, В.М. Осовик, М.С. Семенюк; за ред. Г.Д. Ейтутіса, О.М. Кривопішина. - Ніжин: ТОВ "Видавництво "Аспект - Поліграф", 2014. – 292 с.
8. Бойник А. Б. . Диагностирование устройств железнодорожной автоматики и агрегатов подвижных единиц: Учебник / А. Б. Бойник, Г. И. Загарий, С. В. Кошевой и др. – Х.: ЧП Издательство “Новое слово”, 2008. – 304 с.



9. Гаврилюк В. І. Автоматизований контроль основних параметрів стрілочного електропривода / В. І. Гаврилюк В. В. Маловічко, // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 16. – С. 5–7.

10. Гаврилюк В. І. Застосування нейромережних технологій для діагностування стрілочних переводів з двигунами постійного струму / В. І. Гаврилюк, В. Ю. Дуб, В. В. Маловічко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – С. 209-213.

11. Дмитренко И. Е. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Дмитренко И. Е., Сапожников В. В., Дьяков Д. В. – М. : Транспорт, 1994. – 263 с.

12. Дмитренко И. Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Дмитренко И. Е. – М.: Транспорт, 1986. – 142 с.

13. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики / [Переборов А. С., Брылеев А. М., Смирнова А. В. и др.]. – М.: Транспорт, 1984. – 384 с.

14. Перникис Б. Д. Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ / Б. Д. Перникис, Р. Ш. Ягудин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1994. – 254 с

15. Разгонов А. П. Об оценке показателей транспортного потока при отказах / А. П. Разгонов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 1998. – № 4. – С. 31–32.

16. Разгонов А. П. Автоматизация процессов диагностики электродвигателей стрелочных переводов в условиях эксплуатации / А. П. Разгонов, А. Б. Руденко, В. В. Скалзуб, О. М. Швец // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 6. – С. 20–22.

17. Резников Ю. М. Электроприводы железнодорожной автоматики и телемеханики / Ю. М. Резников. – М. : Транспорт, 1985. – 288 с.

18. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – М. : Энергоиздат, 1981. – 576 с.

19. Бальтет Л. И. Устройство определения неисправности электродвигателей стрелочных электроприводов / Л. И. Бальтет // Автоматика, телемеханика и связь. – 1993. – № 3. – С. 4–11.

20. Гриль А. И. Осциллографический метод оценки состояния стрелочных электродвигателей постоянного тока / А. И. Грила // Автоматика, телемеханика и связь. – 1983. – № 12. – С. 28.

21. Маловічко В. В. Автоматизований контроль технічного стану стрілочних електродвигунів постійного струму по кривим споживання струму / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: Вид-во Української державної академії залізничного транспорту, 2007. – Вип. 5, 6. – С. 18–21.

22. Маловічко В. В. Підвищення ефективності технічного обслуговування стрілочних переводів шляхом автоматизації контролю їх параметрів: дис. канд. техн. наук : 05.22.20 / Маловічко Володимир Володимирович. – Д., 2011. – 177 с.

23. Пат. 31735 Україна, МПК (2006) В61L 7/00. Спосіб дистанційного контролю та діагностування стрілочних переводів з двигуном постійного струму /Маловічко В. В., Гаврилюк В. І.; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № u200711971; заявл. 29.10.2007; опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8.

24. Пат. 8530 Украина, МПК (2011.01) В61L 7/00. Способ дистанционного определения дефектов электрических составляющих, электродвигателя постоянного тока стрелочного перевода / Парфенов В. И., Руденко А. Б.; заявитель и патентообладатель Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна. – № 20041210675; заявл. 24.12.2004; опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8.

25. Пат. 8573 Украина, МПК (2011.01) В61L 7/00. Способ дистанционной диагностики состояния механической части стрелочного перевода с электроприводом постоянного тока / Парфенов В. И., Руденко А. Б.; заявитель и патентообладатель Днепропетровский национальный ун-т жел. дор. транспорта им. академика В. Лазаряна. – № u200500050; заявл. 04.01.2005; опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8.

26. Семьянских А. И. Способ дистанционного обнаружения неисправностей в электрическом двигателе постоянного тока / А. И. Семьянских, Н. И. Яничек // Автоматика, телемеханика и связь. – 1981. – № 2. – С. 37–39.
27. Унтеров С. Н. Дистанционный контроль исправности стрелочных электродвигателей / С. Н. Унтеров // Автоматика, телемеханика и связь. – 1993. – № 9. – С. 23–24.
28. Скалозуб В.В. Нейросетевые модели диагностики электродвигателей постоянного тока [Текст] / В.В.Скалозуб, О.М. Швец // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – №4. – С. 7-11.
29. Скалозуб В. В. Диагностика электродвигателей постоянного тока методами спектрального анализа и экспертных систем / В. В. Скалозуб, О. М. Швец, А. Б. Руденко // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : международ. науч.-практ. конф., 15–16 мая 2008 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2008. – С. 78.
30. Джарратано д., Райли Г. Экспертные системы. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 1152 с.
31. Джексон П. Введение в экспертные системы / Питер Джексон. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2001. – 624 с.
32. Дилигенский Н. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология / Дилигенский Н. В., Дымова Л. Г., Севастьянов П. В. – М. : Машиностроение, 2004. – 378 с.
33. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Заде Л. А. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
34. Згуровский М.З. Интегрированные системы оптимального управления и проектирования [текст] / М.З. Згуровский // Киев: Вища школа, 1990. – 351 с.
35. Кохонен Т. Саморганизующиеся карты. / Т.Кохонен. // Пер. с англ. – М.: БИНИМ, 2009. – 655 с.

36. Kohonen T. *Self-Organizing Maps* / Teuvo Kohonen. – Springer-Verlag, 2001. – 501 p.
37. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
38. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта / Л.Рутковский // Пер. с польск. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 520 с.
39. Piegat A. Nonregular nonlinear sector modeling / A. Piegat // *Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 8, No 3, 1998. – P. 101 – 123.
40. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат // Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2009. – 798 с.
41. Скалозуб В.В. Аксиоматика компромисса в обратных задачах многокритериальной оптимизации конструкций и технических систем // В сб. научн. тр. АН Украины «Математические методы в задачах расчета и проектирования сложных механических систем». – Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. 1992. С. 62 – 65.
42. Скалозуб В. В. Метод и информационные технологии нечетко-статистического управления / В. В. Скалозуб // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1 (50). – Дніпропетровськ, 2008. – С. 120 – 127.
43. Скалозуб В. В. Информационная технология диагностики, прогнозирования и управления устойчивым развитием сложных систем на основе рейтинговых оценок / В. В. Скалозуб, В. А. Андрющенко, С. Ю. Разумов, М. В. Скалозуб, К. С. Фокша, О. М. Швец // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (76). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 178–185.
44. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс [Текст] / С.Хайкин, Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1056 с.
45. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування: ЦШ 0060. – К.: Укрзалізниця, 2009. – 111 с.
46. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ): ЦШЕОТ 0012. – Офіц. вид. – К. : Дер-

жавна адміністрація залізничного транспорту України, 1998. – 54 с. – (Затверджено наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України № 243-Ц від 05 жовтня 1998 р.).

47. Пристрої сигналізації централізації та блокування. Технологія обслуговування: ЦШ 0042. – К.: Укрзалізниця, 2007. – 461 с.

48. Сороко В. И. Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника на железных дорогах России: Энциклопедия : в 2 т. Т. 1 / Сороко В. И., Кайнов В. М., Казив Г. Д. – М. : НПФ «ПЛАНЕТА», 2006. – 736 с., ил.

49. Станционные системы автоматики и телемеханики / [Сапожников В. Вл., Елкин Б. Н., Кокурин И. М. и др.]; под ред. В. Вл. Сапожникова. – М.: Транспорт, 2000. – 432 с.

50. Швец О. М. Ресурсосберегающие методы автоматизированной диагностики электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных приводов / О. М. Швец, А. Б. Руденко // Проблемы экономики транспорта: VIII междунар. науч. конф., 16–17 апр. 2009 г.: тезисы докл. – Днепропетровск, 2009. – С. 153.

51. Швец О. М. Классификация объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил / О. М. Швец // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (68). – Дніпропетровськ, 2010. – С. 133–139.

52. Швец О. М. Усовершенствование методов эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов средствами интеллектуальных систем, дис. канд. техн. наук: 05.22.20 / Швец Олег Михайлович. – Д., 2012. – 160 с.

53. Пультяков А. В. Расходование ресурса стрелочных электроприводов / А. В. Пультяков // Межвузовский сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону, 2001. – С. 83–86

54. Бессуднов Е. П. Обнаружение мест дефектов изоляции обмоток электрических машин постоянного тока / Е. П. Бессуднов. – М.: Энергия, 1977. – 120 с.

55. Саидов С. А., Автоматизированная система измерения и контроля параметров стрелочных электродвигателей постоянного тока / С. А.

Саидов, О. Г. Морозов, Н. А. Палахов, Н. В. Дорогов // Автоматика, телемеханика и связь. – 1996. – № 6. – С. 28–30.

56. Буряк С. Ю. Исследование диагностических признаков стрелочных электроприводов переменного тока / С. Ю. Буряк, В. И. Гаврилюк, О. А. Гололобова, А. М. Безнарытний // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д.: ДНУЗТ, 2014. – Вип. 4(52). – С. 7 – 22.

57. Buryak S. Yu. Mathematical modeling of AC electric point motor / S. Yu. Buryak // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2014. – № 2(50). – P. 7 – 20.

58. Буряк С. Ю. Дистанционное диагностирование состояния стрелочных переводов по временной характеристике и спектральному составу токовой кривой / С. Ю. Буряк, В. И. Гаврилюк, О. А. Гололобова, М. А. Ковригин // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д.: ДНУЗТ, 2015. – Вип. 2(56). – С. 39 – 57.

59. Технические средства диагностирования: Справочник / [В. В. Клюев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук и др.] ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1989. – 672 с.

60. Классификация дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов. Дополнение к НТД/ЦП-1-93: Каталог дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов. Дополнение к НТД/ЦП-3-93. / МПС России. – М.: Транспорт, 1996. – 43 с.

61. Классификация и каталог дефектов и повреждений элементов электрических переводов железных дорог Украины. – Днепропетровск: Арт-Прес, 2000. – 148 с.

62. Швец О. М. Классификация объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил / О. М. Швец // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (68). – Дніпропетровськ, 2010. – С. 133–139.

63. Ивченко Ю. Н. Методы автоматизированного управления парком электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов «по текущему состоянию» / Ю. Н. Ивченко, О. М. Швец, М. В. Скалозуб //

Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 4. – С. 96–102.

64. Скалозуб В.В. Задачи интеллектуализации автоматизированных систем управления вагонными парками Укрзализныци. / В.В.Скалозуб, И.В. Клименко, В.Н. Осовик, М.С. Чередниченко. Intelligent Transportation Systems. Коммуникационные и информационные технологии для обеспечения безопасности и эффективности транспортных потоков: программа 517374-TEMPUS-1-2011-1-RU-TEMPUS-JPCR., 11 – 2013, - С. 51- 61..

65. Скалозуб В. В. Методы интеллектуальных транспортных систем в задачах управления парками объектов железнодорожного транспорта по текущему состоянию [Текст] / В.В. Скалозуб, О.М. Швець, В.Н. Осовик. //Зб. наук. пр. ДНУ ім. О. Гончара «Питання прикладної математики і математичного моделювання», - Дніпропетровськ: Вид-во «Ліра», 2014. – С. 229 – 242.

66. Осовик В.М. Удосконалення методів автоматизованого управління процесами експлуатації парків залізничних технічних систем [Текст] / В.М. Осовик // Системні технології, 5 (100), 2015. – С. 19-30,

67. Осовик В.М. Питання забезпечення стійкості процесів залізничних перевезень на основі підвищення надійності стрілочних переводів [Текст] / В.М. Осовик //Транспортні системи та технології перевезень /Зб. наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, №9. 2015. – С. 57 – 64.

68. Осовик В. М. Розвиток методів інтелектуальної автоматизованої експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів на базі оцінки параметрів поточного стану [Текст] // Свідоцтво № 62670 про реєстрацію авторського права, 2015.

69. Скалозуб В.В., Индивидуальные интеллектуальные модели для эксплуатации парка однородных железнодорожных технических систем на основе параметров текущего состояния [Текст] /В.В. Скалозуб, В.Н. Осовик // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті", №6, 2014. – С. 8 – 12.

70. Kasabov N. Foundations of neural networks, fuzzy systems and knowledge engineering. – London: Bradford book MIT press, 1996. – 362 p.

71. Дебок Г. Анализ финансовых данных с помощью самоорганизующихся карт / Г. Дебок, Т. Кохонен // Пер. с англ. – М.: Изд. Дом «Альпина», 2001. – 318 с.

72. Скалозуб В.В. Автоматизированное нечеткое интеллектуальное управление эксплуатацией парков железнодорожных технических систем на основе параметров текущего состояния [Текст] / В.В. Скалозуб, В.Н. Осовик // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. № 2 (30), 2015. – С. 34-36.

73. Skalozub V.V. Intelligent models for monitoring and operation on the set of railway technical systems based on the parameters of the current state /V.V. Skalozub, V.N. Osovik //Материалы конф. “Интеллектуальные транспортные системы” проекта «CITISSET» (№ 517374-TEMPUS-1-2011). – Москва, МИИТ, 2014. – С. 45 – 47.

74. Осовик В.Н. О процедурах взаимодействия объектов в интеллектуальных системах транспорта // III Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы развития интеллектуальных систем транспорта». 27.01-31.01.2014 г. – Днепропетровск: ДНУЗТ. - С. 49 – 50.

75. Ермольев Ю.М. Математические методы исследования операций / Ю.М. Ермольев, И.И. Ляшко, В.С. Михалевич, В.И. Тюптя // Киев: Вища школа, 1979. – 312 с.

76. Моделі і методи соціально-економічного прогнозування: Підручник/ [Геєць В.М., Клебанова Т.С., Черняк О.І., Іванов В.В., Дубровіна Н.А., Ставицький А.В.] — Х.: ВД “ІНЖЕК», 2005. — 396 с.

77. Исследование операций [Текст. В 2-х томах, пер. с англ.] /Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981.

78. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений: Пер. с англ. – М. : Мир, 1976. – С. 172–175.

79. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети [Текст]/ Г.Э. Яхьяева. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий, Лаборатория знаний, БИНИМ, 2008. – 316 с.



80. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях / Монография. - Тюмень: Изд-во Тюменского гос. Ун-та. 2000. – 295 с.

81. Скалозуб В. В. Економіко-технологічні моделі аналізу і управління експлуатацією парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів [Текст] / В.В. Скалозуб, В.М. Осовик, І.В. Клименко // В зб. «Проблеми економіки транспорту», вип. 9, 2015. – С. 129 – 137.

82. Скалозуб В.В. Индивидуальные интеллектуальные модели процессов эксплуатации парка технических систем железнодорожного транспорта на основе текущего состояния / В.В. Скалозуб, В.М. Осовик // Материалы 27 Международной научно-техн. конф. «Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте », № 4 (приложение). Харьков, УкрДУЗТ, 2014. – С. 10 – 11.

83. Скалозуб В.В. Экономико-математическое моделирование процессов эксплуатации парков сложных технических систем железнодорожного транспорта / В.В. Скалозуб, В.Н. Осовик // Тез. доп. XII Міжнародна наукова конференція «Проблеми економіки транспорту».. 2014 р. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ. – С. 213.

84. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток [Текст]// Нуссбаумер Г. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 382 с.

85. Айфичер Э. С. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2008. – 992 с.

86. Лепа Р.Н. Координация управленческой деятельности предприятия на основе принципов иерархического управления / Р.Н. Лепа // Современные проблемы моделирования социально-экономических систем [Монография ]. – Х.: ИД «ИНЖЭК», 2009. – С. 334 – 345.

87. Зайченко Ю.П. /Ю.П. Зайченко // Исследование операций. – Киев: Вища школа, 1989. – 392 с.

88. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования / Б. Лю; Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 416 с.

89. Жолен Л., Кифер М., Дидри О., Вальтер Э. Прикладной интервальный анализ. – М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007. – 468 с.
90. Nguyen T.H. Theoretical aspects of fuzzy control / T.H. Nguyen, M. Sugeno, R.Tong, R.R. Yager // New York, John Wiley & Sons, 1995. – 386p.
91. Боднарь Б. Е. Применение нейронных сетей для определения технического состояния локомотивов / Б. Е. Боднарь, А. Б. Очкасов, О. М. Швец // Локомотив-информ. – Харьков, 2009. – № 9–10. – С. 4–6.
92. Осовик В.М. Векторна модель автоматизованого управління процесами експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів [Текст] / В.М. Осовик // В зб. "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті", №5, 2015. – С. 39 – 43.
93. Скалозуб В.В. Автоматизація прогнозування параметрів інвестиційних проєктів методами нечіткого управління / В.В. Скалозуб, О.П. Іванов, В.М. Осовик // Тез. доп. 74 Міжнарод. науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 2014 р. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ. – С. 210.
94. Чагур О.В., Кассір В.В. Концептуальні підходи до управління пропускною спроможністю залізничної інфраструктури в умовах конкуренції на ринку перевезень // Тез. доп. XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економіки транспорту», - Дніпропетровськ, ДНУЗТ, 2015. С. 79 – 80.
95. Швец О. М. Автоматизированная технология мониторинга электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов методами искусственных нейронных сетей / О. М. Швец // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : междунар. науч.-практ. конф., 14–15 мая 2009 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2009. – С. 68.
96. Efe M.O. A Novel Optimization Procedure for Training of Fuzzy Inference Systems By Combining Variable Structure Systems Technique and Levenberg-Marquardt Algorithm [Text] / M.O. Efe ,O. Kaynak // Fuzzy Sets and Systems. –2001. – Vol. 122, № 1. – P. 149–161.

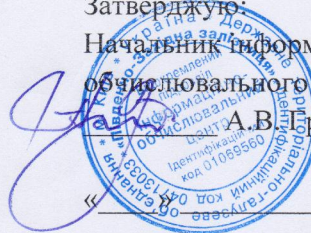
97. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения /Дженкинс Г., Ватс Д. – М.: Мир, 1971. – 317 с.
98. Солонина А. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов / Солонина А., Улахович Д., Яковлев Л. – СПб : БХВ-Петербург, 2001. – 464 с.
99. Скалозуб В.В. Интеллектуальні моделі управління експлуатацією парків залізничних технічних систем за параметрами поточного стану/ В.В. Скалозуб, В.М. Осовик // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем». – Дніпропетровськ, УДХТУ, 2015. – С. 83 – 87.
100. Осовик В.М. Питання розвитку автоматизованого управління процесами експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів / В.М. Осовик // Материалы 28 Международной научно-технической конф. «Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте », № 4 (приложение). Харьков, УкрДУЗТ–2015. – С. 8.
101. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 256 с.
102. Саати Т., Кернес А. Метод анализа иерархий / Т. Саати, А. Кернес // – М.: Мир. 1991. – 352 с/
103. Bollerslev T., Ray Y., Chou and Kenneth F. Kroner «ARCH modeling in finance: A Review of the Theory Empirical Evidence» // *Jornal Of Econometrics*, №5, 1992. – P. 5 – 59.
104. Растрингин Л.А., Пономарев Ю.П. Экстраполяционные методы проектирования и управления. – М. Машиностроение, 1986. – 116 с.
105. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 15, p. 116 – 132, 1985.

## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК А

Акти впровадження результатів дисертації

Затверджую:  
 Начальник інформаційно-  
 обчислювального центру  
 А.В. Грушко



\_\_\_\_\_ 2015 року

**Акт впровадження  
 результатів виконання дисертаційної роботи аспіранта  
 Осовика Володимира Миколайовича  
 «Підвищення ефективності автоматизованої експлуатації парків  
 електричних двигунів залізничних стрілочних переводів з урахуванням  
 стану інфраструктури».**

Цей акт підтверджує, що розроблені в дисертаційній роботі методи і засоби підвищення ефективності процесів експлуатації парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів шляхом удосконалення систем автоматизованого моніторингу та діагностування поточного стану технічних систем, а також урахування невизначеності параметрів стану інфраструктури і процесу перевезень були реалізовані на дистанціях сигналізації та зв'язку Південно-Західної залізниці.

Автоматизована технологія і система експлуатації парків ЕД АЕПЕД дозволили перейти від планової, встановленої нормативами заміни двигунів з невикористаними експлуатаційними ресурсами, до обслуговування парку ЕД по їх фактичному технічному стану, з урахуванням умов невизначеності електричних двигунів та інфраструктури процесів залізничних перевезень. Аналіз автоматизованих засобів дистанційного моніторингу та діагностування технічного стану електричних двигунів стрілочних переводів показав наступні переваги розробленої та удосконаленої технології і системи АЕПЕД в порівнянні з вже існуючими методами: виявлення більшої кількості несправностей, моніторинг і діагностика технічного стану двигуна в режимі робочого навантаження, автоматизоване налагодження на розпізнавання нових видів несправностей, багатокритеріальне управління процесами експлуатації парків ЕД, забезпечення процесів прогнозування періоду до відмови ЕД.

Головний інженер галузевої  
 служби сигналізації та зв'язку



О.А. Майбродський

## ЗАТВЕРДЖУЮ



Перший проректор Дніпропетровського  
національного університету залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна

д.т.н., проф. Боднар Б.Є.  
2015 р.

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
«Підвищення ефективності експлуатації парків електричних двигунів  
залізничних стрілочних переводів з урахуванням стану інфраструктури»  
на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 –  
експлуатація та ремонт засобів транспорту  
Осовика Володимира Миколайовича

Результати дисертаційної роботи Осовика В.М. щодо планування розподілу ремонтів електродвигунів у залежності від виявлених несправностей з урахуванням спеціалізації виконавців робіт та кооперації, формування нечіткого управління процесами експлуатації парків технічних систем на основі процедур прогнозування і двохетапної моделі оптимізації, процедур діагностування стану на основі метод Такагі – Сугено і експертних систем, були впроваджені в навчальний процес при підготовці магістрів в рамках міжнародних TEMPUS-програм, на кафедрі комп'ютерних інформаційних технологій, в курсах підготовки магістрів з інтелектуальних транспортних систем та з інтероперабельності, сертифікації і безпеки на транспорті. Результати використані при читанні курсів:

«Інфраструктура, телематика та інтероперабельність в інтелектуальних транспортних системах», «Інформаційне забезпечення вантажних і пасажирських перевезень», «Розробка експертних систем» для студентів 5 курсу підготовки спеціалістів і магістрів,

«Дослідження операцій Інтелектуальних Транспортних Систем» для студентів 3 курсу, спеціальність «Програмне забезпечення систем».

Завідувач кафедри "Комп'ютерні  
інформаційні технології", д.т.н., професор

Шинкаренко В.І.

## ДОДАТОК Б

### Характеристики планово-попереджувальної та автоматизованої експлуатації парків стрілочних електродвигунів на основі параметрів поточного стану

У теперішній період експлуатація парків електричних двигунів стрілочних переводів на залізничному транспорті України виконується на основі планово-попереджувального методу [45], причому рівень автоматизації процесів експлуатації – недостатній. Метод недостатньо враховує нерівномірність вичерпання ресурсу окремих систем, має високу суб'єктивну складову, являється досить витратним.

У додатку Б показані деякі діючі форми обліку процесів обслуговування парків ЕД, а саме – структура журналів обліку результатів планового поточного обслуговування стрілочних електричних двигунів, що ведуться на Південно-Західній залізниці. Вони свідчать про актуальність завдань переходу до автоматизованої експлуатації парків ЕД на основі оцінки та прогнозування параметрів поточного стану.

Також у додатку представлена структура моделі для автоматизованої діагностики та експлуатації парків електричних двигунів постійного струму залізничних стрілочних переводів, яка проводиться на основі дистанційного моніторингу та діагностування параметрів поточного стану ЕД [52]. Основні властивості та процедури моделі рис. Б.1, стосовно методик оцінки параметрів поточного стану ЕД, покладені в основу розробок удосконаленої структури (розд. 2 – розд. 3) та функції експлуатації парків стрілочних ЕД, виконаних у дисертації.

Следующая  
Замена  
моторов  
в 2020 году  
МСП - ДП

# 2015 ГОД

ДАТА РЕМОНТА	№/п	ТИП МОТОРА	№ <sup>з</sup> Завода	ГОД ВЫПУСК	V лит	I потр	УЗОЛ м.Ом	R Я	R Л-К	R П-К	ДИАМ на Л-УЗ	ДИАМ на П-УЗ
8.01.15	1	МСП-0,25	17215	1981	160	2,5	500	6	4	4	250	150
8.01.15	2	—	1742	1978	160	2,5	500	6	4	4	250	150
8.01.15	3	—	6172	1990	160	2,5	500	6	4	4	250	150
9.01.15	4	—	3075	1999	160	2,5	500	6	4	4	250	150
9.01.15	5	—	15430	1986	160	2,5	500	6	4	4	250	150
12.01.15	6	—	3216	1982	160	2,5	500	6	4	4	250	150
13.01.15	7	МСП-0,3	501	2007	190	2,1	500	5,8	5,8	5,8		
14.01.15	8	ДП-0,25		2007	160	2,5	500					
14.01.15	9	—		2012	160	2,5	500					
14.01.15	10	—		2012	160	2,5	500					
16.01.15	11	МСП-0,25	12601	1985	160	2,5	500	6	4	4	250	150

(а)

№ строчки	Тип мотора	Номина Роботы якору (ДМ)	Дата проберки	Роботы якору МОН	Подпись ЛН	Дата проберки	Роботы якору МОН	Подпись ЛН	Дата проберки	Роботы якору МОН	Подпись ЛН
№1	МСП-0,25	6,0-7,4	23.08.10	6,5	ЛН	24.02.10	6,5	ЛН	24.03.10	6,4	ЛН
№3	МСП-0,25	6,0-7,4	-	6,2	ЛН	-	6,8	ЛН	-	6,3	ЛН
№5	МСП-0,25	6,0-7,4	-	6,1	ЛН	-	6,7	ЛН	-	6,4	ЛН
№7	МСП-0,25	6,0-7,4	-	6,5	ЛН	-	6,2	ЛН	-	6,5	ЛН
№9	МСП-0,25	6,0-7,4	-	6,1	ЛН	-	6,3	ЛН	-	6,3	ЛН
№11	МСП-0,25	6,0-7,4	-	6,3	ЛН	-	6,4	ЛН	-	6,2	ЛН
№13	МСП-0,25	6,0-7,4	-	6,2	ЛН	-	6,2	ЛН	-	6,2	ЛН
№15	МСП-0,25	6,0-7,4	23.08.10	6,3	ЛН	24.02.10	6,1	ЛН	-	6,1	ЛН
№17	МСП-0,25	6,0-7,4	-	6,4	ЛН	-	6,1	ЛН	24.03.10	6,3	ЛН
№19	МСП-0,25	6,0-7,4	-	6,2	ЛН	-	6,8	ЛН	-	6,2	ЛН
№21	МСП-0,25	6,0-7,4	-	6,3	ЛН	-	6,8	ЛН	-	6,1	ЛН
№23	МСП-0,25	6,0-7,4	-	6,1	ЛН	-	6,3	ЛН	-	6,4	ЛН
№25	МСП-0,25	6,0-7,4	-	6,4	ЛН	-	6,4	ЛН	-	6,2	ЛН

(б)

Рисунок Б.1 – Фрагменты журналу обліку робіт із обслуговування ЕД



Схематично модель автоматизованої технології діагностування двигунів постійного струму і управління деякими процесами експлуатації парку ЕД представлена на рис. Б.2 [52, 65, 69]. Вона заснована на аналізі частотного спектру робочого струму двигуна.

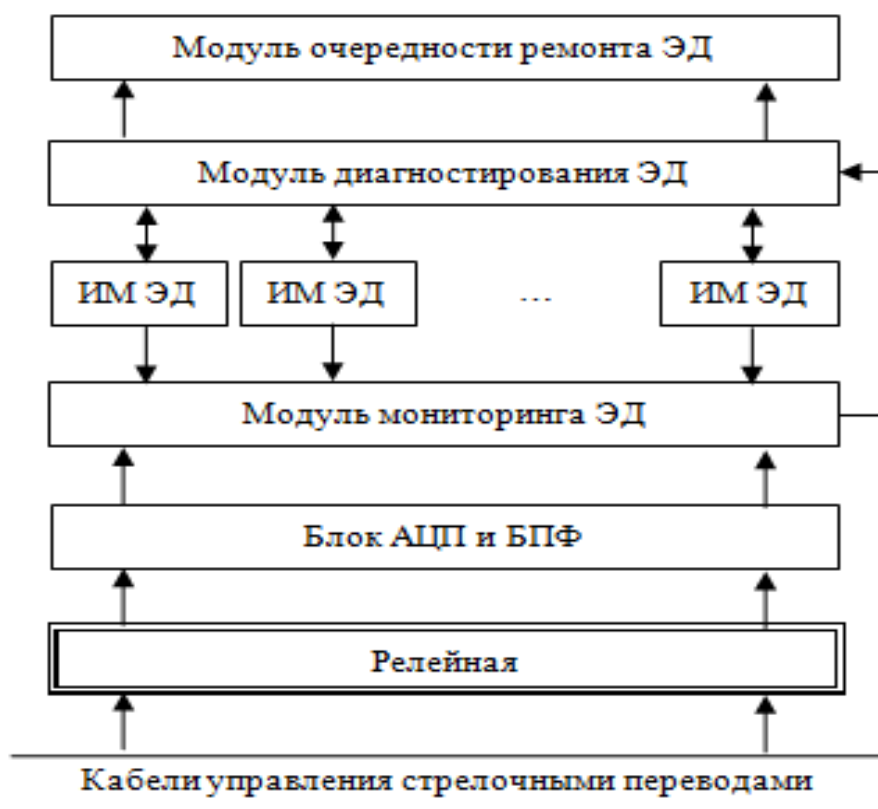


Рисунок Б.2 – Багаторівнева система управління діагностуванням і експлуатацією парку електродвигунів стрілочних переводів

Згідно рис. Б.2 в блоці аналого-цифрового перетворювача (АЦП) реалізується дискретизація струму ЕД. Отримання спектральних характеристик струму виконано за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [84, 85]. Вхідними даними модуля моніторингу ЕД є частотний спектр струму ЕД, розрахований в блоці ШПФ. Для кожного ЕД формується індивідуальна модель (ІМ), яка також зберігає спектральні характеристики справного стану двигуна.

Модуль моніторингу порівнює спектр, отриманий з блоку ШПФ, зі спектром справного стану, прочитаного з відповідної індивідуальної моделі ЕД. При виявленні їх істотних відмінностей виконується модуль діагно-

стування. На виході модуля діагностування отримують оцінки достовірності виявлених несправностей електродвигуна. Ці оцінки зберігаються в ІМ ЕД, формуючи часовий ряд, який використовується для прогнозування технічного стану електродвигуна. Поточний і прогнозований технічний стан кожного ЕД з модуля діагностування передається в модуль черговості ремонту електродвигунів, який дає рекомендації про порядок ремонту ЕД.

## ДОДАТОК В

### Визначення пріоритетів стрілочних електродвигунів на основі методу аналітичних ієрархій для обслуговування парків за параметрами поточного стану

Для визначення та урахування неоднорідності окремих об'єктів інфраструктури і процесу перевезень (технічно та технологічно) через нерівноцінність зв'язків підсистем із рештою елементів інфраструктури (їх призначення, відповідальності, наявних ресурсів ін.) у роботі застосовується процедура Методу Аналізу Ієрархій, МАІ [102], розд. 3.2. Така неоднорідність складових елементів інфраструктури і парку ЕД впливає на реалізацію завдань із визначення раціональної черговості діагностування, їх ремонтів тощо. Постановка відповідних завдань оцінювання пріоритетів, планування та управління парками ЕД можлива лише в умовах автоматизованого управління на основі оцінки параметрів поточного стану ЕД, а також прогнозування їх можливих значень на наступних етапах управління. При експлуатації парків ЕД необхідно ураховувати відмінність процедур контролю параметрів та ремонту двигунів різних типів, часові та вартісні показники, технічну базу ін. Неоднорідність елементів інфраструктури і відповідних ЕД передбачає формування математичних моделей із урахування їх пріоритетів у завданнях планування процесів діагностування і ремонтів, рис. 3.4. Показник і відносної важливості ЕД мають комплексний, багатокритеріальний характер. Вони ураховують вплив ЕД на безпеку і стійкість процесів перевезень тощо.

Метод МАІ – це методологічна основа для вирішення завдань із вибору альтернатив за допомогою їх багатокритеріального рейтингування, в даний час проблематика МАІ стає міждисциплінарним розділом науки.

У Додатку В представлено приклад застосування процедури МАІ для визначення пріоритетів поїздоділянок (у розрахунках – чотирьох) розташування ЕД, відповідно моделі рис. 3.4.

Далі представлено протокол експертизи та розрахунку пріоритетів для чотирьох поїздоділянок на основі моделі рис. 3.4.

**Процедура методу аналітичних ієрархій**  
**Визначення важливості поїздодірянок д1 – д4**

<b>М1 - Пріоритети електродвигунів</b>	<b>Р - Пасажирські перевезення</b>	<b>G - Вантажні перевезення</b>	<b>PM - Приміські перевезення</b>	<b>Нормалізовані ваги</b>
Р - Пасажирські перевезення	1	3	1	0,429
G - Вантажні перевезення	1/3	1	1/3	0,143
PM - Приміські перевезення	1	3	1	0,429
				<b>OC=0,00%</b>

<b>Р - Пасажирські перевезення</b>	категорія поїзда Р	період Р	місце знаходження Р	напруженість ділянки Р	період для відновлення Р	Нормалізовані ваги
категорія поїзда Р	1	1/2	2	1/3	2	0,164
період Р	2	1	3	1/2	3	0,268
місце знаходження Р	1/2	1/3	1	1/4	1	0,087
напруженість ділянки Р	3	2	4	1	4	0,394
період для відновлення Р	1/2	1/3	1	1/4	1	0,087
						<b>OC=2,15%</b>

<b>G - Вантажні перевезення</b>	категорія поїзда G	період G	місце знаходження G	напруженість ділянки G	період для відновлення G	Нормалізовані ваги
категорія поїзда G	1	1	1/2	1/2	1/2	0,125
період G	1	1	1/2	1/2	1/2	0,125
місце знаходження G	2	2	1	1	1	0,250
напруженість ділянки G	2	2	1	1	1	0,250
період для відновлення G	2	2	1	1	1	0,250
						<b>OC=0,00%</b>

<b>PM - Приміські перевезення</b>	категорія поїзда PM	період PM	місце знаходження PM	період для відновлення PM	напруженість ділянки PM	Нормалізовані ваги
категорія поїзда PM	1	3	1/2	2	1	0,222
період PM	1/3	1	1/4	1/2	1/3	0,072
місце знаходження PM	2	4	1	3	2	0,356
період для відновлення PM	1/2	2	1/3	1	1/2	0,128
напруженість ділянки PM	1	3	1/2	2	1	0,222
						<b>OC=1,98%</b>

категорія поїзда Р	ділянка 1	ділянка 2	ділянка 3	ділянка 4	Нормалізовані ваги
ділянка 1	1	1	1/2	1/3	0,140
ділянка 2	1	1	1/2	1/3	0,140
ділянка 3	2	2	1	1/2	0,273
ділянка 4	3	3	2	1	0,446
					<b>ОС=0,92%</b>

період Р	ділянка 1	ділянка 2	ділянка 3	ділянка 4	Нормалізовані ваги
ділянка 1	1	2	2	2	0,400
ділянка 2	1/2	1	1	1	0,200
ділянка 3	1/2	1	1	1	0,200
ділянка 4	1/2	1	1	1	0,200
					<b>ОС=0,00%</b>

місце знаходження Р	ділянка 1	ділянка 2	ділянка 3	ділянка 4	Нормалізовані ваги
ділянка 1	1	1/2	1/2	2	0,198
ділянка 2	2	1	1	3	0,347
ділянка 3	2	1	1	3	0,347
ділянка 4	1/2	1/3	1/3	1	0,107
					<b>ОС=0,92%</b>

напруженість ділянки Р	ділянка 1	ділянка 2	ділянка 3	ділянка 4	Нормалізовані ваги
ділянка 1	1	3	2	2	0,414
ділянка 2	1/3	1	1/2	1/2	0,121
ділянка 3	1/2	2	1	1	0,233
ділянка 4	1/2	2	1	1	0,233
					<b>ОС=0,96%</b>

період для відновлення Р	ділянка 2	ділянка 1	ділянка 3	ділянка 4	Нормалізовані ваги
ділянка 2	1	1/2	1/2	2	0,198
ділянка 1	2	1	1	3	0,347
ділянка 3	2	1	1	3	0,347
ділянка 4	1/2	1/3	1/3	1	0,107
					<b>ОС=0,92%</b>

категорія поїзда G	ділянка 2	ділянка 1	ділянка 3	ділянка 4	Нормалізовані ваги
ділянка 2	1	2	3	1	0,347
ділянка 1	1/2	1	2	1/2	0,198
ділянка 3	1/3	1/2	1	1/3	0,107
ділянка 4	1	2	3	1	0,347
					<b>ОС=0,92%</b>

період G	ділянка 1	ділянка 2	ділянка 3	ділянка 4	Нормалізовані ваги
ділянка 1	1	1/2	1/2	2	0,198
ділянка 2	2	1	1	3	0,347
ділянка 3	2	1	1	3	0,347
ділянка 4	1/2	1/3	1/3	1	0,107
					<b>ОС=0,92%</b>

місце знаходження G	ділянка 1	ділянка 2	ділянка 3	ділянка 4	Нормалізовані ваги
ділянка 1	1	1	2	2	0,333
ділянка 2	1	1	2	2	0,333
ділянка 3	1/2	1/2	1	1	0,167
ділянка 4	1/2	1/2	1	1	0,167
					<b>ОС=0,00%</b>

напруженість ділянки G	ділянка 1	ділянка 2	ділянка 3	ділянка 4	Нормалізовані ваги
ділянка 1	1	2	2	1	0,333
ділянка 2	1/2	1	1	1/2	0,167
ділянка 3	1/2	1	1	1/2	0,167
ділянка 4	1	2	2	1	0,333
					<b>ОС=0,00%</b>

період для відновлення G	ділянка 1	ділянка 2	ділянка 3	ділянка 4	Нормалізовані ваги
ділянка 1	1	2	1/2	1/2	0,198
ділянка 2	1/2	1	1/3	1/3	0,107
ділянка 3	2	3	1	1	0,347
ділянка 4	2	3	1	1	0,347
					<b>ОС=0,92%</b>

категорія поїзда РМ	ділянка 1	ділянка 2	ділянка 3	ділянка 4	Нормалізовані ваги
ділянка 1	1	1	1	2	0,286
ділянка 2	1	1	1	2	0,286
ділянка 3	1	1	1	2	0,286
ділянка 4	1/2	1/2	1/2	1	0,143
					<b>ОС=0,00%</b>

Остання таблиця попарних порівнянь по МАІ

напруженість ділянки РМ	ділянка 1	ділянка 2	ділянка 4	ділянка 3	Нормалізовані ваги
ділянка 1	1	2	2	3	0,414
ділянка 2	1/2	1	1	2	0,233
ділянка 4	1/2	1	1	2	0,233
ділянка 3	1/3	1/2	1/2	1	0,121
					<b>ОС=0,96%</b>

## ДОДАТОК Г

### Приклади та класифікація спектрограм робочих струмів електричних двигунів постійного струму з різними видами несправностей

У додатку подано спектральні характеристики електродвигунів залізничних стрілочних переводів. Види несправностей ЕД визначалися експертом засобами програмно-апаратного комплексу згідно з методикою, зазначеної в [23 – 24, 52]. При цьому електродвигуни перевірялися на стенді, в досвідних перевірках виконувалися праве і ліве обертання з дроселем, праве і ліве обертання без дроселя; проводилися досліди холостого ходу.

На представлених у додатку рисунках спектрограм по осі абсцис відкладається час, а по осі ординат - частота гармонік спектра. На спектрограмі амплітуда гармонік спектру робочого струму ЕД позначається за допомогою кольору: чим більше амплітуда гармоніки, тим ближче колір до червоного. На спектрограмах колірна шкала амплітуд гармонік представлена праворуч.

Інтерпретація спектрограм дозволяє з достатньою достовірністю встановити характеристики його стану, визначити види несправностей. Так для справного електродвигуни моделі МСП-0,25, рис. 1.2, частоти спектрограми мають таке значення (знизу вгору): випадкова незначна подія (подряпина на колекторі, непритерті щітки); квазігармоніка 100 Гц; основна пульсація випрямляча 300 Гц; 2-а гармоніка 600 Гц; швидкісна частота. Таким чином, використання спектрограм забезпечує надійну і ефективну оцінку станів досліджуваних стрілочних електродвигунів.

Представлені нижче рисунки спектральних характеристик стрілочних електродвигунів [23, 24, 28, 29] засвідчують значні можливості дистанційного моніторингу ЕД, автоматичного пошуку типових несправностей

на основі накопичення даних процесів експлуатації, відбору еталонів і прогнозування станів ЕД парку.

На рис. Г.1 показано спектрограму електродвигуна моделі ДП-0,18 з коротким замиканням секцій якоря.

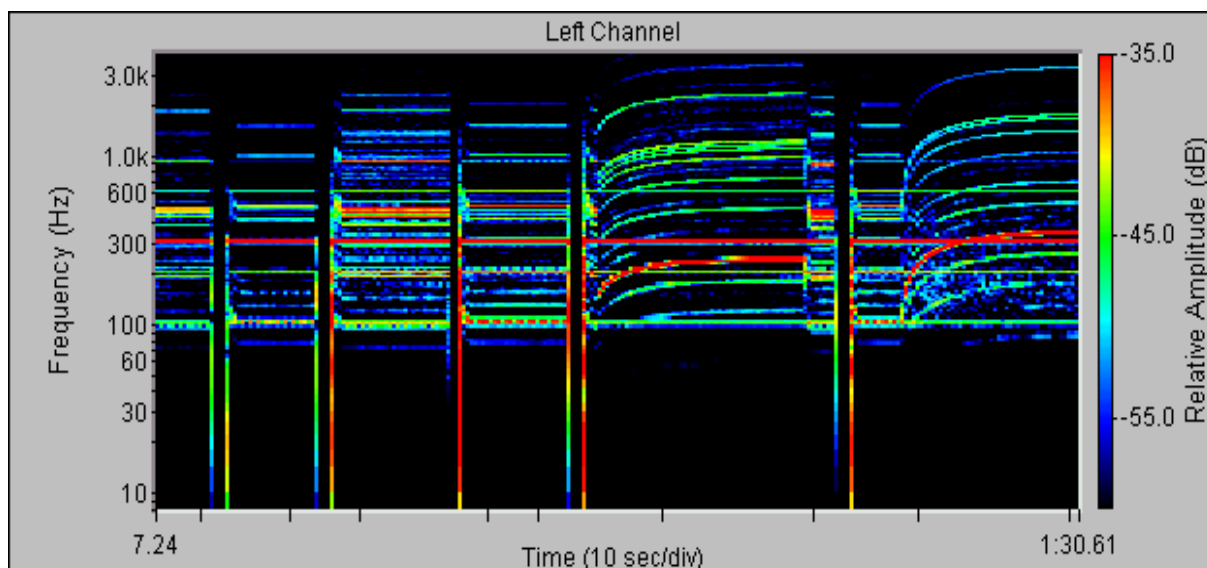


Рисунок Г.1 Спектрограма електродвигуна моделі ДП-0,18 з діагностованим коротким замиканням секцій якоря

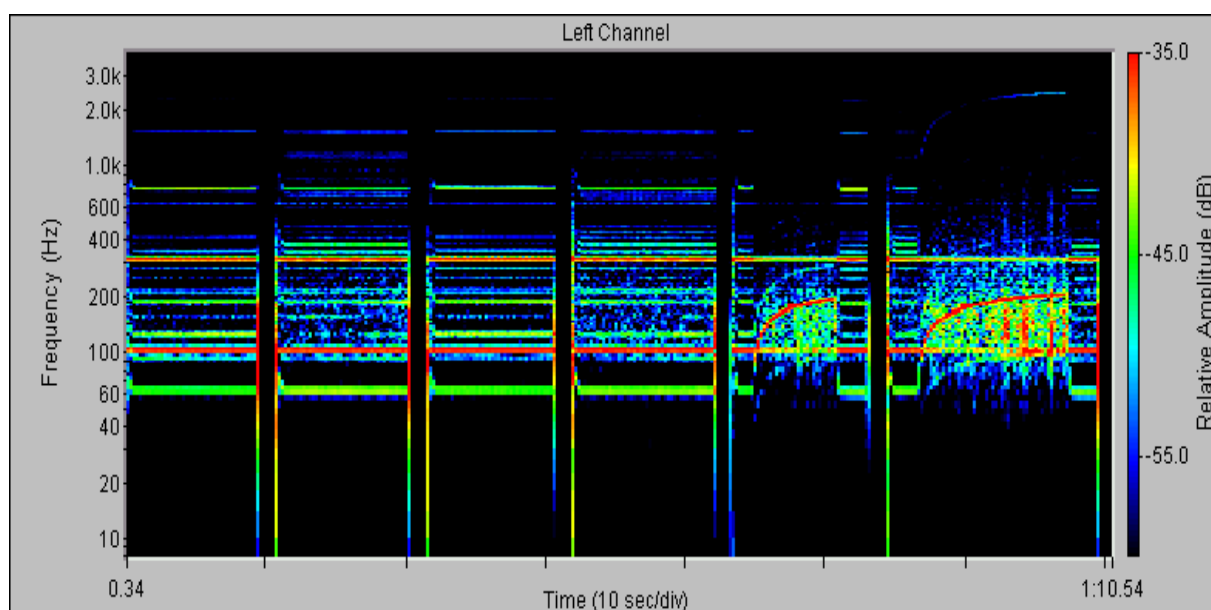


Рисунок Г.2 Спектрограма електродвигуна моделі МСП 0,25 з діагностуванням двох обривів та коротким замиканням секцій якоря



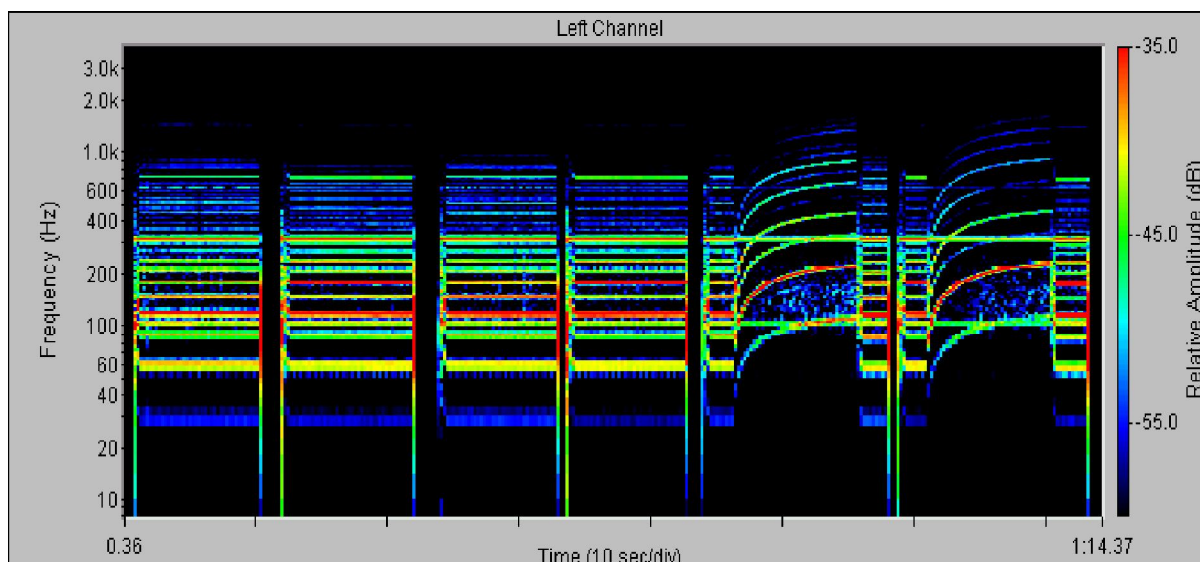


Рисунок Г.3 Спектрограма електродвигуна моделі МСП 0,25 з підряд двома обривами секцій якоря

У роботі [60] відзначається, що засобами розрахунків на ЕОМ також виявляється це одне місце обриву і коротке замикання секцій якоря.

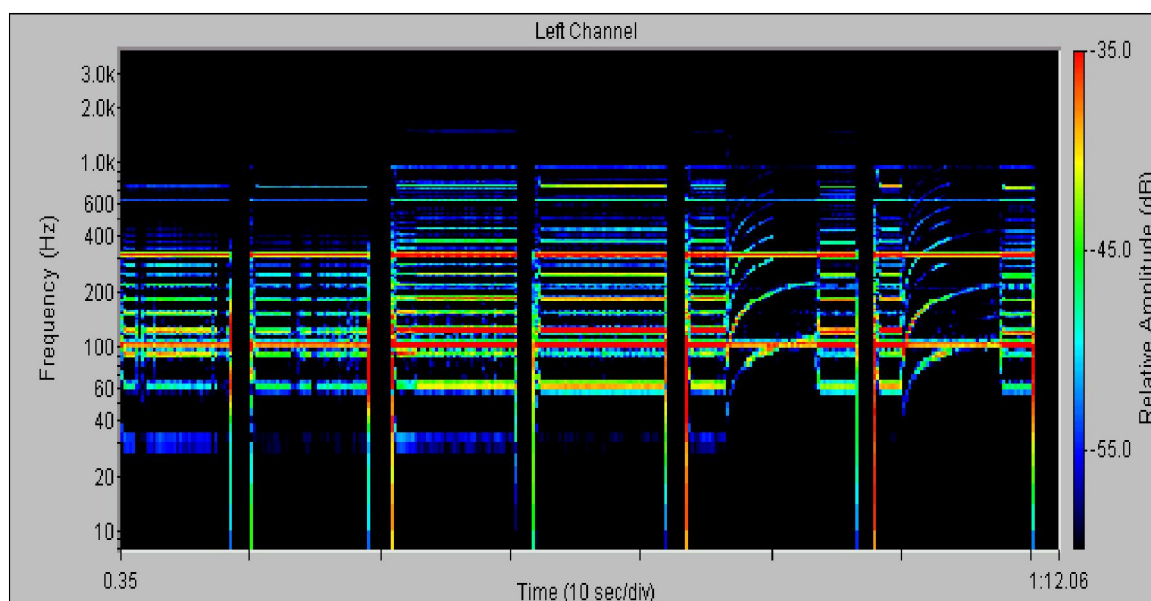


Рисунок Г.4 Спектрограма електродвигуна моделі МСП 0,25 з одним обривом секцій якоря, одною розпайкою та КЗ пластин колектора

Повна характеристика станів ЕД, представлено на рис. Г.4, отримана засобами ЕОМ. Методом трансформатору визначено один обрив, а інші несправності – не встановлюються.

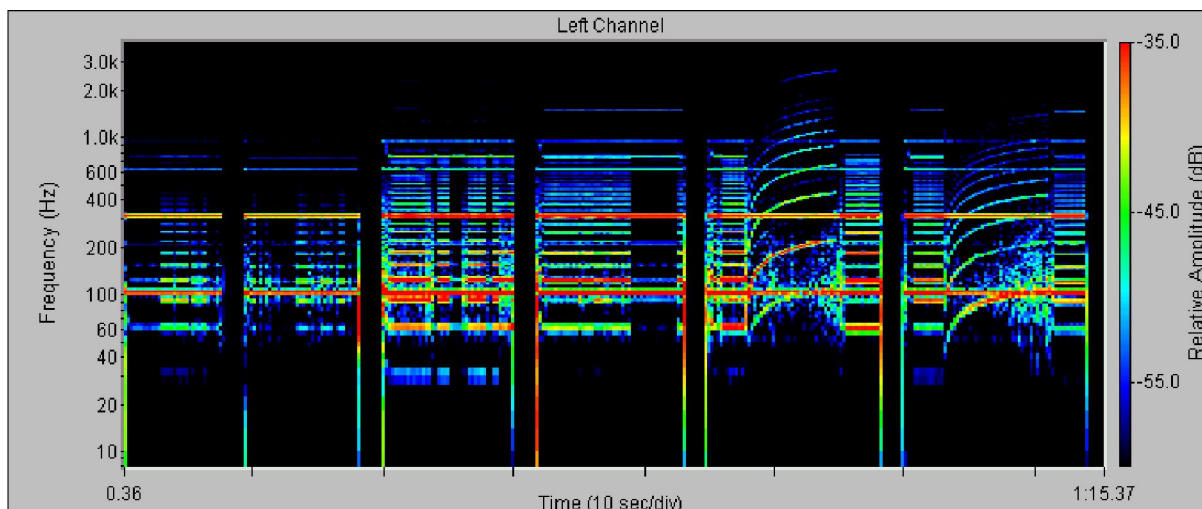


Рисунок Г.5 Спектрограма електродвигуна моделі МСП 0,25 з двома обривами секцій якоря та КЗ пластин колектора що періодично зникають

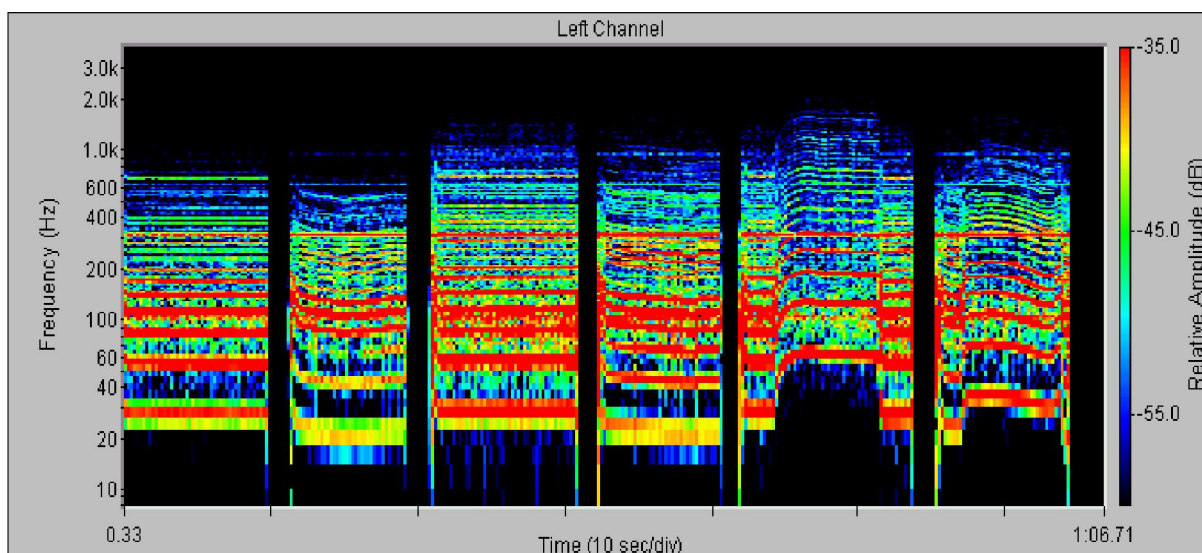


Рисунок Г.6 Спектрограма електродвигуна моделі МСП 0,25 з чотирма обривами та двома КЗ секцій якоря і зломом валу з боку колектора

Рис. Г.6 демонструє значні можливості щодо діагностування комплексних несправностей стрілочних ЕД на основі спектрального аналізу їх робочих струмів.

## ДОДАТОК Д

### Оцінка адекватності моделей прогнозування параметрів об'єктів парку стрілочних електродвигунів

#### 1.1. Методика формування вихідних даних на основі індивідуальних моделей електричних двигунів

У розд. 3.2 подана загальна схема процедури прогнозування на основі МЛЕ, що дозволяє оцінювати точність та достовірність результатів оцінювання очікуваних станів деякого ЕД. Зокрема вона передбачає виконання наступних етапів.

1. Відбір множини «подібних»  $\{\bar{X}_{ЕДk}\}$  за даними індивідуальної моделі контрольованого ЕД, використовуючи інформаційні моделі (3.1), або кластери моделі Кохонена для парку ЕД.

2. Формування на основі  $\{\bar{X}_{ЕДk}\}$  множини варіантів прогнозних за МЛЕ значень заданого вихідного параметра, що використовується для визначення статистичних оцінок параметрів прогнозування за МЛЕ.

3. Формування регресійної моделі  $\Delta Y(\bar{X}) = F(Y_{МЛЕ}(\bar{X}))$  залежності відхилень параметрів станів ЕД від прогнозів за БЛЕ з використанням  $\{\bar{X}_{ЕДk}\}$ . При чому точність регресійної моделі приймається за точність прогнозів на основі МЛЕ з використанням набору  $\{\bar{X}_{ЕДk}\}$ .

4. Використання моделі регресії для прогнозування оцінок значень параметрів станів контрольованого ЕД на основі набору  $\{\bar{X}_{ЕДk}\}$  та МЛЕ.

Головна гіпотеза щодо оцінки адекватності моделей екстраполяційного прогнозування (3.2) – (3.5) визначається наступним. Для розрахунків статистичних параметрів точності екстраполяційних моделей МЛЕ, функцій МЛЕ правил (3.13), необхідно сформувати відповідну статистичну базу. Це виконується шляхом розрахунків точності процедури МЛЕ при прогнозуванні відомих параметрів ЕД  $X_{ED}^{(k)} \in \{\bar{X}_{EDk}\}$  на основі інших шаблонів –  $\{\bar{X}_{EDk}\} / X_{ED}^{(k)}$ . Тобто досліджується можливість представлення параметрів деякого (кожного) ЕД  $X_{ED}^{(k)}$  через інші. Мотивація цього в тому, що формування  $\{\bar{X}_{EDk}\}$  на основі процедур «подібності» залежить від багатьох нечітко визначених умов, значить входження конкретного ЕД в зазначену множину може бути випадковим. Якщо ж величини прогнозованих параметрів достатньо узгоджені з дійсними, відомими для  $\{\bar{X}_{EDk}\}$ , тоді така множина дозволяє виконувати прогнози наступних станів ЕД для процесів експлуатації з такою ж достовірністю, як і для всіх  $X_{ED}^{(k)} \in \{\bar{X}_{EDk}\}$ . Комбінуючи різні набори об’єктів, на основі яких виконуються процедури МЛЕ, можливо сформувати необхідну кількість даних для статистичної оцінки точності прогнозів (діапазонів значень з заданим рівнем значущості, у роботі –  $\alpha = 0,1$ ).

Розглянемо зазначені етапи докладно, використовуючи для конкретності дані табл. 3.2, варіанти В.2. Відбір «подібних» ЕД (далі  $X_{(T)EDk}^s$ ) для множини  $\{\bar{X}_{EDk}\}$  реалізують співставляючи його ІМ із всією множиною моделей парку (3.1) на всіх попередніх контрольованих етапах експлуатації ( $t \leq T$ ). При цьому у якості елементів множини  $\{\bar{X}_{EDk}\}$  виступають елементи кластеру карти Кохонена, до якого належить  $X_{(T)EDk}^s$ . Також для відбору множини  $\{\bar{X}_{EDk}\}$  можуть застосовуватися правила вигляду (3.9), в яких у правій частині використовуються нечіткі величини: якщо індекс достовірності даних ЕД  $X_{(T)EDk}^s$  вище заданої границі, він включається до множини  $\{\bar{X}_{EDk}\}$ . Результати вище зазначеної процедури відбору представлені у табл. Д.1(варіанти В2.1 – В2.4).

Результати формування на основі ЕД  $\{\bar{X}_{ЕДk}\}$  множини варіантів прогнозних за МЛЄ значень заданого вихідного параметра також представлено у табл. Д.1 (стовпці  $Y_{МЛЄ}$  та  $\Delta_Y$ ). При цьому у стовпці  $N_{вар}$  указані номери шаблонів ЕД, відносно яких реалізується процедура прогнозування МЛЄ (3.5), у стовпці  $Y_{oute}$  вказаний номер ЕД  $\{B2.1 - B2.4\}$  для якого розраховуються прогнозні значення, а у стовпці  $\Delta_Y$  подано величину відхилення даних за МЛЄ від відомих значень, стовпець  $Y_{oute}$ .

Таблиця Д.1

Вихідні дані для прогнозування параметрів станів ЕД на основі моделі лінійної екстраполяції

$N_{вар}$	$Y_{oute}$	$Y_{МЛЄ}$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$\Delta_Y$	$N$
B2,1	$Y_1(KЗПК) \approx 2\bar{0}$		30	40	125	75		
B2,2	$Y_1(KЗПК) \approx 3\bar{0}$		10	30	145	95		
B2,3	$Y_1(KЗПК) \approx 1\bar{4}$		20	35	175	115		
B2-4	$Y_1(KЗПК) \approx 0$		35	24	160	94		
1-2	$Y_{мле}(3)$	35	20	35	175	115	-21	1
	$Y_{мле}(4)$	28	35	24	160	94	-28	2
1-3	$Y_{мле}(2)$	10	10	30	145	95	20	3
	$Y_{мле}(4)$	16,7	35	24	160	94	-16,7	4
1-4	$Y_{мле}(2)$	5,6	10	30	145	95	24,4	5
	$Y_{мле}(3)$	6,4	20	35	175	115	7,6	6
2-3	$Y_{мле}(1)$	-26,2	30	40	125	75	46	7
	$Y_{мле}(4)$	-37,2	35	24	160	94	37,2	8
2-4	$Y_{мле}(1)$	5,96	30	40	125	75	14	9
	$Y_{мле}(3)$	27,6	20	35	175	115	-13,6	10
3-4	$Y_{мле}(1)$	3,6	30	40	125	75	16,4	11
	$Y_{мле}(2)$	14,9	10	30	145	95	15	12
1-2-3	$Y_{мле}(4)$	-38,4	35	24	160	94	38,4	13
1-2-4	$Y_{мле}(3)$	28,47	20	35	175	115	-14,5	14
2-3-4	$Y_{мле}(1)$	-29,1	30	40	125	75	49,1	15

Для регресійного моделювання дані табл. Д.1 необхідно попередньо опрацювати, упорядкувати (за параметром  $Y_{МЛЄ}$ ), видалити зайві значення,

узагальнити, щоб забезпечити можливість отримання результату з встановленим рівнем значущості  $\alpha=0,1$ . На рис. Д.1, рис. Д.2 та ц табл. Д.2 представлено упорядковані та узагальнені дані, що використовуються для формування лінійної регресійної моделі із наступною структурою

$$\Delta Y (\bar{X}) = a + b * Y_{МЛЕ}(\bar{X}). \quad (Д.1)$$

На основі моделі (Д.1) оцінюються можливі контрольовані відхилення результатів розрахунку за МЛЕ  $Y_{МЛЕ}$ .

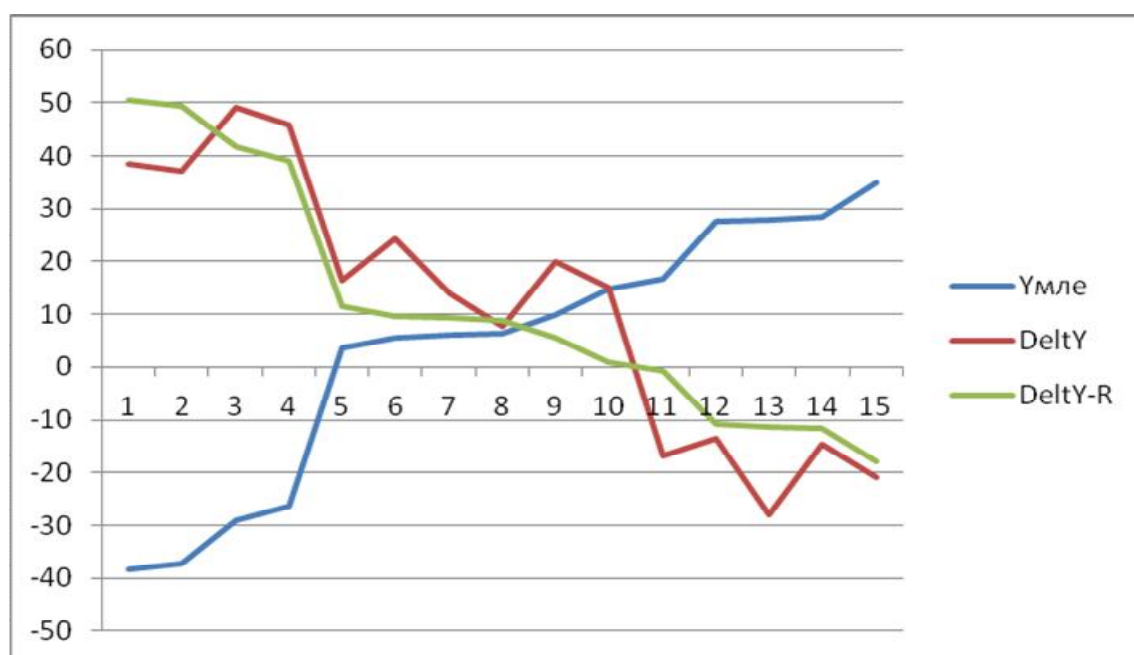


Рис. Д.1 Упорядковані дані (табл. Д.1) для регресійного аналізу процедури прогнозування станів стрілочних електродвигунів

Таблиця Д.2

Вихідні дані для прогнозу станів ЕД на основі прототипів  $\{\bar{X}_{ЕДк}\}$ .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ymle	-37,2	-26,2	3,6	5,96	6,4	10	14,9	16,7	28,5	35
DeltY	37,2	46	16,4	14	7,6	20	15	-16,7	-14,5	-21

## Д.2 Перевірка адекватності екстраполяційної моделі прогнозування параметрів станів стрілочних електродвигунів

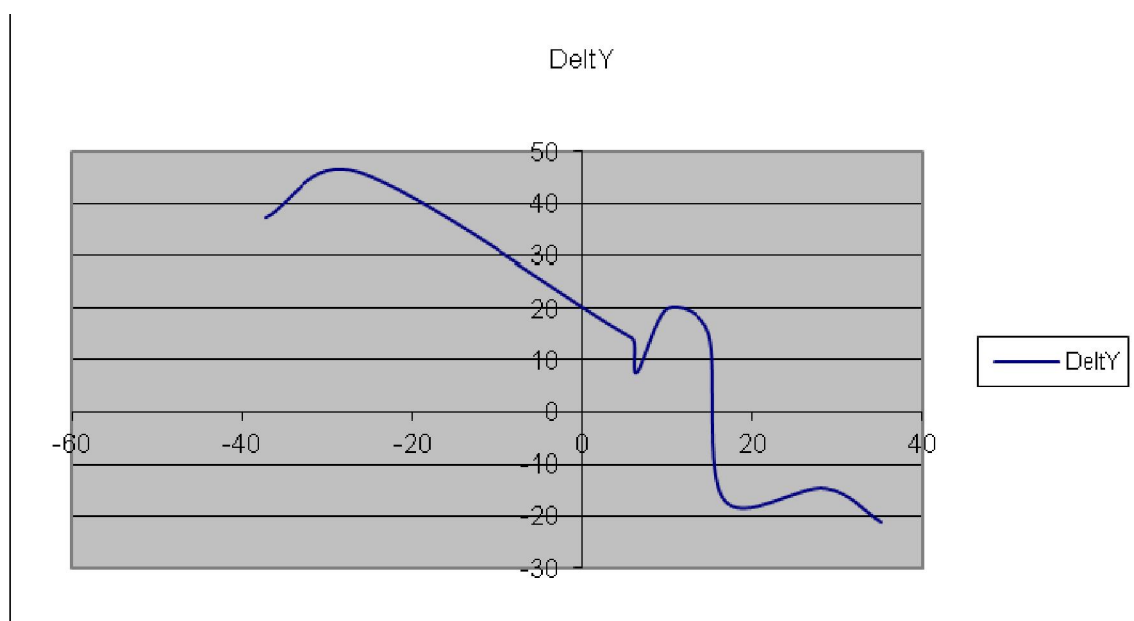


Рис. Д.2 Графік вихідних даних для формування регресійної моделі прогнозування станів ЕД

На основі методу найменших квадратів [Статист] отримано наступну модель регресії табл. Д.2, при цьому розраховані також незміщена дисперсія помилок  $S_E^2(\Delta Y)$  та її середнє квадратичне відхилення  $\sigma_E(\Delta Y)$

$$\Delta Y(\bar{X}) = 15,56 - 0,9 * Y_{MLE}(\bar{X}). \quad S_E^2(\Delta Y) = 113,9, \quad \sigma_E(\Delta Y) = 10,7. \quad (\text{Д.2})$$

Графік моделі регресії для рис. Д.2 наведено на рис. 3.10.

Критерієм, що характеризує щільність зв'язку між залежною змінною  $y$  і незалежною  $x$ , є коефіцієнт кореляції [76], який є відносною мірою зв'язку між двома змінними (Д.1). Розрахункові значення подано в табл. Д.2. Якщо коефіцієнт кореляції спрямований за абсолютною величиною до 1 ( $r_{yx} \rightarrow \pm 1$ ), то це свідчить про наявність міцного лінійного зв'язку, інакше ( $r_{yx} \rightarrow 0$ ) – такий зв'язок відсутній. Як відомо, коефіцієнта кореляції це

$$r_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} . \quad (\text{Д.3})$$

Значення коефіцієнта кореляції табл. Д.2 дорівнює

$$r_{yx} = \frac{4000}{(4464 * 4495)^{0,5}} = 0,893.$$

Частина дисперсії, яка пояснюється регресією, називається коефіцієнтом детермінації й позначається  $R^2$ . Оскільки коефіцієнт детермінації є відносною мірою варіації у під впливом незалежної змінної  $x$ , він може використовуватися як критерій адекватності моделі. Коефіцієнт детермінації завжди позитивний і перебуває в межах від нуля до одиниці. Якщо його значення близьке до нуля, то модель вважається неадекватною, якщо ближче до одиниці – адекватною. Коефіцієнт детермінації дорівнює квадрату коефіцієнта кореляції.

$$R^2 = r_{yx}^2 . \quad (\text{Д.4})$$

У нашому випадку коефіцієнт детермінації дорівнює  $R^2 = (0,893)^2 = 0,797$ , тобто дійсно існує досить щільний лінійний зв'язок між характеристиками табл. Д2.

Щоб однозначно визначити адекватність моделі, скористаємося критерієм Фішера [Фішер]. Розрахункове значення F- відношення дорівнює

$$F_{(k-1, n-k)} = \frac{R^2 / (k-1)}{(1-R^2) / (n-k)} , \quad (\text{Д.5})$$

де  $n$  – кількість спостережень;  $k$  – кількість параметрів моделі.

Для перевірки моделі на адекватність визначимо число ступенів свободи. Зв'язок між аналізованими факторами лінійний, тому рівняння простої лінійної регресії матиме два параметри  $k=2$ , число ступенів свободи до-



рівнює  $\gamma_1 = 2 - 1 = 1$  і  $\gamma_2 = 10 - 2 = 8$ , а значення F-відношення складає

$$F = \frac{0,797}{1 - 0,797} \cdot \frac{8}{1} = 31,4.$$

За таблицею критичних значень F-розподілу Фішера [76] визначаємо, що при вказаних ступенях свободи й рівні значущості  $\beta = 0,05$  (ризик помилки рівний  $100 - 95 = 5$  %) критичне значення F-критерію –  $F_{1,8}(0,05) = 5,32$ , тобто критичне значення F-критерію менше за розрахункове, а отже, побудовану модель можна вважати адекватною. Виходячи з приведених розрахунків, критерій Фішера на рівні значущості  $\beta = 0,05$  підтверджує адекватність розробленої моделі (Д.1), (Д.2) [76, 99].

Розглянемо питання щодо визначення довірчих границь для значень вихідних параметрів прогнозування на основі МЛЕ, в яких з встановленою довірчою імовірністю буде знаходитися значення результату за БЛЕ. Для цього використовується дисперсія значень залежної змінної  $\Delta Y (\bar{X})$  (Д.1), (Д.2), яка визначається на основі дисперсії вихідних параметрів [76]. Для лінійної трендової моделі (Д.1) дисперсія вихідного параметру  $\Delta Y (\bar{X})$  розраховується наступним чином

$$S_Y^2 = S_E^2(\Delta Y) \left[ \frac{1}{n} + \frac{(t^{pez} - \bar{t})^2}{\sum (t - \bar{t})^2} \right]. \quad (Д.6)$$

В (Д.6) величина незміщених перешкод  $S_E^2(\Delta Y)$  (Д.2) визначена у (Д.2). Знаючи дисперсію показника  $\Delta Y (\bar{X})$ , визначають довірчі інтервали для середніх прогнозованих значень наступним чином:

$$\Delta Y (\bar{X}) \pm t_\alpha(k) S_Y, \quad (Д.7)$$

де  $t_\alpha(k)$  - статистика за критерієм Стьюдента,  $\alpha$  – рівень значущості, яких встановлюється при аналізі,  $k = n - 2$ , являється кількістю ступенів свободи

вибірки. При невеликих відхиленнях  $t^{pe2}$  від середніх значень прогнозованого параметра довірчі інтервали для середніх прогнозованих та індивідуальних прогнозованих значень не сильно відрізняються [76]. Так для  $\alpha=0,1$  і кількості спостережень  $n=10$ , табл. Д.2,  $t_\alpha(k)=1,81$ . На основі (Д.7) отримано  $t_\alpha(k)S_Y=4,77*1,81=8,64$ .

Рахуючи, що загальна дисперсія зв'язана з коливаннями вибіркової середньої та варіюванням індивідуальних значень процесу навколо середнього, тобто складає  $S_E^2(1+1/n)$ , визначають довірчі інтервали для прогнозної оцінки у вигляді [76, стор. 78]

$$\Delta'Y (\bar{X}) \pm t_\alpha(k)S_Y\sqrt{1+1/n}. \quad (\text{Д.8})$$

Приклад розрахунків показує процедуру і встановлює достовірність моделі прогнозування на основі даних методу лінійної екстраполяції (3.2) – (3.5), а також адекватність моделей (3.9), (3.17) Такагі-Сугено, які використовуються для планування завдань управління процесами експлуатації парків стрілочних електродвигунів.