

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГАЙДЕНКО ОЛЕСЬ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 004.891.3

ДИСЕРТАЦІЯ
КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНІ ЗАСОБИ ОПРАЦЮВАННЯ ПЕРВИННИХ
ДАНИХ МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦІ

Спеціальність 05.13.05 – «Комп'ютерні системи та компоненти»

Галузь знань 12 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Стасюк Олександр Іонович,
доктор технічних наук, професор

Київ - 2019

АНОТАЦІЯ

Гайденко О.С. Комп'ютерно-орієнтовані засоби опрацювання первинних даних моніторингу та інтелектуалізації процесів електропостачання залізниці. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти». – Державний університет інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2019.

Проблема різкого подорожчання енергоресурсів та необхідності зменшення шкідливих викидів у результаті їх видобутку та споживання зачепила весь світ, зокрема на сьогоднішній день вона актуальна й для України. Пошук шляхів її вирішення в Європі та США привів до створення програм розвитку електроенергетики як інтелектуальної системи з розподіленою структурою генерації, що вилилися в концепцію з загальноновизнаною назвою Smart Grid, технології та концептуальні рішення якої розкривають можливості до інтелектуалізації тягового електропостачання залізниць України для підвищення їх надійності та швидкості відновлення працездатності у разі настання аварійної ситуації, мінімізації витрат на закупівлю електроенергії та експлуатацію обладнання, що з урахуванням особливостей та потреб вітчизняної системи електропостачання потребує синтезу комп'ютерно-орієнтованих методів реєстрації та обробки первинних даних, мінімізації плати за спожиту електроенергію, пошуку оптимальних архітектур комп'ютерних систем для роботи в умовах поставлених завдань.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної задачі синтезу комп'ютерно-орієнтованих засобів мінімізації плати за спожиту електроенергію залізницею та розробки засобів опрацювання первинних даних у рамках інтелектуалізованої інформаційної системи, побудованої на принципах єдиного інформаційного простору.

У дисертаційній роботі на підставі проведеного аналізу залізничного транспорту як об'єкта моніторингу й управління визначено чинники, які потрібно враховувати при моделюванні процесів, що протікають у системі тягового електропостачання запропоновано модель інформаційних потоків моніторингу електроенергетичної системи, інтелектуалізовану інформаційну систему керування електропостачанням залізничного транспорту та її модифіковану архітектуру, відповідно концепції Smart Grid та єдиного інформаційного простору, орієнтовану на збір інформації та раціональне використання пропускної спроможності каналів зв'язку. Розроблено диференційні математичні методи визначення вичерпної інформативності первинних даних моніторингу динамічних процесів нештатних режимів функціонування електропостачання залізничного транспорту як основу формування нових знань для оптимізації електроспоживання та створення інтелектуальних енергозберігаючих технологій. Розроблено методи гармонічного аналізу первинних даних для визначення окремих гармонічних складових в області диференційних зображень. Проведено аналіз методів прогнозування та комп'ютерне моделювання нейронної мережі для прогнозу електроспоживання у програмному пакеті Neural Network Toolbox, що показало достатні результати для їх використання. Розроблено та досліджено комп'ютерно-орієнтовані математичні методи використання комерційних тарифів оплати електроенергії на залізничному транспорті, які дають змогу оцінити ефективність застосування однозонного, двозонного та тризонного тарифів оплати електроенергії, розраховувати витрати на закупівлю електроенергії на тягу за періодами часу та граничні обсяги споживання у заданих періодах, при яких перехід на закупівлю електроенергії за диференційованим тарифом економічно вигідний. Розроблено математичну модель для опису тривалості руху потяга через періоди дії тарифних зон диференційованого тарифу, під час яких він здійснює рух, на основі чого розроблено продукційну модель та математичні методи для економії коштів при оплаті електроенергії залізницею згідно з тризонним диференційованим тарифом шляхом автоматизованої зміни розкладу руху поїздів.

Ключові слова: опрацювання інформації, комп'ютерні системи, моніторинг, інтелектуалізація, формалізація процесів, організація архітектури комп'ютерної системи, первинні системні перетворення даних.

ANNOTATION

O. S. Haidenko. Computer-oriented means of monitoring primary data processing and railways electrical supply intellectualization. – Manuscript copyright.

The thesis for degree of Candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.13.05 "Computer systems and components". State University Infrastructure and Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The problem of a sharp rise in prices of energy resources and the need to reduce harmful emissions as a result of their extraction and consumption affected the whole world, in particular, today it is relevant for Ukraine as well. The search for ways to solve it in Europe and the United States has led to the creation of programs for the development of electricity as an intelligent system with a distributed generation structure, which resulted in the concept with the generally accepted name Smart Grid, technologies and conceptual solutions of which reveal the possibilities for intellectualizing the Ukraine railways traction power supply to increase their reliability and the rate of recovery in the event of an emergency, minimizing the cost of purchasing electricity and operating equipment, which, taking into account the specifics and needs of the national electricity supply system requires synthesis of computer-based methods for recording and processing the raw data, minimization of payment for consumed electricity, search of computer systems optimal architectures for work in the conditions of the tasks.

The dissertation is devoted to actual scientific and technical task of synthesis of computer-oriented methods of minimizing the payment for consumed electricity by railroad and developing tools for processing the raw data within the intelligent information system based on the principles of common information space.

Factors, that need to be taken into account when simulating the processes occurring in the traction power system are determined based on the analysis of railway transport as an

object of monitoring and management in the thesis. The model of information streams of monitoring of the electric power system, intellectualized information system of control of the railway transport electric power supply and its modified architecture, according Smart Grid concepts and a common information space, oriented on information gathering and rational use of communication channels bandwidth are proposed on the basis of the conducted researches. Differential mathematical methods for determining the exhaustive informativeness of the monitoring primary data of dynamic abnormal processes of railway transport electric power supply functioning as the basis for formation of new knowledge for power consumption optimization and intelligent energy-saving technologies creation are developed. Methods of harmonic analysis of primary data for the determination of individual harmonic components in the field of differential images are developed. The analysis of the forecasting methods and computer simulation of the neural network model of the electricity consumption forecast is carried out in the software package Neural Network Toolbox. Computer simulation has shown sufficient results for their use. The computer-oriented mathematical methods of the commercial tariffs use for the electric energy payment in railway transport are developed and investigated, which makes it possible to evaluate the efficiency of single-zone, dual-zone and three-zone tariffs application for electricity payment, calculate the cost of purchasing electricity for traction over time periods and the limiting volumes of electricity consumption in given periods, during which the transition to the purchase of electricity at a differentiated tariff is economically viable. The mathematical model for describing the duration of the train movement through the periods of validity of the tariff zones of the differentiated tariff, during which it carries is developed. On the basis of which a production model and mathematical methods to save money when paying electricity by rail according to the three-zone differentiated tariff by automated change of the train timetable are developed.

Keywords: processing information, computer systems, monitoring, intellectualization, formalization of processes, organization of computer system architecture, primary system data transformations.

Список публікацій за темою дисертації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Гайденко О. С. Методологічні концепції розвитку інформаційних технологій оперативного керування тяговими електромережами / О. С. Гайденко // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2014. – Вип. 25. – С. 153-161.
2. Гайденко О. С. Методи прогнозування електроспоживання тяговими підстанціями залізниці / О. С. Гайденко // Моделювання та інформаційні технології. – 2015. – Вип. 75. – С. 49-56.
3. Гайденко О. С. Комп'ютерно-орієнтована математична модель оцінки ефективності тарифної системи оплати за спожиту електроенергію залізницею / О. С. Гайденко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал. – 2016. – № 4. – С. 10-14. – ISSN 1681-4886.
4. Гайденко О. С. Інтелектуальна обробка баз знань господарства електропостачання залізниць / О. С. Гайденко // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2016. – Вип. 28. – С. 147-153.
5. Гайденко О. С. Оптимізація графіка руху потяга для використання тризонного диференційованого тарифу оплати спожитої електроенергії / О. С. Гайденко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал. – 2016. – № 5. – С. 46-50. – ISSN 1681-4886.
6. Гайденко О. С. Сучасні тенденції та основні методи інтелектуального аналізу первинних даних / О. С. Гайденко // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія : Транспортні системи і технології. – 2016. – Вип. 29. – С. 184-188.
7. Гайденко О. С. Математичні моделі та методи адаптації графіка руху потягів до оплати спожитої електроенергії на тягу за комерційним тарифом / О. С. Гайденко // Науковий журнал «Електрифікація транспорту». – 2016. – № 12. – С. 8-11. – ISSN 2307-4221.

8. Гайденко О. С. Особливості комп'ютерного моніторингу, аналізу та управління технологічними процесами електропостачання залізниць / О. С. Гайденко // Моделювання та інформаційні технології. – 2016. – Вип. 77. – С. 82-88.

9. Гайденко О. С. Організація комп'ютерної архітектури інтелектуального керування електропостачанням Укрзалізниці / О. С. Гайденко // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2017. – Вип. 30. – С. 221-225.

10. Гайденко О. С. Характерні особливості моделювання системи та процесів тягового електропостачання залізниці як об'єкта моніторингу та керування / О. С. Гайденко, Г. М. Голуб // Моделювання та інформаційні технології. – 2017. – Вип. 79. – С. 42-48.

11. Гайденко О. С. Прогнозування спожитої електроенергії методами нейромережевого моделювання / О. С. Гайденко, Г. М. Голуб // Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології». – 2018. – Вип. 31. – С. 196-201.

12. Гайденко О. С. Експериментальні дослідження комп'ютерно-орієнтованих методів мінімізації плати за спожиту електроенергію / О. С. Гайденко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал. – 2018. – № 4. – С. 30-34. – ISSN 1681-4886.

13. Стасюк О. І. Диференційні моделі та комп'ютерно-орієнтовні методи інтелектуалізації процесів визначення інформативності параметрів режимів інтелектуальних мереж електропостачання залізниць / О. І. Стасюк, О. С. Гайденко, Л. Л. Гончарова // Науковий журнал «Електрифікація транспорту». – 2018. – № 15. – С. 75-83. – ISSN 2307-4221.

14. Гайденко О. С. Модель інтелектуальної інформаційної системи керування електропостачанням залізниці // О. С. Гайденко, Г. М. Голуб / Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – 2018. – Вип. 32-33. – С. 96-101. – ISSN 2617-9040.

15. Кульбовський І. І. Моделювання інформаційних потоків комп'ютерного моніторингу мереж електропостачання транспорту // І. І. Кульбовський, Г. М. Голуб, О. С. Гайденко / *Металургійна та гірничорудна промисловість*, 2018. – №4 (313). – С. 94-98.

Список публікацій за темою дисертації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

16. Гайденко О. С. Перспективи інтелектуалізації системи електропостачання залізниці / О. С. Гайденко // *Збірник тез науково-практичної конференції «Розвиток науки і техніки на залізничному транспорті»*. – К.: ДЕТУТ, 2015. – С. 21.

17. Гайденко О. С. Прогнозування електроспоживання залізниці / О. С. Гайденко // *Збірник тез науково-практичної конференції «Залізниця: вчора, сьогодні, завтра» XLVII Державного економіко-технологічного університету транспорту*. – К.: ДЕТУТ, 2016. – С. 72-73.

18. Гайденко О. С. Інтелектуальна обробка баз знань господарства електропостачання залізниць / О. С. Гайденко // *Проблеми економіки и управління на железнодорожном транспорте. – ЭКУЖТ 2016: Материалы XI Международной научно-практической интернет-конференции*. – К.: ГЭТУТ, 2016. – С. 7-8.

19. Гайденко О. С. Особливості сучасних функцій комп'ютерного моніторингу, аналізу та управління технологічними процесами електропостачання / О. С. Гайденко // *Збірник тез XLVIII Науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів, магістрів і спеціалістів «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки» Державного економіко-технологічного університету транспорту*. – К.: ДЕТУТ, 2017. – С. 14-16.

20. Голуб Г. М. Методологічні аспекти синтезу інформаційно-керуючих систем. Дослідження режимів електричних мереж / Г. М. Голуб, О. С. Гайденко // *V Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління»: матеріали конференції*. – Луцьк: 2017. – С. 167-171.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	12
ВСТУП	13
РОЗДІЛ 1	
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ КОМП'ЮТЕРНИХ АРХІТЕКТУР МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦІ	19
1.1. Дослідження мережі тягового електропостачання залізниці як об'єкта моніторингу та керування	19
1.2. Аналіз провідних напрацювань інтелектуалізації електропостачання та дослідження можливості впровадження їх технологічних рішень у мережу тягового електропостачання	27
1.2.1. Сучасні засоби забезпечення процесів збору інформації, що характеризує режими функціонування об'єктів системи електропостачання	29
1.2.2. Функціональні особливості керування системою електропостачання на основі сучасних засобів моніторингу й аналізу первинних даних	31
1.3. Модель інформаційних потоків комп'ютерного моніторингу мережі електропостачання	35
1.4. Інтелектуалізована інформаційна система керування електропостачанням залізниці	40
1.5. Організація комп'ютерної архітектури інтелектуалізованого керування електропостачанням	45
1.6. Висновки до розділу 1	51
РОЗДІЛ 2	
СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ	53
2.1. Методи інтелектуальної обробки первинних даних	53

	10
2.2. Аналіз основних програмних засобів опрацювання баз знань	59
2.3. Аналіз методів автоматизації оперативного та короткострокового прогнозування електроспоживання тягових підстанцій	65
2.4. Висновки до розділу 2	74

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦІ	75
3.1. Математичні методи підвищення інформативності первинних даних параметрів режимів роботи інтелектуальних мереж електропостачання	75
3.2. Методи гармонічного аналізу первинних даних аномального процесу тягового електропостачання	80
3.3. Комп'ютерно орієнтовані математичні методи мінімізації плати за електроенергію в умовах комерційного обліку	83
3.4. Висновки до розділу 3	87

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ГОСПОДАРСТВА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦІ	88
4.1. Формування диференційних спектрів первинних даних моніторингу мережі електропостачання	88
4.2. Формалізація процесів функціонування залізниці та дослідження програмних засобів нейромережевого прогнозування електроспоживання	98
4.3. Комп'ютерне моделювання математичних методів вибору тарифу оплати за спожиту електроенергію	103
4.4. Формалізація перевізних процесів і алгоритмічні засоби адаптації графіка руху потягів до оплати спожитої електроенергії на тягу за тризонним диференційованим тарифом	106

	11
4.5. Експериментальні дослідження комплексу комп'ютерно-орієнтованих засобів оптимізації витрат на електроенергію, спожиту на тягу залізниці	115
4.6. Висновки до розділу 4	122
	126
ВИСНОВКИ	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	
Додаток А. Тарифні коефіцієнти тризонного диференційованого тарифу і тривалість періодів їх дії	143
Додаток Б. Результати комп'ютерного моделювання засобами Mathcad залежностей вартості та споживання електроенергії протягом доби промисловим підприємством (орієнтовано на залізницю)	144
Додаток В. Алгоритм адаптації графіка руху потягів до оплати електроенергії за диференційованим тарифом	147
Додаток Г. Акти про впровадження	150
Додаток Д. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	152

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСКОЕ	автоматизована система комерційного обліку електроенергії
АСУ	автоматизована система управління
АРМ	автоматизоване робоче місце
ДТ	диференційований тариф
ІДК	інформаційно-діагностичний комплекс
ІС	інтелектуальна інформаційна система
ЕД	електрифікована ділянка
КЗ	коротке замикання
ПЗ	програмне забезпечення
СЕЗТ	системи електропостачання залізничного транспорту
СМ	система моніторингу
СППР	система підтримки та прийняття рішень
СТЕ	система тягового електропостачання
ТП	тягова підстанція
ШІ	штучний інтелект
ШНМ	штучна нейронна мережа
DM	Data Mining
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MSE	Mean Squared Error
PMU	Phasor Measurement Unit
SMART	Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology
SSE	Sum Squared Error
WAMS	Wide Area Measurement System

ВСТУП

Актуальність теми. Для інтелектуальної енергетики став усталеним термін Smart Grid, що охоплює передові технології і дослідження, які стали фундаментальними для мереж електропостачання нового покоління.

АТ «Укрзалізниця» – один із найбільших промислових споживачів електроенергії в Україні. За таких умов кожен відсоток економії електроенергії, завдяки впровадженню інтелектуальних технологій, веде до економії величезних коштів. Тому логічним кроком стало те, що електромережа залізничного транспорту поступово розвивається у рамках концепції «інтелектуальної енергетики».

Концепція розумної енергетики передбачає інтелектуальну взаємодію широкого спектру таких показників як ціноутворення, ефективності використання енергоресурсів, технологічних процесів електропостачання і набуває широкого розвитку завдяки тому, що в ній відображається якісно новий рівень ефективності енергоспоживання.

Вже впроваджені в АТ «Укрзалізниця» пристрої моніторингу та лічильники системи комерційного обліку здатні накопичувати дані, необхідні для підтримки функцій інтелектуальної інформаційної системи в галузі електропостачання. Подальшого вдосконалення потребують засоби інтелектуальної обробки накопичених даних, разом із розширенням сфери їх застосування, що обумовлює актуальність проведених у дисертаційній роботі досліджень.

Рішення, поставлених у дисертаційній роботі завдань опираються на праці відомих вчених, серед яких Г. Є. Пухов, Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель, О. І. Стасюк, Усама Файяд, Григорій П'ятецький-Шапіро, Д. О. Босий, В. П. Закарюкін, А. В. Крюков, О. В. Кириленко, О. Ф. Буткевич.

Не зважаючи на значну кількість наукових досліджень, теоретичних робіт і численних публікацій, задача інтелектуалізації управління електропостачанням залізниці має нереалізовані шляхи розвитку, яким приділено увагу в дисертаційній роботі. Неповнота інформативності первинних даних, що залежить від способів їх реєстрації є домінуючою в процесі формування і адекватності нових знань, тому

створення нових методів, орієнтованих на суттєве підвищення інформативності зареєстрованих даних, що відображають аварію системи електропостачання залізниці є дуже актуальним. У той же час, накопичені великі дані та підвищення рівня їх інформативності, на етапі реєстрації, надає додаткові функціональні можливості інтелектуальним комп'ютерним мережам керування електропостачанням, що в дисертації взято за основу розробки нових технологій оптимізації витрат на електроенергію для залізничного транспорту, що своєчасно в умовах сьогодення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно державних програм:

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 р., схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 24.07.2013, в частині розвитку електроенергетичної галузі;
2. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, ухвалена Постановою Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р. (із змінами, внесеними згідно з Постанови № 970), в частині зменшення обсягу питомих витрат енергоресурсів на тягу поїздів.

Дослідження виконувалося згідно з планом науково-дослідних робіт Державного економіко-технологічного університету транспорту в рамках держбюджетних наукових тем № 0115U000394 «Теоретичні дослідження і розробка сучасних комп'ютерно-орієнтованих технологій оптимізації режимів електропостачання, енергозбереження і безпеки руху залізниць України», № 0115U002476 «Наукові засади створення сучасних розподілених комп'ютерних мереж оптимізації електроспоживання та управління енергозбереженням залізниць України», в яких автор був співвиконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності використання первинних даних у інформаційній системі керування електропостачанням залізниці шляхом розробки методів опрацювання первинних даних та комплексу комп'ютерно-орієнтованих засобів мінімізації плати за електроенергію.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних задач:

- проаналізувати мережу електропостачання залізничного транспорту як об'єкт моніторингу, тенденції комп'ютерного моніторингу, аналізу й управління мережею постачання електроенергії, засоби інтелектуальної обробки даних, існуючі методи та терміни прогнозування електроспоживання;
- розробити інтелектуалізовану інформаційну систему електропостачання залізниці та відповідну їй комп'ютерну архітектуру згідно останніх тенденцій розвитку галузі електроенергетики та комп'ютерних технологій;
- розробити методи визначення повної інформативності зареєстрованих первинних даних динамічних процесів аномальних і аварійних режимів систем електропостачання як основу формування нових знань у сфері енергопостачання для оптимізації процедур електроспоживання та створення інтелектуальних енергозберігаючих технологій;
- удосконалити методи гармонічного аналізу первинних даних в області диференційних зображень у вигляді спектрів для визначення окремих гармонічних складових і їх особливостей;
- формалізувати залежність вартості електроенергії від часу її споживання тяговим навантаженням та розробити комп'ютерно-орієнтовані математичні методи оцінки ефективності застосування комерційних тарифів оплати електроенергії на залізничному транспорті;
- розробити алгоритм зміни графіка руху потягів та програмне забезпечення для економії коштів при оплаті електроенергії залізницею за тризонним диференційованим тарифом;
- провести експериментальні дослідження та аналіз отриманих рішень.

Об'єкт дослідження – процеси опрацювання даних, оптимізації процедур електроспоживання та інтелектуалізації інформаційної системи діагностики та керування режимами електропостачання на тягу залізниці.

Предмет дослідження – засоби опрацювання формалізованих знань та первинних даних, комп'ютерно-орієнтовані методи мінімізації витрат на тягове електропостачання залізничного транспорту.

Методи дослідження. У роботі застосовано аналіз літературних та електронних джерел для визначення сучасного стану інтелектуальної енергетики, переваг та недоліків інтелектуального аналізу даних, методів прогнозування з орієнтацією на застосування в електроенергетиці залізничного господарства. Вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань базується на використанні методів формалізації та інтелектуальної обробки даних, статистики, продукційного, нейромережевого, математичного та кортежного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- знайшли подальшого розвитку диференційні математичні методи визначення повної інформативності зареєстрованих первинних даних швидкоплинного аварійного процесу мережі тягового електропостачання, використання яких дає можливість реалізувати синтез нових знань про сутність процесів, що протікають у системах електропостачання, як теоретичну основу створення принципово нових критеріїв і параметрів оптимізації електроспоживання;
- удосконалено методи визначення окремих гармонічних складових первинних даних в області диференційних зображень, що дозволило з підвищеною точністю виділяти окремі гармонічні складові струму в аварійному режимі функціонування системи тягового електропостачання, на основі чого відкривається можливість визначати величину впливу на силове обладнання кожної гармоніки окремо;
- запропоновано на основі формалізованої залежності вартості електроенергії від часу її споживання тяговим навантаженням, комп'ютерно-орієнтовані математичні методи використання комерційних тарифів оплати електроенергії на залізничному транспорті для досягнення економічного ефекту, особливістю яких, у порівнянні з існуючими, є те, що оцінка ефективності застосування тарифу не залежить від ринкової ціни на електроенергію, а лише від обсягів споживання протягом кожного з періодів часу диференційованих тарифів, що дає можливість оцінити доцільність переходу на диференційовані тарифи в довгостроковій перспективі, навіть за умови невизначеності зміни вартості електроенергії;

- уперше розроблено математичну модель тривалості руху потяга через періоди дії тарифних зон диференційованого тарифу, яка знайшла подальше застосування як основа розробки алгоритмів та програмного забезпечення, призначених для моделювання перевізного процесу залізниці в умовах комерційного обліку електроенергії.

Практичне значення отриманих результатів:

- запропоновано модифіковану комп'ютерну архітектуру системи інтелектуального електропостачання Укрзалізниці, спрямовану на розвиток існуючої інформаційної системи за концепцією Smart Grid та єдиного інформаційного простору;
- опираючись на запропоновану математичну модель тривалості руху потяга через періоди дії тарифних зон, розроблено алгоритм, призначений автоматизувати процес адаптування графіка руху потягів для економії коштів при оплаті електроенергії залізницею згідно тризонного диференційованого тарифу;
- розроблено програмне забезпечення, основане на алгоритмі адаптації графіка руху поїздів, яке орієнтоване на запропоновану децентралізовану архітектуру комп'ютерної мережі. Програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процес пристосування перевізного процесу під тарифи диференційовані за зонами доби.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес Державного університету інфраструктури та технологій при підготовці і викладанні лекційних занять, практичних і лабораторних робіт з дисциплін «Алгоритмізація і програмування» та «Автоматика і комп'ютерні системи управління рухом поїздів» і у науково-дослідну та виробничу діяльність АТ «Українська залізниця» в інформаційній системі керування на тяговій підстанції ЕЧЕ-8 ст. Фастів-1.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися та отримали схвалення на наступних конференціях: Науково-практичній конференції «Розвиток науки і техніки на залізничному транспорті», м. Київ, 2015 р.; XLVII Науково-практичній конференції Державного економіко-технологічного

університету транспорту «Залізниця: вчора, сьогодні, завтра», м. Київ, 2016 р.; XI Международной научно-практической интернет-конференции «Проблемы экономики и управления на железнодорожном транспорте. – ЭКУЖТ 2016», м. Київ, 2016 р.; XLVIII Науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів, магістрів і спеціалістів «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки» Державного економіко-технологічного університету транспорту, м. Київ, 2017 р.; V Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління», м. Луцьк, 2017 р.

Особистий внесок здобувача. Автором особисто проведено інформаційний пошук та вибір методів теоретичних і експериментальних досліджень. Основні результати проведених досліджень відповідно до завдань та мети дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: [1] – аналіз системи електропостачання залізниці як об'єкта моніторингу та керування, а також чинників, які необхідно враховувати при комп'ютерному моделюванні процесів, що протікають у системі тягового електропостачання, [2] – порівняльні дослідження роботи алгоритмів програмного пакету Neural Network Toolbox для нейромережевого прогнозування електроспоживання, [3] – розробка та дослідження диференційних математичних методів визначення повної інформативності зареєстрованих первинних даних та методів інтелектуалізації процедур визначення окремих гармонічних складових первинних даних, [4] – розробка інтелектуальної інформаційної системи керування мережею електропостачання залізниці, [5] – схема функціонування систем моніторингу та керування режимами роботи мережі електропостачання як взаємопов'язаних складових єдиного інформаційного простору.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 133 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи складає 154 сторінок друкованого тексту, в тому числі 114 сторінок основного тексту.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ
КОМП'ЮТЕРНИХ АРХІТЕКТУР МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦІ

1.1. Дослідження мережі тягового електропостачання залізниці як об'єкта моніторингу та керування

Разом із впровадженням мікропроцесорної техніки на об'єктах електроенергетики залізниць з'явилася можливість цифрової реєстрації параметрів обладнання та режимів його роботи, точної синхронізації усієї зареєстрованої інформації незалежно від місця розташування пристроїв, а також можливість застосування, як вже існуючих алгоритмів обробки зареєстрованої інформації, так і нових, які раніше принципово не могли бути застосовані [6].

Автоматизовані процеси, що складають ланцюг «моніторинг – аналіз – управління» обумовлені широким розповсюдженням мікропроцесорної техніки в системі електропостачання. Згідно тенденцій останнього часу вони використовуються для найрізноманітніших функцій: діагностики та прогнозування відмов обладнання, прогнозування виникнення аварійних ситуацій та електроспоживання, оптимізації процесу прийняття рішень та інших функцій управління, тощо.

Кінцевим результатом цих інновацій на залізниці є підвищення надійності системи електропостачання, економія коштів, шляхом зниження експлуатаційних витрат на тягу поїздів і підвищення ефективності використання електроенергії для забезпечення перевізного процесу, що на сьогодні є пріоритетним напрямком діяльності служби електропостачання.

Залізничний транспорт за функціональними особливостями поділяється на вантажний і пасажирський. У зв'язку з тим, що перевезення, зокрема вантажні, виконуються здебільшого за допомогою електричної тяги, залізничний транспорт є одним із найбільших споживачів електроенергії. Постачання електроенергії для

залізниць здійснюється в пунктах прийому, до яких відносяться центральні розподільчі підстанції, трансформаторні та тягові підстанції [7].

Історично склалося так, що на електрифікованих ділянках (ЕД) залізниць України застосовують постійний та змінний типи струму з номінальною напругою 3,3 і 27,5 кВ відповідно [8].

Системи тягового електропостачання (СТЕ) залізниць є ключовою технологічною ланкою транспортного процесу, яка забезпечує його енергією, складає вагому частину затрат і зв'язує територіально-розподілені об'єкти, а тому є однією з технологічних основ інтеграції управління транспортним процесом [9].

Особливістю сформованої системи електропостачання залізничного транспорту є живлення від тягових підстанцій (ТП) не тільки електричного рухомого складу, а й нетягових (комунально-побутових, промислових) внутрішніх і сторонніх споживачів (рис. 1.1).

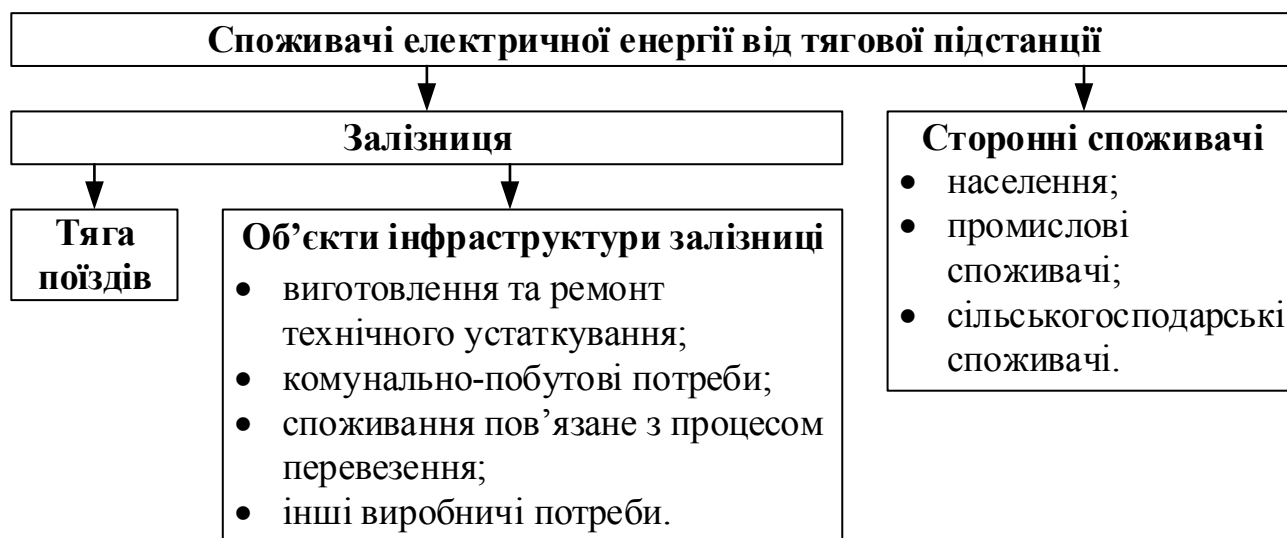


Рис. 1.1. Структурна схема споживачів електроенергії, що живляться від тягової підстанції

До витрат електричної енергії на експлуатаційні потреби залізниць входять витрати електроенергії на основні та допоміжні технологічні процеси, а також допоміжні потреби виробництва (загальновиробниче цехове та деповське споживання на освітлення, вентиляцію, опалення й інше) [10].

До АТ «Українська залізниця», що є основним перевізником вантажів та пасажирів входять шість регіональних залізниць: Південно-Західна, Львівська, Придніпровська, Одеська, Південна та Донецька. Ступінь електрифікації кожної з них складає від 32 до 59%. Від 80 до 92% загального вантажообігу окремо взятої регіональної залізниці припадає на ЕД [7].

Підприємством виконується 82,4% від загального вантажопотоку країни (без урахування трубопровідного) та 33,4% пасажиропотоку, експлуатаційна довжина залізничних колій складає 19,8 тис. км, із загальним рівнем електрифікації понад 47,2% [10,11].

Згідно офіційних даних Україна займає 10-те місце серед країн світу та 6-те серед країн Європи за довжиною електрифікованих залізниць, при цьому оптимальною вважається електрифікація для країн із розвинутою залізничною інфраструктурою 50 – 60% загальної довжини залізничних мереж країни з виконанням ними 90 – 95% загального обсягу перевезень [12].

Для досліджень залізниці слід розглядати як великі системи. Цей підхід передбачає вивчення таких систем із використанням методів, які враховують наявність тісних зв'язків між великим числом факторів, що визначають стан об'єкта. Крім того, вони є керованими об'єктами, які необхідно розглядати як сукупність взаємопов'язаних підсистем, об'єднаних спільною метою функціонування. Однією з основних підсистем розглянутих об'єктів, безпосередньо залучених до процесу виробництва, є господарства електропостачання. Структурна схема ієрархії СТЕ окремої залізниці у рамках Укрзалізниці в загальному вигляді зображена на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Узагальнена структурна схема ієрархії системи електропостачання Укрзалізниці

Через складності об'єктів СТЕ та процесів забезпечення роботи транспорту і ТП, дослідження властивостей цих об'єктів і процесів лежить у області розробки та розвитку математичних моделей, різних методів і комплексів програм [13].

Важливу роль у дослідженні СТЕ відіграють засоби моніторингу, які вимірюють та надають для подальшої обробки первинні дані.

Моніторинг в електроенергетиці – систематичне автоматичне спостереження за технологічними процесами в системі електропостачання та оцінювання їх стану [14].

Варто відзначити, що традиційна система моніторингу (СМ) відрізняється відсутністю засобів автоматизації, збір інформації та її опрацювання здійснюються операторами, які працюють згідно інструкцій [15], а автоматизована СМ реалізується на основі сучасних інформаційних технологій (ІТ) і апаратних засобів [16] та здатна працювати самостійно без втручання людини, при цьому роль оператора зводиться до контролю працездатності СМ або її налаштувань.

На тягових підстанціях Укрзалізниці застосовуються територіально розподілені високоточні реєстратори «Регіна-Ч», на основі яких створена автоматизована СМ перехідних режимів, призначена для безперервного спостереження параметрів режимів електроенергетичних систем та надання отриманої інформації у цифровому виді інформаційним системам управління. Дана система входить до складу розподіленої комп'ютерної системи керування електричними мережами залізниць [17-19]. Вона забезпечує підтримку рішень диспетчерського та технологічного персоналу щодо керування мережами електропостачання залізниць, створює інформаційний базис для прийняття рішень щодо купівлі, постачання та використання електроенергії у масштабі галузі.

Реєстратори сигналів комплексу «Регіна-Ч» забезпечують вимірювання миттєвих значень струмів і напруг, визначення їх діючих величин, а також потужності, фази та частоти змінного струму. Вони фіксують два типи стану системи електропостачання: «поточний» та «аварійний». У файлі зареєстрованих даних «поточного» стану міститься тільки інформація, що стосується дискретних сигналів, які характеризують стан обладнання у нормальному режимі роботи. У разі

виконання однієї з умов, що характеризують виникнення «аварійного» стану, відбувається реєстрація дискретних та аналогових сигналів, значення яких записуються у лог-файл.

Запуск реєстрації аварійної події задається виконанням однієї або одночасно декількох умов: у випадку виходу за межі заданого діапазону значень параметру, при збільшенні чи зменшенні його значення, за значеннями похідної сигналу по часу.

Засобами інформаційно-діагностичного комплексу (ІДК) «РЕГІНА» здійснюється попередня програмна обробка даних, подання їх у вигляді цифрових масивів, таблиць, графіків і текстових повідомлень. Зареєстрована інформація зберігається на сервері. Її використання можливе як підсистемами «Регіни», так і ПЗ, яке безпосередньо не є частиною інформаційно-діагностичного комплексу. Таким чином ІДК «РЕГІНА» забезпечує моніторинг стану системи електропостачання та збір первинних даних, що характеризують стан роботи СТЕ в нормальному та аварійному режимах.

СТЕ залізничного транспорту України структурно складається з елементів: ліній електропередачі 110, 35, 10 або 6 кВ, якими електрична енергія постачається від електростанції до ТП; власне самих тягових підстанцій, де параметри, зокрема напруга, електроенергії адаптуються до необхідних для функціонування залізничного електротранспорту; живильних, зворотних фідерів, контактних проводів і рейкової сітки, за допомогою яких здійснюється неперервне живлення електровозів; власне самих електровозів, де електрична енергія переходить у механічну та забезпечує рух потягів.

Електричні мережі залізниць належать до класу територіально розподілених електричних об'єктів, автоматизація яких потребує розв'язку широкого спектру задач економічного, диспетчерського, технологічного та експлуатаційного керування на різних рівнях ієрархії [9].

Наявність реактивної складової потужності є причиною додаткових втрат електроенергії, відхилень напруги та зниження пропускної здатності електричної мережі [20].

Система електропостачання залізничного транспорту (СЕЗТ) – це складна технічна система, що включає зовнішню та тягову мережі з потужним нелінійним і несиметричним навантаженням, що характеризується як швидкоплинний процес [20,21]. Від СЕЗТ живляться спеціалізовані споживачі, такі як інформаційно-керуючі системи та пристрої СЦБ (сигналізація, централізація, блокування), надійне забезпечення живлення яких є критично важливим для безпеки руху та безперебійних перевезень [12].

Варто зауважити, що тягові мережі як об'єкти керування відрізняються від мереж електропостачання інших галузей національного господарства наявністю комплексної взаємодії ряду специфічних особливостей як, наприклад, рухоме навантаження та різка його нерівномірність, складність захисту від короткого замикання (КЗ), однофазна структура електроживлення, електромагнітний вплив на суміжні лінії електропостачання та зв'язку, несинусоїдальність і значна несиметрія струмів, генерація вищих гармонік (перш за все, третьої), а також повернення енергії при рекуперативному гальмуванні [9,12,21-24]. У зв'язку з цим система моніторингу та керування залізничною СТЕ належить до класу складних багатопозиційних систем керування територіально розподіленими об'єктами з рухомими навантаженнями [9], тому, як наслідок, при її дослідженні повинні враховуватися загальносистемні закономірності, під якими розуміються типові властивості, зв'язки чи залежності, які встановлюються досвідом, що часто повторюються; зміна в одній частині системи поширюється в різні сторони; тому дії всередині системи не можуть бути обмежені окремою її частиною, проте, властивості системи Δ_c залежать від властивостей її складових елементів δ_e [21]:

$$\Delta_c = \Delta_c(\delta_e).$$

Для СЕЗТ як об'єкта моделювання характерна полісистемність – будь-який її елемент належить до багатьох підсистем, між якими можуть мати місце неузгодженість, при цьому кожна підсистема може розвиватися до власної мети, використовуючи свої елементи в якості засобів її досягнення [21].

У такому разі СЕЗТ доцільно описати засобами кортежного моделювання, що є переходом від вербальних описів системи до запису її моделі в математичній формі. На цьому етапі відбувається створення системної моделі та складається специфікація – повний перелік моделей, що описують систему [25].

Системна модель СЕЗТ матиме вигляд:

$$CEZT = \langle \{E\}, \{Z\}, \{\Phi\} \rangle,$$

де $\{E\}$ – сукупність елементів СЕЗТ; $\{Z\}$ – сукупність зв'язків між ними; $\{\Phi\}$ – функції СЕЗТ.

Модель елементів $\{E\}$ у свою чергу складається з трьох основних компонентів:

$$\{E\} = \langle \{I\}, \{T\}, \{P\} \rangle,$$

де $\{I\}$ – сукупність інформаційних засобів, до яких відносяться не лише програмні засоби та бази даних і знань, а й рішення надані людиною-експертом; $\{T\}$ – сукупність технічних засобів; $\{P\}$ – решта елементів.

Зв'язки між елементами опишемо як:

$$\{Z\} = \langle \{IZ\}, \{MZ\}, \{EZ\}, \{EM\}, \{PZ\} \rangle,$$

де $\{IZ\}$ – сукупність інформаційних зв'язків; $\{MZ\}$ – механічні зв'язки; $\{EZ\}$ – електричні; $\{EM\}$ – електромагнітні впливи; $\{PZ\}$ – решта.

Для комп'ютеризації технологічних процесів електропостачання на тягу слід враховувати перелічені вище факти [12].

Дослідження процесів зміни штатного режиму роботи СТЕ можна проводити на основі пасивних чи активних експериментів у реальній СТЕ або засобами комп'ютерного моделювання.

Динаміка електроспоживання характеризує основний процес роботи системи електропостачання.

На ЕД основною одиницею навантаження є потяг [26], тому варто досліджувати особливості організації перевезень як основне навантаження на систему електропостачання. Споживана потужність залізничного транспорту зростає зі швидкістю, вагою, прискоренням, нахилом та горизонтальною кривизною, тощо [27].

Дослідження питання зміни тягового навантаження базується на графіку руху, що пов'язує координату положення потяга з часом. Величини тягового навантаження визначаються на основі тягових розрахунків або експериментально [28].

Зміна споживання електроенергії електровозом є випадковою величиною, так як навантаження, що створює потяг буде різним протягом шляху слідування. Це обумовлене впливом різноманітних чинників: маса потягів, інтенсивність їх руху, зокрема вантажних, метеорологічні умови та світлова тривалість доби, особливості організації руху та відстань між ТП, величина міжпоїзного інтервалу, наявність пристроїв, які компенсують втрату напруги на струмоприймачах електровозів, тип тягового електропостачання. При цьому чинники можна розділити на постійні (тип тягового електропостачання, відстань між ТП) і змінними в часі (вага потяга, величина міжпоїзного інтервалу, кліматичні умови, інтенсивність експлуатації ЕД) [28]. Також слід брати до уваги опосередковані чинники. Наприклад, до особливостей організації руху можна віднести пропускну спроможність шляху, яка в свою чергу пов'язана з міжпоїзним інтервалом; час доби, день тижня, календарний місяць впливають на інтенсивність руху та метеорологічні умови; кліматичні зміни протягом шляху слідування потяга знову ж мають вплив на метеорологічні умови.

Міжпоїзний інтервал є випадковим, так як теж змінюється в залежності від багатьох факторів: інтенсивності руху (фактичної та закладеної в графік), метеорологічних умов, фактичної наявності вагонів, типів локомотивів, маси потягів [26].

У великій кількості взаємозв'язків факторів впливу і полягає складність моделювання процесів, що протікають у системі електропостачання залізниць.

1.2. Аналіз провідних напрацювань інтелектуалізації електропостачання та дослідження можливості впровадження їх технологічних рішень у мережу тягового електропостачання

Центральне місце серед енергоефективних розробок займають «інтелектуальні» мережі, які представляють собою автоматизовані саморегульовані енергосистеми, засновані на передових інформаційних технологіях і спроможні зробити електропостачання більш надійним, а споживання енергоресурсів – більш економічним.

Організації, що займаються дослідженнями в галузі енергетики домоглися значного прогресу в розробці та просуванні нового покоління інтелектуальних електромереж, ключовою особливістю яких є можливість взаємодії між передовими технологіями в системі електропостачання [29].

Програма IntelliGrid, ініційована Electric Power Research Institute, створює технічну основу для смарт енергосистеми, яка пов'язує електрику з комунікаціями і комп'ютерним контролем для досягнення вищого рівня надійності та якості електропостачання. Ця програма передбачає методології, інструменти та рекомендації для відкритих стандартів і вимог на основі впровадження передових технологій обліку, автоматизації і вимірювання [30].

Програма Smart Grids, створена European Technology Platforms в 2005 році, створила концепцію європейських мереж на 2020 рік і подальший період [31-33].

Департаментом енергетики США у 2007 р. створено свою концепцію Grid 2030 [34].

У Росії розвиток електроенергетики визначено як активно-адаптивні мережі, що представляють енергетичну систему нового покоління для забезпечення ефективного використання ресурсів і надійного, якісного й ефективного енергозабезпечення споживачів за рахунок гнучкої взаємодії всіх видів генерації, електричних мереж та споживачів на основі єдиної «інтелектуальної» ієрархічної системи управління.

Нині прижився та став загальноживаним у значенні «інтелектуальної енергетики» термін «Smart Grid» [35]. Саме поняття SMART – Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology означає самоконтролюючу, аналізуючу та звітуючу технологію [36].

Розробка та впровадження усіх цих програм спричинена світовою тенденцією до заощадження енергоресурсів та пошуку альтернативних джерел енергії. Зокрема їхній стрімкий розвиток обумовлений в першу чергу необхідністю об'єднання розосередженої генерації в єдину енергосистему, що стало можливим завдяки розвитку мікропроцесорної техніки й ІТ.

Оскільки Укрзалізниця не займається виробництвом електроенергії, далі технологічні рішення, безпосередньо пов'язані виключно з розосередженою генерацією, розглядатися не будуть.

Тому, серед спільних на загальносвітовому рівні сучасних напрямів і технологій концепції Smart Grid у дослідженні розглядатимуться два напрямки: системи управління режимами електросистем та енергоспоживанням, у тому числі «інтелектуальні» системи управління при централізованій та розподіленій генерації електроенергії, включаючи альтернативні джерела енергії; «розумний» облік – технології «інтелектуальних» систем обліку і розрахунків (Smart metering) та режимного управління навантаженням.

Різні концепції Smart Grid, що існують у даний час, зачіпають багато аспектів у тому числі керування та моніторинг стану електротехнічного обладнання ТП [8]. Основними відмінностями енергетичної системи на базі концепції Smart Grid від існуючої СТЕ залізниці є самодіагностика, превентивне керування, самовідновлення та дистанційний моніторинг, що частково забезпечується існуючими підсистемами (СМ, АСУ, тощо) які є засобами на шляху до інтелектуалізації електроенергетики.

Для реалізації цих нових функцій мережі оснащують сучасними швидкодіючими пристроями силової електроніки, системами, що забезпечують в online режимі отримання інформації про роботу мережі та стан обладнання, сучасними системами автоматизації управління нормальними й аварійними режимами роботи та

використовуються потужні комп'ютерні засоби управління й оцінки стану режимів функціонування [21].

Проаналізувавши літературу [29-38], можна виділити загальні тенденції розвитку функціональних і технологічних рішень інтелектуальної енергетики в світі. Насамперед розвиток технологій моніторингу та методів аналізу первинних даних у кінцевому результаті забезпечує розширення функцій управління.

1.2.1. Сучасні засоби забезпечення процесів збору інформації, що характеризує режими функціонування об'єктів системи електропостачання

Електромережі змінюються до більш локально керованих інтелектуальних мереж електропостачання із передовими методами управління та моніторингу [39]. Інтелектуальні мережі поєднують елементи традиційної електроенергетики і новітні технології, інструменти контролю та моніторингу і засоби комунікації.

Пристрої реєстрації параметрів роботи об'єктів системи постачання електроенергії, такі як Phasor Measurement Units (PMUs) складають основу системи моніторингу перехідних режимів (Wide Area Measurement System (WAMS)) та є базовим елементом ІДК. Кількість реєстраторів визначається за кількістю дискретних і аналогових сигналів, що підлягають опрацюванню.

Концепція WAMS передбачає наявність центральної бази даних, що вимірюється за допомогою пристроїв PMU, тобто інформаційно-обчислювального кластера. Головною особливістю пристроїв PMU є отримання інформації в режимі реального часу завдяки високошвидкісним каналам передачі інформації, що дозволяє вирішити досить широкий обсяг завдань управління електроенергетичною системою [40]. При відсутності аварії PMU накопичує всі дискретні пасивні сигнали, що не вимагають реєстрації аналогових сигналів, протягом заданого часу до початку аварії, або до встановленого об'єму. Реєстрація дискретних сигналів – відбувається безперервно, а передача даних проходить у фоновому режимі та не перешкоджає процесу.

Важливим аспектом елементів WAMS є синхронізація даних, яка технологічно забезпечується за допомогою супутникових систем орієнтації. Пристрої WAMS,

орієнтовані на впровадження в Україні можуть працювати як з GPS, так і з ГЛОНАСС. У той час, як продукція провідних виробників обладнання з країн заходу працює виключно з GPS сигналами. Оскільки обидві системи супутникової орієнтації спочатку створювалися для військових потреб та зважаючи на зовнішньополітичну ситуацію, яка склалася на сьогодні в Україні, при закупівлі нового обладнання для WAMS важливих стратегічних об'єктів таких, як система електропостачання залізниці та енергосистема країни загалом, слід орієнтуватися на роботу саме з GPS.

Нині функції діагностики, що реалізуються за допомогою PMUs, WAMS, фактично зосереджені та обмежені на ЕД, і включають у себе моніторинг низькочастотних коливань системних параметрів, ідентифікацію аварійного режиму та визначення місця пошкодження в об'єктах енергосистеми, або на лініях електропередач [41].

Існує тенденція поєднання функцій моніторингу WAMS та керування WACS, необхідних для реалізації програм інтелектуальної енергетики (Smart Grids, Grid 2030, IntelliGrid).

WAMS для моніторингу стану об'єктів СТЕ Укрзалізниці побудована на базі пристроїв «Регіна-Ч» [42], що реалізує моніторинг на рівні світових програм інтелектуалізації електропостачання та дає потенціал впровадження та розвитку функцій аналізу та керування відповідно останніх напрямків.

Методи DM використовуються як засіб втілення вдосконалених функцій управління характерних Smart Grid.

Орієнтація на людину є ключовою характеристикою функцій комп'ютерного моніторингу нового покоління. У зв'язку з переходом до інтелектуальної енергетики, зокрема й у тягових підстанціях, зростає кількість пристроїв моніторингу, які в свою чергу накопичують більше доступних даних, щоб допомогти оперативно-диспетчерському персоналові стежити за станом системи електропостачання в режимі реального часу. Проте, більша кількість даних не обов'язково означає більше інформації. Лише обробка перетворює дані на корисну

інформацію. Функції моніторингу наступного покоління призначені надавати диспетчерам корисну інформацію, а не первинні дані.

Інформація з датчиків на тягових підстанціях і лініях електропередач, замість безпосереднього відправлення диспетчерам, може пройти процедуру інтелектуальної обробки даних для оперативного визначення життєздатності обладнання. Забезпечення диспетчерів потенційними даними про несправності компонентів може допомогти їм передбачити проблеми в роботі СТЕ та розробити план послаблення наслідків аварійного стану.

Наприклад, система захисту на підстанціях може записувати випадки порушень нормального функціонування (аварійний стан). Замість того щоб надати диспетчеру повний об'єм записаних даних, йому може бути надана інформація про конкретні типи несправностей та місце їх виникнення. Надання такої інформації дозволить оперативно-диспетчерському персоналові заощадити велику кількість часу.

Варто відзначити, що вже сьогодні для системи електропостачання Укрзалізниці такий функціонал забезпечується за допомогою ІДК «Регіна-Ч».

Інформація може бути додатково використана в оперативній оцінці безпеки, щоб допомогти диспетчерському персоналові в аналізі проблем стабільності системи і розробити оптимальні стратегії їх виправлення.

Сучасні засоби моніторингу здатні забезпечити перехід від управління за фактом виникнення аварійного стану до превентивного керування з метою випередження появи збоїв у функціонуванні обладнання, що надає можливість постійно підтримувати технічний стан елементів системи електропостачання на заданому рівні та забезпечувати необхідну надійність і якість електропостачання [43].

1.2.2. Функціональні особливості керування системою електропостачання на основі сучасних засобів моніторингу й аналізу первинних даних

Створення інтегрованих «інтелектуальних» мереж вимагає розроблення нової динамічної архітектури оперативно-диспетчерського керування енергетичними мережами в режимі реального часу та дієвих систем регулювання енергопотоків.

Осередком інтелектуальної системи електропостачання є центр управління, функціонал якого зростає разом із ступенем автоматизації процесів моніторингу, аналізу та керування. У роботі [44] автори описали концепцію інтелектуального центру керування, який може бути важливою частиною в загальних рамках Smart Grid. Його ключовими характеристиками є скоординованість, орієнтованість на людину, комплексність, випередження та самовідновлення.

Дані створюють основу прийнятих диспетчерами рішень [43]. Кожен диспетчер має власні вподобання ефективного сприйняття інформації. Функції моніторингу та управління наступного покоління пропонують передові методи візуалізації та можливість легкого індивідуального налаштування інтерфейсу людина-машина для кожного диспетчера на основі його вподобань з метою допомоги йому в швидкому осягненні інформації. Із застосуванням орієнтованих на людину функцій моніторингу підвищиться ефективність оперативно-диспетчерського персоналу в розумінні поточних умов роботи, виявленні аномальних умов експлуатації, розгляді потенційних проблем. При цьому СМ повинна надавати інформацію в режимі реального часу так, щоб не перевантажувати диспетчера повідомленнями, що може заважати виконанню роботи.

Комп'ютери, що підтримують технології превентивного керування та підтримки і прийняття рішень здатні приймати обширний потік даних у режимі, близькому до реального часу, обробляючи ці дані за допомогою різних аналітичних програм, і експертних систем, надаючи диспетчерові список рекомендованих дій [43].

СЕЗТ тісно пов'язана з загальною енергосистемою країни. Закуплена на оптовому ринку, електроенергія через ТП використовується крім живлення рухомого складу залізничного транспорту також і для не тягових споживачів. Вітчизняна СЕЗТ не має власних джерел електроенергії, що разом із рухомістю поїздів, частка яких у споживанні електроенергії від ТП найбільша [45] є певними особливостями, які повинні відобразитися й на процесах комп'ютерного моніторингу та керування. На рис. 1.3. показана схема організації інтелектуалізованого центру диспетчерського керування СЕЗТ на основі концепції [44].

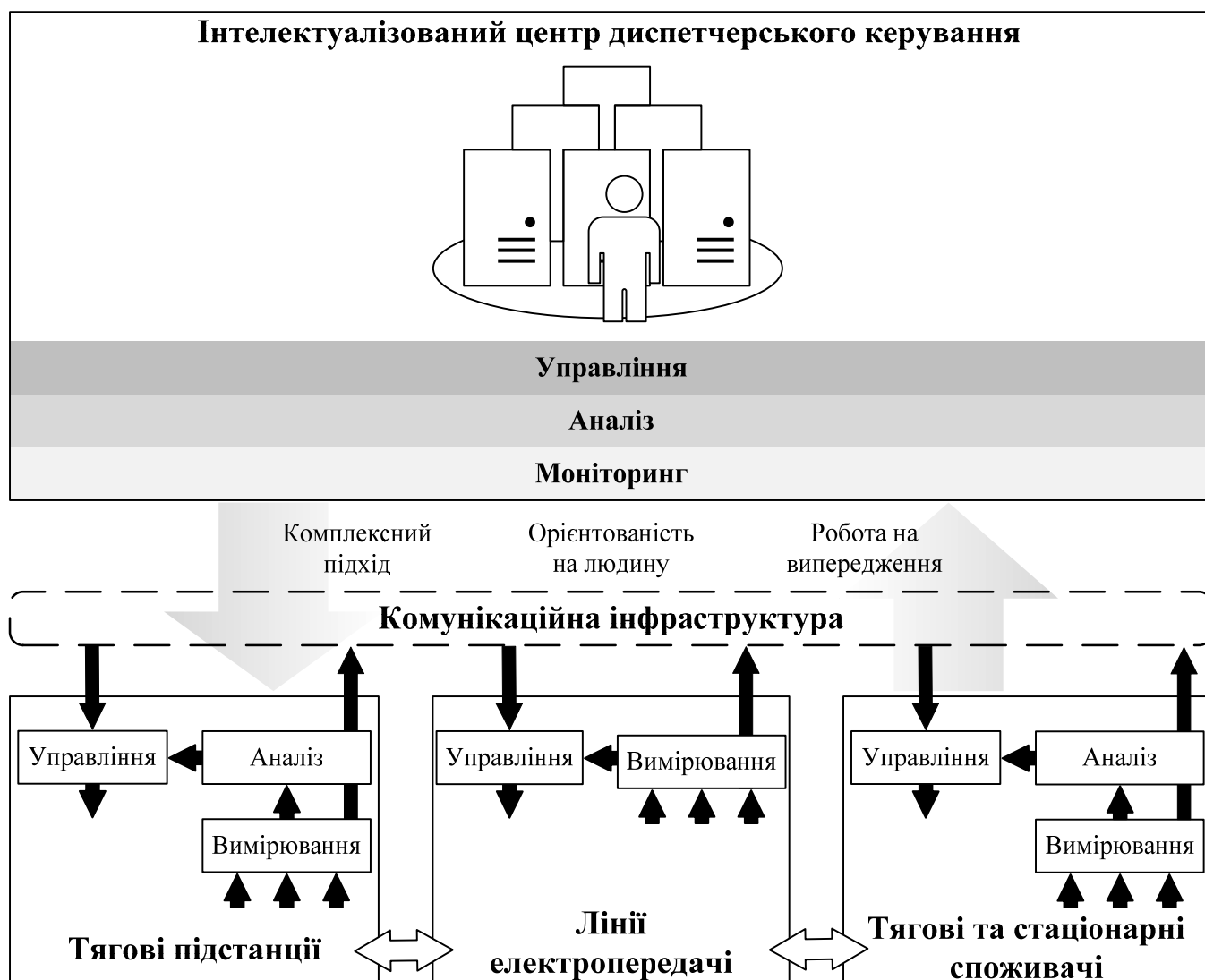


Рис. 1.3. Інтелектуалізований центр диспетчерського керування системою електропостачання залізниці разом із інфраструктурою

Надаючи передовим інструментам управління можливість брати на себе все більше функцій аналізу та контролю, диспетчер-людина зможе більшою мірою концентруватися на оцінці та управлінні станом енергетичної системи.

Функції оперативного аналізу наступного покоління повинні допомогти персоналові визначити комплексні гранично допустимі показники температури, рівнів напруги, струмів КЗ, частоти та стійкості в режимі реального часу. Для цього застосовують «комплексний» аналіз – поєднання аналізу, оснований на розрахунках з аналізом, заснованим на вимірах.

Підхід на основі розрахунків служить інструментом розробки стратегії превентивного контролю. Точність аналізу на основі розрахунків повністю залежить

від точності моделювання об'єктів навантаження та передачі. Невизначеність у цих чинниках може призвести до зниження точності результатів такого підходу, що в свою чергу може привести диспетчера до неправильних рішень. Крім того, підхід на основі розрахунків забезпечує рішення для подальшого аналізу також залежно від оцінки штатного стану. В нештатних умовах експлуатації, коли стан оцінки не сходиться, підхід на основі розрахунків не принесе користі.

Впровадження технологій моніторингу, таких як PMU, дозволяє застосувати нові можливості для аналізу на основі вимірювань, який використовує дані вимірювань на підстанціях для обчислення границі стійкості в режимі реального часу.

Підходи на основі розрахунків та вимірювання доповнюють один одного. Отримані результати на основі вимірювання можна перевірити за допомогою розрахунків. Запас стійкості, розрахований з використанням вимірів, може застосовуватися в сценарії автоматичного керування, заснованому на превентивних стратегіях, синтезованих на основі розрахунків.

Виділимо основні тенденції Smart Grid щодо функцій, які забезпечуються переходом до «інтелектуальної енергетики»:

- аналіз наслідків аварій, визначення їх місця;
- реалізація спеціальних методів і алгоритмів підтримки та прийняття рішень;
- візуалізація обробленої інформації;
- прогнозування виникнення аварійного стану, виходу з ладу конкретних пристроїв, та як наслідок зміни в процесі обслуговування обладнання; превентивне керування;
- динамічний контроль параметрів мережі електропостачання;
- прогнозування споживання електроенергії.

Ідеологія розвитку та інтелектуалізації СЕЗТ відповідає основним тенденціям розвитку електроенергетики провідних країн.

Залишається відкритим питання підвищення вимог безпеки, що матиме великий вплив на доступність надання нових функцій та їх інтеграції у центри керування, через що потенційні вигоди можуть лишитися недосяжними [46].

1.3. Модель інформаційних потоків комп'ютерного моніторингу мережі електропостачання

Процес моніторингу є невід'ємною базовою складовою процесу автоматизованого керування [15]. Останнім часом у зв'язку з широким впровадженням мікропроцесорних пристроїв та розширенням сфери їх застосування в інтелектуальній енергетиці йде тенденція до розгляду функцій моніторингу та управління як одного цілого. Наприклад, у роботі [47], спираючись на те, що базовим поняттям моніторингу у всіх галузях є «спостереження стану об'єкту з метою керування», автори ввели визначення «моніторинг в електроенергетиці» та відзначили, що до цього поняття повинна відноситися оцінка стану об'єкта та його прогнозування, що вже є однією з функцій управління. Тому розглядати СМ та АСУ краще в комплексі. Як об'єкт моніторингу та керування розглядатимемо будь-який пристрій, задіяний в інтелектуальній мережі електропостачання, технологічні процеси що протікають у ній та процеси, які мають істотний на них вплив, а також мережу загалом [14,15].

Первинні дані від СМ мережі електропостачання, які реєструються на виходах датчиків та силового електроустаткування ТП, а також систем мікропроцесорного та релейного захисту різних сегментів електричного комплексу мережі електропостачання залізниці можуть подаватись у аналоговій та дискретній формах. У вигляді аналогових інформаційних сигналів A можуть бути представлені, наприклад, значення струмів I , частоти змінного струму f , напруги U , проміжків часу t , тиском газу високовольтних вимикачів, температурою, вологістю, значенням концентрації газів у середовищі мастила силових трансформаторів, тощо. Дискретні сигнали D надходять від мікропроцесорних систем та інших носіїв інформації, це можуть бути, наприклад, дані з виходів датчиків систем мікропроцесорного та релейного захисту, інформація про спожиту електроенергію, зчитана з електролічильників, що в складі АСКОЕ використовуються на рівні первинних вимірювальних перетворювачів, завданням яких є трансформація вимірювальної величини у зручну для подальшої передачі, обробки та збереження форму.

АСКОЕ можуть виконувати не лише свої класичні функції, а й створювати умови для керування режимами в СЕЗТ [48].

«Інтелектуальні» лічильники є економічним засобом для одержання достовірної інформації, даючи можливість енергосистемам і ціноутворювальним органам широко запроваджувати диференційовані тарифи (ДТ) на споживання залежно від часу доби та пори року, провадити моніторинг і управління електроспоживанням через стимулююче тарифоутворення, забезпечуючи раціональне використання енергоресурсів.

Сучасні лічильники електричної енергії дозволяють не лише вимірювати електроспоживання у задані відрізки часу, але й зберігати інформацію за досить тривалий період часу, визначати параметри несиметрії, потужність, напругу, струм, частоту та спотворення синусоїдальності [20].

Виходячи з цього, набір первинних даних (для моделі – вхідних даних) можна описати як $\alpha_1(A_1, D_1, t), \alpha_2(A_2, D_2, t), \dots, \alpha_n(A_n, D_n, t)$, де $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – об'єкти моніторингу, а $\alpha_1(A_1, D_1, t), \alpha_2(A_2, D_2, t), \dots, \alpha_n(A_n, D_n, t)$ – у свою чергу являється сукупністю аналогових та дискретних сигналів, наданих СМ, які представляють собою зареєстровані в часі миттєві значення струму, напруги чи будь-яких інших параметрів, що реєструються розгалуженою системою датчиків та представляють інтерес для вирішення конкретного завдання управління. Причому розвиток СМ в електроенергетиці передбачає заміну аналогових сигналів цифровими [14].

Комплекс питань пов'язаних із надійністю ефективного тягового електропостачання тісно переплітається з проведенням, у реальному часі, оперативного моніторингу сукупності значень параметрів, що відображають режим функціонування СТЕ.

Пристрої контролю повинні формувати керуючі дії для виконавчих пристроїв у реальному часі, наприклад для систем стабілізації напруги та компенсації реактивної потужності, відповідно, основні вимоги до пристроїв управління – швидкодія, точність, забезпечення стійкості АСУ. Функціонування в складі інформаційної системи формує нові вимоги щодо пристроїв контролю – забезпечення online режиму, розвинена система передачі даних [20].

Опираючись на загальні засади, наведені у роботі [15], здійснимо опис функціонування інтелектуальної мережі електропостачання як багатовимірного об'єкта через модель (рис. 1.4), що являє собою комплекс окремих блоків та моделей, зокрема СМ і АСУ разом із його об'єктом, а також набір первинних даних, які надходять від СМ та набір керуючих рішень, які є кінцевим результатом роботи АСУ та всієї інформаційно-комп'ютерної мережі загалом.

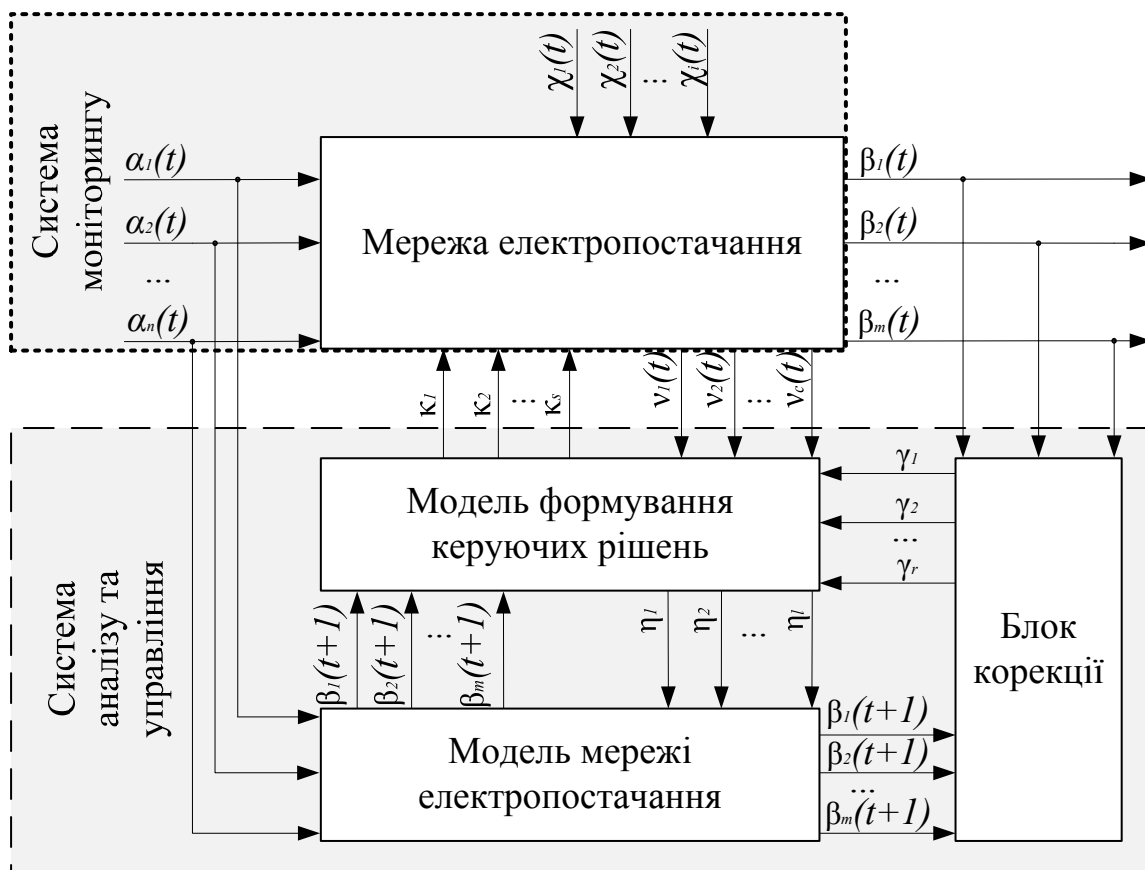


Рис. 1.4. Інформаційні потоки моніторингу та керування режимами роботи мережі електропостачання

Зовнішній вплив на мережу електропостачання як об'єкт моніторингу та керування характеризується значеннями $\chi_1(t), \chi_2(t), \dots, \chi_i(t)$. Фактори, що описуються параметрами $\chi_1(t), \chi_2(t), \dots, \chi_i(t)$ детальніше розглянуто в розділі 1.

Через «блок корекції» (див. рис. 1.4) здійснюється зворотній зв'язок між об'єктом моніторингу та керування з «модулем формування керуючих рішень».

Виходами моделі $\beta_1(t), \beta_2(t), \dots, \beta_m(t)$ можуть бути параметри мережі електропостачання та/або її стан після застосування керуючих рішень.

Структурну схему АСУ такого типу наведено на рис. 1.5.

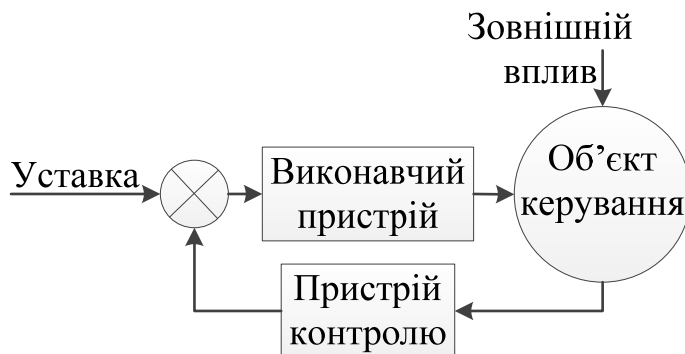


Рис. 1.5. Структурна схема системи керування за відхиленням від штатного режиму функціонування

При порушеннях нормального режиму роботи системи електропостачання, аномальні процеси протікають із такою швидкістю, що зупинити їх шляхом втручання персоналу неможливо, тому й виникла необхідність в інтелектуалізованих системах діагностики. Для виконання функцій діагностики ІДК «РЕГІНА» потребує лише інформації про нештатний режим роботи об'єкта моніторингу.

У роботі [49] автори розділили первинні дані $(\alpha_n(A_n(I_n, U_n), t))$ на доаварійні, аварійні та післяаварійні. Цих категорій первинних даних цілком достатньо для ефективної роботи інформаційно-діагностичного комплексу. Такий підхід дозволяє не записувати увесь об'єм інформації доаварійного режиму та, відповідно, не завантажувати пам'ять і заощаджувати апаратні ресурси комп'ютерної СМ та АСУ.

Головною при цьому є необхідність організації первинних даних у вигляді єдиного інформаційного простору мережі електропостачання, сформованого з єдиних загальносистемних позицій без проміжних вимірювальних перетворень [24]. Подібна організація інформації відкриває можливість використовувати її всіма сегментами розподіленого комп'ютерного середовища керування

електропостачанням, що значно покращує ряд показників якості функціонування мережі тягового електропостачання, безпеки руху й оптимізації електроспоживання.

Найважливішими задачами в процесі організації єдиного інформаційного простору є формування, з єдиних загальносистемних позицій, компонентів інформаційного середовища, що для сукупності струмів I_{kn} , напруг U_{kn} , а також набору інших аналогових сигналів A_{ke} може бути представлено як

$$\begin{aligned} I_{kn} &= F_{kn}^i(I_{ke}^d, I_{ke}^a, I_{ke}^p, \tau, t, S_{ke}^i, C_{ke}^i, T); \\ U_{kn} &= F_{kn}^u(U_{ke}^d, U_{ke}^a, U_{ke}^p, \tau, t, S_{ke}^u, C_{ke}^u, T); \\ A_{kn} &= F_{kn}^A(A_{ke}^d, A_{ke}^a, A_{ke}^p, \tau, t, S_{ke}^A, C_{ke}^A, T), \end{aligned} \quad (1.1)$$

де $I_{ke}^d, U_{ke}^d, A_{ke}^d$ – сигнали доаварійного режиму; $I_{ke}^a, U_{ke}^a, A_{ke}^a$ – сигнали аварійного режиму; $I_{ke}^p, U_{ke}^p, A_{ke}^p$ – сигнали післяаварійного режиму; $S_{ke}^i, S_{ke}^u, S_{ke}^A$ – параметри, які визначають синхронність реєстрації інформації у різних сегментах мережі електропостачання; $C_{ke}^i, C_{ke}^u, C_{ke}^A$ – параметри які визначають особливості організації первинної інформації з єдиних загальносистемних позицій; e – число дискрет за період T ; k – кількість фідерів мережі електропостачання.

Набір дискретних сигналів D_{ke} по аналогії з (1.1) може бути представлений системою математичних залежностей

$$D_{ke} = F_{kn}^D(D_{ke}^d, D_{ke}^a, D_{ke}^p, \tau, t, S_{ke}^D, C_{ke}^D, T). \quad (1.2)$$

Сформуємо $I_{ke}, U_{ke}, A_{ke}, D_{ke}$ у виді відповідних множин B^i, B^u, B^A, B^D , тоді

$$\{I_{ke}\} \in B^i, \{U_{ke}\} \in B^u, \{A_{ke}\} \in B^A, \{D_{ke}\} \in B^D. \quad (1.3)$$

На основі (1.1–1.3) модель єдиного інформаційного простору параметрів режимів мереж електропостачання залізниць у вигляді множини B представляється наступним чином

$$B = B^A \cup B^D \cup B^u \cup B^i. \quad (1.4)$$

На основі математичних виразів (1.1–1.4) відкривається можливість організації ковзкого моніторингу параметрів режимів мереж електропостачання на тягу. Процес безперервного моніторингу реалізується наступним чином. Значення первинних даних $I_{ke}^d, U_{ke}^d, A_{ke}^d, D_{ke}^d$ за N періодів T реєструються у пам'яті. Ці ж значення за $N+1$ період записується в пам'ять на місце даних першого періоду, первинна інформація за $N+2$ період відповідно, записується у запам'ятовуючий пристрій на місце другого періоду і т.д. Так процес продовжується до тих пір поки по значенням первинних даних не буде зареєстровано аварійний режим. Завдяки цьому повністю зберігається первинна інформація $I_{ke}^d, U_{ke}^d, A_{ke}^d, D_{ke}^d$ за N періодів до аварійного режиму, повністю проводиться реєстрація інформації $I_{ke}^a, U_{ke}^a, A_{ke}^a, D_{ke}^a$ про аварійний режим синхронно за часом t і, наостанок, реєструються первинні дані $I_{ke}^p, U_{ke}^p, A_{ke}^p, D_{ke}^p$ після аварійного режиму протягом проміжку часу τ .

1.4. Інтелектуалізована інформаційна система керування електропостачанням залізниць

Інтелектуальні інформаційні системи керування (ІСК) застосовують для вирішення широкого кола завдань, зокрема моніторингу, діагностики, прогнозування, підтримки прийняття рішень, тощо. Дозволяють створювати ІСК технології, до яких належать: експертні системи, штучні нейронні мережі (ШНМ), нечітка логіка, еволюційні методи та генетичні алгоритми. Основною відмінністю ІСК від інших систем управління є наявність механізму системного опрацювання

даних, автоматичного виявлення певних закономірностей з подальшим їх накопиченням, що може бути доповнений інструментами самонавчання на основі здобутого досвіду. Таким чином ІС здатні в деяких випадках надавати користувачеві «готові» рішення на рівні людини-експерта. Головною відмінністю нової концепції ієрархічної побудови систем управління складними динамічними об'єктами є використання методів і технологій штучного інтелекту в якості основних засобів боротьби з невизначеністю зовнішнього впливу. Працездатність ІСК складними динамічними об'єктами багато в чому визначається наявністю розвиненого набору апаратних і програмних засобів, що відповідають за оперативний збір, попереднє опрацювання й узагальнення даних для контролю виконуваних функцій, власного стану, зовнішнього середовища та впливів, командних вказівок, тощо [50].

Основним технічним засобом ІС є цифрові керуючі системи, що здійснюють контроль, управління та вирішення завдань ШІ. Очевидно, що така складна система повинна використовувати можливості сучасної інформаційної техніки, яка істотно підвищує рівень інтелектуалізації [51].

ІС акумулюють у собі високий рівень автоматизації не лише процесів підготовки інформації для прийняття рішень, а й власне процесів вироблення варіантів рішень, що опираються на отримані ІС знання.

Мережа електропостачання залізничного транспорту – складний і масштабно розосереджений об'єкт управління, що зумовлює складну структуру ІСК з підконтрольними системами.

З розвитком СТЕ було інтегровано велику кількість мікропроцесорного обладнання (датчиків, цифрових лічильників, тощо), які здатні накопичувати в базах даних інформацію, що може бути використана не лише для за прямою метою її збору (здебільшого для діагностики), а поряд з тим і для реалізації інших інтелектуальних функцій. Завдяки технологіям обробки даних data mining (DM), розвиваючи інформаційну систему мережі електропостачання залізничного транспорту в рамках єдиного інформаційного простору, стало можливим впровадження в інтелектуалізованій інформаційній системі керування комплексу

інтелектуальних методів мінімізації плати за спожиту електроенергію, що може заощаджувати у масштабах витрат електроенергії галуззю великі кошти.

Класична теорія керування містить у собі три елементи (планування, організацію та власне керування), які базуються на розвитку системи та прогнозуванні діяльності, яке є складовою частиною планування, у процесі чого виробляються управлінські рішення, що враховують перехід об'єкта з початкового в якийсь новий стан, сформований під впливом ряду зовнішніх і внутрішніх факторів [52].

Виходячи з цього та зважаючи на тенденції розвитку інформаційних технологій в сфері енергетики та на стан їх впровадження в залізничній галузі України, розвивати ІС господарства електропостачання Укрзалізниці пропонується за схемою, зображеною на рис. 1.6, спрямованою на підвищення інтелектуалізації існуючої системи керування, шляхом розширення її функціональних можливостей, метою яких є суттєва в масштабах галузі економія витрат на електроенергію.



Рис. 1.6. Інтелектуалізована інформаційна система керування електропостачанням залізниці

Структура запропонованої ПСК являє собою сукупність складних підсистем із власними напрямками діяльності.

Підсистема накопичення інформації об'єднує в собі фізичні пристрої реєстрації первинних даних, їх зберігання та передачі до інших підсистем, а також алгоритми їх обробки та отримання знань. Така підсистема для забезпечення інтелектуалізації системи керування на рівні потреб та технологій сьогодення передбачає отримання даних із зовнішніх джерел, які можуть знадобитися для вирішення конкретних управлінських завдань.

Підсистема автоматизованої діагностики та екстреного прийняття рішень орієнтована на зменшення людського фактору в роботі оперативного персоналу при ліквідації нештатних та аварійних режимів функціонування мережі електропостачання відповідно концепції Smart Grid. Складається вона з «Блоку прогнозу відмов обладнання», призначенням якого є визначення залишкового ресурсу силових пристроїв та «Блоку формування аварійної інформації та керуючих впливів». «Блок формування аварійної інформації та керуючих впливів» відповідає за інформування диспетчера про настання нештатного режиму та надання зареєстрованих даних про поточний режим функціонування, надання пропозицій щодо можливих шляхів усунення аварії за необхідності втручання людини-диспетчера, тобто через «Блок взаємодії з користувачем» він виконує функції системи підтримки та прийняття рішень (СППР).

Сучасна СППР дає змогу передбачати ступінь впливу ухвалених рішень на подальший розвиток об'єкта керування [53].

У випадках коли можливо усунути наслідки настання нештатного режиму без залучення оперативного персоналу підсистема автоматизованої діагностики та екстреного прийняття рішень повинна самостійно ліквідувати їх завдяки інтелектуальним алгоритмам.

Підсистема автоматизованого керування електроспоживанням складається зі взаємопов'язаних блоків – прогнозування, планування, та оптимізації перевізного процесу, які надають інформацію у вигляді готових звітів і рішень через блок взаємодії з користувачем.

Так як завдання, поставлені у дисертаційній роботі певною мірою вирішуються розробкою засобів функціонального розширення ІС через роботу даної підсистеми, розглянемо призначення окремих блоків детальніше.

«Блок прогнозування» призначений надавати на основі даних, що надходять з БД прогнозовані значення електроспоживання по окремих ТП та, за можливості, по окремих фідерах. Надані значення електроспоживання надходять у блок планування та у звітному вигляді на «Блок взаємодії з користувачем».

Метою «Блока планування» є економія витрат на закупівлю електричної енергії на основі отриманих прогнозних значень, зокрема через розгляд доступних тарифів на електроенергію та поточного розкладу руху поїздів.

«Блок оптимізації перевізного процесу» необхідний за потреби, яка визначається «Блоком планування», адаптувати графік руху поїздів під умови тарифу на електроенергію в автоматизованому режимі.

До функцій підсистеми автоматизованого керування електроспоживанням відносяться також автоматичне формування річних, квартальних та місячних електричних балансів по відокремленим об'єктам керування (це може бути ТП, її окремий фідер чи, навіть, окремий цех або будь-який інший стаціонарний споживач, що живиться від даного фідера та має власні пристрої автоматизованого обліку).

На основі цих балансів здійснюється аналіз використання електроенергії, її втрат, визначаються шляхи економії.

Разом із блоками планування та оптимізації перевізного процесу, «Блок взаємодії з користувачем» утворюють СППР.

У класичному розумінні СППР являє собою сукупність інтелектуальних інформаційних застосунків та засобів, які використовуються для опрацювання даних, їх аналізу та надання результатів кінцевому користувачу.

Блоки планування та оптимізації перевізного процесу надають сформовані керуючі впливи користувачеві системи для їх затвердження чи корегування.

Запропонована структура ІСК може бути основою розширення системи автоматизованого керування (АСУ) на об'єктах СТЕ Укрзалізниці з метою

раціональнішого використання технічного оснащення та впровадження додаткового функціоналу.

1.5. Організація комп'ютерної архітектури інтелектуалізованого керування електропостачанням залізниць

Діапазон застосування інтелектуальних технологій з кожним роком постійно розширюється, охоплюючи нові галузі контролю, керування та діагностики [54].

Перспективним напрямком досліджень є ефективний розподіл потоків мережевого трафіку, оптимізація структур і параметрів комп'ютерних мереж і управління ресурсами, підвищення надійності роботи не лише загалом, а особливо окремих сегментів мережі.

Розвиток інтелектуальних мереж передбачає розробку та впровадження обладнання і програмно-апаратних комплексів для інтелектуальної енергетики, що забезпечують підвищення безпеки, надійності й економічності СЕЗТ за рахунок online контролю параметрів електроенергії та стану встановленого обладнання й інформаційних комплексів на основі сучасних технологій, які здійснюють високоточне визначення та збір синхронізованих режимних параметрів у вузлах мережі в режимі реального часу й інтеграцію отриманих даних в єдиний інформаційний простір [20].

Зміна функціональних потреб, обумовлена розвитком та впровадженням сучасних технологічних рішень інтелектуалізації у галузі енергетики, змушує переглянути підходи та структуру побудови комп'ютерної системи інтелектуалізованого керування СЕЗТ.

Архітектура інтелектуальної електроенергетичної системи в загальному виді являє собою окрему структуру взаємодіючу між складовими її частинами зі складною топологією зв'язків [36].

Необхідність зміни комп'ютерної архітектури полягає в її оптимізації для поліпшення ефективності експлуатації комп'ютерно-інформаційних пристроїв у сучасних умовах.

Сучасні комп'ютерні засоби відкривають можливість синтезувати обчислювальні системи і розподілені мережі підвищеної продуктивності обробки інформації, що дозволяє моделювати досить складні алгоритми рішення задач високої розмірності, орієновані на моделювання в реальному часі швидкоплинних перехідних процесів в електричних мережах.

Робочі станції систем моніторингу в електроенергетиці взаємодіють частіше за допомогою локальних серверів, ніж із зовнішніми серверами, тому є сенс оптимізувати топологію мережі, зокрема сегментувати мережу відповідно до робочих груп, в яких більша частина трафіка не виходитиме за межі локального сегмента [14]. Комунікаційна інфраструктура при цьому повинна відповідати принципам використання всіх доступних шляхів та здійснювати обмін даними найкоротшим шляхом [15].

Слід відмітити, що головна архітектурна особливість, яка відрізняє інтелектуальну систему керування від інших, пов'язана з підключенням механізми накопичення та опрацювання знань для реалізації можливостей виконання необхідних функцій в умовах динамічності вхідних даних або їх невизначеності при випадковому характері зовнішніх впливів (зміни завдань, параметрів зовнішнього середовища, характеристик об'єкта керування, тощо) [50].

Відповідно концепції Smart Grid одним із найважливіших елементів «інтелектуальної» мережі є цифрова підстанція з системами контролю, захисту і управління, що збирають і опрацьовують увесь об'єм даних про стан електричної мережі, а також здійснюють управління устаткуванням у цифровому форматі.

Зібрані первинні дані архівується та згідно з нормативними документами зберігаються в необробленому виді необхідний термін.

На підставі проаналізованих тенденцій інтелектуалізації електропостачання та орієнтуючись на особливості й функціональні потреби галузі електропостачання залізничного транспорту, запропоновано модифіковану схему організації комп'ютерної архітектури керування електропостачанням Укрзалізниці (рис. 1.7) як ПС, що підходить для реалізації передових технологічних і функціональних рішень на її основі. Вона забезпечує розосереджену інформаційну обробку для перенесення

навантаження на нижні рівні ієрархії. Такий розподіл, дозволить на основі серверів дистанцій електропостачання реалізувати локальне автоматизоване керування та діагностику.

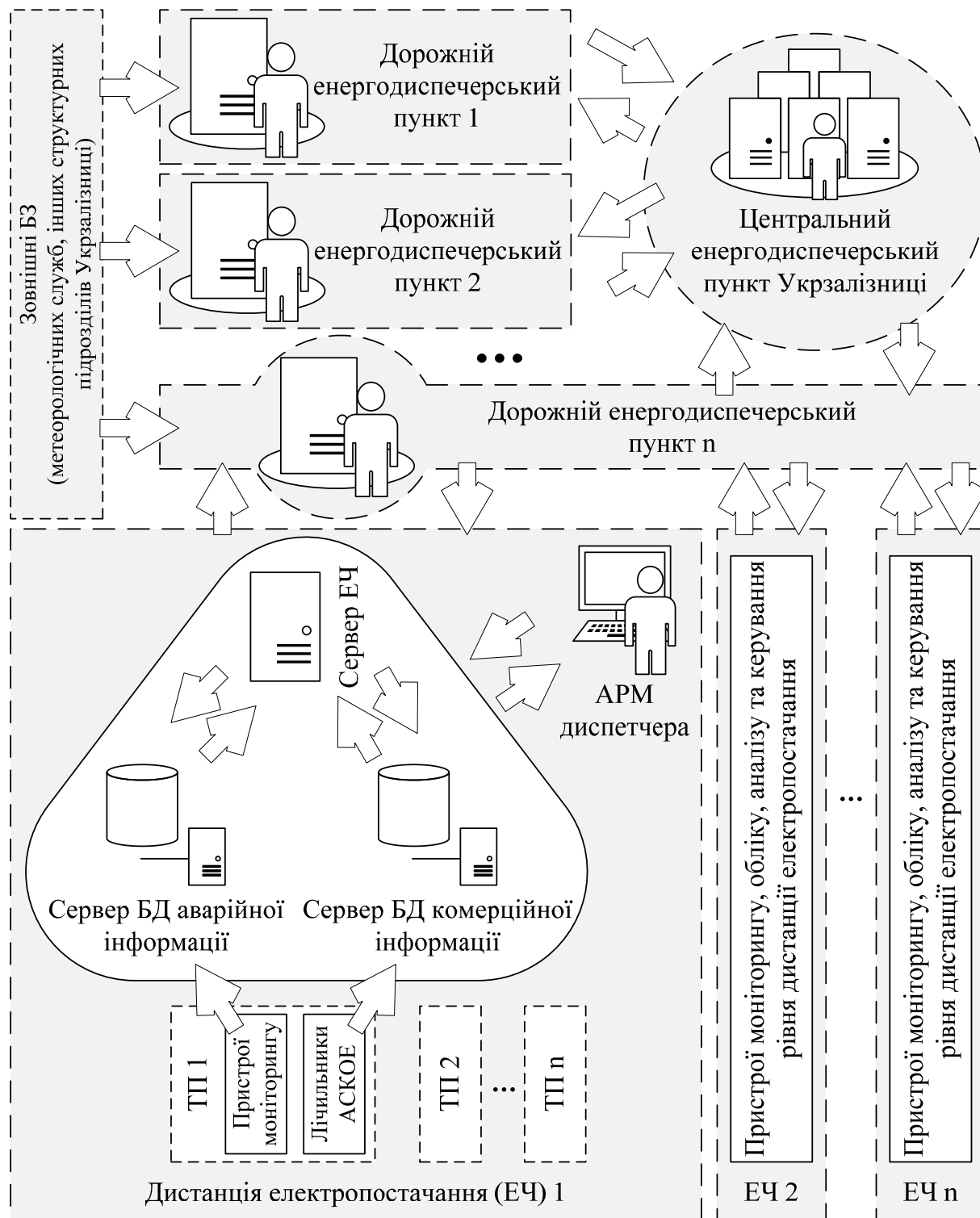


Рис. 1.7. Модифікована комп'ютерна архітектура інтелектуалізованої інформаційної системи електропостачання Укрзалізниці

Залізнична промисловість є одночасно виробником даних і користувачем знань, витягнутих з таких наборів даних [55], тому запропонована архітектура інформаційно-обчислювальної мережі буде раціональною, зважаючи на те, що нижні рівні архітектури є не лише основними джерелами інформації, а у кінцевому результаті і її основними споживачами. На них зосереджено найбільш інтенсивний обмін даними.

Таким чином значна частина інформаційних потоків буде розміщеною у відповідних підсистемах, що дозволить заощаджувати трафік та обчислювальні потужності на верхніх рівнях ієрархії [56].

Протоколи передачі даних повинні забезпечувати надійну та правильну роботу, тому для передачі даних локальною мережею слід використовувати протокол Ethernet та модель TCP/IP, так як вони використовуються провідними виробниками комп'ютерного обладнання, в тому числі й апаратних засобів автоматизованих систем управління та моніторингу [14,57]. Це пов'язано в першу чергу добре відпрацьованою технологією, з дешевою та з широкою поширеністю і доступністю таких мереж.

Поєднання інтелектуальних протоколів зв'язку з передачею енергії в загальній архітектурі робить можливим розподілене керування [58] для реалізації якого важливим є принцип єдиного загальносистемного виміру первинної інформації залізничної електроенергетики, оскільки він є базовим для отримання високоінформативних первинних даних, які відображають збуджені режими роботи системи електропостачання як територіально роззосередженої складної структури та надає можливість своєчасно реагувати на зовнішні впливи та в найкоротші терміни з мінімальними збитками стабілізувати систему до штатного функціонування.

Розглянемо детальніше узагальнену чотирьохрівневу ієрархічну структуру запропонованої комп'ютерної архітектури. Інформаційна мережа повинна реалізовуватися таким чином, щоб забезпечувати рівні доступу до даних відповідно ієрархії, що необхідно з точки зору захисту інформації.

Нижнім рівнем організації комп'ютерної архітектури інтелектуального керування електропостачанням Укрзалізниці (див. рис. 1.7) є ТП. Його формують

мікропроцесорні пристрої та компоненти комп'ютерної мережі моніторингу та діагностики. Функціонально даний рівень забезпечує технологічне керування об'єктами та процесами на контактній мережі та ТП. Засоби реєстрації первинних даних, що знаходяться на нижньому рівні служать базою інтелектуалізації електропостачання, за допомогою комп'ютерних компонентів автоматично вирішується завдання комерційного та технологічного обліку електроенергії, безперервної діагностики обладнання, яка полягає у реєстрації доаварійних, аварійних та післяаварійних режимів роботи СТЕ із синхронізацією за часом і спрацюваннями системи захисту, визначенні типу та місця аварії. З даного рівня інформація передається на всі вищі рівні керування.

Наступний рівень ієрархії управління електромережами Укрзалізниці є рівень дистанції електропостачання ЕЧ. Дистанцій електропостачання в кожній із залізниць декілька. На цьому рівні реалізуються оперативне диспетчерське організаційно-технологічне керування ЕЧ, функції оперативного керування та моніторингу, здійснюється збір отриманих первинних даних з мікропроцесорних реєстраторів ТП. Зібрана первинна інформація проходить інтелектуальне опрацювання й архівується. На основі серверів рівня ЕЧ реалізуються розподілені БД аварійної та комерційної інформації та формується інформація для передачі на вищий рівень. При цьому БД повинні побудовані на окремих серверах (див. рис. 1.7).

Однією з причин такого рішення є «multi-user» режим роботи комп'ютерної мережі, що зумовлює цілий набір взаємопов'язаних питань щодо захисту інформації, яка зберігається в комп'ютерах або серверах комп'ютерної мережі [59,60].

Модифікована комп'ютерна архітектура дозволить легше розмежовувати доступ до окремих даних. Таке рішення забезпечить підвищення надійності та інформаційної безпеки. Крім того, вихід з ладу обладнання збору аварійної інформації не перешкоджатиме збору та використанню комерційної і навпаки.

На підставі інформації з баз даних реалізується аналіз ситуації та вплив на неї, прогнозування змін і надання інформації для підготування керуючих рішень [14].

Інформація з дистанцій електропостачання та зовнішніх джерел, таких як, наприклад, метеорологічні служби надходить на диспетчерський центр залізниці, де відбувається її обробка сучасними методами. На даному рівні здійснюється оперативне диспетчерське організаційно-економічне та технічне управління службою електропостачання дороги, втілюються алгоритми, що забезпечують функції управління відповідно до концепції Smart Grid – здійснюється оцінка стану обладнання, формування управлінських рішень, моделювання і прогнозування надійності функціонування передачі та споживання електричної енергії.

Найвищим рівнем управління є центральний енергодиспетчерський пункт Укрзалізниці, куди надходить вся інформація від шести регіональних залізниць. На цьому рівні координуються управлінські дії, включаючи операції купівлі-продажу електричної енергії, вартість закупівлі якої можна мінімізувати за допомогою сучасних алгоритмів та методів моделювання.

На найвищих рівнях ІС проводиться формування інформації для організаційно-економічного керування та генерації звітів відповідного рівня.

Ефективність управління та енергоефективність на рівні організаційного та економічного керування забезпечується підвищенням рівня інформованості управлінського персоналу та можливості використання різних обчислювальних методів у процедурах прийняття рішень, зокрема використання інформаційних технологій у процедурах прийняття рішень з придбання електроенергії.

На рівні організаційно-технологічного керування – зниженням споживання електроенергії за рахунок використання економічних режимів роботи СТЕ, забезпечення енергооптимального графіка руху поїздів, інтелектуалізації процесів ефективного використання тарифної системи оплати електроенергії, своєчасності та підвищення достовірності інформації;

На рівні технологічного керування обладнанням СТЕ ефективність управління забезпечується підвищенням оперативності прийняття управлінських рішень.

Запропонована ІС є комбінованою, так як поряд із БЗ та роботою інтелектуальних алгоритмів вона передбачає інтеграцію неформалізованих знань,

представлених в архітектурі центральним енергодиспетчерським пунктом Укрзалізниці та автоматизованим робочим місцем (АРМ) диспетчера на рівні ЕЧ.

Запропонована ПС будується за принципом єдиного інформаційного простору на базі існуючих локальних обчислювальних мереж різних рівнів і являє собою розподілену систему з територіально віддаленими об'єктами, верхнім рівнем якої є центральний енергодиспетчерський пункт Укрзалізниці. Побудова запропонованої ПС передбачає модернізацію ПЗ та ширшого впровадження мікропроцесорних пристроїв.

Діапазон застосування інтелектуальних технологій з кожним роком постійно розширюється, охоплюючи нові галузі контролю, керування та діагностики. Інтелектуалізація, як ключовий напрямок розвитку сучасних інформаційних технологій, є важливим фактором підвищення ефективності функціонування систем, що в першу чергу стосується області автоматизації керування виробничими процесами. Сучасні складні електротехнічні об'єкти та системи, до яких відносяться СТЕ, характеризуються істотною кількістю різного роду функціонально взаємопов'язаних компонентів і сегментів енергетичного середовища, високим рівнем динамічності та складністю протікання швидкоплинних технологічних процесів. Досягнення та збереження стійкості електричних систем, у процесі постачання електроенергії на тягу, в збудженому зовнішньому середовищі, та проведення процедур мінімізації електроспоживання з використанням сучасних енергозберігаючих технологій, при значному рівні існуючих завод, може бути підтримано лише завдяки застосуванню комп'ютерних технологій, що відкривають можливість реалізувати як тенденційний аналіз і оцінку наслідків впливу зовнішніх і внутрішніх завод, так і реалізацію стратегій виконання критеріїв оптимізації електропостачання.

1.6. Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз мережі електропостачання залізниць як об'єкта моніторингу й управління. Розглянуто роль моніторингу при моделюванні та його особливості.

Досліджено чинники, що мають вплив на функціонування СТЕ та виявлено, що на практиці через велику кількість взаємопов'язаних факторів впливу відбувається їх системний розгляд при моделюванні та, іноді, нехтування деякими з них, що в свою чергу погіршує точність результатів.

2. Проведено аналіз тенденцій комп'ютерного моніторингу, аналізу й управління системою постачання електроенергії, який показав що майбутнім інтелектуальної енергетики стануть ІТ-технології, розроблені у рамках роботи над Smart Grid програмами, чи на їх основі. Відповідно до особливостей вітчизняної системи електропостачання залізниць, розглянуто основні функції моніторингу, інтелектуального аналізу даних та контролю нового покоління, які можуть бути застосованими в даній системі електропостачання. Визначено, що комунікаційна та обчислювальна інфраструктури повинні бути розширені для підтримки цих функцій та, на основі аналізу потреб та стану розвитку пристроїв, що забезпечують інтелектуалізацію енергетики.

3. Запропоновано модель систем моніторингу та керування режимами роботи мережі електропостачання як взаємопов'язаних складових єдиного інформаційного простору. Показано інформаційні зв'язки між компонентами систем моніторингу та керування і їхнім об'єктом, зокрема узагальнену структуру перетікання первинних даних, керуючих рішень та зовнішніх впливів у межах інформаційно-комп'ютерної системи.

4. На основі аналізу потреб та стану розвитку пристроїв, що забезпечують інтелектуалізацію енергетики, запропоновано інтелектуалізовану інформаційну систему та модифіковану комп'ютерну архітектуру системи інтелектуального електропостачання Укрзалізниці, орієнтовані на розвиток існуючої інформаційної системи за концепцією Smart Grid та єдиного інформаційного простору. Наведені підходи до побудови інтелектуальної інформаційної системи забезпечують збір інформації з зовнішніх джерел, що необхідно для прогнозування спожитої електроенергії і мінімізації витрат на її закупівлю.

РОЗДІЛ 2

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ

2.1. Методи інтелектуальної обробки первинних даних

Інтелектуалізація, як ключовий напрям розвитку сучасних інформаційних технологій, є важливим фактором підвищення ефективності функціонування систем, що, в першу чергу, стосується області автоматизації керування виробничими процесами [54].

Інтелектуальна обробка інформації – це динамічний процес, що у кінцевому рахунку передбачає трансформацію сигналів у важливу та корисну інформацію. Дані – це термін, який надається основному класу сигналів. Будь-який клас сигналів з частотними, фазними та амплітудними компонентами загалом можна називати даними [61]. Первинні дані (початкові, сирі або історичні дані) – необроблені масиви даних, отримувані в результаті спостереження за динамічною системою або об'єктом, що відображають його стан у конкретні моменти часу.

Для вирішення деяких завдань інтелектуальної енергетики необхідна така обробка первинних даних, яка дозволить на підставі знайдених взаємозв'язків будувати моделі, здатні описати особливості функціонування реальних систем електропостачання.

У випадку системи електропостачання залізниці джерелом первинних даних є пристрої моніторингу – різного роду датчики та елементи системи комерційного обліку АСКОЕ. Оброблені дані несуть у собі інформаційну цінність, тобто є вже не даними, а інформацією.

Інформація – це термін, який описує упорядковані дані, й, таким чином, є більш організованою формою даних, при цьому знання визначається як організована інформація, а інтелект – це здатність отримувати знання та ефективно їх застосовувати у мінливому середовищі [61].

Величезний обсяг інформації, накопичений у базах знань, може приносити користь у вирішенні різноманітних управлінських завдань. Для цього необхідні

ефективні засоби комплексного аналізу зібраних даних і пошуку в них закономірностей. Ручний аналіз даних стає непрактичним у багатьох областях, коли обсяги даних експоненціально зростають [62], тому таке завдання через свою трудомісткість вимагає сучасних технологій обробки інформації.

Традиційно обробка інформації з баз даних полягає в застосуванні статистичних методів для перевірки наперед сформульованих гіпотез та Online Analytical Processing (OLAP) для роботи з реляційними базами даних, а саме швидкого (оперативного) отримання відповідей на аналітичні запити. Такі підходи до аналізу даних мають низку недоліків.

Статистичні методи використовують усереднені значення. Опіраючись на них, важко вияснити достеменний стан процесів у досліджуваній галузі. Усереднення по вибірці призводить до оперування фіктивними величинами і до нехтування нетипових спостережень (наприклад, пікових значень), що в свою чергу знижує достовірність результатів дослідження. Такий підхід є не ефективним для завдань, де головним критерієм кінцевих результатів є точність, наприклад, прогнозування. Зокрема, прогнозування споживання електричної енергії тяговою підстанцією критично залежить від даних, на які опирається процес, адже від точності прогнозу залежить закупівельна ціна електроенергії. Певні нетипові значення, описують унікальні, але важливі явища та можуть становити інтерес для дослідження. Навіть сама лише ідентифікація цих спостережень, може допомогти інтерпретувати сутність досліджуваних об'єктів чи явищ. Виняткові події можуть бути провідними у подальшому розвитку та поведінці складних систем як СТЕ.

Використання класичних методів обробки інформації, хоч і не втратило актуальності, та вузька спеціалізація не дозволяє ефективно застосовувати їх для вирішення завдань обробки баз знань господарства електропостачання залізниці.

З розвитком комп'ютерної техніки набуває популярності група технологій інтелектуального аналізу даних DM, яка раніше не мала широкого практичного застосування в зв'язку з великою кількістю обчислень, необхідних для виконання алгоритмів. Зростання обчислювальної потужності процесорів усунуло вагомість цієї проблеми. Тепер якісний аналіз можна провести за прийнятний час [63,64].

Накопичення великої кількості ретроспективної інформації стало поштовхом для розвитку інтелектуального аналізу. Сьогодні data mining є фактично синонімом інтелектуального аналізу даних. Згідно визначення, data mining – це застосування певних алгоритмів для вилучення невідомих раніше практично корисних взаємозв'язків (тенденцій, структур, залежностей чи шаблонів), які можуть бути інтерпретованими користувачем.

OLAP-системи забезпечують надання інформації зручної для перегляду та створення звітів, але в аналітичній обробці продукти OLAP вміють виконувати лише найпростіші дії і на практиці можуть використовуватися виключно для підготовки матеріалу [65]. Тоді як OLAP більше підходить для трактування ретроспективних даних, DM використовує ретроспективні дані, щоб здобути інформацію про майбутнє. На відміну від більшості статистичних методів, DM оперує дійсними значеннями. І в той час, як статистичні методи придатні в основному для підтвердження або спростування висунутих гіпотез, методи DM на основі аналізу самостійно можуть будувати гіпотези, знаходити приховані правила і закономірності серед набору даних, які користувач не здатен спрогнозувати. Зважаючи на те, що найскладнішою задачею є саме формулювання гіпотези щодо взаємозв'язків, перевага DM є очевидною.

Результати обробки даних за допомогою статистичних інструментів і OLAP-засобів можуть сприяти кращому розумінню характеру закономірностей, тому застосування DM не виключає їх використання [64]. Інтелектуальний аналіз об'єднує останні досягнення у сфері ІТ з математичними інструментами, тому методи DM умовно можна класифікувати як технологічні, статистичні та кібернетичні. Більшість методів DM оснований на перевірених методах з машинного навчання, розпізнавання образів і статистики. Серед багатьох методів DM насправді існує лише кілька фундаментальних. Усі інші є доповненням або гібридами основних.

DM полягає у використанні технологій розпізнавання шаблонів (patterns), а також статистичних і математичних методів. Шаблони відображають фрагменти багатоаспектних взаємозв'язків у даних. Цими шаблонами є закономірності,

властиві підвибіркам даних, які можуть бути компактно виражені у зрозумілій людині формі. Пошук шаблонів проводиться методами, не обмеженими рамками апріорних припущень про структуру вибірки і вид розподілів значень аналізованих показників [63,66].

Технології data mining є кроком у процесі виявлення знань у базах даних (knowledge discovery in databases (KDD)) та входять у концепцію інформаційних сховищ даних і організації інтелектуальних обчислень.

Дані в сховищі об'єднується в цілісну структуру за різними рівнями деталізації, що надає потрібні для користувача міри узагальнення інформації. У цій концепції головне місце відведено метаданим – даним про дані. При цьому в сховищі також містяться результати перетворення інформації, її сумаризації та верифікації [67].

KDD полягає в застосуванні аналізу даних і алгоритмів виявлення, які, в прийнятних межах обчислювальної ефективності, створюють перелік шаблонів. Процес KDD є інтерактивним й ітеративним, включаючи численні кроки з багатьма рішеннями, прийнятими користувачем:

1. Розвиток розуміння області застосування та визначення мети процесу KDD.
2. Створення вибірки даних: вибір набору даних, або акцентування на підмножині змінних або вибірок даних, на основі яких робитиметься відкриття.
3. Очищення та попередня обробка даних. Основні операції включають у себе видалення шуму при необхідності, збір інформації, потрібної для моделювання або обліку шуму, ухвалення рішення про стратегію обробки втраченої інформації та обліку в часовій послідовності інформації і відомих змін.
4. Зменшення даних та проектування: пошук корисних ознак для представлення даних в залежності від мети завдання. Зі зменшенням розмірності або методів трансформації, ефективна кількість змінних, відведених для компенсації, може бути зменшена, або знайдено незмінні ознаки для даних.
5. Узгодження мети процесу KDD (крок 1) з конкретним методом DM (узагальненням, класифікацією, регресією, кластеризацією, тощо).
6. Дослідницький аналіз, моделювання і вибір гіпотези: вибір алгоритмів і методів інтелектуального аналізу даних, які використовуватимуться для пошуку

шаблонів даних. Цей процес включає визначення доречних моделей та параметрів і узгодження методу DM із загальними критеріями процесу KDD (наприклад, кінцевий користувач може бути більш зацікавлений у розумінні моделі, ніж її прогнозних можливостях).

7. DM: пошук моделей, які представляють інтерес, в конкретному вигляді, у вигляді дерева рішень або наборі правил класифікації, регресії, кластеризації, тощо. Користувач може суттєво допомогти методу DM, правильно виконуючи попередні кроки.

8. Інтерпретація видобутих шаблонів, можливо, повернення до будь-якого з кроків з 1 по 7 для подальшої ітерації. Цей крок може також включати візуалізацію виявлених шаблонів і моделей або візуалізацію даних, наданих здобутими моделями.

9. Робота з виявленими знаннями: використання знання безпосередньо, включаючи знання з іншої системи для подальших дій, або простої документації та звітності. Цей процес також включає в себе перевірку на наявність потенційних конфліктів з інформацією, яка була здобута раніше та їх вирішення.

Покрокове застосування KDD до баз знань господарства електропостачання залізниці умовно зображено на рис. 2.1.

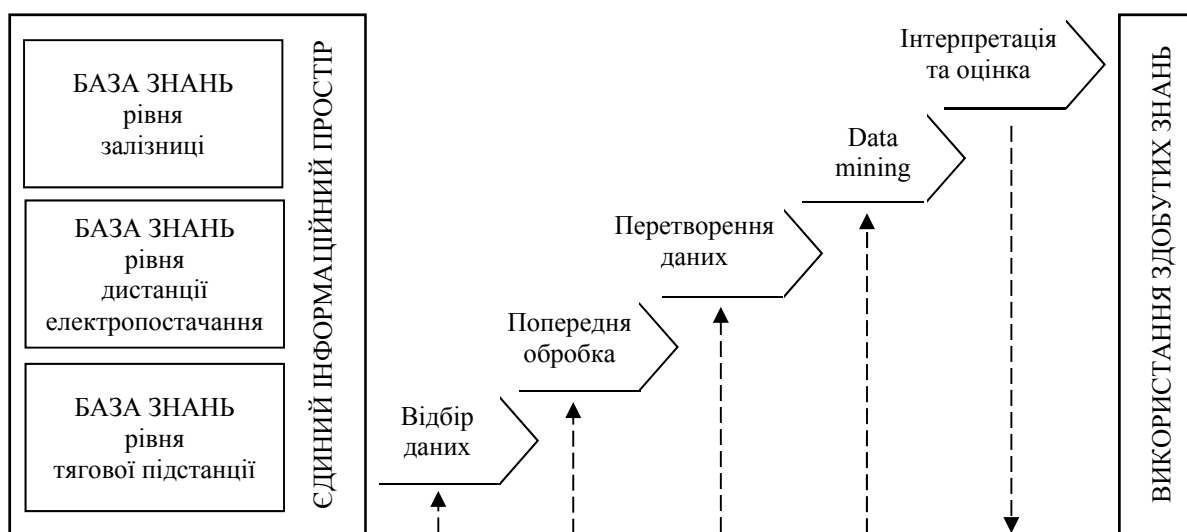


Рис. 2.1. Процес KDD у базах знань інформаційного простору господарства електропостачання залізниць

Процес KDD може включати значні ітерації і містити петлі між будь-якими двома етапами. Основна робота KDD зосереджена на етапі 7, тим не менше, інші кроки є важливими для практичного застосування.

Після виявлення нових елементів і аспектів даних підхід до виявлення джерел і форматів даних з наступним зіставленням цієї інформації з заданим результатом може змінитися. Чим більше користувач оперуватиме даними, будуватиме моделі, оцінюватиме результати, тим кращим може бути результат. Робота з даними стає ефективнішою, коли можлива інтеграція наступних компонентів: візуалізації, графічного інструментарію, засобів формування запитів, оперативної аналітичної обробки, що дозволяють зрозуміти дані й інтерпретувати результати і самі алгоритми, що будують моделі [67, 68].

Прогнозування та опис на практиці є основними завданнями DM, мета яких може бути досягнута за допомогою ключових засобів DM, таких як [64,67-70]:

- Класифікація – це віднесення об'єкту до однієї з визначених груп (класів) згідно певного набору правил або ознак, що характеризують конкретну групу. Крім того, класифікацію можна використовувати в якості вхідних даних для інших методів. Наприклад, кластеризація дозволяє використовувати загальні атрибути різних класифікацій з метою виявлення кластерів.

- Кластеризація – загальне описове завдання, з метою визначення набору категорій або кластерів, необхідних для опису даних. Категорії можуть бути взаємно вичерпними і взаємовиключними. Досліджуючи один або більше атрибутів або класів, можна згрупувати окремі елементи даних разом, отримуючи структурований вивід. На простому рівні при кластеризації використовується один або декілька атрибутів як основа для визначення кластера схожих результатів.

- Моделювання залежностей – метод знаходження моделі, яка описує істотні взаємозв'язки між змінними. Існує на двох рівнях: структурний рівень (часто у графічній формі), де змінні локально залежать одна від одної і кількісний рівень, що визначає сильні зв'язки, використовуючи деякі числові шкали.

- Регресія – функція математичного очікування однієї випадкової величини залежно від значень іншої.

- Підбивання підсумків – метод пошуку компактного опису для підмножини даних (наприклад, зведення до таблиці). Методи підбивання підсумків застосовується для інтерактивного дослідницького аналізу даних і автоматичної генерації звітів.

- Виявлення змін і відхилень – метод, зосереджений на виявленні найістотніших змін у даних відносно норм або раніше виміряних значень.

У будь-якому алгоритмі DM можна виділити три основних компоненти: модель представлення, модель оцінки, та пошук.

Модель представлення є мовою опису виявлених шаблонів. Якщо подання занадто обмежене, то точна модель для даних не може бути представлена, незалежно від кількості часу навчання та прикладів.

Критеріями моделі-оцінки є кількісні судження, наскільки добре певний шаблон (модель і її параметри) відповідає цілям процесу KDD. Наприклад, прогнозні моделі оцінюють тестовим набором за емпіричну точність прогнозування; описові – за розмірами прогностичної точності, новизни, корисності та зрозумілості.

Компонент пошуку в DM складається з пошуку параметра і пошуку моделі. Після того як модель представлення і критерії моделі-оцінки нормалізовані, проблема DM зводиться до задачі оптимізації: знайти параметри і моделі, які оптимізують критерії оцінки. Алгоритм пошуку параметра повинен шукати параметри, які оптимізують критерії моделі-оцінки, враховуючи спостережувані дані і представлення нормалізованої моделі.

2.2. Аналіз основних програмних засобів опрацювання баз знань

За роки роботи мікропроцесорних пристроїв у складі СЕЗТ зібрано великий об'єм даних, що характеризують різні аспекти роботи системи тягового електропостачання та можуть використовуватися для пошуку нової інформації, на основі якої за допомогою сучасних інформаційних технологій може бути розширено сферу застосування впровадженої комп'ютерної техніки, звідки виникає необхідність пошуку нових рішень щодо подальшої інтелектуалізації системи

електропостачання. Розглянемо всі сучасні фундаментальні підходи DM, які можуть використовуватись для завдань інтелектуалізації СЕЗТ.

Статистичні методи

Статистичні методи є незамінним компонентом у відборі та аналізі даних, і оцінці здобутих знань. Вони використовуються для оцінки результатів DM, щоб відокремити корисні дані від негативних. Статистичні методи пропонують використовувати у процесі очищення даних, для виявлення «сторонньої» інформації, а також для оцінки спотворень. Статистичні методи також можуть використовуватися для роботи з відсутніми даними, використовуючи засоби оцінки.

Методи для транзакцій і реляційної бази даних

Як відомо, транзакція – логічна одиниця роботи з даними, що являє собою окрему послідовність операцій із БД. Інтелектуальний пошук правил асоціацій популярний для використання у транзакціях БД і реляційних БД. Завдання полягає в тому, щоб отримати набір чітких асоціативних правил у формі

$$X_1 \dots X_n \Rightarrow Y_1 \dots Y_m,$$

де X_i (для $i \in \{1, \dots, n\}$) та Y_j (для $j \in \{1, \dots, m\}$) атрибути-значень з множини відповідних наборів інформації у базі даних. Наприклад, у одній і тій же транзакції можна знайти правило про асоціацію: якщо потяг спізнюється відносно розкладу, то він зазвичай витрачає більше енергії на проходження тієї ж ділянки. Оскільки операції DM для транзакцій бази даних можуть вимагати повторюваного читання (Repeatable Read, Snapshot), може знадобитися величезна потужність обробки [71].

Методи штучного інтелекту (Artificial intelligence)

Методи ШІ широко застосовуються в DM. Методам розпізнавання образів, машинного навчання і нейронних мереж приділяється велика увага. Інші методи в ШІ, такі як здобуття знань, представлення знань і пошуку, мають відношення до різних етапів процесу в DM.

Одним із рішень класифікації як одного з основних завдань ДМ є використання нейронної мережі. Класифікація це процес розподілу набору даних на взаємовиключні групи.

Нейронна мережа для ДМ складається з трьох основних етапів [72]:

1. Будівництво мережі та навчання: в цій фазі багаторівнева нейронна мережа створюється та навчається на основі заданих атрибутів, класів та обраного методу.
2. Спрощення мережі: на даному етапі надлишкові зв'язки та блоки видаляються без збільшення частоти помилок класифікації у мережі.
3. Вилучення правил класифікації.

Нейромережеві технології тісно переплітаються з обчислювальними технологіями на принципах нечіткої логіки, нечітких нейронних мереж, розділах теорії ймовірностей, еволюційних та генетичних алгоритмів [36].

Генетичний алгоритм

Генетичний алгоритм являє собою відносно нову парадигму ПЗ, натхненну теорією еволюції Дарвіна. Популяція правил, кожна з яких представляє можливе рішення проблеми у вигляді хромосом, спочатку створюється випадковим чином. Тоді пари правил (як правило, найсильніші правила вибираються в якості батьків) об'єднуються, щоб зробити потомство для наступного покоління. Нова популяція рішень формується застосуванням двох генетичних операторів. Перший – секції хромосом двох рішень міняються місцями та дають нові рішення. Другий – використовується процес мутації для зміни випадковим чином генетичної структури деяких членів кожного нового покоління. Мутація є операцією стохастичної зміни частини хромосом. Система працює протягом кількох десятків або сотень поколінь. Процес завершується, коли буде виконана наперед задана умова (прийнятне або оптимальне рішення знайдено, або після деякої межі, встановленого часу) [73].

Генетичні алгоритми використовуються для вирішення задач пошуку глобального екстремуму багатопараметричних і наближених функцій, для задач знаходження найкоротшого шляху, оптимального розміщення, налаштування нейронних систем, розроблення ігрових стратегій [74]. Генетичні алгоритми підходять для вирішення завдань, що вимагають глобальної оптимізації за певним

обчислюваним критерієм. Ця парадигма може бути застосована до завдань DM. Величина, яка повинна бути зведена до мінімуму, часто є числом помилок класифікації на навчальній вибірці. Щоб отримати відповідні результати в розумні терміни великі та складні завдання вимагають потужного апаратного забезпечення. Видобуток великих масивів даних за допомогою генетичних алгоритмів набирає практичної популярності лише останнім часом у зв'язку з наявністю доступних високошвидкісних комп'ютерів. Крім того, генетичні алгоритми можуть бути застосовані до задач із великою кількістю змінних, що підлягають розгляду.

Графічні методи DM

Візуальні методи DM довели цінність пошукового аналізу даних, і вони також мають хороший потенціал для роботи з великою базою даних. Такий підхід вимагає інтеграції людини в процес DM. Є кілька добре відомих методів для візуалізації багатовимірних масивів даних: діаграми, графіки, паралельні координати, матриці проєкцій, а також інші методи геометричної проєкції, такі як ієрархічні методи, засновані на графах.

Часто графічні моделі передають взаємозв'язки з використанням структури графа [75,76]. У своїй простій формі, модель визначає, які змінні безпосередньо залежать одна від одної.

Дерева рішень

Дерева рішень – набори рішень у деревовидній формі для кращого сприйняття людиною. Вони в основному використовуються для прогнозного моделювання, класифікації набору даних по заданих правилах і завдань регресійного аналізу [77].

Для ухвалення рішення слід дати відповідь на питання виду «значення $y < x?$ » у вузлах дерева, починаючи від кореня.

Конкретні методи дерев рішень у DM, бувають двох основних типів [78,79]:

- класифікації, результатом роботи яких є присвоєння категорії для даних;
- регресійного аналізу, коли результат можна сприймати як дійсне число (наприклад, час руху потяга або вартість спожитої електроенергії).

Classification and Regression Trees (CART) і Chi Square Automatic Interaction Detection (CHAID) – популярні алгоритми дерев рішень, які використовуються для

класифікації набору даних. Вони визначають набір правил, які можуть бути застосовані до нового (несортованого) набору даних для прогнозування.

CART, як правило, вимагає менше підготовки даних, ніж CHAID. CART може обробляти відсутні значення. Побудована модель може бути перевірена на окремо зазначеному тестовому наборі даних, крім того, вона може бути збережена і використана згодом на додаткових тестових наборах [75].

Велика кількість алгоритмів дерев рішень описано в літературі з області машинного навчання і прикладної статистики. Перевагами дерев рішень є їх зрозумілість та ліпша робота з дискретними даними, категоріями [80-82].

Нечітка логіка

Для надання математичним моделям і алгоритмам здатності сприйняття погано формалізованої інформації розроблено ряд математичних апаратів, зокрема системи на базі нечіткої логіки, що дозволяють пов'язати елемент невизначеності з даними, оперувати ними та робити відповідні висновки. Як приклад, вимірювання температури може керуватися нечіткою системою шляхом розгляду температури як одного з наступних якісних значень: дуже холодно; холодно; посередньо; спекотно; дуже спекотно. Застосуванням таких нечітких систем може бути прийняття рішень у невизначених або гіпотетичних ситуаціях [83], формалізацію невизначеностей, джерела яких мають різну природу [50].

Формалізація поняття нечіткої множини заснована на використанні так званої функції приналежності [84]. Ця спеціальна характеристична функція, приймає значення у межах $[0, 1]$ та відображає суб'єктивну оцінку міри приналежності окремих елементів базової шкали відповідній нечіткій множині. Система складається з набору лінгвістичних операторів чи правил, які задають конкретні ситуації та можуть бути легко вилучені з технічних даних про процес керування.

Експертні системи

Експертна система (ЕС) – це комп'ютерна система, яка імітує здатність приймати рішення людини експерта; вона також може забезпечувати прийняття рішень. СППР допомагає користувачеві шляхом надання можливих рішень проблемної області [56]. Особливістю технології ЕС є можливість роботи з формами

природнього представлення знань, включаючи правила, предикати. Під предикатом розуміється логічна функція від будь-якого числа аргументів, що приймає значення true або false (істина або неправда, 1 чи 0). При цьому об'єкти і зв'язки в предметній області описуються у вигляді набору коректних виразів. Основною проблемою при створенні будь-якої інтелектуальної ЕС є розробка БЗ у вузькій області експертизи, яка може бути вирішена в два етапи: спершу повинні бути формалізовані та структуровані експертні знання про предметну область; на другому етапі – формалізовані представлення цих знань за допомогою моделей ШІ [50]. По суті, технологія ЕС об'єднує декілька близьких напрямків, оскільки прийняті методи логічної обробки кожної з форм природнього подання знань значно відрізняються між собою, тож певною мірою технології ЕС є гібридними.

Можливості ЕС обмежені для роботи в реальному часі в системах із швидкоплинними процесами, під якими розуміються системи, такт управління яких не перевищує 2 мс. [50], тобто не доцільні для виконання автоматизованої діагностики в електроенергетиці, хоча можуть мати місце в інших завданнях АСУ, наприклад, у поєднанні з іншими методами.

Гібридні методи

Очевидно, що гібридні методи в інтелектуальному аналізі не відносяться до основних, проте через зростання їхньої популярності проігнорувати їх було б недоречно.

Ідея алгоритмів побудованих на основі гібридних методів полягає в комбінації декількох методів для знаходження наближеного рішення без гарантій якості. Головною особливістю таких систем є використання окремого модуля для прийняття рішень, в який, наприклад, надходить інформація з нейронної мережі і структуровані дані з експертної системи. Використання таких систем виправдано при автоматизації аналітичних процесів обробки великого масиву даних з подальшою агрегацією, а також при автоматизації складних технологічних процесів. Однією з останніх тенденцій у розробці гібридних інтелектуальних алгоритмів і систем є об'єднання класичних методів АІ з нечіткими системами, генетичними алгоритмами і т. п. Перспективним є поєднання нечіткої логіки та різних видів

нейронних мереж між собою (нечіткі нейронні мережі). Проте при впровадженні гібридних інтелектуальних систем часто виникають проблеми, пов'язані з інтеграцією окремих компонентів, через складнішу архітектуру такі системи мають низьку відмовостійкість [73].

В інформаційному просторі господарства електропостачання залізниці застосування алгоритмів DM може допомогти у виконанні завдань:

- оперативного та короткострокового прогнозування споживання електроенергії;
- виявлення невідомих взаємозв'язків між чинниками, що впливають на споживання електроенергії, та показниками споживання;
- короткострокового та довгострокового прогнозування виникнення аварій;
- виявлення прихованих тенденцій і закономірностей експлуатаційних процесів мережі електропостачання та прогнозування закономірностей їх розвитку;
- комплексного системного аналізу виробничих ситуацій;
- виявлення невідомих факторів впливу;
- візуалізації результатів аналізу;
- створення рекомендацій щодо прийняття управлінських рішень;
- підготовки звітів.

Наведені підходи інтелектуального аналізу даних дозволяють вирішувати актуальні завдання, такі як прогнозування електроспоживання, зміни графіка руху потягів, ефективної діагностики та керування системою електропостачання залізниці, тощо. На основі розглянутих методів при практичному застосуванні можуть виникати нові нетрадиційні алгоритми, пристосовані до виконання конкретних завдань.

2.3. Аналіз методів автоматизації оперативного та короткострокового прогнозування електроспоживання тягових підстанцій

Використання АСКОЕ дозволяє отримати картину електроспоживання кожного об'єкта в режимі максимально наближеному до реального часу і, відповідно,

планувати підключення своїх об'єктів з максимальною ефективністю. При наявності сучасної комп'ютерної системи комерційного обліку залізниця повністю контролює весь процес електроспоживання і має можливість за погодженням із постачальниками електричної енергії гнучко переходити до різних тарифних систем, мінімізуючи свої витрати. За цих умов об'єктивно зростає необхідність у підвищенні наукового підходу до комерційного обліку електроенергії [85].

Впровадження АСКОЕ на залізницях України дозволяє забезпечити роботу залізниць по закупівлі електроенергії з Оптового ринку електричної енергії за диференційованими тарифами і знизити витрати на електроенергію, здійснювати погодинний прогноз споживання електроенергії та керування процесом електроспоживання з урахуванням графіка руху поїздів та в подальшому застосовувати регулювання графіка руху з метою зниження ціни закупівлі електроенергії. У зв'язку зі значним щорічним зростанням тарифів на електроенергію збільшуються і витрати коштів на її оплату [45], що підвищує актуальність проблеми мінімізації оплати електроспоживання.

Перспективним напрямком щодо мінімізації затрат на закупівлю електроенергії є автоматизація процесу прогнозування споживання електроенергії на тягових підстанціях.

Варто відзначити, що прогнозування є однією з функцій СМ в сучасному її розумінні [14,15]. Прогнозування електричного навантаження забезпечує основну вихідну інформацію для прийняття рішень при керуванні електроенергетичними системами в процесі планування [86]. Вирішення загального завдання прогнозування електроспоживання ТП дозволяє оцінювати стан електричного господарства залізниці, використовуючи системні властивості об'єкта [28].

Розроблені раніше технології прогнозування були орієнтовані в основному на стаціонарні умови і використання питомих норм витрат. Сучасні умови функціонування залізниці характеризуються нестабільністю економічних процесів, що вимагає вдосконалення методів прогнозування [87].

Залізниці мають потребу в точному прогнозі необхідної кількості електроенергії. У випадку, якщо залізниця замовить менший обсяг, ніж їй знадобиться, нестачу вона

купуватиме за значно більшими цінами. А у випадку якщо буде спожито менше, ніж замовлено, надлишок доведеться реалізувати за суттєво меншими цінами, ніж вона була придбана. Остаточна ціна для залізниці як споживача таким чином залежить від точності прогнозу споживання.

Прогнозування електричного навантаження забезпечує основну вихідну інформацію для прийняття рішень при управлінні електроенергетичними системами в процесі планування.

На сьогоднішній день налічується велика кількість методів прогнозування [86-90]. Вибір ефективного методу для конкретного випадку має велике значення для точності прогнозування. Аналіз існуючих методів прогнозування не лише визначить переваги їх застосування, а й саму доцільність автоматизації цього процесу.

Важливою характеристикою є час випередження – відрізок часу від моменту, для якого є останні статистичні дані по досліджуваному об'єкті, до моменту, до якого відноситься прогноз. За періодом (проміжком часу) прогнозування поділяють на оперативне (до 1 місяця), короткострокове (до 1 року), середньострокове (до 3 – 5 років) та довгострокове (від 5 років) [86, 89]. Важливе значення для роботи з організації закупівлі електроенергії залізницею має точність прогнозування її споживання за годину, добу, місяць, так як заявка на місячний обсяг закупівлі складається до 20 числа місяця, що передує місяцю закупівлі. Від точності прогнозування залежить величина місячного платежу, а також точність розрахунку погодинних оптових тарифів [91]. За цих умов для прогнозування електроспоживання залізниці найбільшу роль відіграють оперативне та короткострокове прогнозування.

Прогнозування електричного навантаження базується на обліку властивостей прогнозованого процесу, його точність є непростою через нелінійні та складні відносини між навантаженням і факторами, від яких вона залежить. [86].

У роботі [1] детально розглянуто фактори, що впливають на споживання електроенергії від ТП. Велика кількість факторів робить прогнозування практично неможливим без застосування сучасних інформаційно-обчислювальних систем.

Для оцінки електроспоживання необхідний збір, обробка та зберігання статистичної інформації. На сьогоднішній день в Україні кожна магістраль має АСКОВЕ. Всього нараховується понад 5 тис. лічильників, за якими залізниці купують електроенергію на оптовому ринку електроенергії (ОРЕ), а це дозволяє контролювати в автоматичному режимі 98% обсягу закупівлі електроенергії з ОРЕ електроенергії в цілому по Укрзалізниці. Зважаючи на це, можна стверджувати, що для вирішення завдання оцінки електроспоживання тяговими підстанціями існує готова технічна база.

Сотні методів прогнозування, що існують сьогодні, основані на застосуванні базових процедур, які в цих методах повторюються, тому на практиці застосовують лише близько двох десятків методів. Для полегшення аналізу серед чисельних методів прогнозування слід виділити основні їх типи та розробити класифікацію.

Методи прогнозування умовно поділяють на дві групи. До однієї групи відносять евристичні методи, засновані на інтуїції, ерудиції і досвіді, тобто суб'єктивних якостях експерта. Іншу групу утворюють формалізовані методи, засновані на логічному аналізі моделі процесу. Результати можуть бути виражені математичними і графічними моделями, матрицями та мережами. Значне число методів у тій чи іншій мірі об'єднують елементи обох груп [86].

Евристичні методи прогнозування – це методи прийняття рішень, що використовують інтуїцію і досвід фахівців у вирішенні аналогічних проблем. Розрізняють дві групи евристичних методів прогнозування: інтуїтивні, засновані на основі особистої ерудиції, досвіді експерта та аналітичні, засновані на логічному аналізі моделі процесу розвитку об'єкта прогнозування.

Після опису об'єкта прогнозу евристичні методи прогнозування виконуються в три етапи: формування експертних груп, збір думок експертів і статистична обробка результатів.

Евристичні методи прогнозування застосовують при прогнозі нових систем, коли ще немає достатньої кількості статистичної інформації, або коли немає можливості формалізувати прогноз у вигляді математичних моделей. Найбільш

ефективні вони при прогнозуванні виробничих і технологічних систем, нових конструктивних рішень.

Однак вони суб'єктивні, а отже доцільні до застосування лише за наявності експертів, добре знайомих із прогнозованою ситуацією. Крім того, при прогнозуванні характеристик складних технічних об'єктів, таких як СТЕ, методи евристичного прогнозування стають досить складними і трудомісткими. Для таких завдань ефективнішою є група математичних методів прогнозування із застосуванням сучасних технологій автоматизації. До них належать групи методів екстраполяції та імітаційного моделювання.

Методи екстраполяції – це методи прогнозування, що полягають у поширенні тенденцій, встановлених у минулому, на майбутній період. Методи екстраполяції полягають у визначенні того, які значення буде приймати змінна величина, якщо відомий ряд її значень у минулі моменти часу.

У загальному вигляді екстраполяція являє собою певне значення функції $x = f(x_0, l, a)$, де x – прогнозоване значення рівня ряду динаміки; l – період упередження; x_0 – рівень ряду, прийнятий за базу екстраполяції; a – параметри рівняння тренду.

Залежно від математичного апарату методи екстраполяції умовно ділять на групи методів аналітичного прогнозування; статистичної класифікації та імовірнісного прогнозування.

До загальних недоліків методів аналітичного прогнозування слід віднести великий обсяг обчислювальних процедур при визначенні прогнозних значень параметрів та неточність результатів при неправильно обраній моделі. Крім того, доводиться враховувати неточності початкових даних, отриманих у період спостереження.

Методи прогнозування на основі статистичної класифікації вимагають обов'язкову наявність апріорної інформації, на основі якої і здійснюється встановлення екстраполяційних зв'язків, тобто необхідна вибірка даних по об'єкту одного типу з об'єктом, показники якого необхідно прогнозувати, що є недоліком даних методів.

Необхідність імовірнісного прогнозування визначається сильним впливом зовнішніх і внутрішніх факторів, що мають випадковий характер. До загальних недоліків імовірнісних методів прогнозування слід віднести необхідність наявності великого обсягу статистичних даних про процеси зміни параметрів і неможливість прогнозу різких змін на ділянці прогнозування.

Методи екстраполяції використовують в умовах відносно стабільної динаміки прогнозованих показників або за наявності сезонних чи циклічних коливань з чітко вираженою тенденцією змін. Використання цих методів є недоцільним, у випадках коли минулі періоди характеризується значною нестабільністю і їх екстраполяція на майбутні періоди є неможливою.

Надійність і точність прогнозу при застосуванні методів екстраполяції залежать від точності опису закономірності в минулому, а також від умов, що стан явища в цілому описується плавною кривою, а загальна тенденція розвитку явища в минулому і сьогодні не зазнає серйозних змін у майбутньому.

Переваги методу екстраполяції для прогнозування тягового електроспоживання обумовлені тим, що необхідні дані для аналізу можна отримати від АСКОВЕ. Екстраполяцію як спосіб прогнозування у галузі, де має місце значна частка нелінійних факторів впливу здійснювати складно. Оскільки модель прогнозу повинна бути стійкою до помилок у вихідних даних, а також до відсутності частини даних, методи екстраполяції для прогнозування електроспоживання тягових підстанцій у деяких випадках можуть давати незадовільні результати [92].

За конкретних умов методи екстраполяції здатні дати хороший результат. Проте проблема автоматизації прогнозування полягає в тому, що при зміні умов, виникає необхідність суттєвого переналагоджування або навіть повної зміни підходів до прогнозування. Для ефективного розпізнавання моменту зміни умов необхідна людина – експерт. Для автоматизації і цього процесу необхідно навчитися формально описувати класи навколишнього оточення і потім вирішувати завдання класифікації для прийняття рішення про переналагоджування або заміну моделі прогнозу відповідно до класу нових обставин. Вирішення такого завдання можливе

завдяки імітаційному моделюванню, до якого відносяться методи із застосуванням технологій ШІ.

Імітаційне моделювання – форма проведення прогнозування, шляхом створення моделі, яка описуватиме закономірності функціонування реальних систем та представляється у вигляді алгоритму, в якому визначаються всі найважливіші елементи, зв'язки в системі і задаються початкові значення параметрів, що відповідають «нульовому» моментові часу. Усі наступні зміни, що відбуваються в системі за законом причин і наслідків, обчислюються за допомогою засобів логічної обробки даних при виконанні даного алгоритму. Такий метод не вимагає складання рівнянь і не вимагає їх вирішення. Отже, він може знайти широке застосування в багатьох сферах людської діяльності без додаткових спеціальних знань. У ході імітаційного експерименту комп'ютер імітує функціонування системи та обчислює характеристики властивостей, які проявляються системою. За допомогою найпростіших інструментів імітаційного моделювання є можливість прораховувати ймовірність того чи іншого результату при врахуванні впливу відразу декількох факторів. Оперативність і простота методу дозволяє варіювати величезна кількість ситуацій при безлічі комбінацій початкових умов [93].

Імітаційну модель можна представити у вигляді функціональних блоків. Моделювання проводять етапами [94]:

1. Виявлення залежності між вихідними і вхідними величинами.
2. Встановлення законів розподілу значень для ключових параметрів моделі.
3. Реалізація комп'ютерної імітації значень ключових параметрів.
4. Обчислення основних характеристик.
5. Аналіз результатів і ухвалення рішень.

Основними методами імітаційного моделювання є: аналітичний, метод статичного моделювання і комбінований (аналітико-статистичний). Аналітичний метод здебільшого використовується при відсутності чинника випадковості для імітації процесів невеликих і простих систем, тому він не доцільний для прогнозування тягового електроспоживання. Метод статистичного моделювання – це чисельний метод, який спочатку розвивався як метод статистичних випробувань

(Монте-Карло) і полягає в здобутті оцінок імовірнісних характеристик. Цей метод застосовують для імітації процесів в системах, усередині яких є джерело випадковості або які здатні до випадкових дій. Комбінований метод використовують для створення моделі з різних модулів. Це набір статистичних та аналітичних моделей, які взаємодіють як єдине ціле.

Одним із варіантів комп'ютерної моделі, яка імітуватиме прогнозовану систему є ШНМ.

ШНМ являє собою сукупність нейронів, пов'язаних між собою. Нейрон – це елементарний перетворювальний елемент, що має безліч входів, на які поступають сигнали, блок, що підсумовує, блок перетворення сигналу за допомогою активаційної функції і один вихід. Особливістю ШНМ є те, що вони не програмуються в звичайному розумінні цього слова, а навчаються за допомогою навчальної вибірки. Технічно навчання полягає в знаходженні коефіцієнтів зв'язків між нейронами. У процесі навчання нейронна мережа здатна виявляти складні залежності між вхідними даними і вихідними, а також виконувати узагальнення. Це означає, що у разі успішного навчання мережа зможе повернути правильний результат на підставі даних, які були відсутні в навчальній вибірці, а також неповних чи частково недостовірних даних. Можливість навчання – це ще одна перевага нейронних мереж, адже в процесі експлуатації модель, основана на технологіях ШНМ з часом видаватиме точніші результати прогнозування. При грамотному застосуванні інструментарію нейронних мереж точність таких прогнозів значно перевищує точність прогнозів, здійснених за допомогою інших, зокрема класичних статистичних методів [90].

Аналіз публікацій [90,92-100] показав, що застосування ШНМ для прогнозування в різних галузях дало найвищі показники точності, порівняно з іншими методами прогнозування. Підхід до прогнозування із залученням технології нейронних мереж має багато незаперечних переваг [96, 101].

1. Нейронні мережі здатні вирішувати задачі навіть за відсутності апріорного знання про масив даних, закономірності розвитку ситуації та залежності між перемінними, вхідними та вихідними даними. Таким чином, нейронні мережі, як й

інші методи інтелектуального аналізу, дають можливість пошуку апріорно не прогнозованих знань в масивах емпіричної інформації. Традиційні статистичні та математичні методи не здатні адекватно вирішувати такі завдання.

2. Нейронні мережі здатні давати точні прогнози, незважаючи на наявність різнотипних, неінформативних, пропущених даних та не потребують нормальності розподілів вхідних перемінних. Нейронні мережі здатні прогнозувати значення втрачених даних.

3. Нейронні мережі мають властивість адаптуватися до змін зовнішнього середовища, тобто, навчена на певній вибірці нейронна мережа здатна адаптуватися до появи нової інформації, а також може вирізняти та класифікувати нові змінні, що не зустрічалися в навчальній вибірці.

4. Нейронні мережі володіють потенційною швидкістю за рахунок використання паралельної обробки даних.

Реалізація ШНМ має певні недоліки:

- для ефективності ШНМ необхідні комп'ютери, здатні до паралельних обчислень;
- реалізація алгоритмів побудови нейронних мереж пов'язана з необхідністю застосування спеціалізованого ПЗ;
- нейронні мережі працюють як «чорний ящик» – користувач не може дізнатися яким чином ШНМ прийшла до отриманих результатів прогнозу, тож проблеми інтерпретації призводять до зниження цінності отриманих результатів;
- для реалізації алгоритму навчання ШНМ потребують час пропорційний кількості змінних, що включаються до аналізу.

Зважаючи на переваги ШНМ над іншими методами прогнозування, несуттєві недоліки, пов'язані здебільшого з реалізацією, а також особливості прогнозування тягового електроспоживання, для ефективного вирішення задачі автоматизації такого прогнозування, рекомендується використовувати ШНМ.

Як інструмент прогнозування можна додатково виділити ще й гібридні методи. Оскільки інформація, що міститься в окремому методі прогнозування, обмежена,

гібридний метод може максимізувати наявну інформацію, інтегрувати інформацію про окремі моделі та максимально використовувати переваги кількох методів прогнозування, тим самим покращуючи його точність. Гібридні методи поєднують різні підходи, такі як, наприклад, поєднання короткострокових та середньострокових прогнозів.

Опрацювання як кількісної, так і якісної первинної інформації, що погано піддається формалізації реалізується з єдиних загальносистемних позицій [102].

2.4. Висновки до розділу 2

1. Визначено, що традиційні методи аналізу даних є не достатньо ефективними для їх об'єктивного застосування до баз знань інформаційного простору господарства електропостачання залізниць. Провідним засобом обробки інформації є інтелектуальний аналіз як етап процесу knowledge discovery in databases. Описано типову послідовність knowledge discovery in databases для баз знань єдиного інформаційного простору господарства електропостачання. Запропоновано області можливого застосування алгоритмів data mining.

2. Виявлено, що короткострокові й оперативні прогнози споживання електроенергії є найбільш значущими для залізничного транспорту. Проведено аналіз існуючих методів прогнозування електроспоживання, який показав, що автоматизація прогнозування необхідного об'єму електроенергії для залізниці є доцільною; методи імітаційного моделювання з використанням технології штучних нейронних мереж мають найвищу точність та ряд переваг над іншими методами для їхнього застосування в системі електропостачання залізниці.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦІ

3.1. Математичні методи підвищення інформативності первинних даних параметрів режимів роботи інтелектуальних мереж електропостачання

Забезпечення високого рівня ефективності використання енергоресурсів неможливе без управління вирішенням задач енергозбереження на всіх рівнях господарювання [103]. Нові засади організації інтелектуального обчислювального середовища на основі високоінформативних первинних даних передбачають взаємоув'язку переваг оптимізації, енергозбереження і гнучкості керуючих рішень.

Створення комп'ютерних мереж керування електропостачанням з інтелектуальними властивостями потребує проведення суттєвих наукових досліджень і пошуку нових шляхів синтезу обчислювальних архітектур обробки первинних багатоаспектних інформаційних даних на основі розробки сучасних математичних методів та комп'ютерно-орієнтованих алгоритмів, особливість яких відкриває можливість виявляти і накопичувати нові знання про режими функціонування енергосистем, створювати нові технології енергозбереження та покращити рівень безпеки перевізного процесу.

Особливістю функціонування систем електропостачання на тягу є швидкоплинність електромеханічних і електромагнітних процесів при аварійних (аномальних) станах системи, в зв'язку з чим у диспетчерського та оперативного персоналу не завжди є можливість впливати на аварійний процес для зупинки його розвитку [104].

Так як струм і напруга у найбільшій мірі визначають основний технологічний процес в електроенергетиці, та є пріоритетними параметрами моніторингу [14], організацію математичних методів підвищеної інтелектуальної складності та

розмірності розглянемо на прикладі динаміки струму та напруги аномальних режимів, що з'являються в процесі постачання електроенергії на тягу.

Отримання первинних даних щодо штатних та аварійних режимів СЕЗТ ґрунтується на технологіях розподілених синхронізованих вимірювань [105].

Аномальний чи аварійний процес постачання електроенергії залізницям може бути представлений сукупністю m миттєвих значень струму $i(t_0), i(t_1), i(t_2), \dots, i(t_j), \dots, i(t_m)$, та, відповідно, напруги $u(t_0), u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_j), \dots, u(t_m)$, на всьому інтервалі нестационарного процесу. Рис. 3.1.а відображає стрибок струму як приклад швидкоплинної динаміки первинних даних аварійного процесу.

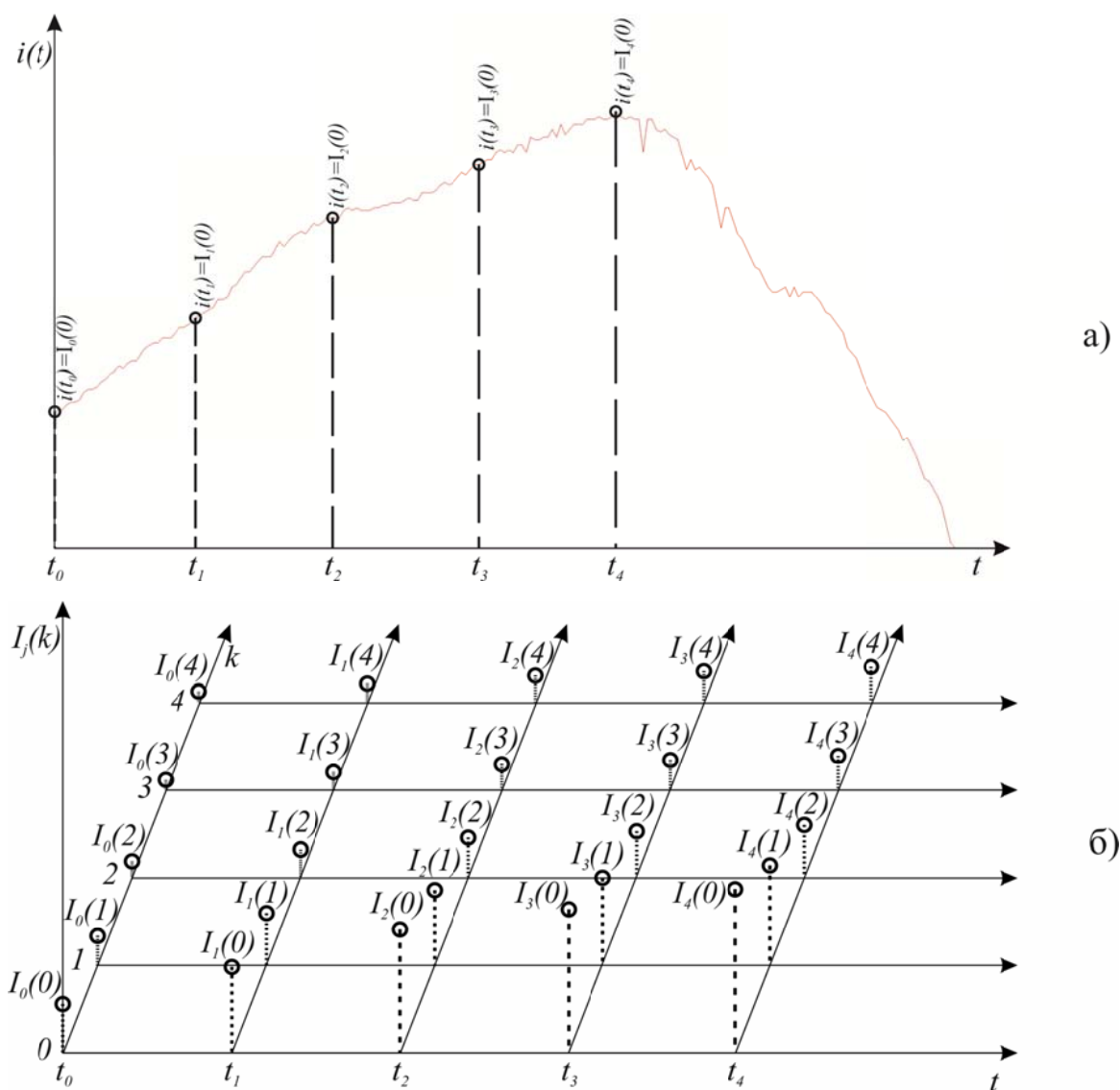


Рис. 3.1. Аномальний режим роботи системи електропостачання

Первинні дані, які поступають у вигляді аналогових, дискретних і цифрових сигналів із виходів відповідних датчиків, що розташовані у різних сегментах енергомережі та системи захисту, в комп'ютерному середовищі, орієнтованому на управління швидкоплинними процесами електропостачання та споживання є домінуючою [102].

Зареєстровані багатоаспектні первинні дані $i(t_0), i(t_1), i(t_2), \dots, i(t_j), \dots, i(t_m)$, $u(t_0), u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_j), \dots, u(t_m)$ і ряд інших, у сукупності представляють набір параметрів режимів аварійного процесу, які відображають стан системи електропостачання та силового електричного обладнання тягових підстанцій.

Синтез диференційних математичних методів інтелектуалізації процесів визначення інформативності параметрів режимів енергосистем реалізуємо на основі теорії диференційних перетворень Пухова [106], фундаментальні положення якої можна представити у вигляді наступної пари перетворень

$$I_0(k) = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k i(t)}{dt^k} \right]_{t=t_0} \stackrel{\triangleq}{=} i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k I_0(k), \quad t_0 = 0, \quad (3.1)$$

де $i(t)$ – первинна функція аргументу t , яка може бути n – раз диференційована та має відповідні обмеження разом із усіма своїми похідними; $I_j(k)$ – зображення функції – оригіналу $i(t)$, яке представляє собою дискретну функцію $I_j(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, \dots$, $j = 0, 1, \dots, m$; H – масштабний коефіцієнт, який має ту ж розмірність, що й аргумент t і, в більшості випадків, вибирається з умов $0 \leq t \leq H$, тобто на всьому діапазоні функції-оригіналу $i(t)$; \triangleq – символ, що характеризує відповідність між оригіналом $i(t)$ і його диференціальним Т-зображенням $I_j(k)$, ($k = 0, 1, 2, \dots$).

У математичній залежності (3.1) вираз, що знаходиться ліворуч від символу \triangleq представляє собою пряме диференційне перетворення. Завдяки прямому

диференційному перетворенню, на основі функції-оригіналу $i(t)$, формується Т-зображення дискретної функції $I_j(k)$ цілочислового аргументу $k=0,1,2,\dots$. Праворуч математичної залежності (3.1) – записано математичний вираз, що дозволяє за значенням Т-дискрет функції цілочислового аргументу $I_j(k)$ $k=0,1,2,\dots$ одержати функцію-оригінал $i(t)$.

Необхідно звернути увагу, що при $k=0$ згідно (3.1), для будь-якого миттєвого значення t_j кожного j^{20} параметру $i(t_j)$ виконується відповідна рівність $i(t_j) = I_j^i(0)$. Скористаємося зворотним диференційним перетворенням і для кожного дискретного значення аргументу аномального параметру (див. рис. 3.1.а) $t_0, t_1, t_2, \dots, t_m$ сформуємо систему диференційних рівнянь виду

$$\begin{aligned}
 I_0(1) \cdot \frac{t_{j+1}}{H} + I_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+1}}{H}\right)^2 + I_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+1}}{H}\right)^3 + I_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+1}}{H}\right)^4 &= i(t_{0+1}) - I_0(0) \\
 I_0(1) \cdot \frac{t_{j+2}}{H} + I_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+2}}{H}\right)^2 + I_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+2}}{H}\right)^3 + I_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+2}}{H}\right)^4 &= i(t_{0+2}) - I_0(0) \\
 I_0(1) \cdot \frac{t_{j+3}}{H} + I_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+3}}{H}\right)^2 + I_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+3}}{H}\right)^3 + I_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+3}}{H}\right)^4 &= i(t_{0+3}) - I_0(0) \\
 I_0(1) \cdot \frac{t_{j+4}}{H} + I_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+4}}{H}\right)^2 + I_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+4}}{H}\right)^3 + I_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+4}}{H}\right)^4 &= i(t_{0+4}) - I_0(0).
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

На основі прямого диференційного перетворення $I_0(k) = \frac{H^k}{K!} \left[\frac{d^k i(t)}{dt^k} \right]_{t=t_0}$, згідно

виразу (3.1), мають місце наступні рівності $i(t_0) = I_0(0)$, $i(t_1) = I_1(0)$, .. $i(t_j) = I_j(0)$, .. $i(t_m) = I_m(0)$, використавши які та розв'язавши систему алгебраїчних рівнянь (2.2) у випадку, коли $j=0$ отримаємо наступну сукупність Т-дискрет $I_0(0)$, $I_0(1)$, $I_0(2)$, $I_0(3)$, $I_0(4)$ функції $I_0(k)$ цілочислового аргументу $k=0,1,2,\dots$, що є зображенням

$i(t_0)$ у точці (t_0) . На основі аналізу отриманих значень $I_0(0), I_0(1), I_0(2), I_0(3), I_0(4)$ можна звернути увагу на те, що функція $i(t)$, представлена в точці (t_0) (див. рис. 3.1.б) є не лише величиною її миттєвого значення $i(t_0) = I_0(0)$, а і сукупністю Т-дискрет $I_0(1), I_0(2), \dots, I_0(k)$, кожна k з яких еквівалентна k -похідній функції $i(t)$ в цій же точці t_0 . Таким чином, повна інформативність зареєстрованих первинних даних визначається завдяки тому, що при їх обробці використовуються не лише миттєві значення параметрів у точках t_j , а також і значення n похідних у цих же точках. Подібна процедура інтелектуалізації процесів визначення інформативності параметрів режимів інтелектуальних мереж електропостачання дозволяє ліквідувати дефіцит зареєстрованої первинної інформації, що відображає швидкоплинні технологічні процеси електропостачання та є основою формування і накопичення нових знань у сфері оптимізації та енергозбереження залізничних енергосистем.

На основі виразів (3.1), (3.2), аналогічно вищеописаному синтезуємо визначення сукупності диференційних спектрів у кожній точці t_1, t_2, \dots, t_m перехідного процесу представлену у вигляді

$$A_j I_j'(k) = F_j, \quad (3.3)$$

де $A_j =$

$\frac{\tau_j}{H}$	$\left(\frac{\tau_j}{H}\right)^2$	\cdot	$\left(\frac{\tau_j}{H}\right)^n$
$\frac{\tau_{j+1}}{H}$	$\left(\frac{\tau_{j+1}}{H}\right)^2$	\cdot	$\left(\frac{\tau_{j+1}}{H}\right)^n$
\cdot	\cdot	\cdot	\cdot
$\frac{\tau_{j+n}}{H}$	$\left(\frac{\tau_{j+n}}{H}\right)^2$	\cdot	$\left(\frac{\tau_{j+n}}{H}\right)^n$

– матриця, яка формується відомим

способом, враховуючи, що $\tau_j = t_j - t_{j-1}$;

$F_j = \left[\begin{array}{c|c|c} i(t_{j+1}) - I_j(0) & i(t_{j+2}) - I_j(0) & \cdot & i(t_{j+n}) - I_j(0) \end{array} \right]^t$ – вектор правих частин;

$I_j'(k) = \left[\begin{array}{c|c|c|c} I_j(0) & I_j(1) & I_j(2) & \cdot & I_j(n) \end{array} \right]^t$ – вектор невідомих величин, компоненти

якого представляють собою диференційний спектр в точці j .

Реалізувавши рішення системи рівнянь (3.3) для кожної наступної точки t_1, t_2, \dots, t_j отримаємо первинні дані представлених в області диференційних зображень у наступному вигляді $I_0(0), I_0(1), \dots, I_0(k); I_1(0), I_1(1), \dots, I_1(k); I_j(0), I_j(1), \dots, I_j(k)$.

Описані математичні методи дозволяють підвищити інформативність зареєстрованих первинних даних та можуть застосовуватися у вирішенні завдань оптимізації електроспоживання та мінімізації втрат, пов'язаних із аварійними режимами роботи мереж електропостачання.

Застосування мікропроцесорних пристроїв підвищує ефективність релейного захисту й автоматики та відкриває перспективи для передачі їх функцій спеціальним керуючим обчислювальним машинам у нормальних і аварійних режимах [107], а запропоновані методи підвищення інформативності зареєстрованих первинних даних можуть бути корисним надбанням для реалізації такого функціоналу. Неповнота отриманих первинних даних при цьому залежить від їх формування та організації, способів реєстрації та синхронізації вимірів, що дуже важливо при керуванні розподіленими електроенергетичними системами [102].

3.2. Методи гармонічного аналізу первинних даних аномального процесу тягового електропостачання

В електричних мережах для контролю втрат потужності необхідно визначати складові прямої та зворотної послідовності не лише основної частоти, а й вищих гармонік [20].

В інженерній практиці великою популярністю користуються інтегральні перетворення Фур'є з безкінечними та скінченими границями. У залізничній

енергетиці дуже важливим є визначення комплексу перших гармонік аномального процесу, оскільки окремі із них мають великий вплив на надійність роботи залізничної автоматики, а в сукупності визначають якість електропостачання. В цьому плані, розглянемо способи організації обчислювального процесу визначення гармонічних складових аварійного режиму енергосистеми на основі диференціальних спектрів $I_0(0), I_0(1), \dots, I_0(k); I_1(0), I_1(1), \dots, I_1(k); I_m(0), I_m(1), \dots, I_m(k)$, що відображають зареєстровану первинну інформацію. Напишемо пряме перетворення Фур'є на кінцевому проміжку $(0, T)$

$$\dot{I}_\gamma = \frac{j^2 T}{T} \int_0^T e^{-j\gamma\omega t} \cdot i(t) dt; \quad i(t) = \frac{1}{j^2} \sum_{\gamma=-\infty}^{\gamma=+\infty} e^{j\gamma\omega t} \dot{I}_\gamma, \quad (3.4)$$

де \dot{I}_γ – комплексна амплітуда γ -гармоніки струму, причому $\dot{I}_\gamma = I_\gamma e^{j\gamma\omega t}$; $\omega = \frac{2\pi}{T}$;

$$j^2 = -1.$$

Оскільки $i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H}\right)^k I(k)$, то підставивши $i(t)$ у вираз (3.4), отримаємо

наступну математичну залежність

$$\dot{I}_\gamma = \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{I(k)}{H^k} \left(\frac{j^2 T}{T} \int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} dt \right). \quad (3.5)$$

Значення інтегралу в математичній залежності (3.5) визначається наступним чином

$$\int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} dt = \frac{k!(-1)^k}{(-j\gamma\omega)^{k+1}} \left(1 - \sum_{m=0}^{m=k} \frac{(-j\gamma\omega T)^m}{m!} \right). \quad (3.6)$$

Підставивши значення інтегралу (3.6) в (3.5) та реалізувавши ряд перетворень, отримаємо математичну залежність формування з Т-спектру $I(k)$ значення \dot{I}_γ , тобто на основі спектру функції $I(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, \dots$ визначимо сукупність

$$\dot{I}_\gamma = \frac{1}{\pi\gamma} \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{k!}{(j\gamma\omega H)^k} \left[\sum_{m=0}^{m=k} \left(\frac{T}{H}\right)^m \frac{(-j\gamma\omega H)^m}{m!} - 1 \right] I(k). \quad (3.7)$$

Для формування математичної залежності визначення Т-спектра $I(k)$ на основі комплексних амплітуд \dot{I}_γ підставим у вираз $I(k) = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k i(t)}{dt^k} \right]_{t=t_0}$ значення

оригіналу $i(t) = \frac{1}{j^2} \sum_{\gamma=-\infty}^{\gamma=+\infty} e^{j\gamma\omega t} \dot{I}_\gamma$ і, реалізувавши ряд перетворень, отримаємо

наступну математичну залежність

$$I(k) = \frac{1}{j^2} \sum_{\gamma=-\infty}^{\gamma=+\infty} \frac{(j\gamma\omega H)^k}{k!} \dot{I}_\gamma. \quad (3.8)$$

Необхідно відмітити, що при $\gamma = 0$, формула (3.7) дає невизначеність, розкривши яку, вираз (3.7) представляється в наступному вигляді

$$\dot{I}_0 = I^2 \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{T}{H}\right)^k \frac{1}{k+1} I(k). \quad (3.9)$$

Таким чином, на основі математичного апарату диференційних перетворень, став можливим синтез методів з інтелектуальними властивостями для формування

нових знань про штатні та нештатні режими функціонування систем електропостачання, як основи оптимізації електроспоживання та енергозбереження.

3.3. Комп'ютерно орієнтовані математичні методи мінімізації плати за електроенергію в умовах комерційного обліку

Інформаційні системи знаходять усе більше застосування в задачах ефективного використання електроенергії на залізничному транспорті [108]. Інформація, одержана за допомогою нових методів, володіє високим ступенем інформативності про об'єкт управління [102]. Стрімкий розвиток сучасних і перспективних комп'ютерних технологій забезпечив можливість автоматизації керування територіально-розподіленими об'єктами та став основою організації комп'ютерних інтегрованих систем комерційного керування електроспоживанням і забезпечення мінімізації комерційної вартості електроенергії. Поява ринку електроенергії призвела до введення диференційованих по зонах доби комерційних тарифів на електроспоживання. Особливістю таких тарифів є змінна вартість спожитої кіловат-години електроенергії протягом доби, що стало основою економічного стимулювання споживачів електроенергії для оптимізації режимів роботи енергосистеми шляхом мінімізації комерційної вартості електроенергії власного споживання та, відповідно, вирівнювання власного графіка навантаження [109].

Маючи прогнозовані значення електроспоживання ТП, розглянемо задачу переведення ТП на закупівлю електроенергії за одним із актуальних комерційних тарифів для отримання економічної вигоди.

На сьогоднішній день залізниці закупають електроенергію для власних потреб та для постачання своїм абонентам у різних типів постачальників – постачальників за регульованим тарифом (обленерго) постачальників за нерегульованим тарифом та на ОРЕ України [110].

Інформаційні технології мінімізації оплати електроспоживання ТП поділяються на дві основні групи: які допускають або які не допускають зміни графіка руху поїздів.

Зі зміною графіка руху теоретично можна досягти економічного ефекту на будь-якій електрифікованій ділянці залізниці, проте зміна графіка руху несе за собою додаткові труднощі.

Проблема застосування диференційованих тарифів для залізничного транспорту не може бути вирішена лише застосуванням АСКОЕ із відповідним ПЗ. В умовах суттєвого зростання вартості електроенергії дані з АСКОЕ дають можливість шукати шляхи економії.

Одним із економічних факторів є можливість купувати електроенергію за різними тарифними системами. Засоби оцінки ефективності тарифної системи повинна враховувати цей фактор для оцінки електроенергетичних затрат.

Контроль витрати електроенергії здійснюється багатофункціональними електронними лічильниками АСКОЕ, за допомогою якої обсяг закупівлі відстежується погодинно. Аналіз інформації з таких лічильників дозволяє оцінювати потреби споживачів, встановити багатотарифні зони оплати [111].

Плата за активну електричну енергію, використану в розрахунковий період t (як правило місяць), за однозонним тарифом визначається за виразом

$$Bo(t) = k \cdot W(t),$$

де k – ціна згідно ринкового однозонного тарифу, грн/кВт год; $W(t)$ – споживання активної електроенергії, кВт·год.

Споживання електроенергії в енергосистемах протягом дня є нерівномірним [7]. У часи пікового навантаження на енергосистему постачальники несуть додаткові затрати на генерацію електричної енергії, щоб задовольнити попит. Це пов'язано з тим, що не існує розвиненої технології накопичення електроенергії у великій кількості.

З метою вирівняти добовий графік навантаження енергетичної системи України Національна комісія з питань регулювання електроенергетики затвердила при розрахунках за електроенергію тарифи, диференційовані за періодами часу. Ставка тарифу для кожного періоду часу визначається шляхом множення встановленого

тарифу на відповідний коефіцієнт (табл. А.1, додаток А) [112]. Інформація, вказана в табл. А.1, актуальна станом на грудень 2016 р. і може змінюватися [113].

Застосування АСКОЕ дає можливість скористатися ДТ на оплату електроенергії та спланувати виробництво таким чином, щоб максимально перевести діяльність енергоємних операцій на час дії пільгових тарифів [85]. Плата за розрахунковий період t при тризонному ДТ становить

$$Bd(t) = A_n \cdot k \cdot W_n(t) + A_{nn} \cdot k \cdot W_{nn}(t) + A_n \cdot k \cdot W_n(t),$$

де A_n , A_{nn} , A_n – тарифні коефіцієнти (табл. А.1, додаток А) за електроенергію, спожиту в нічний, напівпіковий і піковий періоди часу відповідно;

W_n , W_{nn} , W_n – витрати електроенергії за розрахунковий період t у нічний, напівпіковий і піковий періоди часу відповідно, кВтгод.

Прогнозування тягового електроспоживання дозволяє оцінити ефективність застосування ДТ оплати електроенергії.

Для прийняття рішення про переведення ТП на ДТ необхідно, щоб задовольнялася умова

$$Bd^*(t) < Bo^*(t) \quad (3.10)$$

де $Bd^*(t)$, $Bo^*(t)$ – прогнозовані значення вартості електроенергії згідно ДТ та однозонного тарифу відповідно.

Якщо умову (3.10) виконано, то переведення ТП на ДТ вигідне.

$$Bd^*(t) = k \sum_{j=1}^i A_j \cdot W_j^*(t);$$

$$Bo^*(t) = k \cdot W^*(t), \quad (3.11)$$

де $W^*(t)$ – прогнозоване значення витрат електроенергії,

i – кількість тарифних зон,

j – період часу.

Підставивши (3.11) в умову (3.10), отримуємо

$$\sum_{j=1}^i A_j \cdot W_j^*(t) \leq \sum_{j=1}^i W_j^*(t). \quad (3.12)$$

Рівність умови (3.12) дозволяє встановити граничні відносні обсяги електроспоживання по зонах ДТ, при яких розглянутий ДТ ефективний за вартістю. Умова (3.12) може бути застосована як для тризонного ДТ, так і для двозонного.

Для оцінки ефективності переведення тягових підстанцій на ДТ без зміни графіка руху поїздів можна застосовувати правило (3.12). Для тризонного ДТ воно набуде виду

$$W_n^*(t) - A_n \cdot W_n^*(t) > A_{nn} \cdot W_{nn}^*(t) + A_n \cdot W_n^*(t) - W_{nn}^*(t) - W_n^*(t) \quad (3.13)$$

У випадку справдження виразу (3.13), різниця між його лівою та правою частинами показує на скільки економічний вигравш від застосування ДТ у нічний період перевищує програш у піковий та напівпіковий періоди. При цьому добуток отриманого значення та ціни електроенергії k буде кількісним показником зекономлених коштів за розрахунковий період.

При розрахунковому періоді, тривалістю місяць або рік слід враховувати, що електроспоживання залізниці залежить від дня тижня та пори року. Це пов'язано зі змінами тривалості світлового дня, температури та графіка руху поїздів. Тому для більш точних обчислень при таких розрахункових періодах умова (3.12) набере виду

$$\sum_{m=1}^d \left(\sum_{j=1}^i A_j \cdot W_j^*(t) \right) \leq \sum_{m=1}^d \left(\sum_{j=1}^i W_j^*(t) \right), \quad (3.14)$$

де d – кількість діб у розрахунковому періоді.

3.4. Висновки до розділу 3

1. Запропоновано диференційні математичні методи підвищеної інтелектуальної складності та розмірності визначення повної інформативності зареєстрованих первинних даних динамічних процесів аномальних і аварійних режимів систем електропостачання як основу формування нових знань у сфері енергопостачання для оптимізації процедур електроспоживання і створення інтелектуальних енергозберігаючих технологій.

2. Розроблено методи інтелектуалізації процедур гармонічного аналізу первинної інформації, представленої в області диференційних зображень у вигляді диференційних спектрів для визначення окремих гармонічних складових і їх особливостей, аномальних та динамічних режимів роботи системи електропостачання.

3. Формалізовано залежність вартості електроенергії від часу її споживання тяговим навантаженням та розроблено комп'ютерно-орієнтовані математичні методи використання комерційних тарифів оплати електроенергії на залізничному транспорті для досягнення економічного ефекту. Розроблені методи дають змогу оцінити ефективність застосування однозонного, двозонного та тризонного тарифів оплати електроенергії, розраховувати витрати на закупівлю електроенергії на тягу за періодам часу та граничні обсяги споживання електроенергії в заданих періодах, при яких перехід на закупівлю електроенергії за тризонним диференційованим тарифом економічно вигідний. Особливість отриманого способу полягає в тому, що оцінка ефективності застосування тарифу не залежить від ринкової ціни на електроенергію, а лише від обсягів споживання протягом кожного з періодів часу диференційованого тарифу.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ГОСПОДАРСТВА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦІ

4.1. Формування диференційних спектрів первинних даних моніторингу мережі електропостачання

Однією з основних вимог до системи електропостачання є передбачені заходи щодо забезпечення необхідних показників якості електроенергії (зокрема стабільність, мінімум коливань і допустимі величини відхилень напруги у нормальних, аварійних і післяаварійних режимах).

Реагування на аварійні ситуації найбільш ефективно, якщо небезпеку правильно ідентифіковано автоматизованими пристроями та швидко здійснено відповідне автоматизоване реагування [114]. Саме тому з'являється потреба у проведенні глибшого дослідження стохастичних процесів функціонування енергосистеми для створення методів читання первинних даних [102].

Струми КЗ у електричних установках можуть досягати значних величин і становлять небезпеку для апаратури та струмопровідних частин електроустановок.

Розглянемо процес формування диференційних спектрів $I_0(0), I_0(1), \dots, I_0(k)$; $I_1(0), I_1(1), \dots, I_1(k)$; $I_j(0), I_j(1), \dots, I_j(k)$ на прикладі реальних первинних даних, що представляють аварійний режим, який зареєстровано ІДК «РЕГІНА» мережі електропостачання на тяговій підстанції Любинь Великий Південно-західної залізниці.

Аварійний процес системи електропостачання характеризується відхиленням миттєвих значень напруги і струму та виходу одного з цих параметрів за межі уставки, після чого, як це було описано в розділі 1, ІДК «РЕГІНА» реєструє початок аварійного процесу на об'єкті моніторингу. Момент виходу параметрів аналогових сигналів за межі уставки програма аналізу обирає як точку відліку (t_0). На рис. 4.1

наведено графічне зображення зміни струму під час аварійного процесу в системі електропостачання залізниці.

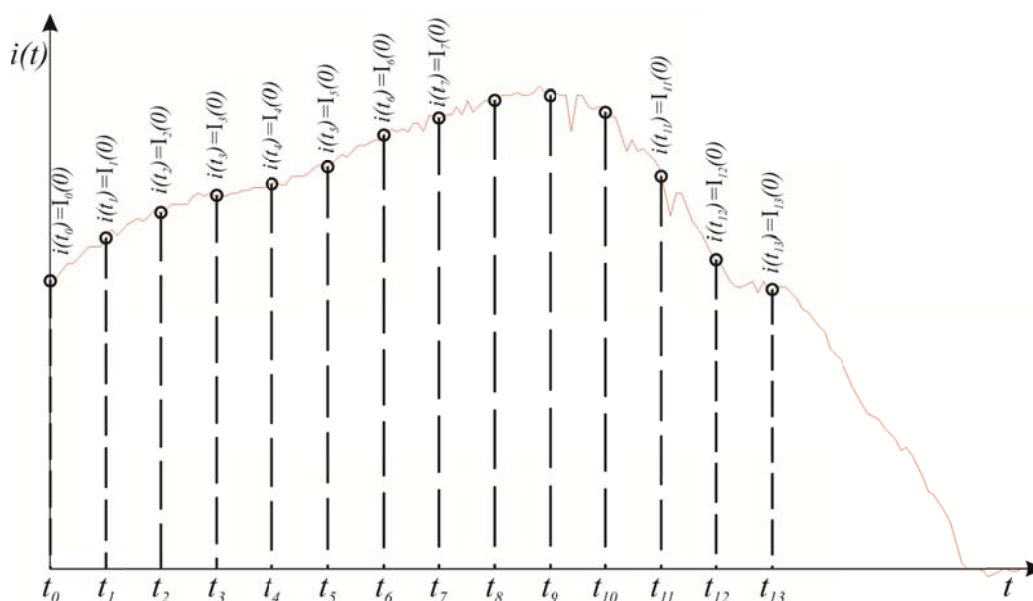


Рис. 4.1. Графік зміни струму після реєстрації аварійного режиму на тяговій підстанції Любинь Великий

Для формування диференціальних спектрів використаємо набір миттєвих значень струму аварійного режиму в точках $t_0, t_1, t_2, \dots, t_j$ і представимо їх у табличній формі для перших j точок (табл. 4.1).

Таблиця (4.1)

Миттєві значення струму, зареєстровані під час аварійного процесу

j	t_j , мс	$i(t_j)$, кА	j	t_j , мс	$i(t_j)$, кА
0	0	1.507	7	14	2.289
1	2	1.703	8	16	2.345
2	4	1.801	9	18	2.345
3	6	1.856	10	20	2.163
4	8	1.94	11	22	1.856
5	10	2.038	12	24	1.424
6	12	2.177	13	26	1.396

На основі виразу (3.3) реалізуємо рішення відповідної системи рівнянь для кожної точки $t_0, t_1, t_2, \dots, t_j$ миттєвих значень параметру струму аварійного режиму й

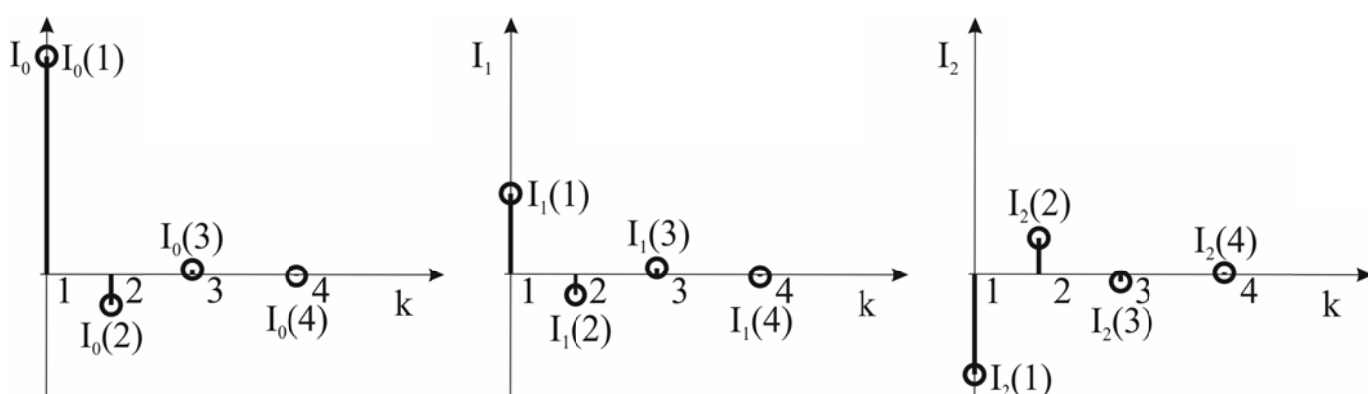
отримаємо сукупність диференційних спектрів, представлених у сфері диференційних зображень в табличній формі (табл. 4.2).

Таблиця (4.2)

Сукупність диференційних спектрів струму

j	$I_j(0)$, кА	$I_j(1)$, кА	$I_j(2)$, кА	$I_j(3)$, кА	$I_j(4)$, кА
0	1.507	0.13	-0.017	6.146×10^{-4}	4.427×10^{-5}
1	1.703	0.045	-0.011	1.656×10^{-3}	-7.031×10^{-5}
2	1.801	-0.059	0.02	-1.831×10^{-3}	6.649×10^{-5}
3	1.856	0.093	-0.03	3.37×10^{-3}	-1.088×10^{-4}
4	1.94	-0.111	0.018	-5.79×10^{-4}	-4.836×10^{-7}
5	2.038	-0.228	0.04	-2.119×10^{-3}	3.532×10^{-5}
6	2.177	0.325	-0.068	4.742×10^{-3}	-1.083×10^{-4}
7	2.289	-0.924	0.14	-6.811×10^{-3}	1.052×10^{-4}
8	2.345	-0.265	0.04	-1.762×10^{-3}	2.098×10^{-5}
9	2.345	-4.673	0.644	-0.029	4.384×10^{-4}

В якості прикладу на рис. 4.2 наведено декілька графіків диференційних спектрів представлених у вигляді функцій $I_j(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Рис. 4.2. Графіки функцій $I_j(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, 3, 4$

Розглянемо застосування описаних вище математичних методів для тієї ж аварії на ТП Любинь Великий, починаючи з точки t_0 , щоб отримати диференційні спектри

коливань напруги та всестороннього дослідження зареєстрованих первинних даних. Крива, зображена на рис. 4.3., відображає коливання синхронно зареєстрованих швидкоплинних значень напруги під час протікання аварійного процесу в результаті КЗ.

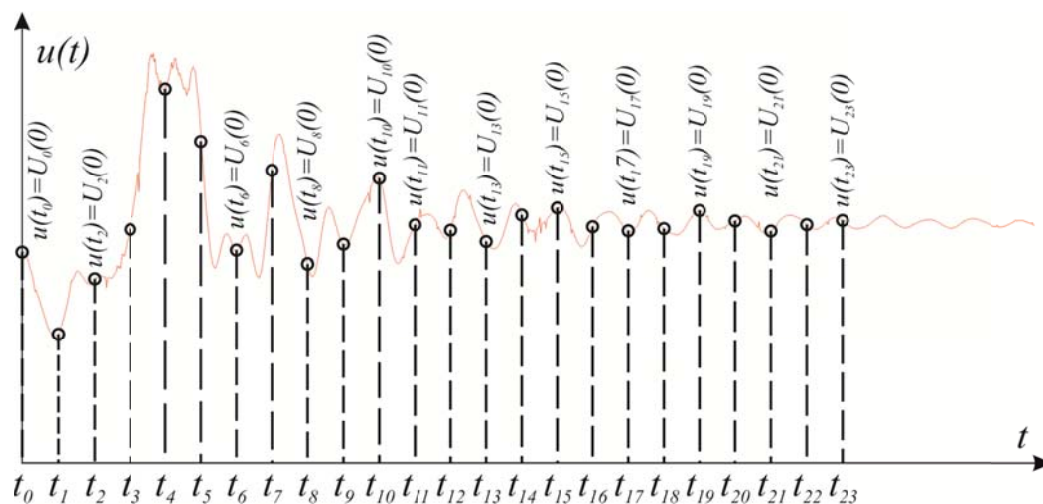


Рис. 4.3. Коливання напруги під час аварійного процесу

Для опрацювання миттєвих значень напруги аварійного процесу (табл. 4.3) система диференціальних рівнянь (3.2) набирає виду

$$\begin{aligned}
 & U_0(1) \cdot \frac{t_{j+1}}{H} + U_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+1}}{H}\right)^2 + U_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+1}}{H}\right)^3 + U_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+1}}{H}\right)^4 = \\
 & = u(t_{0+1}) - U_0(0) \\
 & U_0(1) \cdot \frac{t_{j+2}}{H} + U_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+2}}{H}\right)^2 + U_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+2}}{H}\right)^3 + U_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+2}}{H}\right)^4 = \\
 & = u(t_{0+2}) - U_0(0) \\
 & U_0(1) \cdot \frac{t_{j+3}}{H} + U_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+3}}{H}\right)^2 + U_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+3}}{H}\right)^3 + U_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+3}}{H}\right)^4 = \\
 & = u(t_{0+3}) - U_0(0) \\
 & U_0(1) \cdot \frac{t_{j+4}}{H} + U_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+4}}{H}\right)^2 + U_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+4}}{H}\right)^3 + U_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+4}}{H}\right)^4 = \\
 & = u(t_{0+4}) - U_0(0).
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Миттєві значення напруги, зареєстровані під час аварійного процесу

j	t_j , мс	$u(t_j)$, кВ	j	t_j , мс	$u(t_j)$, кВ	j	t_j , мс	$u(t_j)$, кВ
0	0	3.102	8	56	2.830	16	112	3.513
1	7	1.929	9	63	3.195	17	119	3.392
2	14	2.718	10	70	4.132	18	126	3.416
3	21	3.612	11	77	3.528	19	133	3.688
4	28	5.508	12	84	3.489	20	140	3.555
5	35	4.613	13	91	3.223	21	147	3.422
6	42	3.126	14	98	3.585	22	154	3.479
7	49	4.492	15	105	3.749	23	161	3.57

Опираючись на досвід комп'ютерного моделювання та для простоти реалізації, рішення системи (4.1) для 20 точок обчислимо за допомогою інженерного математичного ПЗ Mathcad.

Способи вирішення систем лінійних рівнянь у Mathcad діляться на дві групи: точні методи, що представляють собою кінцеві алгоритми для обчислення коренів системи (рішення систем за допомогою методу Гауса, оберненої матриці, правила Крамера, та ін.), а також ітераційні методи, які дозволяють отримати рішення системи з заданою точністю шляхом збіжних ітераційних процесів (метод Зейделя, метод ітерації, тощо). Для проведення розрахунків, з міркувань отримання точності результатів, обрано функцію Mathcad «lsolve», яка відповідає за обчислення методом оберненої матриці. Вираз (3.3) набере виду

$$A_j U_j'(k) = F_j, \quad (4.2)$$

$$F_j = \left[\begin{array}{c|c|c} u(t_{j+1}) - U_j(0) & u(t_{j+2}) - U_j(0) & \cdot & u(t_{j+n}) - U_j(0) \end{array} \right]^t;$$

$$U_j'(k) = \left[\begin{array}{c|c|c|c} U_j(0) & U_j(1) & U_j(2) & \cdot & U_j(n) \end{array} \right]^t.$$

У результаті обчислень отримана сукупність диференційних спектрів напруги в області диференційних зображень для 20 точок ($t_0, t_1, t_2, \dots, t_{19}$) (табл. 4.4).

Сукупність диференційних спектрів напруги

j	$U_j(0)$, кВ	$U_j(1)$, кВ	$U_j(2)$, кВ	$U_j(3)$, кВ	$U_j(4)$, кВ
0	3.102	-0.495	0.065	-2.91×10^{-3}	4.779×10^{-5}
1	1.929	0.571	-0.081	4×10^{-3}	-5.962×10^{-5}
2	2.718	-1.781	0.175	-5.277×10^{-3}	5.036×10^{-5}
3	3.612	-1.202	0.12	-3.621×10^{-3}	3.438×10^{-5}
4	5.508	5.694	-0.389	8.656×10^{-3}	-6.326×10^{-5}
5	4.613	-7.198	0.414	-7.851×10^{-3}	4.908×10^{-5}
6	3.126	4.11	-0.196	3.069×10^{-3}	-1.586×10^{-5}
7	4.492	3.627	-0.175	2.744×10^{-3}	-1.418×10^{-5}
8	2.830	-6.173	0.25	-3.356×10^{-3}	1.49×10^{-5}
9	3.195	2.89	-0.105	1.274×10^{-3}	-5.153×10^{-6}
10	4.132	-2.826	0.099	-1.16×10^{-3}	4.502×10^{-6}
11	3.528	3.926	-0.124	1.294×10^{-3}	-4.485×10^{-6}
12	3.489	0.343	-0.014	1.687×10^{-4}	-6.572×10^{-7}
13	3.223	-3.2	0.088	-8.014×10^{-4}	2.423×10^{-6}
14	3.585	0.159	-2.412×10^{-3}	6.989×10^{-6}	1.642×10^{-8}
15	3.749	-0.289	8.825×10^{-3}	-8.735×10^{-5}	2.804×10^{-7}
16	3.513	5.063	-0.119	9.261×10^{-4}	-2.4×10^{-6}
17	3.392	-4.211	0.091	-6.515×10^{-4}	1.554×10^{-6}
18	3.416	-1.582	0.034	-2.48×10^{-4}	5.929×10^{-7}
19	3.688	2.047	-0.04	2.577×10^{-4}	-5.54×10^{-7}

4.2. Формалізація процесів функціонування залізниці та дослідження програмних засобів нейромережевого прогнозування електроспоживання

Розробка ШНМ поділяється на етапи: підготовки даних; побудови алгоритму; його тренування на вибірці та валідації на тестових даних.

Процес підготовки даних для ШНМ простий в плані подання якісних ознак у числовому виді. Наприклад, тип погоди (сонячно, хмарно, дощ, сніг) достатньо подати в числовому виді як 1,2,3,4 відповідно. Значення дат і часу, за потреби, можна перетворити у числові, віднімаючи з них початкову дату (час). Кількісні дані можна залишити без змін.

Збільшення кількості використаних факторів нелінійно збільшує кількість необхідних спостережень, так що вже при досить невеликій кількості факторів може знадобитися величезна кількість спостережень. Зазвичай на практиці достатньо декількох сотень або тисяч спостережень, а для складних завдань може знадобитися більше, при цьому завдання, де потрібно менше 100 спостережень зустрічаються дуже рідко [115].

Розглядаючи систему електропостачання залізниць як об'єкт моніторингу в 1 розділі, зроблено висновок, що складність моделювання такої системи полягає у великій кількості факторів, що впливають на електроспоживання. Очевидно, що врахування їх усіх потребуватиме величезної вибірки даних. За наявності достатньої кількості даних можна визначити вплив на електроспоживання кожного фактору окремо експериментальним шляхом. При цьому, додаючи в ШНМ новий фактор, слід перевіряти зміну похибки прогнозування, нерідко вона може зростати.

Результат прогнозування залежить у першу чергу від якості вхідних даних, тому при побудові прогностичної моделі обов'язково слід враховувати фактори, що матимуть найістотніший вплив на вихідні дані ШНМ, оскільки включення невідповідних входів або входів, що не впливають на цільові результати, може спотворити продуктивність прогнозу, збільшити час навчання, збільшити складність мережі [95]. ШНМ може не знайти зв'язок між вхідними даними, що мають не такий вагомий, опосередкований вплив на вихідні дані мережі.

На етапі навчання крім якості підбору ваг важливу роль відіграє його тривалість. Ці фактори, зазвичай, пов'язані зворотною залежністю, тому їх доводиться вибирати на основі компромісу. Якість його виконання суттєво впливає на ефективність функціонування мережі в штатному режимі при вирішенні поставлених завдань [50].

Проходження процедури навчання ШНМ відбувається ітераціями. Помилка навчання визначається шляхом порівняння вихідних значень із цільовими значеннями після проходження через мережу всіх існуючих спостережень. Для оцінки точності штучного нейронного підходу в прогнозуванні можуть бути використані різні критерії.

Типовим критерієм якості навчання є середньоквадратична помилка Mean Squared Error (MSE) – середнє значення квадрату різниці між результуючими та цільовими значеннями, визначити яку можна за формулою [95,115]:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N},$$

де ε – помилка навчання; X_i та Y_i – значення очікуваного та фактичного виходів ШНМ. Нижчі значення краще. Нуль означає відсутність помилки.

Середня абсолютна похибка (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) задана формулою:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_i - Y_i|}{X_i}.$$

Сумарна квадратична похибка (Sum Squared Error, SSE):

$$SSE = \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2.$$

Стандартне відхилення вибірки (Standard Deviation of Error, SDE) визначається наступним чином [98]:

$$SDE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left((X_i - Y_i) - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i) \right) \right)^2}.$$

Графік залежності MSE від кількості ітерацій для нормально навченої ШНМ має вид (рис. 4.4), де величина MSE впродовж процесу навчання як правило буде не більшою, ніж на попередніх ітераціях.

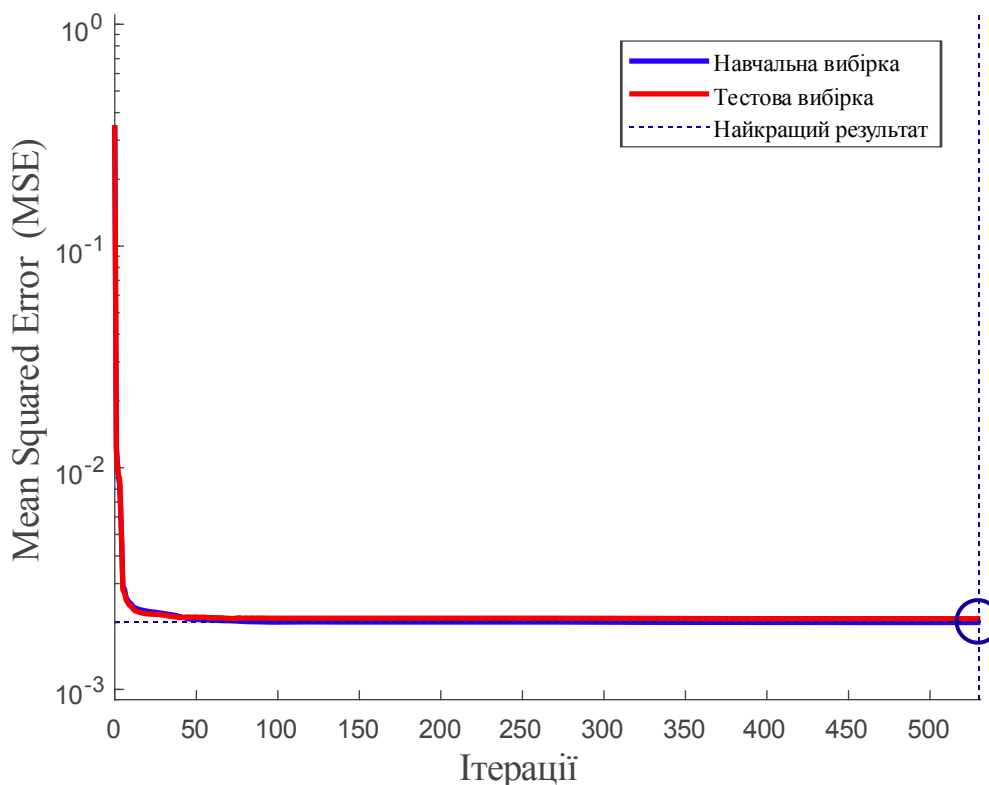


Рис. 4.4. Типовий графік зміни середньоквадратичної помилки в залежності від ітерацій навчання ШНМ (алгоритм Байєсівської регуляризації)

З графіка видно, що алгоритм зупинився на 531 ітерації, а найменше значення MSE досягнуто на 530 ітерації та дорівнює 0,0020052. Таке значення MSE можна вважати хорошим результатом навчання, а на вхід ШНМ можна подавати нові дані.

Якщо помилка навчання ε для всієї множини вхідних даних не виходить за встановлене обмеження, або досягнуто заздалегідь задану кількість ітерацій, процес навчання завершується.

Алгоритм навчання поступово шукає глобальний мінімум, починаючи з випадково вибраної точки на поверхні функції помилок, та зупиняється в деякому мінімумі, який при вдалому навчанні буде глобальним, а може виявитися лише локальним, тобто модель працюватиме не для всіх даних. У такому разі необхідна

регуляризація для якої можна використати формулу нормування вхідних даних, до яких виявився чутливим нейрон.

$$V_i' = \frac{V_i - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

де V_i та V_i' – ненормоване та нормоване значення, що подаються на $i^{\text{й}}$ вхід, V_{\min} і V_{\max} – мінімальне та максимальне значення вхідних даних даної вибірки.

Складність регуляризації у тому, що важко знайти оптимальний параметр регуляризації та кількість необхідних нейронів, тому на основі правила Байєса було запропоновано Д. Мак-Кейєм автоматичний вибір параметра регуляризації [116]. Детально процедури регуляризації з використанням правила Байєса та алгоритму Левенберга – Маркварда описано у роботі [23].

Серед великої кількості програмних комплексів, що дозволяють складати прогнозні моделі на основі ШНМ обрано додаток Matlab Neural Network Toolbox. Вибір обумовлено популярністю програмного продукту, його доступністю та наявністю досвіду роботи в середовищі Matlab.

По суті алгоритми навчання нейронних мереж аналогічні алгоритмам пошуку глобального екстремуму функцій багатьох змінних [54,115]. У Neural Network Toolbox такими є алгоритми спряжених градієнтів [117] і Левенберга – Марквардта (Levenberg – Marquardt) [118]. Вони зупиняються під час збільшення середньої квадратичної помилки тестових зразків. Алгоритм Байєсівської регуляризації (Bayesian regularization) зупиняється відповідно до мінімізації адаптаційної ваги (регуляризації).

Розглянемо програмне рішення Neural Network Toolbox Matlab як інструмент прогнозування на основі ШНМ. Neural Network Toolbox дає достатні можливості для моделювання ШНМ із використанням популярних алгоритмів при відносно простій реалізації, що в свою чергу дозволяє швидко протестувати доступні алгоритми й обрати кращий для конкретної задачі. В програмі доступні вибір архітектури ШНМ залежно від завдання, налаштування кількості нейронів і прихованих шарів, що дає

змогу експериментальним шляхом швидко оцінити різні конфігурації та впливає на здатність ШНМ до навчання і змінюються залежно від складності поставленої мети. Хоча немає жорсткого набору правил для визначення оптимальної конфігурації ШНМ, основним правилом є вибір мінімальної кількості нейронів, достатньої для того, щоб виконати завдання, але не надто багато, щоб навчання не призвело до локального рішення.

В якості вхідних даних ШНМ взято графік руху поїздів через станцію Фастів та погодинні значення температури повітря.

Сучасні прилади дозволяють вести облік електроенергії з періодом дискретизації у декілька хвилин, проте здебільшого використовуються погодинні графіки електричних навантажень [119]. Оскільки цільовим виходом моделі є прогнозоване погодинне навантаження, вона має один вихід. У нашому випадку в якості вхідних даних ШНМ є також погодинні показники споживання електроенергії режимної доби зняті з лічильників АСКОЕ ТП ЕЧЕ-8.

Прогнозування методами інтелектуальної обробки вимагає попереднього перетворення вхідних даних. Класифікуємо потяги, що проходять через станцію на три типи – регіональні та приміські електропоїзди, поїзди далекого сполучення, вантажні поїзди. Оскільки в нас немає точного часу слідування кожного з них через дільниці, які живляться від ТП ЕЧЕ-8, припустимо що цей час та споживана потужність для кожного потяга одного типу однакові. Для характеристики інтенсивності руху на станції введемо кількісну характеристику, де одиницею буде поїзд, що прибув та відправився зі станції в межах однієї години доби. Тоді для характеристики поїзда, час прибуття якого лежить в межах однієї години, а час відправлення – в межах наступної, введемо коефіцієнт 0,5 для обох годин. Поїзди, для яких станція Фастів є початковою або кінцевою вважатимемо 1, оскільки один із фідерів ЕЧЕ-8 живить Моторвагонне депо, яке їх обслуговує.

У роботі [120] для прогнозування навантаження енергетичної системи одними із вхідних даних було взято тип дня – робочий та святковий, так як автори експериментально встановили, що розбиття вхідних даних на дні тижня хоч і

знижує похибку навчання мережі, але призводить до погіршення якості прогнозування.

Як приклад набору вхідних даних, взятих для дослідження, наведено формалізовані дані однієї доби функціонування залізничного вузла Фастів (табл. 4.5).

Таблиця (4.5)

**Інтенсивність руху поїздів та виміри спожитої активної електроенергії
21 червня 2017р.**

Час доби, год.	Вплив нетягових споживачів залізниці	Регіональні та приміські електропоїзди	Поїзди далекого сполучення	Вантажні поїзди	Температура повітря, °С	Споживана активна електроенергія, кВт·год
0	0	3	3,5	7	21	7535
1	0	1	1	9,5	21	11055
2	0	0	6	5	21	7480
3	0	1	2,5	9	21	11385
4	0	1	5,5	4	20	7810
5	0	10,5	4	1	19	4675
6	0	3	8,5	3,5	17	7480
7	0	5,5	4,5	2	18	10010
8	1	3	6	5	19	9075
9	1	2,5	3,5	4,5	20	9625
10	1	3	2,5	5,5	20	10835
11	1	1	1,5	2,5	21	7645
12	1	1,5	3	2	22	8745
13	1	3	2,5	6,5	22	10230
14	1	3	0	5,5	23	8745
15	1	4	1,5	1,5	24	9845
16	1	3	2,5	5	24	8470
17	0	3,5	5	3	24	9570
18	0	5	4,5	4	23	12210
19	0	8,5	4	4	22	14300
20	0	8	3,5	4	21	10670
21	0	4	7	1	20	10945
22	0	3	6,5	1,5	20	10395
23	0	3	5,5	7	20	14905

На відміну від енергосистеми загалом, основним споживачем електроенергії на залізниці є тяга поїздів, причому відмінності розкладу руху між вихідними та робочими днями по станції взятій для дослідження не суттєві та не матимуть

істотного впливу. Розклад руху для вузла Фастів у вихідні та робочі дні відрізнявся на 1-2 потяги. Тому навчальна, тренувальна та тестова вибірки містять дані електроспоживання за робочі дні та формалізований розклад руху відповідних дат. При цьому значеннями днів тижня чи їх типом як окремим фактором у дослідженні знехтувано.

Для врахування нетягового навантаження припустимо, що підрозділи залізниці, що працюють цілодобово мають рівномірне споживання протягом доби. Тоді фактор впливу на споживання електроенергії нетягових споживачів залізниці опишемо як «1» з 8 до 17 години та «0» для всього іншого часу доби.

На початковій стадії дослідження використано (Feed-forward) архітектуру прямого розповсюдження даних і зворотного розповсюдження помилок (рис. 4.5), яка за описами Neural Network Toolbox найбільш підходяща для прогнозування електроспоживання.

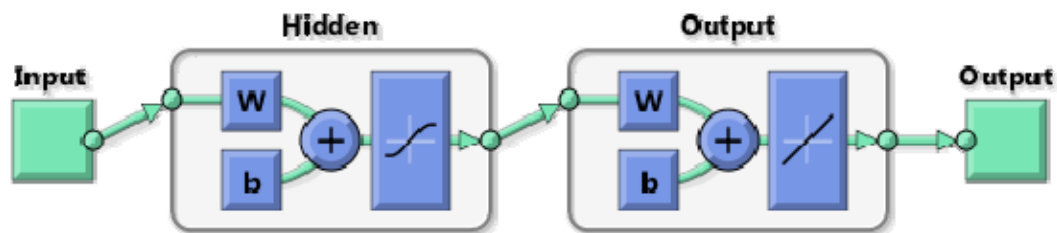


Рис. 4.5. Схема двошарової (Feed-forward) архітектури нейронної мережі прямого розповсюдження даних і зворотного розповсюдження помилок

При такій архітектурі ШНМ для її навчання необхідно вказати цільові значення часового ряду, які є еталоном при складанні прогнозування та вхідні дані, що підлягають обробці. Після навчання ШНМ підбирає вагові коефіцієнти таким чином, щоб середнє квадратичне відхилення вихідних значень від етальонних було мінімальним. До переваг такої архітектури відносять швидкість її роботи. Під час дослідження вона показала достатньо хороші результати прогнозування, проте щоразу різні. Дійсно, до недоліків такої мережі відносять неможливість використання для повторного навчання вагових коефіцієнтів, отриманих при початковому навчанні, що призводить до різноманітних рішень при одному і тому ж

наборі даних та не сприяє збільшенню точності, так як ШНМ щоразу навчається спочатку.

Враховуючи цей недолік, було проведено дослідження на іншій архітектурі прогнозування часових рядів, що представляє собою модель нелінійної авторегресії із зовнішніми входами (NARX) (рис. 4.6).

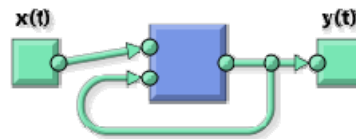


Рис. 4.6. Узагальнена схема архітектури NARX

При такій архітектурі ШНМ потрібно задавати як вхідні значення функції, так і цільові. Дані на вході, проходячи через мережу, обробляються відповідно до вагових коефіцієнтів, а потім знову попадають на вхід мережі, тим самим замінюючи себе зворотним розповсюдженням помилок, що дає можливість застосування вагових коефіцієнтів, отриманих після першого навчання, при повторному навчанні ШНМ та в свою чергу підвищує точність її роботи.

Загалом обидві архітектури показали схожі результати прогнозу, проте для подальшого дослідження обрано мережу NARX як більш перспективну для практичного застосування.

Отже, конфігурація експериментальної ШНМ буде наступна – вхідний шар, який складається з нейронів, кількість яких відповідає сумарній кількості ретроспективних даних: погодинну температуру повітря, 3 типи потягів, що рухаються ЕД, не тягове навантаження; вихідний шар, який містить нейрони, що характеризують погодинне споживання електроенергії.

Вибір кількості прихованих шарів і елементів у них, здійснено експериментально так, щоб для різних вхідних і вихідних наборів даних досягалася мінімальна похибка прогнозування.

Точність прогнозування обсягу споживання електроенергії у значній мірі залежить від величини вибірки ретроспективних даних. Опрацьовуючи дані для

навчальної вибірки, виявлено наступні проблеми, подальше вирішення яких може підвищити якість прогнозування: фактичне проходження поїздів ЕД може відрізняється від взятого для дослідження графіка руху через затримки та зміни в розкладі; недостатній рівень впровадження пристроїв АСКОЕ (не всі з 9 фідерних ліній, що живить ТП ЕЧЕ-8 мають окремі лічильники), через що для дослідження довелося брати узагальнені дані (дані споживання зі спільного для 9 фідерних ліній лічильника та тягове навантаження відразу по всіх ділянках).

При практичному застосуванні алгоритмів, запропонованих Neural Network Toolbox, для прогнозування електроспоживання найточніший результат показав алгоритм Байєсівської регуляризації, проте при схожому результаті з алгоритмом Левенберга – Марквардта для навчання мережі йому знадобилося в рази більше ітерацій, що при дуже великих об'ємах навчальної вибірки потребує відповідної обчислювальної потужності. Алгоритм спряжених градієнтів показав результат, хоч і задовільний до вимог точності прогнозу, проте суттєво гірший, ніж алгоритми Левенберга – Марквардта і Байєсівської регуляризації, що робить його недоцільним у практичному застосуванні інструментом прогнозування електроспоживання.

Взявши результати навчання алгоритму Байєсівської регуляризації за 100%, визначено, що продуктивність алгоритму Левенберга – Марквардта для прогнозування електроспоживання на залізниці менша на 3%, а спряжених градієнтів на 23% (рис. 4.7).

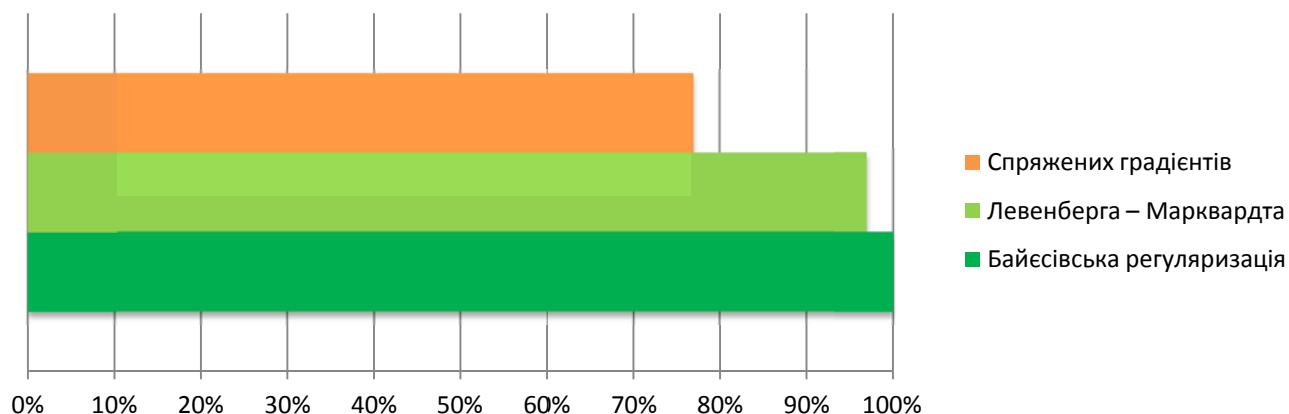


Рис. 4.7. Гістограма порівняння продуктивності алгоритмів пакету інструментів Neural Network Toolbox у прогнозуванні електроспоживання

Навчена ШНМ тестується на окремих прикладах даних. ШНМ, що на тестових даних показала хорошу точність може застосовуватися на практиці. Усі нетипові відхилення обсягів споживання електроенергії, як правило, спричиняються економічними та технологічними змінами, тому необхідно чітко усвідомлювати характер таких змін та, якщо вони носять постійний характер (зміни тарифу, технологій, обсягів експлуатації), то ШНМ слід перебудувати таким чином, щоб за основу завжди лягали постійні чинники [121].

4.3. Комп'ютерне моделювання математичних методів вибору тарифу оплати за спожиту електроенергію

Складність обчислень та потреба у великій кількості статистичних даних, які на практиці повинні отримуватися за допомогою комп'ютерної системи комерційного обліку, вимагають для розрахунку (3.5) застосування автоматичних обчислень за допомогою комп'ютерної техніки. Тому приклад розрахунків буде наведено для періоду t одна доба листопада місяця. Взяті для прикладу значення споживання електроенергії на тягу в межах однієї ділянки наведено в табл. 4.6.

Таблиця (4.6)

Електроспоживання протягом доби

Час доби, год.	$W^*(t)$, мВт·год	Час доби, год.	$W^*(t)$, мВт·год
0-1	0,086	12-13	0,07
1-2	0,119	13-14	0,082
2-3	0,11	14-15	0,09
3-4	0,126	15-16	0,061
4-5	0,119	16-17	0,097
5-6	0,199	17-18	0,134
6-7	0,22	18-19	0,199
7-8	0,265	19-20	0,239
8-9	0,217	20-21	0,189
9-10	0,136	21-22	0,139
10-11	0,101	22-23	0,145
11-12	0,084	23-0	0,141

Розрахунок проведений засобами Mathcad (додаток Б) не підтвердив справдження умови (3.3) для значень електроспоживання табл. 4.6. У даному випадку однозонний тариф виявився ефективнішим за тризонний на 7,223%. Такий результат очікуваний, адже взяті для прикладу початкові дані були для дільниці, де графік руху поїздів не був підготовлений до застосування ДТ.

Як видно з рис. 4.8 програш по платі за електроенергію згідно тризонного ДТ відбувається з 8 по 10 та з 17 по 21 години, тобто під час пікового періоду.

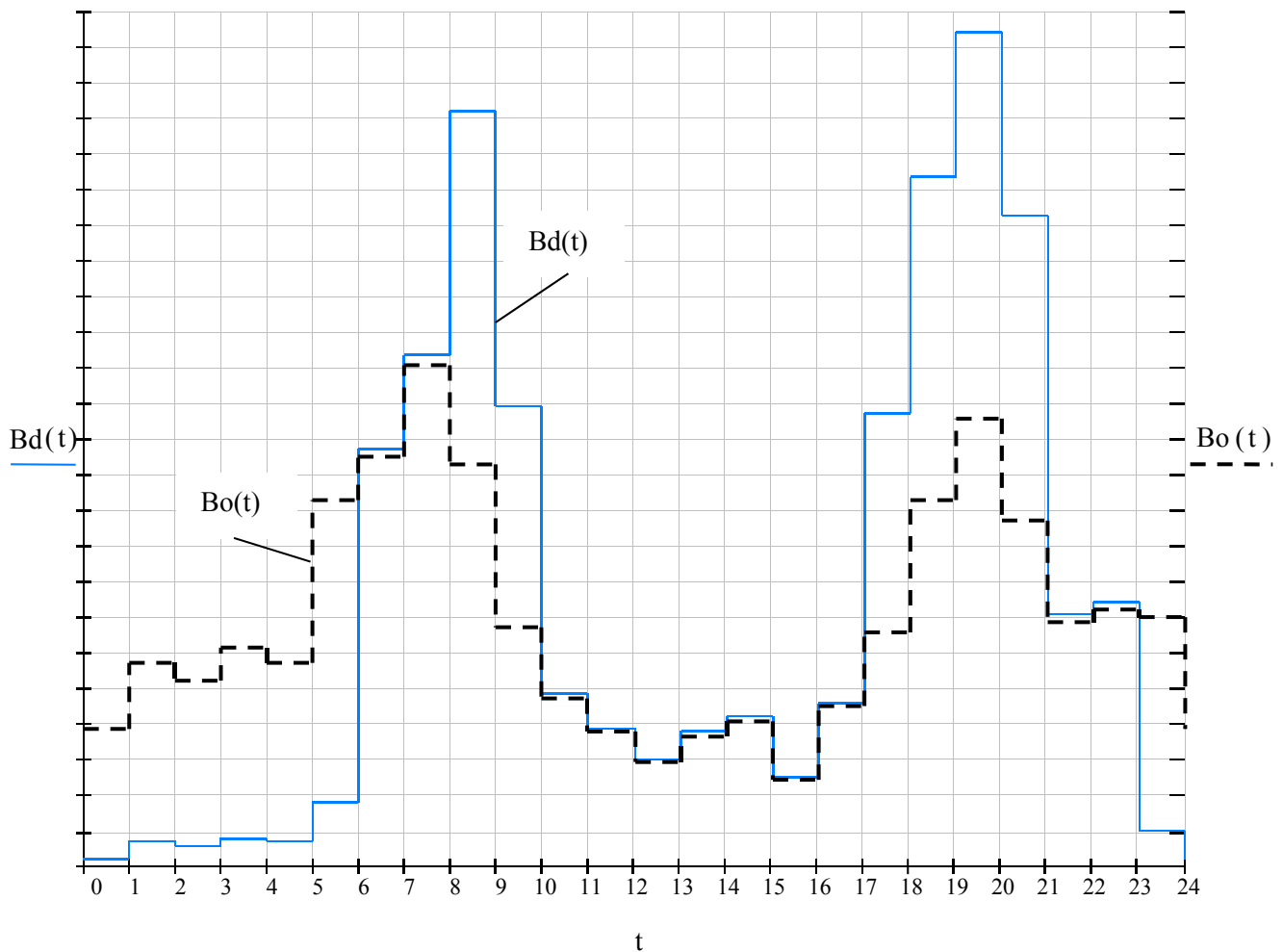


Рис. 4.8. Плата за спожити електроенергію протягом дня за однозонним тарифом $Bo(t)$ і тризонним диференційованим тарифом $Bd(t)$

Споживання електроенергії в основному обумовлюється обсягами перевезень [45]. Тому на практиці часто застосування ДТ, як і у випадку прикладу, вимагає зміну графіка руху поїздів, при чому слід досягти, щоб найвищі значення

кривої $W(t)$ (рис. 4.9) мали менше співпадінь із найвищими значеннями кривої $A(t)$, а навпаки знаходилися в місцях її мінімуму, тобто перенести навантаження на мережу з пікового періоду в нічний або в напівпіковий.

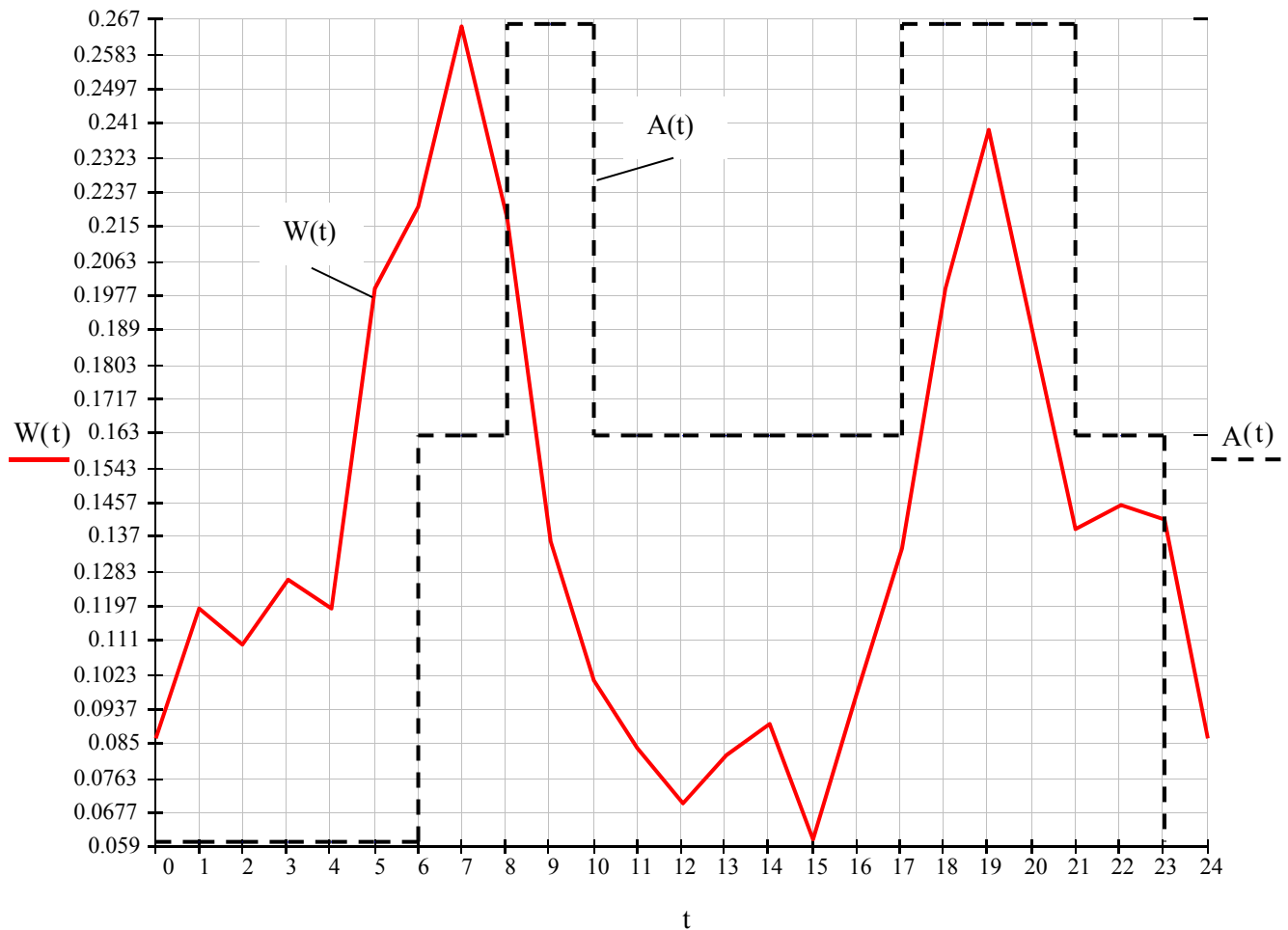


Рис. 4.9. Залежність споживання електроенергії на тягу $W(t)$, мВт·год та вартості електроенергії за тризонним ДТ $A(t)$ від часу доби

Такі результати обґрунтовують необхідність розробки автоматизованих рішень по адаптації графіка руху поїздів до ДТ.

Запропоновані методи прогнозу споживання електричної енергії пред'являють жорсткі умови до первинних даних, поведінки електроенергетичних об'єктів управління та не завжди можуть задовольнити точність прогнозу для оперативного керування.

4.4. Формалізація перевізних процесів і алгоритмічні засоби адаптації графіка руху потягів до оплати спожитої електроенергії на тягу за тризонним диференційованим тарифом

Планування розкладів – активна область досліджень для залізничної галузі [122]. Автоматизація розроблення графіка руху поїздів є досить складною проблемою, яка передбачає розв’язання комплексу задач, які визначають технологію всього перевізного процесу [123].

Реалізація енергозберігаючих технологій перевізного процесу на електрифікованих лініях залізниці можлива за рахунок формування упорядкованого розкладу руху поїздів, оперативного аналізу і вирівнювання електроспоживання за допомогою АСУ та розумного використання тарифів при оплаті за електроенергію.

Питання, пов’язані з мінімізацією комерційної вартості спожитої електроенергії, асоціюються здебільшого зі зміною послідовності технологічних процесів, зокрема зі зміною графіка руху поїздів при організації перевезень [109]. Дійсно, дослідження [124] показали перспективним застосування тризонного ДТ, проте, без зміни графіка руху поїздів перехід на ДТ вигідний не у всіх випадках.

На сьогоднішній день існує багато моделей та методів, що були запропоновані для ефективного та енергозберігаючого планування графіка руху поїздів. Хіггінс та співавтори [125] розробили модель для планування розкладу руху поїздів по одній колії залізничної магістралі. Лі та Гао [126] запропонували підхід, застосований на двоколійних залізничних мережах на основі моделі мережі, у роботі станції та секційні доріжки розглядалися як вузли та ребра. У роботі [127] ці ж автори представили модель клітинного автомата для моделювання руху поїздів на залізничній лінії. Лі та співавтори [128] розробили нову модель клітинного автомата для імітації руху поїздів за графіком, розглянувши втрати енергії. У роботі [129] автори запропонували моделювання планування розкладу руху на основі загальної інформації про поїзд, представлено новий метод контролю для уникнення затримок. Тим не менше, завданню планування розкладу руху поїздів в умовах комерційних

тарифів приділено недостатньо уваги, так як це завдання – реакція на виклики сьогодення.

Для комп'ютерного моделювання перевізного процесу для подальшої роботи над даними, що представляють собою фізичні властивості поїзда, необхідна така математична модель, що співставляла б їх між собою. Припустимо, що поїзд $p-1$ є попереднім поїздом, а поїзд p – наступним. $X_{p-1}(t + \Delta t)$ і $(X_p(t + \Delta t))$ – означають позиції поїздів $p-1$ та p , а $V_{p-1}(t + \Delta t)$ – його швидкість на час моделювання $t + \Delta t$.

$$\begin{cases} X_{p-1}(t + \Delta t) = X_{p-1}(t) + V_{p-1}(t + \Delta t)\Delta t, \\ V_{p-1}(t + \Delta t) = V_{p-1}(t) + a\Delta t, \\ X_{p-1}(t + \Delta t) - X_p(t + \Delta t) \geq M_{\min}, \end{cases}$$

де $X_{p-1}(t)$ положення поїзда $p-1$ в поточний момент, $X_{p-1}(t + \Delta t)$ – його положення в наступному періоді часу, $V_{p-1}(t)$ – швидкість потяга $p-1$ в поточний момент, $V_{p-1}(t + \Delta t)$ – швидкість поїзда $p-1$ в наступному періоді, Δt – інтервал часу, a – прискорення, p – порядковий номер потяга за послідовністю відправлення згідно існуючого графіка руху, M_{\min} – мінімальний міжпоїздний інтервал.

Запропонована модель описує взаємозв'язок між швидкісними характеристиками, часом і позицією поїздів на шляху їх слідування та може бути корисною для виконання стратегії ущільнення розкладу руху з метою збільшення пропускної спроможності залізниці.

Очевидно, що зміна графіка руху для застосування тризонного ДТ має великий потенціал мінімізації оплати електроспоживання.

Для перенесення енергоємних технологічних процесів виробництва таких як залізничні перевезення на час дії пільгових зон комерційних тарифів необхідними є планування і мінімізація вартості витрат, пов'язаних із перенесенням [130]. При

цьому оптимальним вважається графік руху потяга, вартість якого є мінімальною [123].

Для перенесення вантажних перевезень на період дії нічної тарифної зони, необхідне врахування пропускної здатності доріг і станцій, місткості складів, тощо. Це унеможливорює простий перехід на комерційні ДТ і вимагає досліджень усіх факторів, які впливають на раціональність зміни графіка руху потягів. Одним із критеріїв створення оптимального графіка руху для застосування ДТ, якому не було приділено достатньої уваги є тривалість руху потяга згідно діючого графіка.

На сьогоднішній день протягом доби згідно тризонного ДТ існує шість відрізків часу, кожному з яких відповідає один із тарифних коефіцієнтів оплати електроенергії, причому час доби та тривалість інтервалу часу, коли діє один коефіцієнт змінюється залежно від календарного місяця (табл. А.1, додаток А).

Зважаючи на те, що зміна графіка руху несе за собою додаткові затрати, то питання пошуку оптимального часу відправлення з точки зору застосування ДТ стоїть насамперед для поїздів, час руху яких припадає на піковий період дії ДТ (T_{n1} і T_{n2}). Графік поїздів, який лежить у межах напівпікових періодів T_{nn1} , T_{nn2} , T_{nn3} та нічного періоду T_n і не заходить у межі пікових періодів міняти не слід.

Для проведення дослідження згідно поставленої мети розглянемо потяг, який рухається з початкової до кінцевої станції протягом часу T . Опишемо тривалість руху потяга через періоди дії тарифних зон, під час яких він здійснює рух:

$$T = \alpha_1 \cdot T_n + \alpha_2 \cdot T_{nn1} + \alpha_3 \cdot T_{n1} + \alpha_4 \cdot T_{nn2} + \alpha_5 \cdot T_{n2} + \alpha_6 \cdot T_{nn3}, \quad (4.3)$$

де α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 , α_6 – коефіцієнти, які означають на скільки час руху потяга співпадає з часом дії відповідної їм тарифної зони.

Завданням комп'ютерної адаптації графіка є раціональне розміщення відрізка часу руху потяга T протягом доби з метою мінімізації плати за електричну енергію при застосуванні ДТ. Візуалізацію поставленої задачі (рис. 4.10) використано для розробки алгоритму.

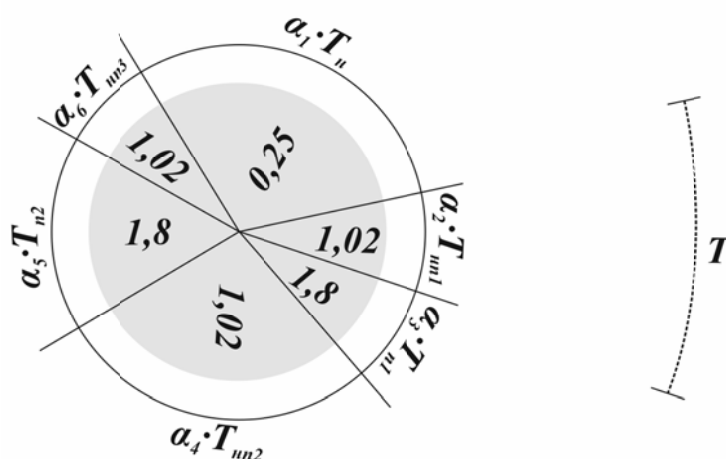


Рис. 4.10. Візуалізація поставленої задачі

Принцип його роботи полягає у максимальному перенесенні графіка руху з пікових зон, при мінімальному його зміщенні. При цьому пріоритетною для перенесення до неї графіка є нічна тарифна зона.

Розроблений алгоритм (додаток В) здатний надати пропозицію раціональної з точки зору застосування тризонного ДТ зміни графіка руху потяга, тривалість руху якого не перевищує однієї доби. Для такого потяга значення кожного з коефіцієнтів α лежить у межах від 0 до 1. Алгоритм побудовано на основі властивостей цих коефіцієнтів.

Під час дії тарифної зони, якій відповідає коефіцієнт α_n (n – порядковий номер коефіцієнта) потяг перебуває у наступному стані (табл. 4.7):

Таблиця (4.7)

Вираження стану руху потяга через коефіцієнти α

$\alpha_n = 1$	поїзд здійснює рух за графіком протягом усього часу дії тарифної зони
$\alpha_n = 0$	поїзд за графіком під час дії даної тарифної зони рух не здійснює
$\alpha_n < 1, \alpha_{n-1} \in (0;1]$	поїзд закінчив рух
$\alpha_n < 1, \alpha_{n+1} \in (0;1]$	поїзд відправився
$\alpha_n \leq 1, \alpha_{n-1} = 0,$ $\alpha_{n+1} = 0$	відправлення та прибуття потяга відбувається під час дії даного тарифу
$\alpha_n = 1, \alpha_{n-1} = 0$	час відправлення потяга співпав із початком дії тарифної зони
$\alpha_n = 1, \alpha_{n+1} = 0$	час прибуття потяга співпав із закінченням дії тарифної зони

Алгоритм побудовано у вигляді деревоподібної структури. Як і типові для інтелектуального аналізу даних дерева рішень, він складається з набору правил та результатів [131]. Після здійснення ідентифікації тарифних зон, до яких відноситься старий (чинний) графік руху потяга, алгоритм пропонує оптимальне зміщення графіка.

За умови, коли графік руху потяга лежить у всіх шести тарифних зонах, а його відправлення та прибуття припадають на період $T_{нп2}$ (рис. 4.11), може виникнути ситуація, коли зміщення графіка призведе до більших витрат за досягнутий економічний ефект.

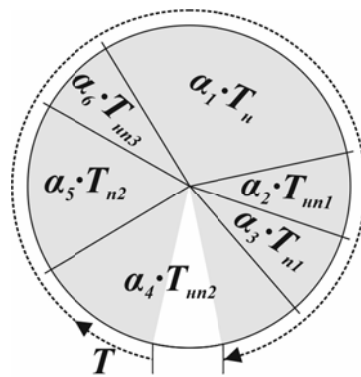


Рис. 4.11. Часова діаграма руху потяга в усіх тарифних зонах із відправленням та прибуттям у зоні $T_{нп2}$

Для перелічених випадків при застосуванні даного алгоритму необхідна експертна оцінка для врахування затрат, пов'язаних із перенесенням графіка руху. Наприклад, правилами перевезення вантажів встановлено граничні швидкості доставки, при невиконанні яких настає відповідальність за протерміновану доставку.

Матеріальні витрати, пов'язані зі зміною графіка руху поїздів у вартісному вираженні, викликані ранішим чи пізнішим відправленням позначимо Z_{θ} , а вартість витрат, необхідних для зміни розкладу при більш ранньому / пізньому прибутті позначимо Z_{np} . Тоді, $Z(t) = Z_{\theta} + Z_{np}$, при цьому для доцільності зміни графіка важливо, щоб справджувалася нерівність

$$Z(t) < \Delta A \cdot k \cdot W(t), \quad (4.4)$$

де ΔA – різниця між піковим тарифним коефіцієнтом і коефіцієнтом тарифної зони, куди зміщено навантаження за новим графіком, а $t = \Delta\alpha_3 \cdot T_{n1} + \Delta\alpha_5 \cdot T_{n2}$, $\Delta\alpha$ – різниця між коефіцієнтом α_n до та після зміни графіка руху.

Функціонально алгоритм складається з трьох блоків, у залежності від пікової зони, в якій лежить старий (чинний) графік руху. Перед виконанням одного з блоків проводиться перевірка доцільності застосування алгоритму, яка фактично визначає чи рухається потяг під час дії пікової тарифної зони (рис. 4.12).

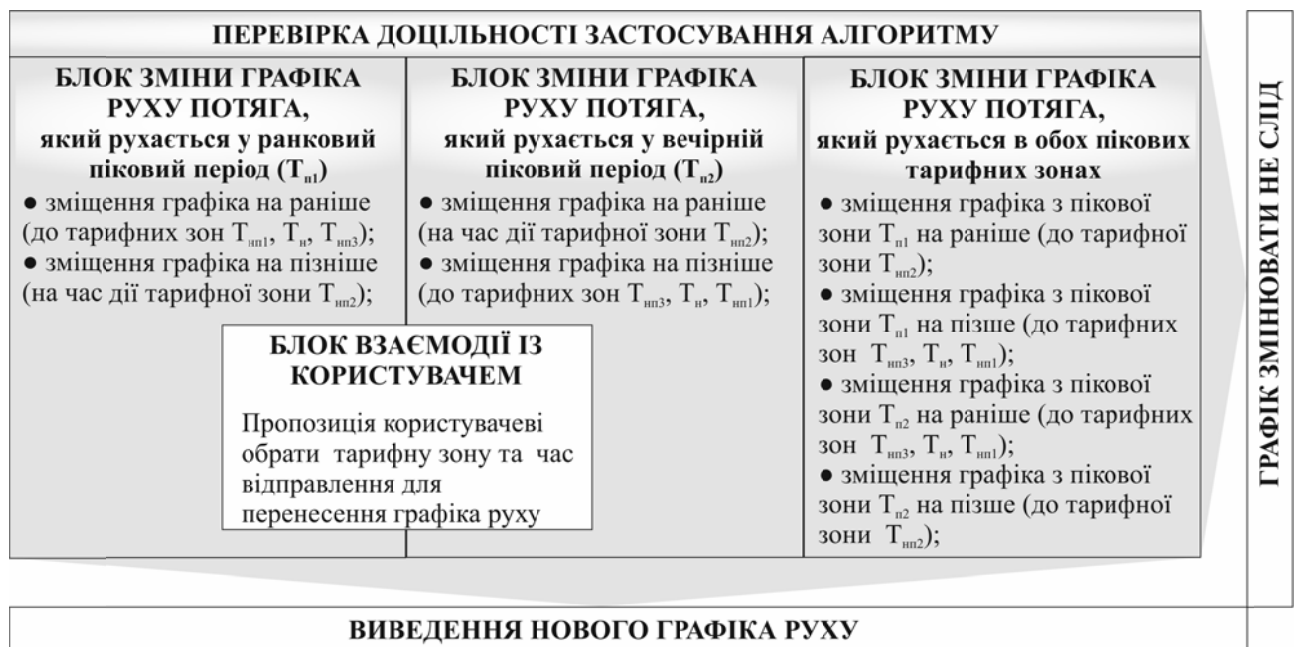


Рис. 4.12. Функціональна схема розробленого алгоритму

Потяги рухаються за розкладом із точністю до 1 хв., тому всі обчислення будуть проводитися у хвиликах. Нічну тарифну зону T_n для зручності розіб'ємо на два періоди – після півночі T_{n1} і до півночі T_{n2} . Для визначення меж періодів дії тарифних зон (табл. 4.8) як точку відліку обрано початок доби.

Межі періодів тарифних зон тризонного ДТ та їхня тривалість (хв.)

січень, лютий, листопад, грудень	Тривалість періоду	березень, квітень, вересень, жовтень	Тривалість періоду	травень, червень, липень, серпень	Тривалість періоду
$T_{n1} \in [0;360]$	$T_{n1} = 360$	$T_{n1} \in [0;360]$	$T_{n1} = 360$	$T_{n1} \in [0;420]$	$T_{n1} = 420$
$T_{nn1} \in [360;480]$	$T_{nn1} = 120$	$T_{nn1} \in [360;480]$	$T_{nn1} = 120$	$T_{nn1} \in [420;480]$	$T_{nn1} = 60$
$T_{n1} \in [480;600]$	$T_{n1} = 120$	$T_{n1} \in [480;600]$	$T_{n1} = 120$	$T_{n1} \in [480;660]$	$T_{n1} = 180$
$T_{nn2} \in [600;1020]$	$T_{nn2} = 420$	$T_{nn2} \in [600;1080]$	$T_{nn2} = 480$	$T_{nn2} \in [660;1140]$	$T_{nn2} = 540$
$T_{n2} \in [1020;1260]$	$T_{n2} = 240$	$T_{n2} \in [1080;1320]$	$T_{n2} = 240$	$T_{n2} \in [1140;1320]$	$T_{n2} = 180$
$T_{nn3} \in [1260;1380]$	$T_{nn3} = 120$	$T_{nn3} \in [1320;1380]$	$T_{nn3} = 60$	$T_{nn3} \in [1320;1380]$	$T_{nn3} = 60$
$T_{n2} \in [1380;1440]$	$T_{n2} = 60$	$T_{n2} \in [1380;1440]$	$T_{n2} = 60$	$T_{n2} \in [1380;1440]$	$T_{n2} = 0$

Для практичного використання алгоритму необхідно здійснити опис часу через коефіцієнти α .

Для періоду, під час дії якого потяг розпочинає рух:

$$\alpha_n = \frac{t^* - t_{\text{в}}}{T^*}.$$

Для періоду, під час дії якого потяг прибуває на кінцеву станцію

$$\alpha_n = \frac{t_{np}' - t^*}{T^*}.$$

Для періоду, лише під час дії якого потяг здійснює рух

$$\alpha_n = \frac{t_{np} - t_{\text{в}}}{T^*}.$$

Для періоду, під час дії якого потяг відправляється та прибуває, при цьому рухається під час дії усіх інших періодів:

$$\alpha_n = \frac{t_*'' - t_*' + t_{np} - t_{\text{в}}}{T_*},$$

де t_*' і t_*'' – межі початку і закінчення періоду тарифної зони T_* (табл. 4.8);

$t_{\text{в}}$ і t_{np} – час відправлення та прибуття потяга, переведені у хвилини наступним чином:

$$t_{\text{в}} = h_{\text{в}} \cdot 60 + m_{\text{в}};$$

$$t_{np} = h_{np} \cdot 60 + m_{np},$$

де $h_{\text{в}}$, $m_{\text{в}}$ та h_{np} , m_{np} – години і хвилини відправлення та прибуття потяга.

У розробці ПЗ важливо, щоб створений продукт працював безвідмовно при будь-яких допустимих початкових даних, тому для того, аби алгоритм працював для випадків $\alpha_{\text{max}} > 1$, перед виконанням алгоритму для всіх змінних, якими позначено коефіцієнти α слід використати формулу:

$$\alpha_n = \alpha_n - \lceil \alpha_{\text{max}} \rceil + 1, \quad (4.5)$$

а перед виведенням результату його роботи необхідно зробити зворотне перетворення

$$\alpha_n = \alpha_n + \lceil \alpha_{\text{max}} \rceil - 1, \quad (4.6)$$

де α_{max} – найбільше значення, серед коефіцієнтів α за існуючим (старим) графіком.

Ці операції додано до алгоритму під виглядом відповідних блоків (додаток В).

Оптимальний графік руху для всіх потягів у одному напрямку не завжди збігається з таким для кожного потяга зокрема [123]. Тому для вирішення завдання адаптації графіка руху потягів до використання комерційних тарифів за електроенергію недостатньо розробити метод оптимізації графіка окремого потяга. Таке завдання є комбінаторним та потребує спільного рішення для всіх потягів за напрямком на електрифікованій ділянці залізниці.

Розглянемо випадок, коли N потягів рухаються від станції відправлення до станції прибуття, між якими немає проміжних станцій, де можуть розпочинати або закінчувати рух інші потяги. Для такого випадку вищезгаданий алгоритм буде справедливим, якщо до його рішень додати міжпоїзний інтервал $M \cdot (p - 1)$.

При перенесенні часу відправлення потяга, необхідно щоб виконувалася умова $N \leq \frac{\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum(\alpha' \cdot T')}{M} - N_*$, де $\sum(\alpha' \cdot T')$ – частина графіка, яку необхідно змістити; $\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*)$ – доступна частина тарифної зони, до якої буде перенесено графік руху; N_* – кількість поїздів, які здійснюють рух у тарифній зоні T_* . Тоді для кожного потяга N_p час відправлення буде перенесено на $M \cdot (p - 1)$. У випадку

$N > \frac{\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum(\alpha' \cdot T')}{M} - N_*$ для $\left[\frac{\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum(\alpha' \cdot T')}{M} \right] - N_*$ потягів

справедливим буде попереднє рішення, а для кожного потяга

$p > \left[\frac{\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum(\alpha' \cdot T')}{M} \right] - N_*$ графік руху змінювати не потрібно.

За наявності на шляху слідування потяга проміжних станцій, звідки можуть відправлятися інші потяги, на тривалість руху матиме вплив дотримання станційних інтервалів. Вони необхідні для узгодження потягів, що рухаються через такі станції з потягами, які з них відправляються. Крім того в умовах комерційного обліку електроенергії маніпуляції станційними інтервалами служать додатковим інструментом економії коштів. Але їхній розрахунок – це окремий складний процес, так як мінімальний станційний інтервал в свою чергу залежить від багатьох

факторів. Перш за все від парку шляхів та від того, в яку залежність включені стрілки та сигнали.

4.5. Експериментальні дослідження комплексу комп'ютерно-орієнтованих засобів оптимізації витрат на електроенергію, спожиту на тягу залізниці

Сьогодні еволюція прикладних інформаційних систем поступово зміщується в сторону їх інтелектуалізації, на сучасному етапі розвитку інформаційного суспільства наявність різноманітного ПЗ визначає ступінь і якість обробки даних та виконання на комп'ютері користувацьких завдань. ПС поєднують найбільш наукомісткі технології із високим рівнем автоматизації не лише процесів підготовки інформації для прийняття рішень, а й самих процесів генерації рішень [132].

У рамках роботи над завданням інтелектуалізації інформаційної системи мережі електропостачання залізничного транспорту було сформовано комплекс комп'ютерно-орієнтованих методів мінімізації плати за спожиту електроенергію на тягу поїздів, що передбачають визначення оптимального тарифу на електроенергію та граничні обсяги споживання електроенергії у заданих періодах, при яких перехід на закупівлю електроенергії за ДТ економічно вигідний, прогнозування електроспоживання та оптимізацію графіка руху до ДТ.

В якості даних для проведення дослідження взято показники споживання електроенергії режимної доби зняті з лічильників АСКОВЕ ТП ЕЧЕ-8 та графік руху поїздів через станцію Фастів (табл. 4.5.), де інтенсивність руху вантажних поїздів формалізована у вигляді коефіцієнтів, сформованих на основі діючого в день вимірів графіка руху за правилами, описаними в роботі [2]. Для визначення меж тарифних зон тризонного ДТ для червня місяця використано табл. А.1, додаток А.

На основі виразу (3.12) та коду в Mathcad (додаток Б) проведено комп'ютерне моделювання визначення ефективності однозонного та тризонного тарифів у даних умовах, в результаті яких однозонний тариф виявився вигіднішим за трьохзонний на 0,014%. На графіку (рис. 4.13) наведено динаміку зміни плати за використану електроенергію відповідно однозонного та тризонного тарифів.

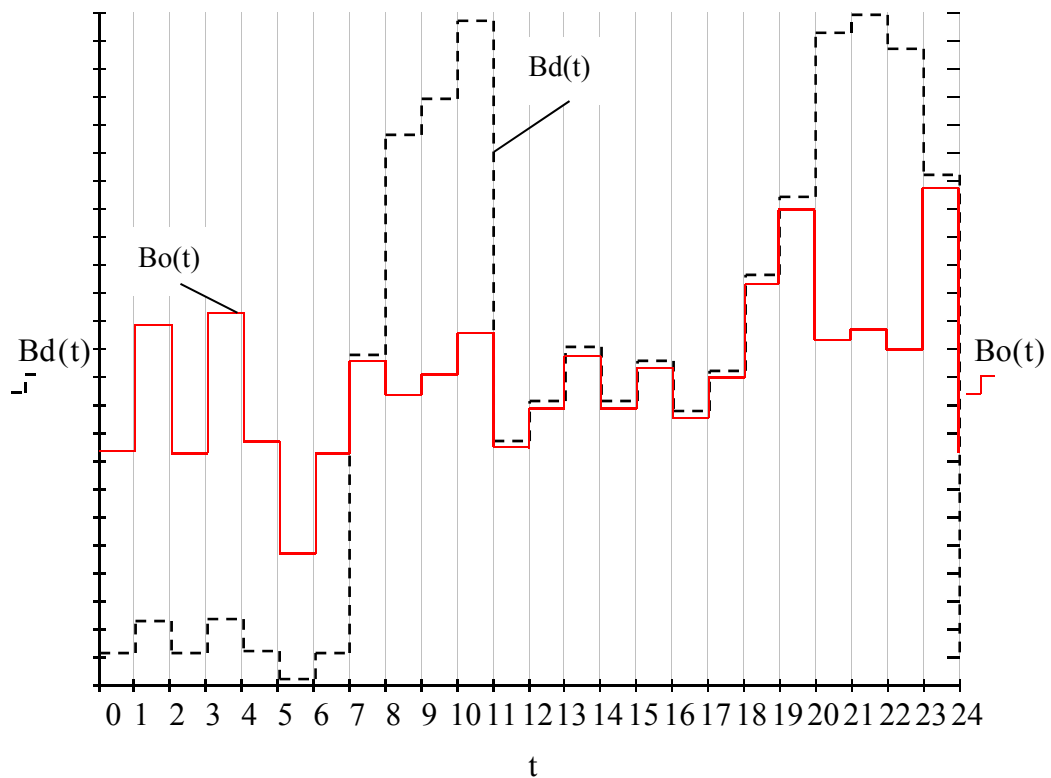


Рис. 4.13. Погодинна плата за використану електроенергію протягом доби за одноступінчастим тарифом $B_o(t)$ і триступінчастим диференційованим тарифом $B_d(t)$

У даному випадку доцільно змінити графік руху, адже при незначному зміщенні розкладу із ДТ можна отримати суттєву економію коштів. З рис. 4.13 видно, що зміна графіка руху поїздів для вигідного використання ДТ насамперед необхідна з 8 до 11 год. та з 20 по 23 год. під час дії пікових тарифних зон.

Розклад пасажирських поїздів, особливо приміських, має співвідноситись із часом початку та закінчення робочого дня [27]. Так як пасажирські перевезення апріорі повинні здійснюватися у різний час доби [133], графік пасажирських поїздів у дослідженні залишився без змін, це питання потребує додаткових урегулювань, які неможливі без втручання людини-експерта.

Для вантажних поїздів застосовано математичні методи комп'ютерної адаптації графіка руху потягів до оплати спожитої електроенергії на тягу за триступінчастим диференційованим тарифом.

На основі розробленого алгоритму (Додаток В) написано та оптимізовано програму з метою тестування його роботи. Для написання програми використано мову JavaScript. Перевагою такого рішення є безкоштовне середовище розробки та

можливість реалізації програми у вигляді веб-застосунку та її універсальність. Розмір отриманого скрипта не перевищує 10 кБ, що при пропускній спроможності запропонованої модифікованої архітектури інтелектуалізованої комп'ютерної інформаційної системи забезпечить достатню швидкодію для комфортного використання.

Децентралізована архітектура дозволить продуктивно використовувати додаток через веб-інтерфейс на стороні комп'ютера клієнта працівниками з наданим до інформації доступом.

Під час написання програми виникли описані нижче проблеми.

Важкість сприйняття коду та його реалізації за допомогою логічного оператора «if» через надмірну розгалуженість алгоритму. Цю проблему вдалося вирішити використанням оператора «switch» з умовою «true» та значеннями «case», які відповідають складним умовам алгоритму, справдження яких в кінцевому випадку веде до функцій, призначених завершувати його роботу й виводити результати. Фрагмент коду такої конструкції виглядає наступним чином:

```
«switch (true){
    case умова_  $i_{j1}$  && умова_  $i_{j2}$  && умова_  $i_{jn}$  :
    case умова_  $i_{2j1}$  && умова_  $i_{2j2}$  && умова_  $i_{2jn}$  :
    case умова_  $i_{mj1}$  && умова_  $i_{mj2}$  && умова_  $i_{mjn}$  :
        дія_1;
        break;
    case умова_  $i_{mj1}$  && умова_  $i_{mj2}$  && умова_  $i_{mjn}$  :
        дія_2;
        break;
    case умова_  $i_{mj1}$  && умова_  $i_{mj2}$  && умова_  $i_{mjn}$  :
        дія_  $k$ ;
        break;
}».
```

При цьому ті умови, що призводять до виконання певних обчислювальних дій, але в логічному контексті приймають значення «false», в межах даної конструкції задано як: «(умова_1 && умова_2 && умова_n) == false».

Такий запис представляє групову умову, яка за потреби використовується як частина значення case і в кінцевому результаті при перевірці на строгу рівність до булевого «true» дає бажаний результат.

JavaScript під час виконання коду переводить значення в їх двійкові еквіваленти і це є першопричиною того, що він робить обчислювальні помилки. Це пов'язано з тим, що у стандарті IEEE 754 на число виділяється рівно 8 байт (64 біта), не більше і не менше. З 64 біт, відведених на число, самі цифри числа займають до 52 біт, один біт зберігає знак, а решта 11 – позицію десяткового дробу. При цьому деякі десяткові дроби у двійковій системі числення є нескінченними дробами. Двійкове значення нескінченних дробів зберігається лише до певного знака, який залежить від обмежень пам'яті. Звідси береться неточність.

Робота розробленого алгоритму здебільшого пов'язана якраз із дробами. Варто зауважити, що мову написання було не перевибрано, тому що в інших популярних мовах, таких як Java, C, PHP, Ruby, Perl, так як вони теж працюють у стандарті IEEE 754, ситуація аналогічна. Дану проблему називають «комп'ютерною неточністю».

Одним із кроків по усуненні проблеми «неточності», зроблених розробниками ECMAScript стало введення (поки що чорнового варіанту) в 2018 році нового для JavaScript числового типу даних «BigInt», який дозволяє без помилок працювати з числами, кількість цифер яких перевищує 2^{53} . Проте BigInt не вирішує аналогічної проблеми для дробових чисел.

У випадку написаної програми похибка при роботі з дробами надзвичайно низька і, як показало тестування програми, для даних, що представляють собою коефіцієнти α виникає приблизно на 18 знакові після коми.

Проблему «комп'ютерної неточності» пом'якшено за допомогою написання функції округлення, яку реалізовано на основі вбудованого математичного методу Math.trunc(), виклик якого повертає цілу частину числа, повністю відкидаючи дробову:

```

«function truncated(num){
    return Math.trunc(num * 1000) / 1000;
}».

```

Перемножуючи аргумент «num» на 1000 до застосування методу Math.trunc() та ділячи після застосування, ми зберігаємо йому три знаки після коми. Таку точність округлення обрано, так як цього достатньо, щоб описати час із точністю до хвилини, що нам потрібно з поставленого завдання.

Функцію округлення застосовано до усіх змінних після дій над ними.

Формулу (4.5) реалізовано у програмі наступним кодом: «a1 = truncated(a10 - Math.ceil (Math.max (a10, a20, a30, a40, a50, a60)) + 1);», де Math.ceil () і Math.max () – вбудовані методи, a10, a20, a30, a40, a50, a60 – змінні, в яких зберігаються вхідні значення коефіцієнтів α , a1 – змінна, яка зберігає значення коефіцієнта α_1 після обробки вхідних даних й до виведення результатів роботи програми. Math.ceil () – метод, який повертає найменше ціле число, яке більше чи дорівнює даному числу, а Math.max () – повертає найбільше значення серед своїх аргументів.

На крок введення додаткових змінних довелося піти через те, що почергова реалізація формули (4.5) потребує роботи з вхідними даними. Перезапис оброблених даних на місце вхідних неодмінно призвів би до помилки в обчисленнях, починаючи з наступної інструкції.

Формулу (4.6) реалізовано по аналогії, але вже всередині окремої функції, так як ця частина коду фактично відповідає за закінчення роботи програми та виведення результатів, тому викликається з різних частин коду програми. Аргументами функції є коефіцієнти α після проведення над ними усіх обчислювальних операцій.

Під час налагодження програми було виявлено умови, які призводять до однакових дій над змінними. Їх було згруповано для оптимізації коду, що є ключовою перевагою конструкції «switch-case» над реалізацією через оператор «if».

Ще одне групування, яке було застосовано для оптимізації коду полягає в використанні логічного «або». У випадках, коли двоє чи більше значень «case» відрізнялися лише однією з умов їх було згруповано в один «case», де умови, які відрізнялися було взято в дужки та розділено знаком логічного «або»: «case умова_1

&& умова_2 && (умова_3 || умова_4)». Такий запис дозволив зменшити розмір коду без втрати наочності в його розумінні та скоротив кількість перевірок, які повинен здійснити інтерпретатор під час виконання, що в позитивному ключі матиме відображення на продуктивності програми.

У програмі реалізовано нерівність (4.4), як опцію після виконання.

Результати роботи алгоритму підготовлені для прогнозування електроспоживання за правилами, описаними в роботі [2] та зведені в табл. 4.9.

Таблиця (4.9)

Адаптована інтенсивність руху вантажних поїздів за літнім розкладом руху

Час доби, год.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Вантажні поїзди	7	9,5	5	9	4	1	3,5	3	2	1,5	4,5	7,5
Час доби, год.	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Вантажні поїзди	3	6,5	5,5	1,5	5	3	4,5	4,5	0,5	1	0,5	8,5

У результаті прогнозування з використанням ШНМ, дослідженої та навченої у роботі [2], отримано значення електроспоживання в години, де відбулися зміни навантаження (табл. 4.10).

Таблиця (4.10)

Значення спожитої активної з урахуванням прогнозованих відповідно зміні графіка руху

Час доби, год.	Спожита активна електроенергія, кВт·год	Час доби, год	Спожита активна електроенергія, кВт·год	Час доби, год.	Спожита активна електроенергія, кВт·год
0	7535	8	8775	16	8470
1	11055	9	6850	17	9570
2	7480	10	9840	18	20845
3	11385	11	10795	19	17865
4	7810	12	9670	20	1325
5	4675	13	10230	21	10945
6	7480	14	8745	22	3450
7	11005	15	9845	23	19035

Повторна оцінка ефективності тарифної системи на отриманих результатах показала, що в результаті адаптації графіка руху тризонний ДТ став вигіднішим за однозонний на 4,606%, що приносить економію коштів при сплаті за електроенергію на тягу в розмірі 4,592%. Динаміка погодинної плати за спожиту електроенергію при цьому набере виду (рис. 4.14).

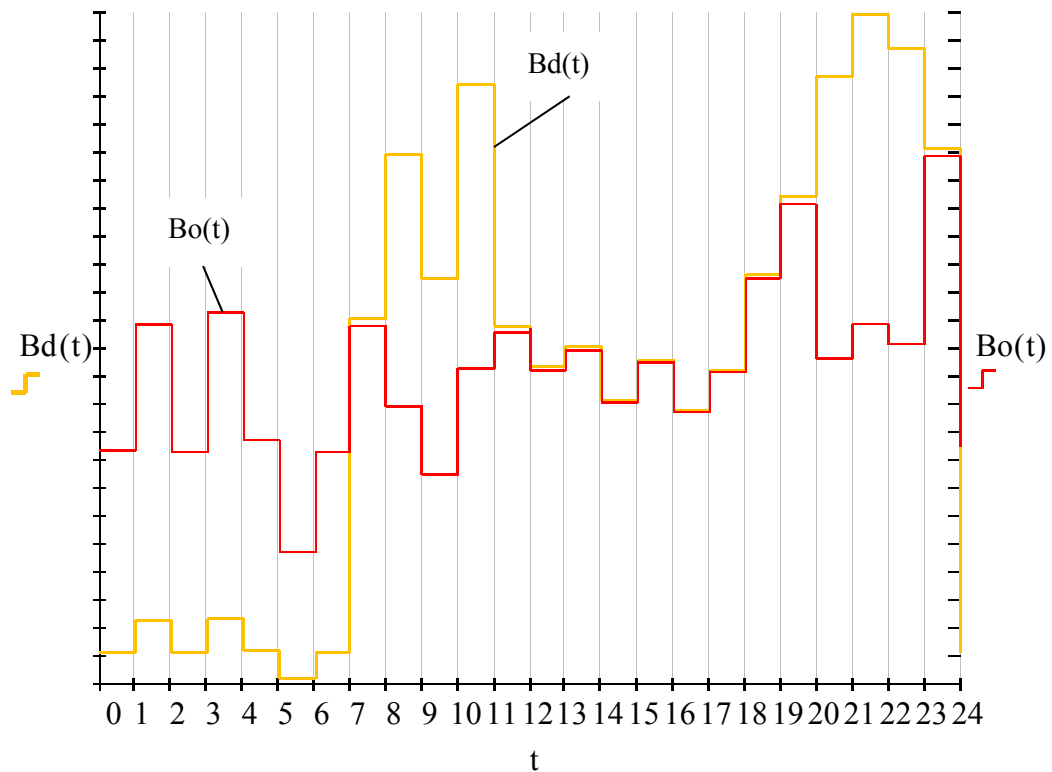


Рис. 4.14. Динаміка погодинної плати за спожиту електроенергію при адаптованому графіку руху

Рисунок 4.15 дає змогу наочно порівняти динаміку плати за електроенергію при зміщеному навантаженні з тією, що була до оптимізації за тризонним ДТ для обох випадків.

Зміщення енергозатратних виробничих процесів, таких як залізничні перевезення із зон пікового навантаження збалансовує енергосистему країни в цілому, а для АТ «Українська залізниця» є інструментом заощадження коштів.

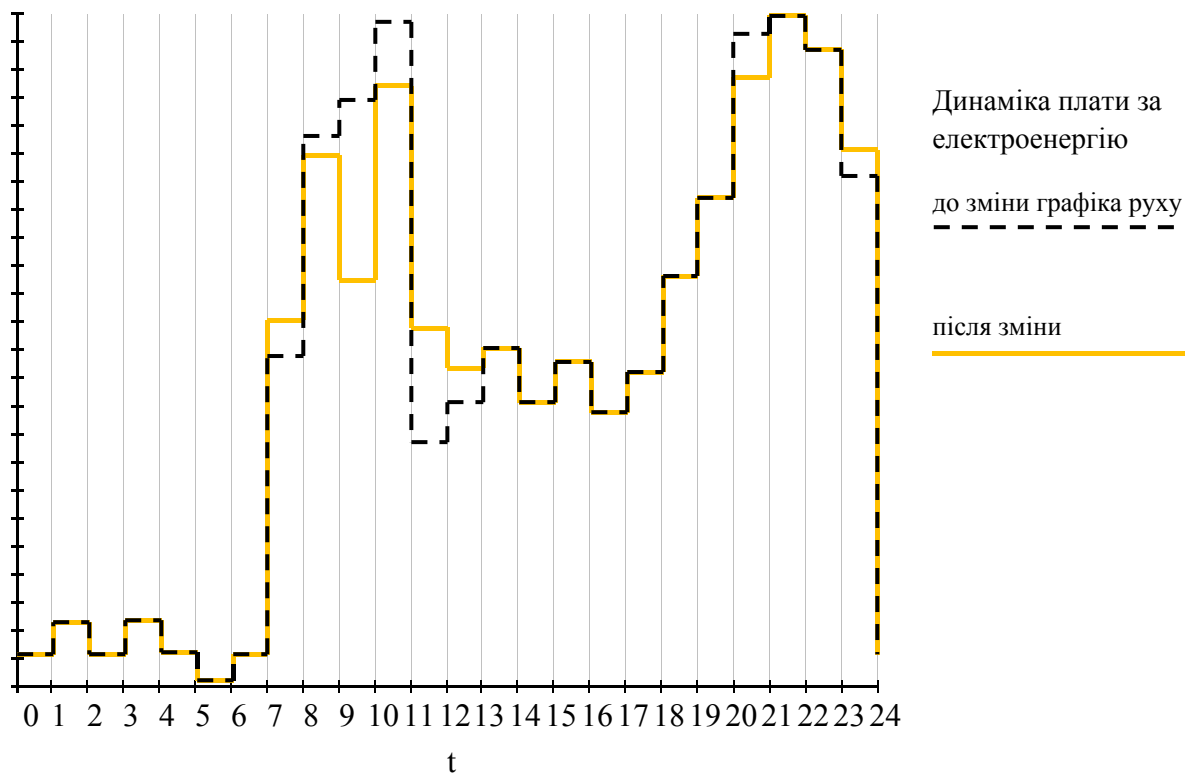


Рис. 4.15. Порівняння погодинної плати за спожиту електроенергію залізницею до та після оптимізації графіка руху поїздів

Як видно з рисунку, алгоритм змістив навантаження з пікових зон доби до найближчих тарифних зон, чим і обумовлено економічний вигравш для обох сторін ринку електроенергії.

4.6. Висновки до розділу 4

1. Комп'ютерними засобами проведено формування диференційних спектрів визначення повної інформативності первинних даних, на основі реальних даних, зареєстрованих інформаційно-діагностичним комплексом «РЕГІНА», що характеризують аварійний режим роботи лінії електропостачання. Рішення системи знайдено методом оберненої матриці. Отримані диференційні спектри є основою синтезу математичних методів підвищеної інтелектуальної складності, орієнтованих для визначення повної інформативності зареєстрованих багатоаспектних первинних даних аварійного режиму, що з'явився в процесі постачання електроенергії.

2. Експериментальні дослідження показали, що прогнозування електроспоживання засобами Neural Network Toolbox достатньо ефективне для його практичного застосування. Серед алгоритмів Neural Network Toolbox для прогнозування електроспоживання найкраще підходить алгоритм Байєсівської регуляризації, а при обмежених можливостях обчислювальної техніки доцільно застосовувати алгоритм Левенберга – Марквардта. Виявлено проблеми забезпечення даних для навчальної вибірки, що потребують подальшого вирішення з метою підвищення якості прогнозування споживання електричної енергії, а саме: недостатній рівень впровадження лічильників АСКОЕ та відмінності фактичного руху поїздів від запланованого за графіком. Таким чином, актуальною є мінімізація помилки прогнозування при використанні невеликого обсягу ретроспективної інформації.

3. Проведено комп'ютерне моделювання математичних методів вибору тарифу оплати за електроенергію на основі даних споживання однієї ЕД. У результаті дослідження виявлено, що для конкретної ЕД, графік руху поїздів якою неадаптований до диференційованого тарифу, оплата згідно однозонного тарифу вигідніша на 7%, з чого можна зробити висновок, що не для всіх випадків застосування тризонного диференційованого тарифу вигідне без зміни графіка руху, тому питання оптимізації перевізного процесу має великий потенціал для застосування тризонного диференційованого тарифу та потребує подальших досліджень.

4. Запропоновано математичну модель для опису тривалості руху потяга через періоди дії тарифних зон диференційованого тарифу, під час яких він здійснює рух. Розроблено продукційну модель, представлену у вигляді алгоритму зміни графіка руху потяга для економії коштів при оплаті електроенергії залізницею згідно з тризонним диференційованим тарифом та математичні методи, які дозволяють застосовувати алгоритм комп'ютерної адаптації графіка руху потяга для N потягів на одній ділянці без обмежень по часу в дорозі кожного з них. Результати досліджень показали, що для розробки програмного забезпечення, яке дозволяло б автоматично адаптувати діючий графік руху потягів до застосування

диференційованих тарифів, необхідні подальші дослідження факторів, які впливають на вартість та доступність зміни графіка.

5. Проведено експериментальні дослідження комплексу комп'ютерно-орієнтованих методів мінімізації плати за спожиту електроенергію залізницею на реальних даних. У результаті застосування комплексу методів досягнуто оптимізації перевізного процесу, що відповідно розрахунків дозволила економити витрати на електроенергію в конкретному випадку, що свідчить про працездатність розроблених методів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновані нові рішення науково-прикладної задачі інтелектуалізації інформаційної системи мережі електропостачання залізничного транспорту для заощадження електроенергії та коштів на її закупівлю. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи наступні:

1. Проведено аналіз мережі електропостачання залізниці як об'єкта моніторингу й управління та основних тенденцій і особливостей комп'ютеризації електроенергетичних об'єктів, засобів обробки даних, методів і термінів прогнозування електроспоживання та виявлено, що для застосування в системі електропостачання залізничного транспорту найбільш відповідними є короткострокові й оперативні прогнози методами з використанням штучних нейронних мереж і сформульовано вимоги й напрямки інтелектуалізації інформаційної системи електропостачання залізниці.

2. Модифіковано комп'ютерну архітектуру, відповідно концепцій Smart Grid та єдиного інформаційного простору, для реалізації інтелектуалізованої інформаційної системи керування електропостачанням залізничного транспорту.

3. Запропоновано модель систем моніторингу та керування режимами роботи мережі електропостачання як взаємопов'язаних складових єдиного інформаційного простору, яка показує інформаційні зв'язки між компонентами систем і їхнім об'єктом, зокрема узагальнену структуру перетікання первинних даних, керуючих рішень та зовнішніх впливів у межах інформаційно-комп'ютерної системи.

4. Розроблено ефективні диференційні математичні методи, які дозволили підвищити рівень інформативності первинних даних моніторингу динамічних процесів нештатних режимів функціонування електропостачання залізничного транспорту.

5. Удосконалено методи аналізу первинних даних в області диференційних зображень для виділення з підвищеною точністю окремих гармонічних складових струму в аварійному режимі функціонування системи тягового електропостачання,

що дало можливість визначати величину впливу на силове обладнання кожної гармоніки окремо.

6. Розроблено та досліджено комп'ютерно-орієнтовані математичні методи використання комерційних тарифів оплати електроенергії на залізничному транспорті, які дають змогу оцінити ефективність застосування однозонного, двозонного та тризонного тарифів оплати електроенергії, розраховувати витрати на закупівлю електроенергії на тягу за періодами часу та граничні обсяги споживання електроенергії у заданих періодах, при яких перехід на закупівлю електроенергії за диференційованим тарифом економічно вигідний. Проведені дослідження споживання електроенергії показали, що питання зміни графіка руху поїздів має великий потенціал для застосування тризонного диференційованого тарифу.

7. Розроблено математичну модель для опису тривалості руху потяга протягом дії тарифних зон диференційованого тарифу, на основі чого розроблено алгоритм та програмне забезпечення для оптимізації перевізного процесу залізниці в умовах комерційного обліку електроенергії.

8. Експериментальні дослідження в реальних умовах підтвердили ефективність розроблених у дисертаційній роботі комп'ютерно-орієнтованих засобів, спрямованих на зменшення плати за спожиту на тягу залізниці електроенергію, які, відповідно розрахунків, дозволили знизити витрати коштів на 4,592%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гайденко О. С. Характерні особливості моделювання системи та процесів тягового електропостачання залізниці як об'єкта моніторингу та керування: / О. С. Гайденко, Г. М. Голуб // зб.наук.праць "Моделювання та інформаційні технології". – Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2017. – Вип. 79. – С. 42-48. – ISSN 2309-7647.
2. Гайденко О. С. Прогнозування спожитої електроенергії методами нейромережевого моделювання / О. С. Гайденко, Г. М. Голуб // Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДУІТ, 2018. – Вип. 31. – С. 196-201.
3. Стасюк О. І. Диференційні моделі та комп'ютерно-орієнтовні методи інтелектуалізації процесів визначення інформативності параметрів режимів інтелектуальних мереж електропостачання залізниць / О. І. Стасюк, О. С. Гайденко, Л. Л. Гончарова // Науковий журнал «Електрифікація транспорту». – 2018. – № 15. – С. 75-83. – ISSN 2307-4221.
4. Гайденко О. С. Модель інтелектуальної інформаційної системи керування електропостачанням залізниці // О. С. Гайденко, Г. М. Голуб / Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – 2018. – Вип. 32-33. – С. 96-101. – ISSN 2617-9040.
5. Кульбовський І. І. Моделювання інформаційних потоків комп'ютерного моніторингу мереж електропостачання транспорту // І. І. Кульбовський, Г. М. Голуб, О. С. Гайденко / Металургійна та гірничорудна промисловість, 2018. – №4 (313). – С. 94-98.
6. Пилипенко Ю. В. Розвиток оперативного-інформаційного комплексу служб електропостачання / Ю. В. Пилипенко, В. Ф. Максимчук // Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2015»: Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції (Одеса, 29.09 – 2.10.2015 р.). – Д.: ДНУЗТ, 2015. – С. 51-52.

7. Стасюк О. І. Математичні моделі і методи комп'ютерної інтелектуалізації швидкоплинних технологічних процесів електропостачання залізниць / О. І. Стасюк, А. Л. Железняк, Л. Л. Гончарова // К.: ДЕДУТ, 2015. – 192 с.
8. Петруняк Р. М. Дослідження та вдосконалення системи діагностики тягової підстанції на базі Smart технологій / Р. М. Петруняк, О. О. Матусевич // Електрифікація транспорту, 2014. – №7. – С. 132-137. – ISSN 2307-4221.
9. Тутик В. Л. Засоби моніторингу систем електропостачання залізниць [Електронний ресурс]: збірник наукових праць II Міжнародної конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'11)» / В. Л. Тутик, Ю. В. Пилипенко, Р. Б. Каменський [та ін.] // 2011. – Режим доступу: <http://www.ess.kpi.ua/index.php/en/archive/past-conferences/ess10-2?layout=edit&id=55>.
10. Пояснювальна записка до консолідованого проекту фінансового плану ПАТ «Українська залізниця» на 2017 рік [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/files/%D0%9F%D0%BE%D1%8F%D1%81%D0%BD.%20%D0%B4%D0%BE%20%D0%A4%D0%9F%202017%20%D0%A3%D0%97.doc>
11. Пояснювальна записка до консолідованого проекту фінансового плану ПАТ «Українська залізниця» на 2018 рік [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/%D0%9F%D0%97%202018.docx>
12. Департамент електрифікації та електропостачання [Електронний ресурс] // Режим доступу: http://www.uz.gov.ua/about/general_information/main_departments/department_of_electrification_and_power_supply/
13. Єліна М. С. Підвищення ефективності тягового електропостачання раціональною стратегією діагностики та ремонту / М. С. Єліна // Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности: Материалы IV Международной научно-практической конференции (Воловец, 11 июня – 14 июня 2013 г.) – Д.: ДНУЖТ, 2013. – С. 41.
14. Сопель М. Ф. Моніторинг в електроенергетиці [Рукопис]: дис. д-ра техн. наук: 05.14.02 / М. Ф. Сопель. – К., 2015. – 430 с.

15. Бобало Ю. Я. Моніторинг об'єктів в умовах апріорної невизначеності джерел інформації / Ю. Я. Бобало, Ю. Г. Даник, Л. О. Комарова [та ін.]. – Львів, 2015. – 360 с.
16. Рижов А. П. Генетичні алгоритми в задачі вибору операторів агрегування інформації в системах інформаційного моніторингу / А. П. Рижов, М. С. Федорова // V Всеросійська конференція «Нейрокомп'ютери та їх застосування». Збірник доповідей. Москва, 17-19 лютого 1999. – С. 267-270.
17. Буткевич О. Ф. Моніторинг та діагностування електроенергетичних об'єктів та систем України на базі комплексів «Регіна» / О. Ф. Буткевич, В. Л. Тутик // Гідроенергетика України. – 2010. – № 3. – С. 46-49.
18. Калинюк І. О. Перспективи організації комп'ютерних систем моніторингу та діагностики електричних мереж і об'єктів / І. О. Калинюк // Зб. наук. праць ДЕТУТ: серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2010. – № 17. – С. 194-200.
19. Калинюк І. О. Організація корпоративної системи моніторингу та діагностики тягових електричних мереж / І. О. Калинюк // Зб. наук. праць ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – К., 2011. – № 61. – С. 37-41.
20. Чижма С. Н. Совершенствование методов и средств контроля качества электроэнергии и составляющих мощности в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой / [Рукопис]: дис. д-ра техн. наук: 05.14.02 / С. Н. Чижма. – Омск, 2014. – 367 с.
21. Вторушин Д. П. Структурно-параметрический синтез эквивалентных моделей систем электроснабжения железных дорог [Рукопис]: дис. кандидата техн. наук: 05.13.01 / Д. П. Вторушин. – Иркутск, 2014. – 161 с.
22. Панасенко М. В. Проблеми електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму і використання засобів силової електроніки для їх вирішення / М. В. Панасенко, Ю. П. Гончаров, В. Г. Сиченко // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – № 2. – С. 22-28.

23. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
24. Стасюк О. І. Методи синтезу розподілених комп'ютерно-інтегрованих мереж і технологій інтелектуалізації, моніторингу та оптимізації режимів електропостачання і енергозбереження залізниць / О. І. Стасюк, Л. Л. Гончарова, В. Ф. Максимчук // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал. – 2015. – № 1. – С. 3-10.
25. Ульянова Е. А. Концептуальное и кортежное моделирование аутопоэтических систем / Е. А. Ульянова // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 8 (часть 1) – С. 234-238
26. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. – М.: Транспорт, 1982. – 27 с.
27. Abrahamsson L. Optimal Railroad Power Supply System Operation and Design: Doctoral Thesis / L. Abrahamsson. – Stockholm, 2012. – 77 p. – ISBN 978-91-7501-584-2
28. Закарюкин В. П. Моделирование и прогнозирование процессов электропотребления на железнодорожном транспорте / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Н. В. Раевский, Д. А. Яковлев. – Иркутск, 2007. – 115 с.
29. A Vision for The Smart Grid [Електронний ресурс]. – 2009. – 11 p. – Режим доступу: https://www.netl.doe.gov/File%20Library/research/energy%20efficiency/smart%20grid/whitepapers/Whitepaper_The-Modern-Grid-Vision_APPROVED_2009_06_18.pdf
30. Erfan I. EPRI Smart Grid R&D Overview / I. Erfan // EPRI. – 2008. – 16 p.
31. SmartGrids SRA 2035 Strategic Research Agenda Update of the SmartGrids SRA 2007 for the needs by the year 2035 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.smartgrids.eu/documents/sra2035.pdf>
32. European Technology Platform SmartGrids — Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future [Електронний ресурс] / Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities – 2006. – 44 p. – Режим доступу: https://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf

33. Giordano Vincenzo Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments / Vincenzo Giordano, Flavia Gangale, Gianluca Fulli, Manuel Sanchez Jimenez [and other]. Publications Office of the European Union. – 2011. – 79, [39] p. ISBN 978-92-79-20487-6
34. «Grid 2030» – A national vision for electricity's second 100 years [Електронний ресурс] / U.S. Dept. Energy – 2003. – 32, [2] p. – Режим доступу: https://www.energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Electric_Vision_Document.pdf
35. Голуб Г. М. Комп'ютерна інтелектуалізація режимів функціонування та процедур управління системи електропостачання залізниць / Г. М. Голуб // Зб. наук. праць ДЕТУТ: серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2013. – С. 134–141.
36. Босий Д. О. Розвиток наукових основ підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць [Рукопис]: дис. д-ра техн. наук: 05.22.09 / Д. О. Босий. – Дніпро, 2017. – 396 с.
37. Lowe Marcy. U.S. Smart Grid. Finding new ways to cut carbon and create jobs / Marcy Lowe, Hua Fan, Gary Gereffi // CGGC. Duke University. – 2011. – 56 p.
38. Кобец Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
39. Hauser C. H. A failure to communicate: next generation communication requirements, technologies, and architecture for the electric power grid / C. H. Hauser, D. E. Vakken, A. Bose // IEEE Power Energ. Mag. – 2005. – 3(2). – P. 47–55. – ISSN: 1540-7977.
40. Закарюкин В. П. Моделирование первичных преобразователей информации устройств синхронизированных векторных измерений / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Н. Г. Кодолов, М. С. Шульгин. – Братск: [Братский государственный университет], Системы. Методы. Технологии. – 2014. – С. 57-65. – ISSN: 2077-5415.

41. Воронко І. О. Сучасний стан комп'ютерних технологій моніторингу, контролю та діагностики електроенергетичних об'єктів та систем / І. О. Воронко // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – Черкаси, 2015. – С. 81–82.
42. Стогній Б. С. Система збору та обробки інформації, що реєструється комплексами «Регіна-Ч» / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, О. Ф. Буткевич [та ін.] // К: Праці ІЕД НАН України. – 2011. – № 29. – С. 35–46.
43. Гайденко О. С. Методологічні концепції розвитку інформаційних технологій оперативного керування тяговими електромережами / О. С. Гайденко // Збірник наукових праць «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2014. – № 25. – С. 153-160.
44. Zhang P. Next-Generation Monitoring, Analysis, and Control for the Future Smart Control Center / P. Zhang, F. Li, N. Bhatt // IEEE Trans. Smart Grid, 2010. – vol.1. – №2. – P. 186-192. – ISSN: 1949-3053.
45. Малишко І. В. Споживання електроенергії та енергозбереження на залізничному транспорті України / І. В. Малишко, Л. І. Малишко, Л. В. Пилипенко, В. І. Романко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 12. – С. 245-248.
46. Sand Kjell Next Generation Control Centres – State of art and future scenariosversion 2.0 / Kjell Sand, Poul Heegaard // Norwegian University of Science and Technology. Trondheim. – 2015. – 46 p. – ISBN 978-82-7200-052-2.
47. Стогній Б. С. Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу / Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель // Техн. Електродинаміка. Київ. – 2013. – № 1. – С. 62-69. – ISSN 1607-7970.
48. Бітюков С. Д. Оптимізація споживання електроенергії на електричному транспорті з використанням інформації автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії / С. Д. Бітюков, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко // Проблеми загальної енергетики. – 2011. – Вип. 3. – С. 39-44.

49. Стогний Б. С. Методы организации компьютерных систем коммерческого управления электрическими объектами / Б. С. Стогний, М. Ф. Сопель, А. И. Стасюк, И. А. Стасюк // Моделювання та інформаційні технології. – 2002. – Вип.15. – С. 3-15.
50. Макаров И. М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько; отв. ред. И.М. Макаров; Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. – М.: Наука, 2006. – 333 с. – ISBN 5-02-033782-X
51. Шилин А. Н. Интеллектуальные электрические сети: проблемы и решения / А. Н. Шилин, А. А. Шилин // Известия ВолгГТУ. Сер. Процессы преобразования энергии и энергетические установки. Вып. 3: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ.- Волгоград, 2011. – №8. – С. 84-88.
52. Тейл Г. Прикладное экономическое прогнозирование / Г. Тейл; пер. с англ. А. Н. Никольской и др. – М.: Прогресс. – 1970. – 509 с.
53. Верес О. М. Види архітектури систем підтримки прийняття рішень / О. М. Верес // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2010. – № 685 : Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – С. 190–197.
54. Міхнєва Г. П. Інформаційна технологія обробки інформації в інтелектуальній системі керування координатновимірною машиною / Г. П. Міхнєва // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій. – 2011. – Том 15. – С. 130–141.
55. Turner Christopher A review of key planning and scheduling in the rail industry in Europe and UK / Christopher Turner, Ashutosh Tiwari, Andrew Starr, Kevin Blacktop // Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit. – 2016. – Vol. 230(3). – P. 984-998.
56. Boucher T. Design of industrial information systems / T. Boucher, A. Yalcin. – [1 ed.]. – Academic Press. – 2006. – 496 p.
57. Spurgeon E. Charles Ethernet: The Definitive Guid / E. Charles Spurgeon, Joann Zimmerman // O'Reilly. – 2014. – 483 p.

58. Katz R. H. An information-centric energy infrastructure: The Berkeley view / R. H. Katz, D. E. Culler, S. Sanders, S. Alspaugh [and other] // Sustainable Computing: Informatics and Systems. – 2011. – V. 1. – P. 7–22
59. Сопель М. Ф. Анализ топологических структур компьютерных сетей систем мониторинга в энергетике с учётом формирования средств защиты информации / М. Ф. Сопель // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. пр. – Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільськ. нац. ун-т, 2012. – Вип. 6. – С. 181-197. – Бібліогр.: 16 назв.
60. Расторгуев С. П. Программные методы защиты информации в компьютерах и сетях / С. П. Расторгуев. – М.: Изд-во «Яхтсмен», 1993. – 188 с. – ISBN 5-86071-002-X.
61. Yaworsky P. S. Toward automating intelligent information processing / P. S. Yaworsky. – New York: Rome Laboratory Air Force Materiel Command. – 1997. – 61 p.
62. Fayyad Usama. The KDD Process for Extracting Useful Knowledge from Volumes of Data / Usama Fayyad, Gregory Piatetsky-Shapiro, Padhraic Smyth // Communications of the ACM. – 1996. – Vol. 39. – №11. – P. 27-34. – ISSN 0001-0782.
63. Петренко А. І. Grid і інтелектуальна обробка даних Data Mining / А. І. Петренко // Систем. дослідж. та інформ. технології. – 2008. – № 4. – С. 97-110. – Бібліогр.: 8 назв.
64. Текуч Н. Ю. Актуальность и характерные особенности применения технологии data mining для решения корпоративных задач / Н. Ю. Текуч // Программные продукты и системы. – 2007. – № 4. – С. 41-43.
65. Щавелёв Л. В. Агрегация и интеллектуальный анализ информации хранилищ данных / Л. В. Щавелёв, С. Д. Коровкин, И. А. Левенец; Новые информационные технологии: материалы науч.-практ. семинара / Моск. гос. ин-т электроники и математики. – М., 1998.

66. Стеценко Д. О. Інтелектуальна обробка даних в системі автоматизованого управління технологічним комплексом брагоректифікації / Д. О. Стеценко, О. М. Зігунов, Я. В. Смітюх // Технологический аудит. – 2014. – № 2/1(16). – С. 49-52.
67. Шерепа Т. А. Інформаційна технологія виділення та обробки знань у CDS/ISIS-сумісних базах даних / Шерепа Т. А. // Бібл. вісн. – 2005. – №5. – С. 8-13.
68. Джулій В. М. Аналіз методів інтелектуальної обробки інформації / В. М. Джулій, В. М. Чешун, В. І. Кривцун, Л. В. Солодєєва. // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2014. – Вип. 45. – С. 119-124.
69. Ленков С. В. Концептуальна схема системи інтелектуальної обробки даних / С. В. Ленков, В. М. Джулій, О. М. Горбатюк, Н. М. Берназ // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2014. – Вип. 46. – С. 181-190.
70. Fayyad Usama. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases / Usama Fayyad, Gregory Piatetsky-Shapiro, Padhraic Smyth // AI Magazine. – 1996. – Vol. 17. – №3. – P. 37-54.
71. Gray Jim. The Transaction Concept: Virtues and Limitations. Proceedings of the 7th International Conference on Very Large Databases / Jim Gray. – Cannes, France, 1981. – Vol. 7. – P. 144–154.
72. Lu H. Effective Data Mining Using Neural Networks / H. Lu, R. Setiono, H. Liu // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 1996. – Vol. 8. – No. 6. – P. 957-961. – ISSN: 1041-4347.
73. Гречкин В. А. Интеллектуальные алгоритмы обработки информации в многокритериальных системах поддержки принятия решений / В. А. Гречкин // Вестник Ставропольского государственного университета. – 2010. – №70. – С. 35-39.
74. Грицишин Я. М. Генетичні алгоритми для розв'язання задач розміщення / Я. М. Грицишин, Д. В. Корпильов, Р. З. Кривий, Т. В. Свірідова, С. П. Ткаченко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2009. – № 638. – С. 271-276.

75. Whittaker J. Graphical Models in Applied Multivariate Statistics / J. Whittaker // New York: Wiley, 1990. – 448 p.
76. Pearl J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems / J. Pearl // San Francisco, Calif.: Morgan Kaufmann, 1988. – 552 p. – ISBN:0-934613-73-7.
77. Fayyad U. M. From Digitized Images to On-Line Catalogs: Data Mining a Sky Survey / U. M. Fayyad, S. G. Djorgovski, N. Weir // AI Magazine. – 1996. – №17(2). – P. 51–66.
78. Gould Joshua. Classification and Regression Trees (CART) Documentation [Електронний ресурс]. – 2 p. – Режим доступу: <ftp://ftp.broad.mit.edu/pub/genepattern/modules/CART/broad.mit.edu:cancer.software.genepattern.module.analysis/00056/1/CART.pdf>
79. Breiman L. Classification and regression trees / L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, C. J. Stone // Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software. – 1984. – 368 p. – ISBN 0412048418.
80. Brockett Patrick L. A comparison of neural network, statistical methods, and variable choice for life insurers' financial distress prediction. / Patrick L. Brockett, Linda L. Golden, Jaeho Jang, Chuanhou Yang // Journal of Risk and Insurance. – 2006. – Vol. 73. – No. 3. – P. 397-419.
81. Quinlan J. C4.5: Programs for Machine Learning / San Francisco, Calif.: Morgan Kaufmann, 1992.
82. Литвин А. В. Розробка дерев рішень для прогнозування фінансової кризи в страхових компаніях України / А. В. Литвин // Наукові записки НаУКМА. Економічні науки. – 2015. – Т. 172. – С. 59-64.
83. McDonald J. R. Intelligent knowledge based systems in electrical power engineering / J. R. McDonald, G. M. Burt, J.S. Zielinski, S. D. J. McArthur. – 1st edition. – Springer-Science+Business Media, B.V. – 1997. – 224 p. – ISBN 978-1-4613-7934-8.
84. Zadeh L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – V. 8. – P. 338-353.

85. Проскурняк К. І. Дослідження методів синтезу комп'ютерних систем обліку електроенергії за диференційованим тарифам залізниці / К. І. Проскурняк // Збірник тез науково-практичної конференції «Розвиток науки і техніки на залізничному транспорті». – К.: ДЕДУТ, 2014. – С. 67-69.
86. Манусов В. З. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами / В. З. Манусов, Е. В. Бирюков // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – № 6. – С. 153-158.
87. Лернер А. Я. Начала кібернетики / А. Я. Лернер. – М.: 1967. – 400 с.
88. Дзоз В. О. Класифікація прогнозів та їх реалізація в гуманітарній політиці держави / В. О. Дзоз // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Філософія. Психологія. Педагогіка; [редкол. : – Б. В. Новіков (гол. ред.), Є. О. Архипова (відп. ред.), Єжи Махнач та ін.]. – К.: 2005. – 9 с. – ISSN: 2308-9393.
89. Шабалина Л. Г. Эвристические методы в прогнозировании экономических ситуаций/ Л. Г. Шабалина // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции; Оренбургский гос.ун-т. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2012. – С. 2274-2278.
90. Омеляненко В. І. Автоматизована система прогнозування споживання електроенергії на залізницях / В. І. Омеляненко, Г. В. Омеляненко, Ю. П. Чудний // Світлотехніка та електроенергетика. – 2009. – №2. – С. 9-13.
91. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования / Е. М. Четыркин. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.
92. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики: перцептроны и теория механизмов мозга / Ф. Розенблатт. – М.: Мир, 1965. – 480 с.
93. Родина Л. А. Имитационное моделирование в контексте управленческого прогнозирования / Л. А. Родина // Вестник Финансовой академии. 2004. – Вып. 1(29). – С. 77-84.

94. Братушка С. М. Імітаційне моделювання як інструмент дослідження складних економічних систем / С. М. Братушка // Вісник Української академії банківської справи. – 2009. – № 2 (27). – С. 113–118.
95. Mishra Dharmendra Kumar. Efficient algorithms for load forecasting in electric power system using artificial neural network / Dharmendra Kumar Mishra, A. K. D. Dwivedi, S. P. Tripathi // International Journal of Latest Research in Science and Technology. – 2012. – Vol. 1. – P. 254-258. – ISSN:2278-5299.
96. Гнучих Л. А. Використання нейромережевих технологій для прогнозування валютного курсу / Л. А. Гнучих, О. В. Старкова, О. О. Шаповалова // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективні розробки науки та техніки – 2011». – Пшемишль, Польща.
97. Chang Wen-Yeau. Short-Term Wind Power Forecasting Using the Enhanced Particle Swarm Optimization Based Hybrid Method / Wen-Yeau Chang. – New Taipei City: St. John's University. – Energies. – 2013. – №6. – P. 4879-4896. – ISSN 1996-1073.
98. Catalro J. P. S. An artificial neural network approach for short-term electricity prices forecasting / J. P. S. Catalro, S. J. P. S. Mariano, V. M. F. Mendes, L. A. F. M. Ferreira // Toki Messe, Niigata, Japan: 2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. – P. 15-23. – ISBN: 978-986-01-2607-5.
99. Черненко П. О. Аналіз ефективності вирішення задачі короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження енергосистеми з використання ШНМ типу багат шаровий персептрон / П. О. Черненко, О. В. Мартинюк, В. О. Мірошник // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – № 1. – С. 24-27.
100. Кретов Д. А. Прогнозирование электропотребления энергосбытовой компании с использованием искусственной нейронной сети [Електронний ресурс] / Д. А. Кретов, Р. В. Рузанов // Инженерный вестник Дона, 2015. – №2. – ISSN 2073-8633. – Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2880

101. Кислова О. М. Можливості застосування штучних нейронних мереж в аналізі соціологічної інформації / О. М. Кислова, К. Б. Бондаренко // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, 2010. – № 891. – С. 78-82.
102. Стасюк О. І. Принципи і методи комп'ютерної інтелектуалізації мереж електропостачання залізниць / О. І. Стасюк, Л. Л. Гончарова, // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал. – 2016. – № 2. – С. 10-18.
103. Находов В. Ф. Удосконалення методологічних засад побудови систем оперативного контролю ефективності енерговикористання / В. Ф. Находов, О. В. Бориченко, Я. С. Бедерак, Д. О. Іванько // Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности: Материалы IV Международной научно-практической конференции (Воловец, 11 июня – 14 июня 2013 г.) – Д.: ДНУЖТ, 2013. – С. 65-66.
104. Стасюк О. І. Методи організації мікропроцесорних архітектур захисту фідерів контактної мережі / О. І. Стасюк, Л. Л. Гончарова, Г. М. Голуб // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал. – 2015. – № 4. – С. 10-19.
105. Воронко І. О. Модернізація архітектури комп'ютерних інформаційно-діагностичних систем електроенергетичних мереж залізничного транспорту / І. О. Воронко // Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДУІТ, 2014. – Вип. 24. – С. 180-186.
106. Пухов Г. Е. Преобразования Тейлора и их применение в электротехнике и электронике / Г. Е. Пухов. – Київ: Наук. думка, 1978. – 259 с.
107. Куделька О. В. Модернізація фідерної автоматики на тяговій підстанції постійного струму / О. В. Куделька, В. М. Ляшук // Електрифікація транспорту, 2011. – №1. – С. 39-41. – ISSN 2307-4221.
108. Закарюкин В. П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Иркутск: Иркут. ун-т. – 2005. – 273 с.

109. Щербакова І. О. Принципи організації та методи синтезу інтегрованих комп'ютерних систем комерційного управління електричними об'єктами : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.13.13 / І. О. Щербакова; НАН України. Ін-т пробл. моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова. — К., 2005. — 18 с.
110. Максимець С. М. Діяльність залізниць як учасників оптового ринку електроенергії України / С. М. Максимець, А. Л. Лагута // Електрифікація транспорту, 2011. – №2. – С. 54-58. – ISSN 2307-4221.
111. Стогній Б. С. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка, 2012. – №5. – С. 52-67.
112. Тарифи на електроенергію для юридичних споживачів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.energo.uz.ua/index.php?id=27>
113. Постанова НКРЕ від 22.01.2015 № 37 «Про внесення зміни до постанови НКРЕ від 20 грудня 2001 року № 1241»
114. Бондаренко Б. М. Автоматизація енергозбереження під час реагування на аварійні ситуації на залізницях / Б. М. Бондаренко, С. В. Кухлівський, С. І. Шилько // Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности: Материалы V Международной научно-практической конференции (Воловец, 11 июня – 13 июня 2014 г.) – Д.: ДНУЖТ, 2014. – С. 25-26.
115. Медведев В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин; Под общ. ред. В. Г. Потемкина. – Пакеты прикладных программ; Кн. 4. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. – 630 с.
116. MacKay D. J. C. Bayesian interpolation / D. J. C. MacKay // Neural Computation, 1991. – Vol. 4. – P. 415-447.
117. Fletcher R. Function minimization by conjugate gradients / R. Fletcher, C. M. Reeves // Computer Journal, 1964. – Vol. 7. – P. 149-154.
118. Hagan M. T. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm / M. T. Hagan, M. Menhaj // IEEE Transactions on Neural Networks, 1994. – Vol. 5. – P. 989–993.

119. Bishop N. W. M. Finite Element Based Fatigue Calculation / N. W. M. Bishop, F. Sherratt // NAFEMS Ltd, 2000. – 131 p.
120. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский; пер. с польского И. Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
121. Лутчин Т. М. Ідентифікація параметрів режимів електроспоживання [Рукопис]: дис. кандидата технічних наук: 05.14.01 / Т. М. Лутчин. – Київ, 2014. – 204 с.
122. Turner C. J. An Intelligent Framework and Prototype for Autonomous Maintenance Planning in the Rail Industry / C. J. Turner, A. Tiwari, A. Starr, I. Durazo-Cardenas, K. Blacktop // Lisbon, Portugal: Proceedings of the 1st International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, 2015. – 7 p.
123. Притула М. Г. Алгоритм побудови графіка руху потягів / М. Г. Притула, Р. Р. Шпакович // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, 2008. – № 629. – С. 146-152.
124. Гайденко О. С. Комп'ютерно-орієнтована математична модель оцінки ефективності тарифної системи оплати за спожиту електроенергію залізницею / О. С. Гайденко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал. – 2016. – № 4. – С. 10-14.
125. Higgins A. Optimal scheduling of trains on a single line track / A. Higgins, E. Kozan, L. Ferreira // Transportation Research – B. – Vol. 30. – 1996. – No. 2. – Pp. 147-161.
126. Li K. Network-based simulation approach for scheduling trains on rail networks / K. Li, Z. Gao // International Journal of Modern Physics C. –Vol. 17. – 2006. – No. 9. – Pp. 1349-1358.
127. Li K. An improved equation model for the train movement / K. Li, Z. Gao // Simulation Modelling Practice and Theory. –Vol. 15. – 2007. – Issue 9. – Pp. 1156-1162.
128. Li K. Modeling and simulation for train control system using cellular automata / K. Li, Z. Gao, L. Yang // Science in China Series E. –Vol. 50. – 2007. – Issue 6. – Pp. 765-773.

129. Li F. Efficient scheduling of railway traffic based on global information of train / F. Li, Z. Gao, K. Li, L. Yang // *Transportation Research Part B*. –Vol. 42. – 2008. – Issue 10. – Pp. 1008-1030.
130. Щербакова И. А. Математические модели компьютерного анализа и оптимизации стоимости электроэнергии по коммерческим тарифам с учетом затрат для изменения графика движения поездов / И. А. Щербакова, А. И. Стасюк // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал*. – 2014. – № 4. – С. 7-12.
131. Lee Sang Jun. A review of data mining techniques / Sang Jun Lee, Keng Siau // *Industrial Management & Data Systems*. – 2001. – Vol. 101. – P. 41-46.
132. Шаров С. В. Сучасний стан розвитку інтелектуальних інформаційних систем / С. В. Шаров // *Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Серія: Педагогічні науки*. – 2015. – Вип. 130. – С. 111-114.
133. Гайденко О. С. Оптимізація графіка руху потяга для використання тризонного диференційованого тарифу оплати спожитої електроенергії / О. С. Гайденко // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал*. – 2016. – № 5. – С. 46-50.

Додаток А

Тарифні коефіцієнти тризонного диференційованого тарифу і тривалість періодів їх дії

Таблиця (А.1)

Тарифні коефіцієнти і тривалість тарифних зон тризонного ДТ

Періоди часу	Межі тарифних зон, год.			Тривалість періоду, год.	Тарифні коефіцієнти
	січень, лютий, листопад, грудень	березень, квітень, вересень, жовтень	травень, червень, липень, серпень		
Нічний	з 23 до 6	з 23 до 6	з 24 до 7	7	0,25
Напів-піковий	з 6 до 8	з 6 до 8	з 7 до 8	11	1,02
	з 10 до 17	з 10 до 18	з 11 до 20		
	з 21 до 23	з 22 до 23	з 23 до 24		
Піковий	з 8 до 10	з 8 до 10	з 8 до 11	6	1,80
	з 17 до 21	з 18 до 22	з 20 до 23		

Додаток Б

Результати комп'ютерного моделювання засобами Mathcad залежностей вартості та споживання електроенергії протягом доби промисловим підприємством
(орієнтовано на залізницю)

	(0)	(0.086)	(0.25)	(0.086)
	1	0.119	0.25	0.119
	2	0.11	0.25	0.11
	3	0.126	0.25	0.126
	4	0.119	0.25	0.119
	5	0.199	0.25	0.199
	6	0.22	1.02	0.22
	7	0.265	1.02	0.265
	8	0.217	1.8	0.217
	9	0.136	1.8	0.136
	10	0.101	1.02	0.101
	11	0.084	1.02	0.084
t :=	W(t) :=	A(t) :=	W1 :=	
	12	0.07	1.02	0.07
	13	0.082	1.02	0.082
	14	0.09	1.02	0.09
	15	0.061	1.02	0.061
	16	0.097	1.02	0.097
	17	0.134	1.8	0.134
	18	0.199	1.8	0.199
	19	0.239	1.8	0.239
	20	0.189	1.8	0.189
	21	0.139	1.02	0.139
	22	0.145	1.02	0.145
	23	0.141	(0.25)	(0.141)
	(24)	(0.086)		

$$B_o := \sum W_1 \quad B_d := W_1 \cdot A(t)$$

$$f := B_d < B_o = 0 \quad \frac{B_o - B_d}{B_o} \cdot 100 = -7.223$$

$$W_n := \begin{pmatrix} 0.141 \\ 0.086 \\ 0.119 \\ 0.11 \\ 0.126 \\ 0.119 \\ 0.199 \end{pmatrix} \quad W_{np} := \begin{pmatrix} 0.22 \\ 0.265 \\ 0.101 \\ 0.084 \\ 0.07 \\ 0.082 \\ 0.09 \\ 0.061 \\ 0.097 \\ 0.139 \\ 0.145 \end{pmatrix} \quad W_p := \begin{pmatrix} 0.217 \\ 0.136 \\ 0.134 \\ 0.199 \\ 0.239 \\ 0.189 \end{pmatrix}$$

$$A_n := (0.25) \quad A_{np} := (1.02) \quad A_p := (1.8)$$

$$W_n \cdot A_n = \begin{pmatrix} 0.035 \\ 0.022 \\ 0.03 \\ 0.028 \\ 0.032 \\ 0.03 \\ 0.05 \end{pmatrix} \quad W_{np} \cdot A_{np} = \begin{pmatrix} 0.224 \\ 0.27 \\ 0.103 \\ 0.086 \\ 0.071 \\ 0.084 \\ 0.092 \\ 0.062 \\ 0.099 \\ 0.142 \\ 0.148 \end{pmatrix} \quad W_p \cdot A_p = \begin{pmatrix} 0.391 \\ 0.245 \\ 0.241 \\ 0.358 \\ 0.43 \\ 0.34 \end{pmatrix}$$

Додаток В

Алгоритм адаптації графіка руху потягів до оплати електроенергії за
диференційованим тарифом

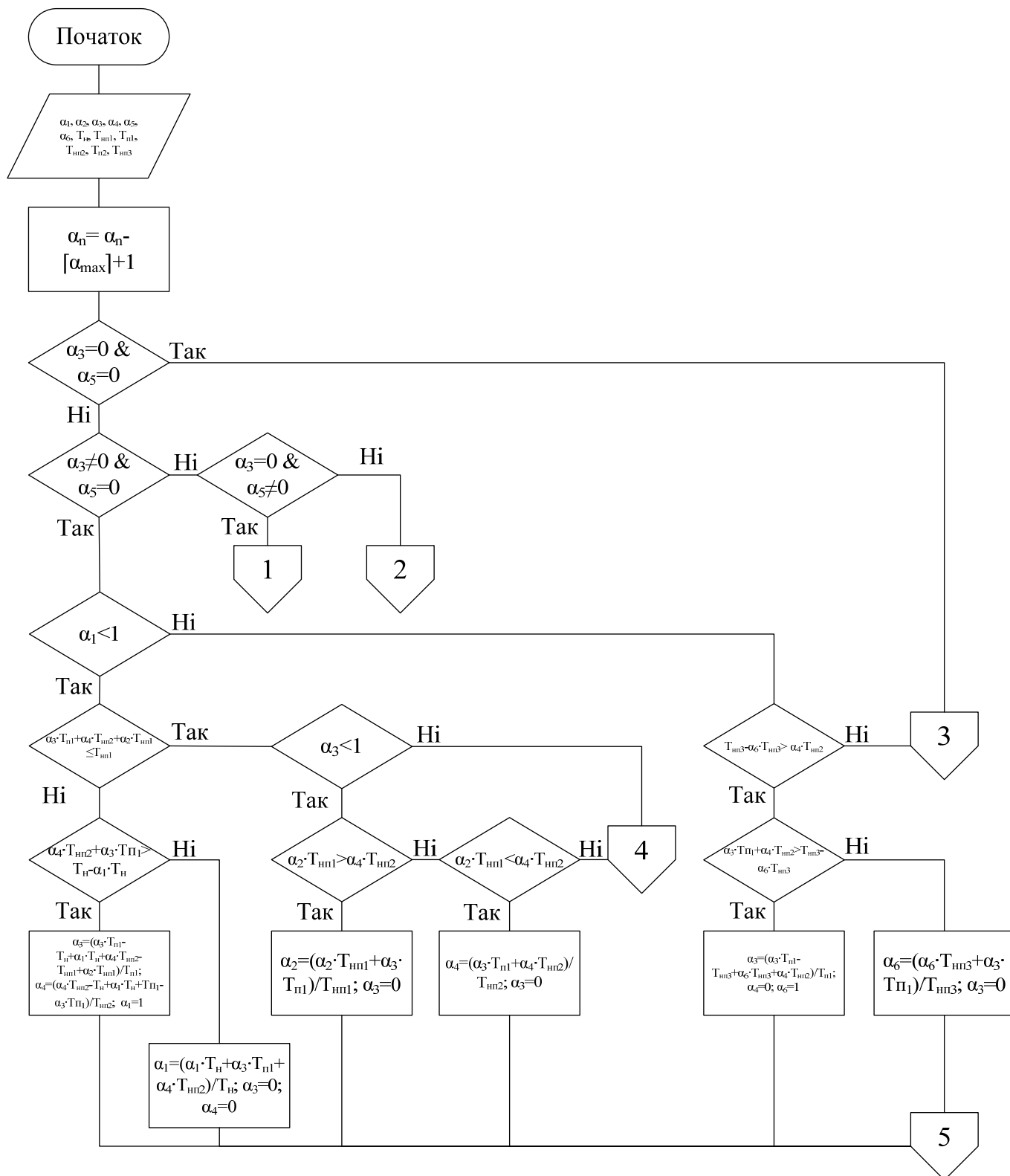


Рис. В.1. Блок-схема алгоритму зміни розкладу потягів для застосування ДТ

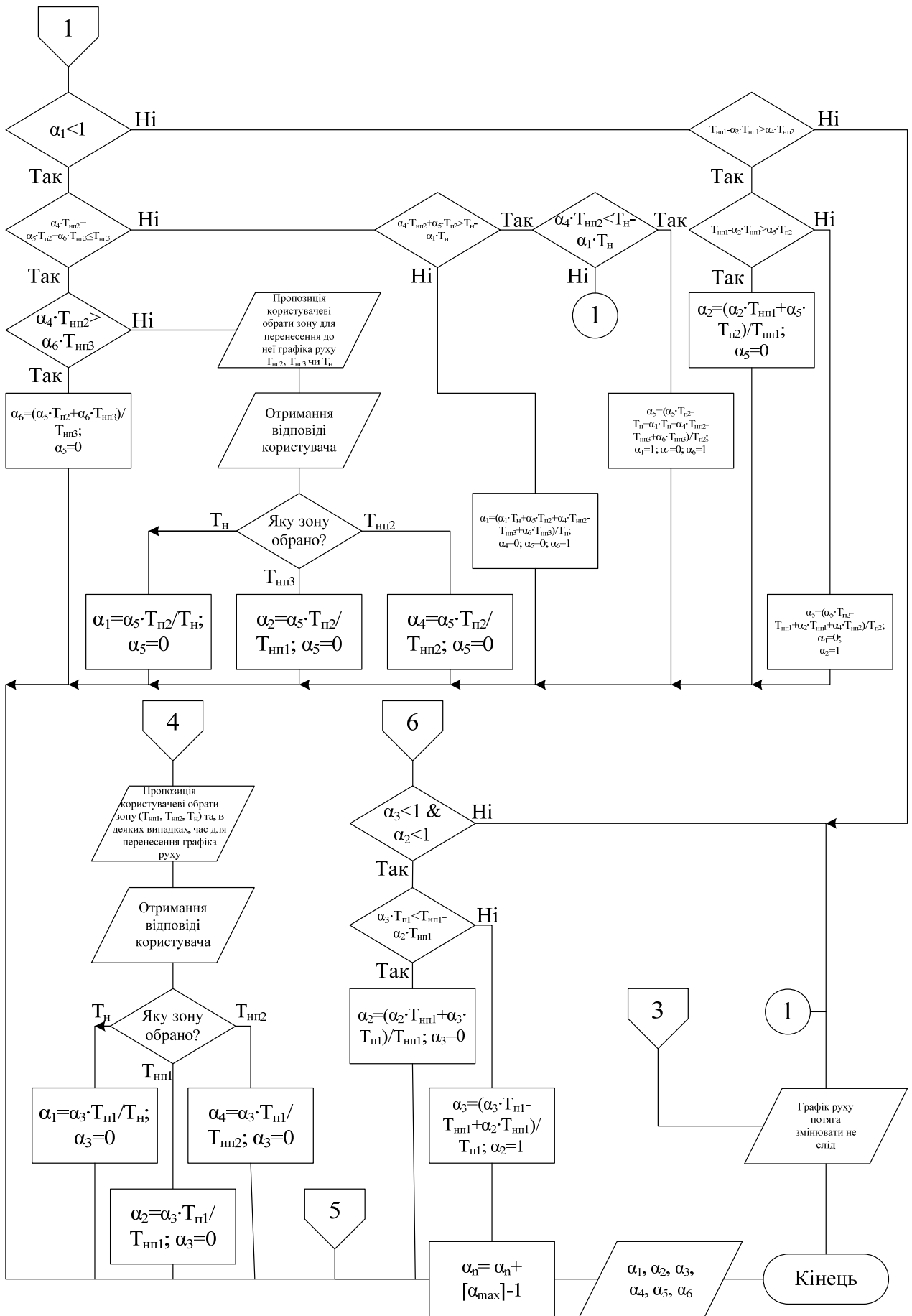


Рис. В.3. Продовження блок-схеми алгоритму


Додаток Г
Акти про впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Київського інституту
залізничного транспорту

Державного університету
інфраструктури та технологій

 Н. С. Браjkовська

" 07 " лютого 2019 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес Державного університету інфраструктури та технологій результатів дисертаційної роботи Гайденка Олесь Сергійовича на тему: «Комп'ютерно-орієнтовані засоби опрацювання первинних даних моніторингу та інтелектуалізації процесів електропостачання залізниці»

Результати дисертаційної роботи Гайденка Олесь Сергійовича впроваджено в навчальний процес у 2018-2019 навчальному році та використовується на кафедрі «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту» Державного університету інфраструктури та технологій при підготовці і викладанні лекційних занять, практичних і лабораторних робіт з дисциплін «Алгоритмізація і програмування» та «Автоматика і комп'ютерні системи управління рухом поїздів».

Впроваджені результати були рекомендовані до включення в робочі програми навчальних дисциплін на засіданні кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту» (протокол №6 від 29.01.2019 р.).

Декан факультету

«Інфраструктура і рухомий склад залізниць»,

к.т.н., доц. В. М. Твердомед



Завідувач кафедри «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології транспорту»

к.т.н., доц. О. А. Герцій



ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник ВП Фастівська
 дистанція електропостачання
 РФ «Південно-західна залізниця»
 ПАТ «Укрзалізниця»

Ю. А. Шманенко

" 21 " січня 2019 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження Гайденка Олеся Сергійовича на тему: «Комп'ютерно-орієнтовані засоби опрацювання первинних даних моніторингу та інтелектуалізації процесів електропостачання залізниці»

Напрацювання дисертаційної роботи частково реалізовано в інформаційній системі керування на тяговій підстанції ЕЧЕ-8 ст. Фастів-1. Запропоновані Гайденком О. С. рішення розширюють сферу застосування інформаційних пристроїв у галузі залізничної енергетики та підвищують загальний рівень автоматизації без необхідності суттєвих затрат на модернізацію існуючої інформаційної мережі.

З фахівцями технічного відділу дистанції електропостачання на базі тягової підстанції ЕЧЕ-8 Південно-Західної залізниці було проведено експериментальні дослідження запропонованих у дисертаційній роботі математичних моделей і методів, комп'ютерних моделей та програмного забезпечення щодо опрацювання даних моніторингу по комп'ютеризації процесів у сфері впровадження АСКОВЕ.

Запропонований дисертантом комплекс методів мінімізації плати за спожиту електроенергію на тягу залізниці за результатами дослідження виявився працездатним і придатним для подальшого поширення на вищі рівні господарства електропостачання.

Головний інженер ВП Фастівська дистанція
 електропостачання Кушпира В. І. _____

Начальник технічного відділу ВП Фастівська
 дистанція електропостачання Горвий В. М. _____



Додаток Д

Список публікацій за темою дисертації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Гайденко О. С. Методологічні концепції розвитку інформаційних технологій оперативного керування тяговими електромережами / О. С. Гайденко // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2014. – Вип. 25. – С. 153-161.
2. Гайденко О. С. Методи прогнозування електроспоживання тяговими підстанціями залізниці / О. С. Гайденко // Моделювання та інформаційні технології. – 2015. – Вип. 75. – С. 49-56.
3. Гайденко О. С. Комп'ютерно-орієнтована математична модель оцінки ефективності тарифної системи оплати за спожиту електроенергію залізницею / О. С. Гайденко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал. – 2016. – № 4. – С. 10-14. – ISSN 1681-4886.
4. Гайденко О. С. Інтелектуальна обробка баз знань господарства електропостачання залізниць / О. С. Гайденко // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2016. – Вип. 28. – С. 147-153.
5. Гайденко О. С. Оптимізація графіка руху потяга для використання тризонного диференційованого тарифу оплати спожитої електроенергії / О. С. Гайденко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал. – 2016. – № 5. – С. 46-50. – ISSN 1681-4886.
6. Гайденко О. С. Сучасні тенденції та основні методи інтелектуального аналізу первинних даних / О. С. Гайденко // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія : Транспортні системи і технології. – 2016. – Вип. 29. – С. 184-188.

7. Гайденко О. С. Математичні моделі та методи адаптації графіка руху потягів до оплати спожитої електроенергії на тягу за комерційним тарифом / О. С. Гайденко // Науковий журнал «Електрифікація транспорту». – 2016. – № 12. – С. 8-11. – ISSN 2307-4221.

8. Гайденко О. С. Особливості комп'ютерного моніторингу, аналізу та управління технологічними процесами електропостачання залізниць / О. С. Гайденко // Моделювання та інформаційні технології. – 2016. – Вип. 77. – С. 82-88.

9. Гайденко О. С. Організація комп'ютерної архітектури інтелектуального керування електропостачанням Укрзалізниці / О. С. Гайденко // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2017. – Вип. 30. – С. 221-225.

10. Гайденко О. С. Характерні особливості моделювання системи та процесів тягового електропостачання залізниці як об'єкта моніторингу та керування / О. С. Гайденко, Г. М. Голуб // Моделювання та інформаційні технології. – 2017. – Вип. 79. – С. 42-48.

11. Гайденко О. С. Прогнозування спожитої електроенергії методами нейромережевого моделювання // О. С. Гайденко, Г. М. Голуб / Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології». – 2018. – Вип. 31. – С. 196-201.

12. Гайденко О. С. Експериментальні дослідження комп'ютерно-орієнтованих методів мінімізації плати за спожиту електроенергію / О. С. Гайденко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал. – 2018. – № 4. – С. 30-34. – ISSN 1681-4886.

13. Стасюк О. І. Диференційні моделі та комп'ютерно-орієнтовні методи інтелектуалізації процесів визначення інформативності параметрів режимів інтелектуальних мереж електропостачання залізниць / О. І. Стасюк, О. С. Гайденко, Л. Л. Гончарова // Науковий журнал «Електрифікація транспорту». – 2018. – № 15. – С. 75-83. – ISSN 2307-4221.

14. Гайденко О. С. Модель інтелектуальної інформаційної системи керування електропостачанням залізниці // О. С. Гайденко, Г. М. Голуб / Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – 2018. – Вип. 32-33. – С. 96-101. – ISSN 2617-9040.

15. Кульбовський І. І. Моделювання інформаційних потоків комп'ютерного моніторингу мереж електропостачання транспорту // І. І. Кульбовський, Г. М. Голуб, О. С. Гайденко / Металургійна та гірничорудна промисловість, 2018. – №4 (313). – С. 94-98.

Відомості про апробацію результатів дисертації

1. Науково-практична конференція «Розвиток науки і техніки на залізничному транспорті» (м. Київ, 15 квітня 2015 р., форма участі – очна).

2. XLVII Науково-практична конференція «Залізниця: вчора, сьогодні, завтра» (м. Київ, 13 квітня 2016 р., форма участі – очна).

3. XI Международная научно-практическая интернет-конференция «Проблемы экономики и управления на железнодорожном транспорте – ЭКУЖТ 2016» (м. Київ, 9-15 вересня 2016 р., форма участі – заочна).

4. XLVIII Науково-практична конференція молодих учених, аспірантів, магістрів і спеціалістів «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки» (м. Київ, 12 квітня 2017 р., форма участі – очна).

5. V Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління» (м. Луцьк, 30 листопада 2017 р., форма участі – заочна).