

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

ГАЙДЕНКО ОЛЕСЬ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 004.891.3

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

Спеціальність 05.13.05 – «Комп'ютерні системи та компоненти»

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

КИЇВ 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному університеті інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України, м. Київ

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
лауреат Державної премії України
в галузі науки та техніки
Стасюк Олександр Іонович,
Державний університет
інфраструктури та технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Квасніков Володимир Павлович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри комп'ютеризованих
електротехнічних систем та технологій

кандидат технічних наук, доцент
Душеба Валентина Віталіївна,
Інститут проблем моделювання
в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України,
в.о. завідувача відділу математичного та
комп'ютерного моделювання

Захист дисертації відбудеться «22» жовтня 2019 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К26.820.04 у Державному університеті інфраструктури та технологій за адресою: 03049, м. Київ, вул. Івана Огієнка, 19 в каб. 305а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного університету інфраструктури та технологій за адресою: 03049, м. Київ, вул. Івана Огієнка, 19.

Автореферат розісланий «12» вересня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 26.820.04

О. А. Герцій

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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, та ін.

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: Енергетична стратегія України на період до 2030 р., схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 24.07.2013, в частині розвитку електроенергетичної галузі; 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 досліджень – 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.

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.

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.

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 20 наукових праць, серед яких 15 статей у фахових виданнях України, з них 5 статей у журналах, що реферуються у наукометричних базах, 5 тез доповідей у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, 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, включаючи 24 рисунки та 10 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет, представлено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами, наведено відомості про наукову новизну, практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію результатів і їх впровадження.

У першому розділі проведено дослідження мережі тягового електропостачання залізниці як об'єкта моніторингу та керування, показано та систематизовано чинники, які необхідно враховувати при моделюванні процесів, що протікають у системі електропостачання залізничного транспорту. Розглянуто роль моніторингу при моделюванні та його особливості. Проведено аналіз провідних напрацювань інтелектуалізації електропостачання, який показав що майбутнім інтелектуальної енергетики стануть ІТ-технології, розроблені у рамках роботи над Smart Grid програмами, чи на їх основі. Виділено загальні тенденції розвитку функціональних і технологічних рішень інтелектуальної енергетики в світі та досліджено можливості впровадження їх технологічних рішень у мережу тягового електропостачання.

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 та на їх основі наведено концептуальну схему функціонування інтелектуалізованого центру диспетчерського керування системою електропостачання залізниці (рис. 1).

Запропоновано схему інформаційних зв'язків між

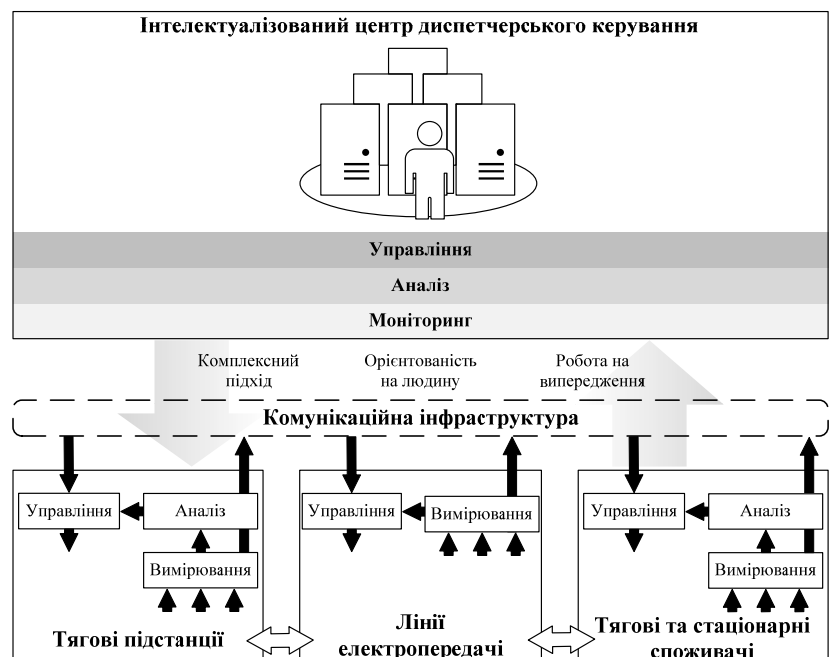


Рис. 1. Інтелектуалізований центр диспетчерського керування системою електропостачання залізниці разом із інфраструктурою

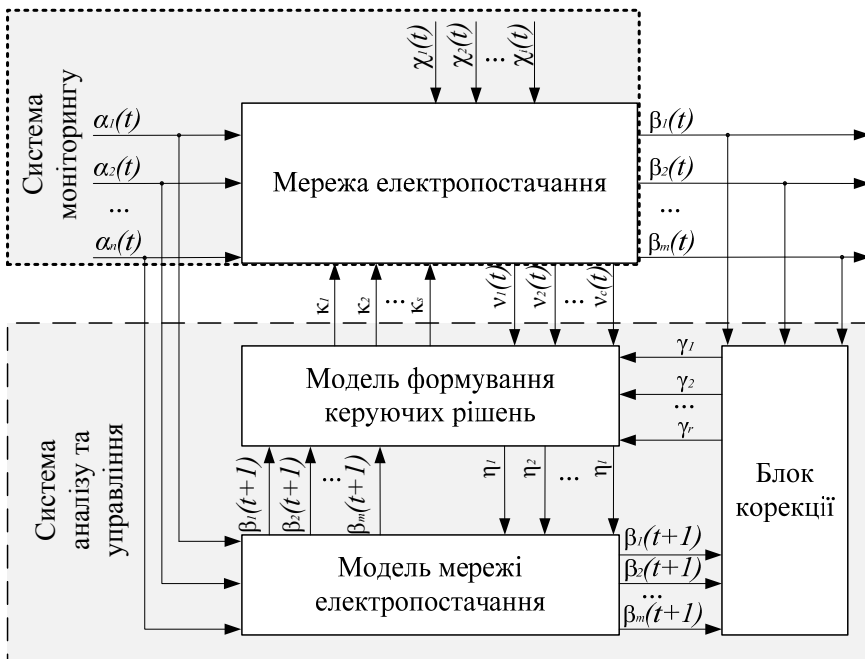


Рис. 2. Інформаційні потоки моніторингу та керування мережі електропостачання залізничного транспорту

апаратних засобів та потреб, запропоновано структуру інтелектуалізованої інформаційної системи (ІС) (рис. 3) та модифіковану комп'ютерну архітектуру системи електропостачання АТ «Українська залізниця» (рис. 4), орієнтовані на розвиток існуючої інформаційної системи за концепцією Smart Grid та єдиного інформаційного простору.

компонентами систем моніторингу та керування режимами роботи мережі електропостачання і їхнім об'єктом як взаємопов'язаних складових єдиного інформаційного простору (рис. 2) та, зокрема, показано узагальнену структуру транзакцій первинних даних, керуючих рішень та зовнішніх впливів у межах інформаційно-комп'ютерної системи з використанням кортежного моделювання.

На основі аналізу сучасного стану розвитку

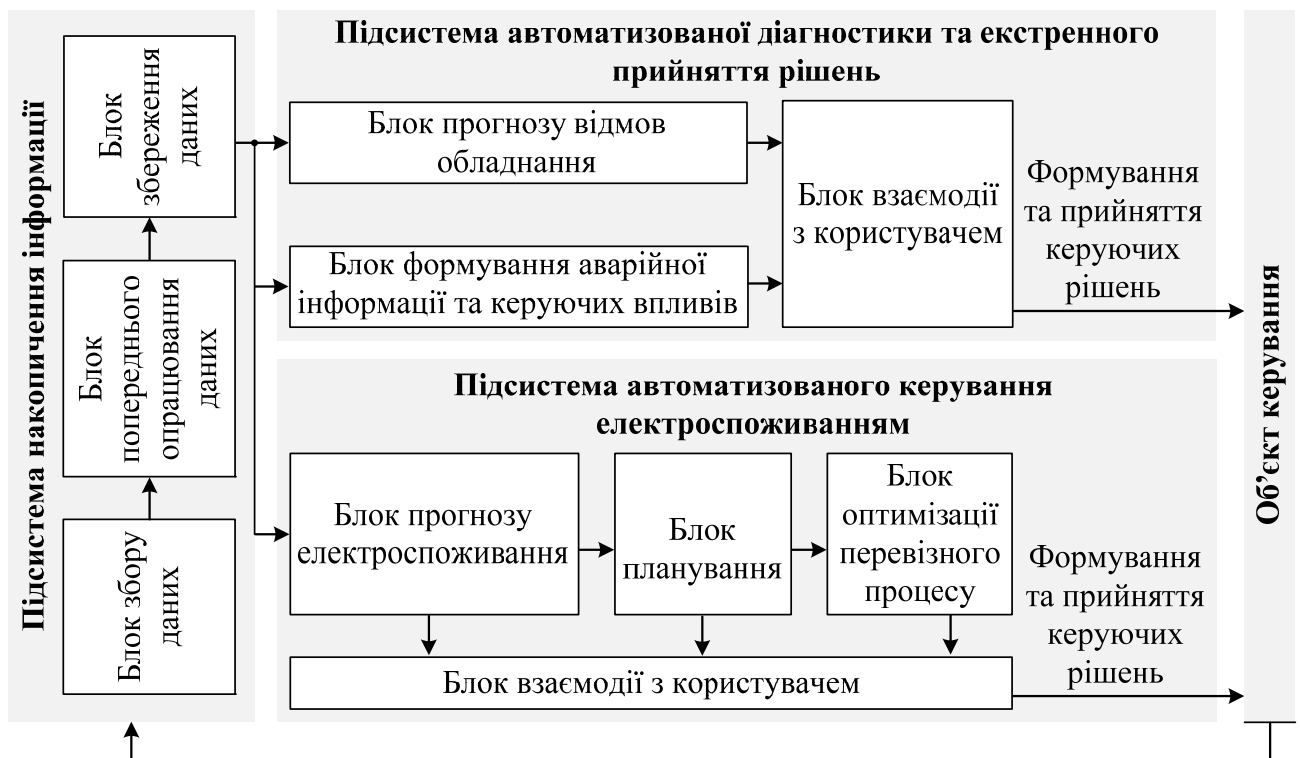


Рис. 3. Інтелектуалізована інформаційна система керування електропостачанням залізниці

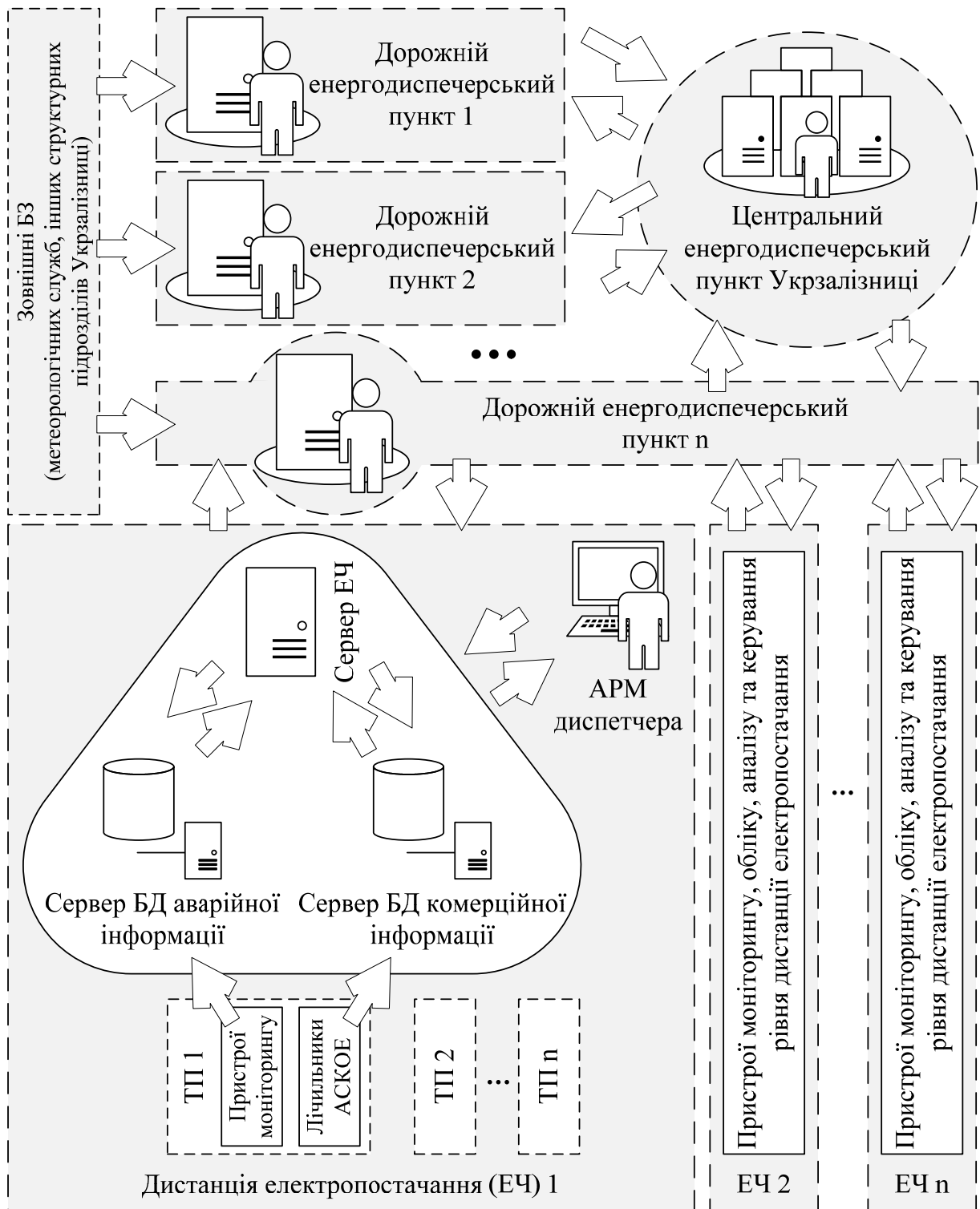


Рис. 4. Модифікована комп'ютерна архітектура інтелектуалізованої інформаційної системи електропостачання Укрзалізниці

Наведені підходи до побудови ІС забезпечують збір інформації з зовнішніх джерел, що необхідно для прогнозування спожитої електроенергії мінімізації витрат на її закупівлю.

У другому розділі проведено аналіз необхідних для реалізації запропонованої ІС методів інтелектуальної обробки даних і методів автоматизації оперативного та короткострокового прогнозування електроспоживання тягових підстанцій, наведено

принципи їх дії. Висвітлено переваги та недоліки розглянутих методів обробки даних та прогнозування з огляду на застосування їх для інтелектуалізації системи постачання електроенергії на тягу залізниці, запропоновано області можливого застосування. Обґрунтовано вибір методів для подальшого дослідження.

Для завдань інтелектуалізації системи електропостачання залізничного транспорту можуть використовуватись фундаментальні підходи інтелектуального аналізу даних, серед яких виділено статистичні та графічні методи які доповнюють інші підходи опрацювання даних, експертні системи, дерева рішень та методи штучного інтелекту. Розкрито ідею гібридних методів.

У результаті аналізу існуючих методів прогнозування електроспоживання встановлено, що методи імітаційного моделювання з використанням технології штучних нейронних мереж (ШНМ) мають найвищу точність та ряд переваг над іншими методами для їхнього застосування в системі електропостачання залізниці. Зазначено особливості ШНМ, на які в подальшому дослідженні опирається реалізація нейронної мережі.

У третьому розділі дисертаційної роботи запропоновано диференційні математичні методи визначення повної інформативності зареєстрованих первинних даних динамічних процесів аномальних і аварійних режимів систем електропостачання, які реалізовано на основі теорії диференціальних перетворень Пухова:

$$I_0(k) = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k i(t)}{dt^k} \right]_{t=t_0} \equiv i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k I_0(k), \quad t_0 = 0, \quad (1)$$

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 $i(t)$; \equiv – символ, що характеризує відповідність між оригіналом $i(t)$ і його диференціальним Т-зображенням $I_j(k)$, ($k = 0, 1, 2, \dots$).

Для формування диференціальних математичних методів використано зворотне диференціальне перетворення та для кожного дискретного значення аргументу аномального параметру $t_0, t_1, t_2, \dots, t_m$ сформовано систему диференціальних рівнянь виду

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

Визначення сукупності диференційних спектрів у кожній точці t_1, t_2, \dots, t_m перехідного процесу, на основі виразів (1), (2) представлено у вигляді

$$A_j I_j'(k) = F_j, \tag{3}$$

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 $\tau_j = t_j - t_{j-1}$;

$F_j = \begin{bmatrix} i(t_{j+1}) - I_j(0) & i(t_{j+2}) - I_j(0) & \cdot & i(t_{j+n}) - I_j(0) \end{bmatrix}^t$ – вектор правих частин;

$I_j'(k) = \begin{bmatrix} I_j(0) & I_j(1) & I_j(2) & \cdot & I_j(n) \end{bmatrix}^t$ – вектор невідомих величин, компоненти якого представляють собою диференційний спектр в точці j .

Також розглянуто способи організації обчислювального процесу визначення гармонічних складових аварійного режиму енергосистеми на основі диференційних спектрів із застосуванням прямого перетворення Фур'є на кінцевому проміжку $(0, T)$

$$\dot{I}_\gamma = \frac{j^2 T}{T} \int_0^T e^{-j\gamma\omega t} \cdot i(t) dt; \quad i(t) = \frac{1}{j^2} \sum_{\gamma=-\infty}^{\gamma=+\infty} e^{j\gamma\omega t} \dot{I}_\gamma, \tag{4}$$

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 $i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H}\right)^k I(k)$, то підставивши $i(t)$ у вираз (4), отримано математичну залежність

$$\dot{I}_\gamma = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{I(k)}{H^k} \left(\frac{j^2 T}{T} \int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} dt \right). \quad (5)$$

Значення інтегралу в залежності (5) визначається наступним чином

$$\int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} dt = \frac{k!(-1)^k}{(-j\gamma\omega)^{k+1}} \left(1 - \sum_{m=0}^{m=k} \frac{(-j\gamma\omega T)^m}{m!} \right). \quad (6)$$

Підставивши значення інтегралу (6) у (5) та реалізувавши ряд перетворень, отримано математичну залежність формування з Т-спектру $I(k)$ значення \dot{I}_γ

$$\dot{I}_\gamma = \frac{1}{\pi\gamma} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{k!}{(j\gamma\omega H)^k} \left[\sum_{m=0}^{m=k} \left(\frac{T}{H}\right)^m \frac{(-j\gamma\omega H)^m}{m!} - 1 \right] I(k). \quad (7)$$

Таким чином, на основі математичного апарату диференційних перетворень, став можливим синтез математичних методів з інтелектуальними властивостями для формування нових знань про режими функціонування системи електропостачання.

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. Для оцінки ефективності переведення тягових підстанцій на диференційований тариф (ДТ) без зміни графіка руху поїздів можна застосовувати правило

$$\sum_{j=1}^i A_j \cdot W_j^*(t) \leq \sum_{j=1}^i W_j^*(t). \quad (8)$$

Для тризонного ДТ воно набуде виду

$$W_H^*(t) - A_H \cdot W_H^*(t) > A_{Hn} \cdot W_{Hn}^*(t) + A_n \cdot W_n^*(t) - W_{Hn}^*(t) - W_n^*(t) \quad (9)$$

У випадку справдження виразу (9), 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 буде кількісним показником зекономлених коштів за розрахунковий період.

У четвертому розділі проведено експериментальні дослідження розроблених у рамках ПС методів підвищення інтелектуалізації комп'ютерної системи моніторингу та керування. Зокрема, на прикладі реальних первинних даних, зареєстрованих інформаційно-діагностичним комплексом «РЕГІНА», що представляють аварійний режим, мережі електропостачання на тяговій підстанції Любинь Великий Південно-західної залізниці (рис. 5).

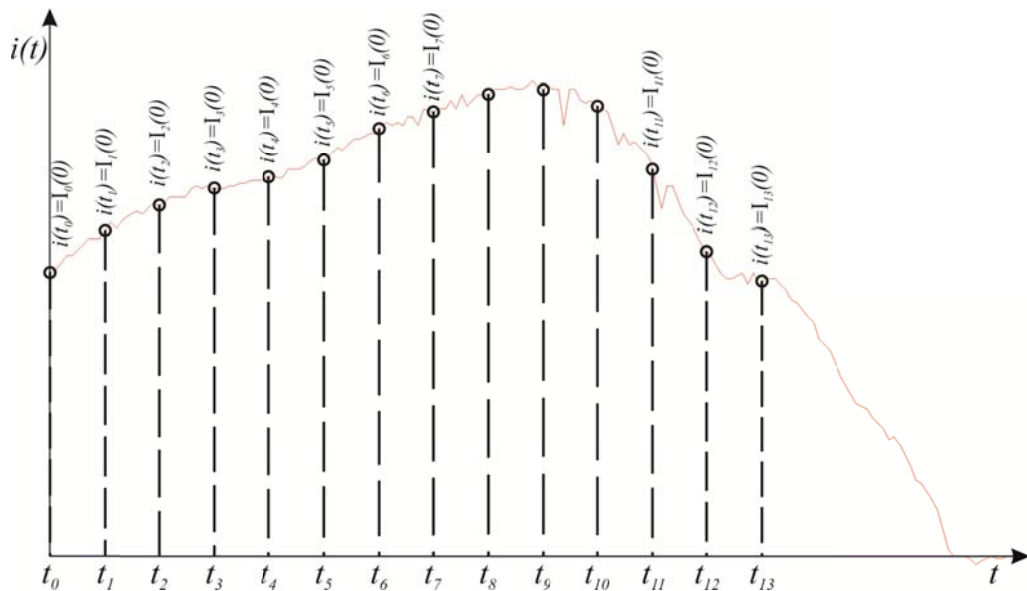


Рис. 5. Графік зміни струму після реєстрації аварійного режиму

На основі виразу (3) реалізовано рішення відповідної системи рівнянь методом оберненої матриці для кожної точки $t_0, t_1, t_2, \dots, t_j$ миттєвих значень параметру струму аварійного режиму й отримано сукупність диференціальних спектрів, представлених у вигляді функцій $I_j(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, в якості прикладу яких на рис. 6 наведено декілька графіків.

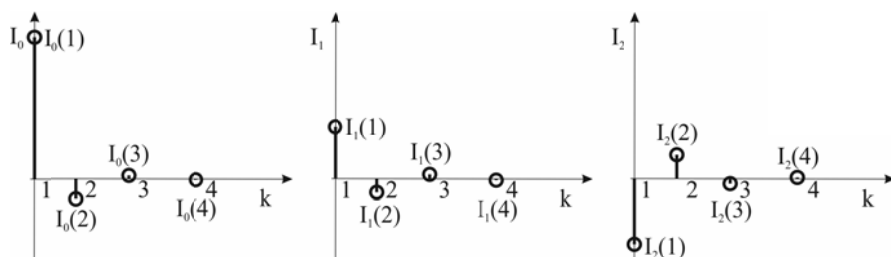


Рис. 6. Графіки функцій $I_j(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, 3, 4$

Наступним кроком проведено дослідження засобів, що забезпечують роботу підсистеми автоматизованого керування електроспоживання, запропонованої ПС.

Проведено комп'ютерне моделювання математичних методів вибору тарифу оплати за електроенергію на основі даних споживання однієї електрифікованої ділянки. У результаті якого виявлено, 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.

Як видно з рис. 7 програвш по вартості оплати за електроенергію згідно тризонного ДТ відбувається з 8 по 10 та з 17 по 21 години, тобто під час пікового періоду.

Тому на практиці часто застосування ДТ, як і у випадку прикладу, потребує зміни графіка руху поїздів.

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

Виходячи з цього запропоновано математичну модель опису тривалості руху потяга T через періоди дії зон диференційованого тарифу, під час яких він здійснює рух.

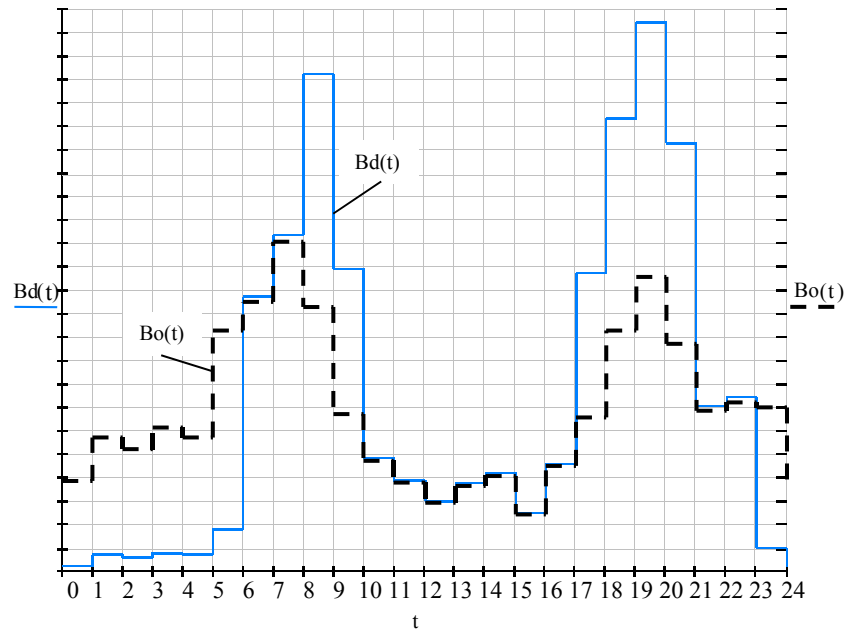


Рис. 7. Плата за спожитою електроенергією протягом доби за однозонним тарифом $Bo(t)$ і тризонним диференційованим тарифом $Bd(t)$

$$T = \alpha_1 \cdot T_H + \alpha_2 \cdot T_{Hn1} + \alpha_3 \cdot T_{n1} + \alpha_4 \cdot T_{Hn2} + \alpha_5 \cdot T_{n2} + \alpha_6 \cdot T_{Hn3}, \quad (10)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ – коефіцієнти, які означають на скільки час руху потяга співпадає з часом дії відповідної їм тарифної зони.

Опираючись на модель (10) та детально описані в дисертаційній роботі властивості коефіцієнтів α , розроблено продукційну модель, представлену у вигляді алгоритму зміни графіка руху потяга для економії коштів при оплаті електроенергії залізницею згідно з тризонним диференційованим тарифом.

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. 8).

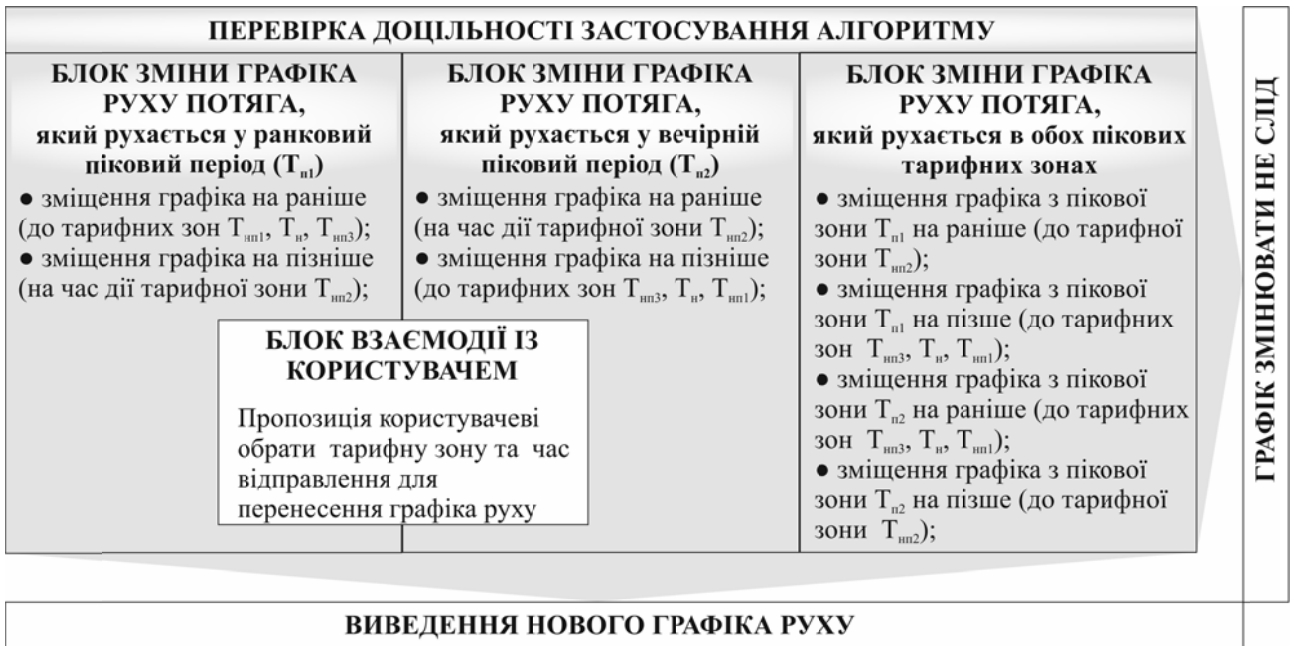


Рис. 8. Функціональна схема розробленого алгоритму

Розроблено 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. 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 $\left\lfloor \frac{\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum(\alpha' \cdot T')}{M} \right\rfloor - N_*$ потягів справедливим буде попереднє рішення, а для кожного потяга $p > \left\lfloor \frac{\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum(\alpha' \cdot T')}{M} \right\rfloor - N_*$ графік руху змінювати не потрібно.

На реальних даних споживання електроенергії режимної доби зняті з лічильників АСКОЕ тягової підстанції ЕЧЕ-8 та формалізованого графіку руху поїздів через станцію Фастів проведено експериментальні дослідження комплексу комп'ютерно-орієнтованих методів мінімізації плати за спожиту електроенергію.

На основі виразу (8) проведено дослідження ефективності однозонного та трizonного тарифів у даних умовах, в результаті якого однозонний тариф виявився вигіднішим за трьохзонний на 0,014%.

На графіку (рис. 9) наведено динаміку зміни плати за використану електроенергію відповідно однозонного та тризонного тарифів.

На основі розробленого алгоритму написано та оптимізовано програму й застосовано до вхідних даних експериментального дослідження. Результати роботи алгоритму підготовлено для прогнозування електроспоживання.

Серед алгоритмів прогнозування електроспоживання експериментальним шляхом обрано алгоритм Байєсівської регуляризації та внаслідок прогнозування з використанням штучної нейронної мережі, отримано значення електроспоживання в години, де відбулися зміни навантаження.

Повторне моделювання отриманих результатів показало, що внаслідок адаптації графіка руху тризонний ДТ став вигіднішим за однозонний на 4,606%, що приносить економію коштів при сплаті за електроенергію в розмірі 4,592%. Динаміка погодинної плати за спожиту електроенергію при цьому набере виду (рис. 10).

Рис. 11 дає змогу наочно порівняти динаміку плати за електроенергію при зміщеному навантаженні з тією, що була до оптимізації за тризонним ДТ для обох випадків.

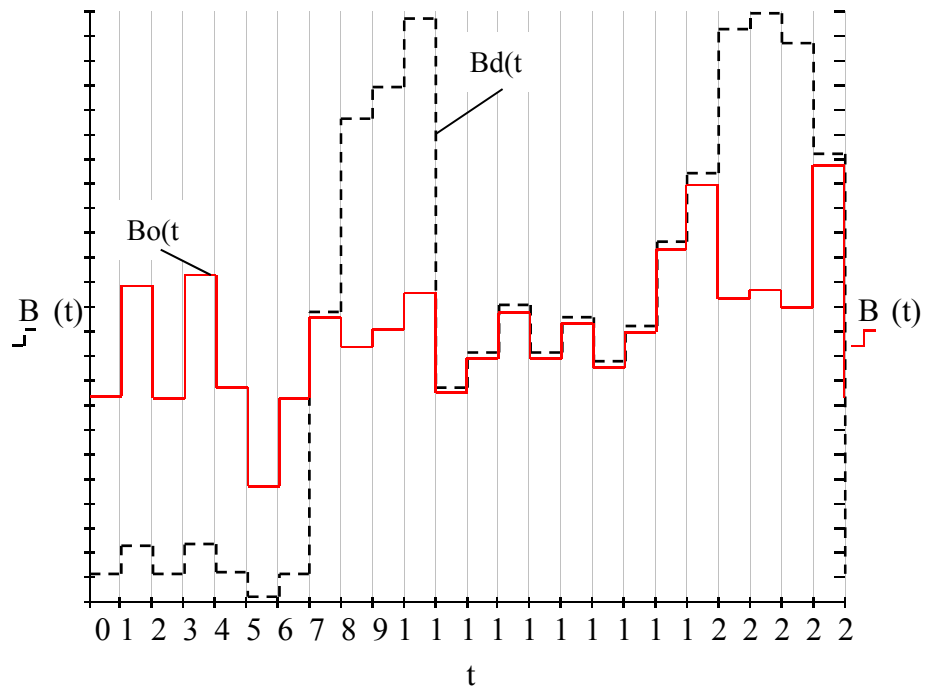


Рис. 9. Погодинна плата за використану електроенергію протягом доби за однозонним тарифом $B_o(t)$ і тризонним диференційованим тарифом $B_d(t)$

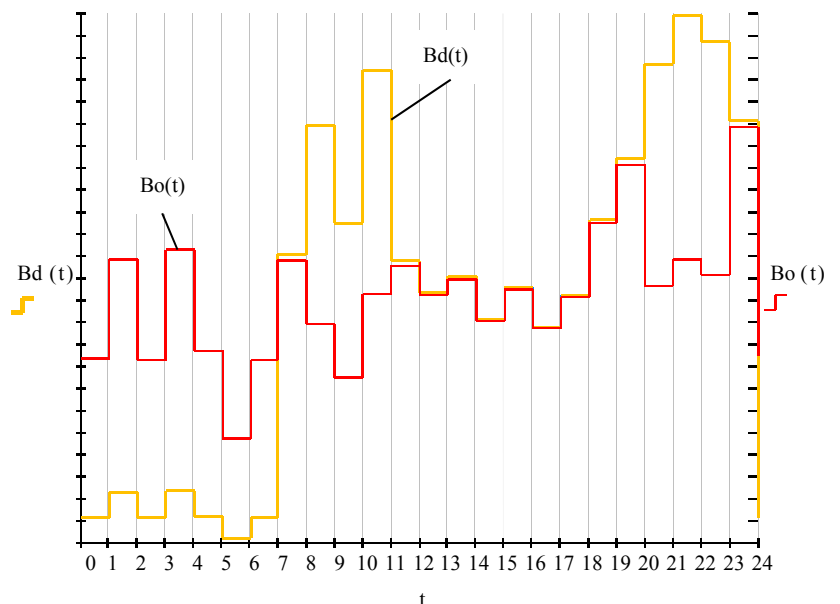


Рис. 10. Динаміка погодинної плати за спожиту електроенергію при адаптованому графіку руху

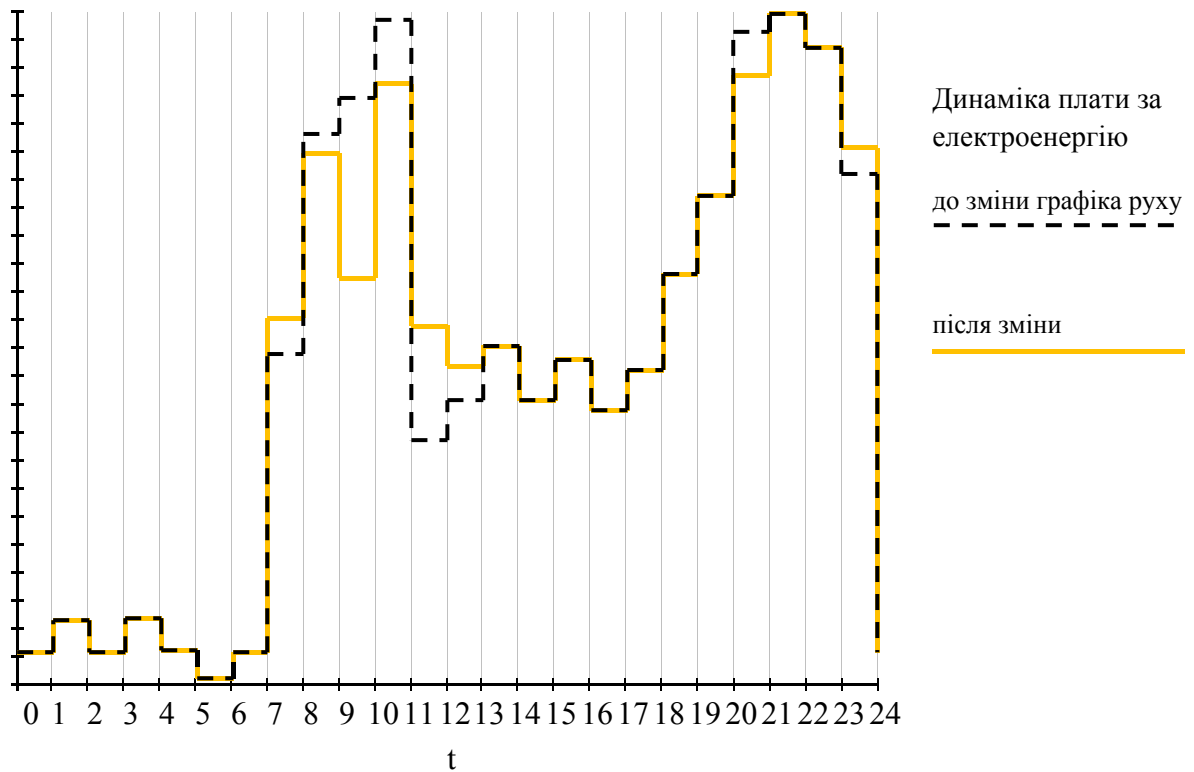


Рис. 11. Порівняння погодинної плати за спожиту електроенергію залізницею до та після оптимізації графіка руху поїздів

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновані нові рішення науково-прикладної задачі інтелектуалізації інформаційної системи 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 транзакцій 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 трizonного 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 трizonного 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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. 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.

7. Гайденко О. С. Методи прогнозування електроспоживання тяговими підстанціями залізниці / О. С. Гайденко // *Моделювання та інформаційні технології*. – 2015. – Вип. 75. – С. 49-56.

8. 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.

9. 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.

10. Гайденко О. С. Оптимізація графіка руху потяга для використання трizonного 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

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 // Проблемы экономики и управления 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.

АНОТАЦІЯ

Гайденко О.С. Комп'ютерно-орієнтовані засоби опрацювання первинних даних моніторингу та інтелектуалізації процесів електропостачання залізниці. – Рукопис.

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, Київ, 2019.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуального наукового завдання синтезу комп'ютерно-орієнтованих методів мінімізації плати за електроенергію залізницею та розробки засобів опрацювання первинних даних у рамках інтелектуалізованої інформаційної системи, яку запропоновано разом з архітектурою. Розроблено математичні методи підвищення інформативності даних та їх аналізу для визначення окремих гармонічних складових, а також математичні методи використання комерційних тарифів за електроенергію, математичну модель опису тривалості руху потяга через зони диференційованого тарифу, продукційну модель та методи для економії коштів за електроенергію шляхом автоматизованої зміни розкладу поїздів.

Ключові слова: опрацювання інформації, інтелектуалізація, формалізація, архітектура комп'ютерної системи, первинні дані.

АННОТАЦИЯ

Гайденко О. С. Компьютерно-ориентированные средства обработки первичных данных мониторинга и интеллектуализации процессов электроснабжения железной дороги. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – «Компьютерные системы и компоненты». – Государственный университет инфраструктуры и технологий, Киев, 2017

Диссертационная работа посвящена решению актуального научного задания синтеза компьютерно-ориентированных методов минимизации платы за потребленную электроэнергию по железной дороге и разработки средств обработки первичных данных в рамках интеллектуализированной информационной системы, построенной на принципах единого информационного пространства.

В диссертационной работе на основании проведенного анализа железнодорожного транспорта как объекта мониторинга и управления определены факторы, которые нужно учитывать при моделировании процессов, протекающих в системе тягового электроснабжения. На основе проведенных исследований предложена модель информационных потоков мониторинга электроэнергетической системы, интеллектуализированная информационная система управления электроснабжением железнодорожного транспорта и ее модифицированную архитектуру, согласно концепции Smart Grid и единого информационного пространства, ориентированные на сбор информации и рациональное использование пропускной способности каналов связи. Разработаны дифференциальные математические методы повышения информативности первичных данных мониторинга динамических процессов нештатных режимов функционирования электроснабжения железнодорожного транспорта как основу формирования новых знаний для оптимизации электропотребления и создания интеллектуальных энергосберегающих технологий. Разработаны методы анализа первичных данных для определения отдельных гармонических составляющих в области дифференциальных изображений. Проведен анализ методов прогнозирования и компьютерное моделирование нейросетевой модели прогноза электропотребления в программном пакете Neural Network Toolbox, что показало достаточные результаты для их использования. Разработано и исследовано компьютерно-ориентированные математические методы использования коммерческих тарифов оплаты электроэнергии на железнодорожном транспорте, которые позволяют оценить эффективность применения однозонного, двухзонного и трехзонного тарифов оплаты электроэнергии, рассчитывать затраты на закупку электроэнергии на тягу по периодам времени и предельные объемы потребления электроэнергии в заданных периодах, при которых переход на закупку электроэнергии по дифференцированному тарифу экономически выгоден. Разработано математическую модель для описания продолжительности движения поезда через периоды действия тарифных зон дифференцированного тарифа, при которых он осуществляет движение, на основе чего разработано продукционную модель и математические методы для экономии средств при оплате электроэнергии железной дорогой по трехзонному дифференцированному тарифу путем автоматизированного изменения расписания движения поездов.

Ключевые слова: обработка информации, интеллектуализация, формализация, архитектура компьютерной системы, первичные данные.

ANNOTATION

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

The dissertation on competition of a PhD scientific degree on the specialty 05.13.05 – «Computer systems and components». – State University Infrastructure and Technologies, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to actual scientific task of synthesis of computer-oriented methods of minimizing the payment for electricity by railroad and developing tools for processing the raw data within the intelligent information system, witch, with architecture are proposed. Differential mathematical methods for increasing the informativeness of data and analyzing them to determine individual harmonic components, and computer-based mathematical methods for using commercial electricity tariffs, the mathematical model for describing the duration of the train movement through the differentiated tariff zones and production model and mathematical methods to save money for electricity by automated change of the train timetable are developed.

Keywords: processing information, intellectualization, formalization, computer system architecture, raw data.