

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

На правах рукопису

КИРИЛЮК ТЕТЯНА ІГОРІВНА

УДК 621.332.3:621.3.017.4

**Удосконалення методу контролю втрат електроенергії
в контактній мережі електрифікованих залізниць**

Спеціальність 05.22.09 – Електротранспорт

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Кузнецов Валерій Геннадійович
доктор технічних наук, доцент

Дніпропетровськ - 2013

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	4
ВСТУП	5
Розділ 1 КОНТРОЛЬ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НА УКРЗАЛІЗНИЦІ	11
1.1 Нормування витрат паливно - енергетичних ресурсів	11
1.2 Інструментальні та методичні заходи контролю електроспоживання	20
1.3 Непрямі способи визначення втрат електроенергії в контактній мережі	26
Задачі дослідження	31
Розділ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ НЕПРЯМИМ СПОСОБОМ	33
2.1 Принципи визначення миттєвих та еквівалентних опорів для різних схем живлення контактної мережі	34
2.2 Підходи до визначення коефіцієнта втрат електроенергії з урахуванням зносу контактних проводів та кількості поїздів на міжпідстанційній зоні	45
2.3 Принципи визначення коефіцієнта втрат з врахуванням швидкості та струму електрорухомого складу, температури нагрівання контактного проводу	52
Висновки до розділу 2	57
Розділ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ	58
3.1 Визначення закономірностей зміни швидкості руху та аналіз кількості поїздів на міжпідстанційній зоні	58
3.2 Дослідження зносу контактних проводів, зміни температури навколишнього середовища та струму електрорухомого складу	63
3.3 Аналіз динаміки зміни «умовних» втрат електричної енергії в контактній мережі	69
Висновки до розділу 3	74

Розділ 4 МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВТРАТ НА ОСНОВІ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ	76
4.1 План повного факторного експерименту 2 ⁿ для ділянки постійного струму .	77
4.2 Ортогональний центрально - композиційний план другого порядку для ділянки постійного струму	86
4.3 Повний факторний експеримент для ділянки змінного струму	91
Висновки до розділу 4	96
Розділ 5 ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ОБЛІКУ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ.....	97
5.1 Регламент зміни коефіцієнта втрат	97
5.2 Схемна реалізація пристрою для вимірювання втрат електроенергії в контактній мережі	105
5.3 Результати вимірювань витрат та втрат електроенергії	110
Висновки до розділу 5	116
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	117
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	119
Додаток А	131
Додаток Б	132
Додаток В	136
Додаток Г	139
Додаток Д	140

Перелік умовних скорочень

АСКОЕ	Автоматизована система комерційного обліку електроенергії
ДПР	Два проводи рейка
ЕОМ	Електронна обчислювальна машина
ЕРС	Електрорухомий склад
ЕЧ	Дистанція електропостачання
ЕЧЕ	Тягова підстанція
ЗМВ	Запасний масляний вимикач
КП	Компенсуючий пристрій
ЛЧ	Лічильник
НКРЕ	Національна комісія по регулюванню електроенергії
ННЕ	Нормативний небаланс електроенергії
ОРЕ	Оптовий ринок електроенергії
ОЦКП	Ортогональний центрально-композиційний план
ПЕР	Паливно - енергетичні ресурси
ПСК	Пункт секціонування контактної мережі
ПФЕ	Повний факторний експеримент
СТЕ	Система тягового електропостачання
ТВП	Трансформатор власних потреб
ТН	Трансформатор напруги
ТНЕ	Технічно зрозумілий небаланс електроенергії
ТП	Тягова підстанція
ТС	Трансформатор струму
ФКМ	Фідер контактної мережі

ВСТУП

Актуальність теми. Залізничний транспорт – один з найбільших споживачів електроенергії в Україні. У 2011 р. загальне споживання електроенергії залізницями з урахуванням підприємств, що підпорядковані Укрзалізниці, склало 6 216,8 млн кВт·год, власне споживання – 6 167,1 млн кВт·год. Зокрема, на тягу поїздів було використано 5 249,5 млн кВт·год, експлуатаційно-виробниче споживання становило 870,8 млн кВт·год, комунально-побутове споживання – 46,7 млн кВт·год. Основна частка втрат електроенергії припадає на тягу поїздів, зокрема в 2011 р. середні втрати електроенергії в контактній мережі склали 10,84 %. Структура втрат електроенергії у відсотках від загального обсягу переробленої електроенергії в 2011 р. по залізницях становила: Донецька – 16 %, Придніпровська – 15,07 %, Південна – 11,44 %, Львівська – 17,26 %, Одеська – 5,06 %, Південно-Західна – 6,53 %.

Зменшення втрат електроенергії – державне завдання, що відповідає державній цільовій економічній програмі енергоефективності й розвитку сфери виробництва енергоресурсів з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2012 – 2015 роки.

Усі залізниці України купують електроенергію на оптовому ринку електроенергії (ОРЕ). Купівля електричної енергії безпосередньо на ОРЕ для задоволення власних потреб і потреб сторонніх споживачів – стратегічний напрямок їх діяльності, який підтверджується як досвідом роботи залізниць на ОРЕ, так і концепцією розвитку ОРЕ, що схвалена Кабінетом Міністрів України. Умови роботи з ОРЕ потребують постійного аналізу рівня втрат у контактній мережі.

На сьогодні втрати електричної енергії в контактній мережі визначаються шляхом розрахунку відповідно до «Інструкції по розрахунку технологічних втрат електроенергії в пристроях тягового електропостачання», затвердженої наказом Укрзалізниці від 29. 08. 2003 р. № 342-ЦЗ. Але цей спосіб дає досить

наближені значення. Підвищити точність та ефективність контролю за втратами можна за допомогою непрямого методу.

Цей метод має середню похибку 7,5 %, яку можна зменшити, якщо враховувати низку факторів, що впливають на втрати електроенергії в контактній мережі, а саме: схему живлення ділянки, знос контактних проводів, кількість поїздів на розрахунковій зоні, температуру навколишнього середовища, швидкість руху, значення споживаного струму електровоза.

Тому дисертаційна робота, яка присвячена вирішенню задачі удосконалення методу визначення втрат електроенергії в контактній мережі, є актуальною для електрифікованого залізничного транспорту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.
Дисертаційна робота виконана за завданнями Укрзалізниці відповідно до державних програм і науково-дослідних робіт:

- Державна цільова економічна програма енергоефективності й розвитку сфери виробництва енергоресурсів з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2012 – 2015 роки;

- Постанова Кабінету Міністрів України від 23. 04. 1999 р. № 661 «Про заходи державної підтримки залізничного транспорту»;

- «Розробка наукових основ раціональних режимів системи тягового електропостачання» (№ ДР 0110U000897);

- «Оптимізація витрат Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів з розробкою рекомендацій» (№ ДР 0111U003607);

- «Дослідження наднормативних небалансів обліку електричної енергії на тягових підстанціях Донецької залізниці і розробка рекомендацій по їх приведенню до нормативних вимог» для тягової підстанції Штерівка» (№ ДР 0111U003606).

Автор брала участь у виконанні вказаних науково-дослідних робіт як виконавець.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення методу визначення втрат електроенергії в контактній мережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі *завдання*:

1. Проаналізувати непрямі способи визначення втрат електроенергії в контактній мережі.
2. Виділити фактори, що впливають на коефіцієнт втрат, та скласти їх математичні моделі.
3. Отримати закони розподілу впливаючих факторів та визначити межі їх зміни.
4. Записати аналітичні вирази для визначення коефіцієнта втрат для ділянок постійного та змінного струмів на основі повного факторного експерименту.
5. Встановити закон розподілу та межі зміни коефіцієнта втрат. Надати рекомендації щодо регламенту його зміни.
6. Експериментально підтвердити отримані теоретичні результати.

Об'єкт дослідження – процеси споживання електричної енергії в тяговій мережі електрифікованих залізниць.

Предмет дослідження – втрати електричної енергії в контактній мережі.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення дисертації отримані за допомогою інтегрального та матричного числення (при розробці математичної моделі для визначення коефіцієнта втрат у загальному вигляді), математичної статистики та теорії ймовірностей (при дослідженні зміни кількості поїздів, швидкості руху поїздів, зносу контактних проводів, зміни температури проводу та струму, що споживає електровоз), теорії планування експерименту (при розробці регресійних залежностей для визначення коефіцієнта втрат) та статистичного моделювання (при визначенні характеру зміни коефіцієнта втрат).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються. Основні наукові положення, висновки і рекомендації, які містяться в дисертації, достатньо обґрунтовані та вірогідні, оскільки:

- експериментальні дослідження коректно поставлено та кваліфіковано виконано, а розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує загальноприйнятих значень;
- дослідні результати одержано на основі великого обсягу реального матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики;
- значну частину експериментальних даних одержано різними незалежними методами.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше отримано аналітичну залежність для визначення коефіцієнта втрат електроенергії, що враховує кількість поїздів на міжпідстанційній зоні, тобто зміну реальної поїзної ситуації, і тому дозволяє більш точно визначати втрати електроенергії в контактній мережі.

2. Вперше встановлено закон статистичного розподілу коефіцієнта втрат, що дає можливість оцінити його межі та надати рекомендації щодо регламенту його зміни.

3. Набув подальшого розвитку непрямий метод визначення втрат електроенергії в частині врахування додаткових факторів, а також отримані рівняння регресії для визначення коефіцієнта втрат для ділянок постійного та змінного струмів, що дозволяє підвищити точність визначення втрат.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропоновано вдосконалений непрямий метод обліку втрат електроенергії в контактній мережі, який підвищує точність визначення величини втрат на 6,9 % порівняно з розрахунком за діючою методикою.

2. Розроблено методику визначення коефіцієнта втрат, яка враховує додаткові фактори. Це дає можливість підвищити точність обліку втрат на 2,1 % порівняно з існуючим непрямим методом.

3. Запропоновано для ділянки постійного струму (Придніпровської залізниці) налаштовувати лічильник за середнім значенням коефіцієнта втрат (1,03), а для ділянки змінного струму (Одеської залізниці) змінювати коефіцієнт втрат кожні 4 години.

4. Розроблено пристрій, який у поєднанні з портативними аналізаторами потужності дозволяє вимірювати втрати потужності в контактній мережі за відсутності лічильників втрат.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, викладені в дисертаційній роботі, отримано дисертантом самостійно. У роботах, які написані в співавторстві, автору належать: [1] – розрахунок економії коштів при різних варіантах закупівлі електроенергії; [2] – розрахунок та аналіз допустимих та фактичних небалансів дослідної тягової підстанції; [3] – аналіз результатів експериментально визначених умовних втрат у тяговій мережі; [4] – запропоновано миттєве та еквівалентне значення опору та принципи розподілу втрат потужності між фідерами тягової підстанції; [5] – отримана залежність коефіцієнта втрат від кількості поїздів на міжпідстанційній зоні; [8] – аналіз досвіду використання електронних лічильників втрат; [9] – планування витрати електроенергії з урахуванням впливаючих факторів; [10] – аналіз причин виникнення небалансів на Львівській залізниці; [11] – запропоновано шляхи вирішення проблеми небалансів електроенергії; [12] – показано переваги перевodu тяги поїздів на вищий рівень напруги; [14] – аналіз використання непрямих методів; [15] – визначено значення миттєвих та еквівалентних опорів для різних схем живлення; [16] – вираз для визначення коефіцієнта втрат в загальному вигляді.

Роботи [6, 7, 13] написані та опубліковані без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювались на 4, 5, 6 - й Міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація залізничного транспорту Транселектро», м. Місхор, 2010 – 2012 рр.; 3, 4 - й Міжнародній науково-практичній конференції «Електромагнітна сумісність і безпека на залізничному транспорті», м. Дніпропетровськ, 2010 – 2011 рр.; 1, 2, 3 - й Міжнародній науково-практичній конференції «Енергозбереження на залізничному

транспорті», Жденієво, 2010 – 2012 рр.; 72-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2012 р.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 16 наукових працях, з них: 6 – у фахових виданнях, 1 – у науковому журналі, 9 – у тезах доповідей та в матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, що викладено на 118 сторінках машинописного тексту і які містять 57 рисунків і 31 таблицю, переліку літературних джерел із 115 найменувань на 12 сторінках, 5 додатків на 15 сторінках. Повний обсяг дисертації складає 145 сторінок.

РОЗДІЛ 1

КОНТРОЛЬ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НА УКРЗАЛІЗНИЦІ

Контроль електроспоживання на Укрзалізниці здійснюється за допомогою нормування витрат паливно - енергетичних ресурсів (ПЕР), інструментальних засобів та методичних заходів (рис. 1.1).

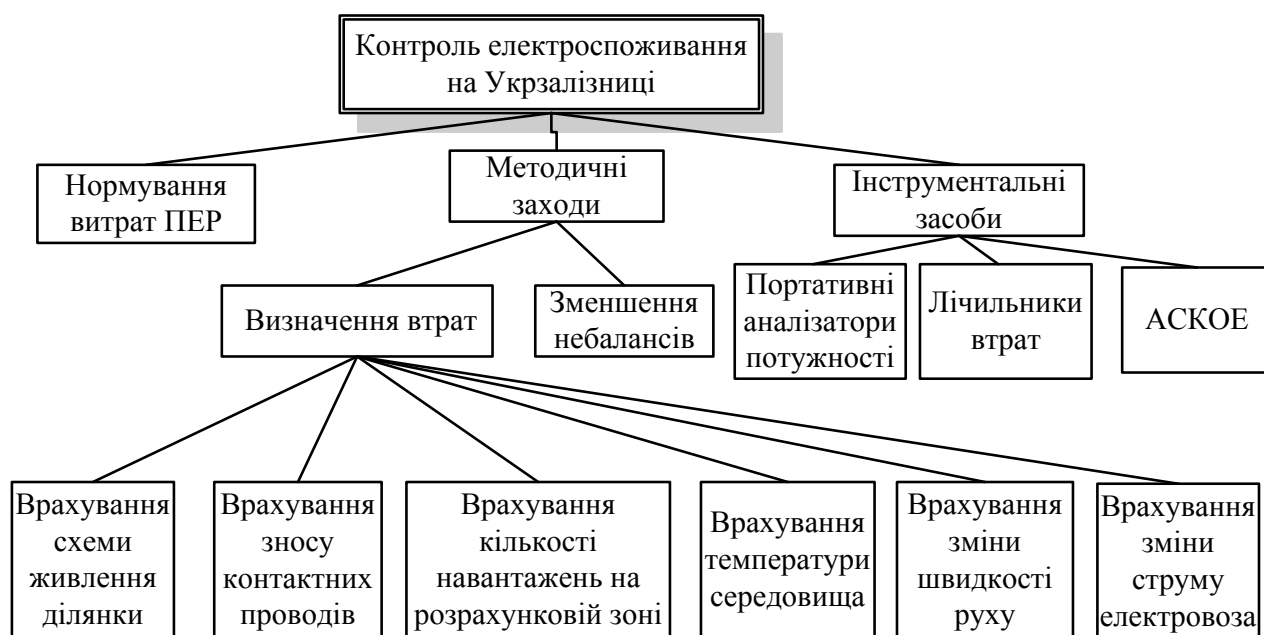


Рисунок 1.1 – Структурна схема задачі контролю енергоспоживання на Укрзалізниці

1.1. Нормування витрат паливно - енергетичних ресурсів

Нормування питомих витрат енергоресурсів у суспільному виробництві України здійснюється з метою раціонального використання та економії енергоресурсів і є основою для застосування економічних санкцій за їх нераціональне використання та запровадження економічних механізмів стимулювання енергозбереження [17].

Нормування питомих витрат ПЕР здійснюється відповідно до Закону України «Про енергозбереження» [18], постанови Кабінету Міністрів України від 15 липня 1997 р. № 786 «Про порядок нормування питомих витрат паливно - енергетичних ресурсів у суспільному виробництві» [17] та [19].

В області нормування енерговитрат варто відмітити роботи [20-39].

Теоретичні основи та методи встановлення норм питомих витрат електроенергії були розроблені ще у 30 – 40 рр. минулого сторіччя. Одними з перших праць в цій галузі були дослідження В. І. Вейца, який вперше встановив наявність взаємозв'язку між енергоспоживанням та технологічними параметрами, вивчив форму цього зв'язку і представив у вигляді енергетичних характеристик агрегатів і виробничо - господарських об'єктів в цілому [39].

Подальший розвиток теорія та практика нормування споживання електричної енергії в промисловості отримала завдяки працям А. А. Тайца [40, 41] та В. І. Гофмана [25, 42], якого вважають засновником системи нормування питомих витрат ПЕР, що діяла в СРСР. В. І. Гофман сформулював основні елементи даної системи, зокрема, класифікацію норм, структуру різних їх видів, об'єкти нормування, одиниці вимірювання обсягів виробництва, що використовуються при нормуванні тощо. У працях [25, 42] визначені різні типи енергетичних характеристик агрегатів, запропонована методологія нормування питомих витрат електричної енергії, яка базується на побудові та нормалізації енергетичних балансів та енергетичних характеристик технологічних і виробничо - господарських об'єктів.

Вищезгадані вчені розглядали процеси електроспоживання з детермінованої точки зору, що безсумнівно було недоліком запропонованих методів нормування, так як процес електроспоживання носить складний динамічний характер. Зазначена обставина змусила почати розглядати електроспоживання як випадковий процес, що вимагало ймовірнісного підходу до нормування питомих витрат електроенергії.

Енергетичні характеристики як багатовимірні статистичні залежності вперше розглянув Авілов - Карнаухов. Він розробив методику нормування питомих витрат електроенергії, що базується на використанні методів математичної статистики та теорії ймовірностей [21, 43].

Багато відомих вчених присвятили свої праці обґрунтуванню необхідності застосування і розробці основ ймовірнісно - статистичного підходу до нормування електроспоживання. Серед них Б. А. Константинов [44],

П. П. Ястребов [38], С. Д. Волобринский [45]. В своїх роботах вони надавали перевагу використанню розрахунково - аналітичного, або експериментального методу, усуваючи їх недоліки за допомогою застосування різних статистичних методів, таких як методів кореляційного, регресійного і дисперсійного аналізу.

Згодом з'являється велика кількість публікацій інших авторів про нормування питомих витрат електроенергії на основі ймовірнісного підходу до аналізу процесів електроспоживання, а саме, за допомогою побудови багатofакторних регресійних моделей, класифікації і групування виробничо - господарських об'єктів за багатьма ознаками та ін. [36-47].

Але не зважаючи на нагальну необхідність та перспективність ймовірнісно - статистичного підходу радянська система нормування витрат паливно - енергетичних ресурсів базувалася на використанні розрахунково - аналітичного та експериментального методів. Розрахунково - статистичний метод застосовувався як виключення, коли з тих чи інших причин використання інших методів було неможливим [48].

Система нормування питомих витрат паливно - енергетичних ресурсів, яка використовувалась в СРСР, мала суттєві недоліки, які не дозволяли вважати її досконалою для оцінки та контролю ефективності енергоспоживання [20, 33, 48-50]. Один із основних недоліків – побудова на командно - адміністративних принципах.

У 60 рр. минулого сторіччя нормуванню споживання енергетичних ресурсів приділялась неабияка увага. У 1960 р. створюється науково - дослідний інститут планування та нормативів по практичній розробці організаційно - методичних документів та нормативної бази планування витрат матеріальних та паливно - енергетичних ресурсів у господарстві. Ведеться активна робота у цьому напрямку. З'являються нові наукові положення та праці. А. Х. Сальников та Л. А. Шевченко у [35] узагальнили діючі в країні показники для планування економії та методи їх визначення, організацію нормування та статистичну звітність про використання паливно - енергетичних

ресурсів, а також вперше розкрили питання комплексного нормування енергетичних витрат.

Наприкінці 80 - х років радянська система нормування питомих витрат паливно - енергетичних ресурсів в Україні перестала існувати, а вже в 1996 р. була відновлена у спрощеному вигляді [48]. Порівнюючи досвід нормування питомих витрат палива та енергії, яке здійснювалось в СРСР та результати нормування енергоспоживання, одержаних протягом останніх років в Україні, можна стверджувати, що діюча система нормування енергоресурсів є ще більш недосконалою, навіть у порівнянні з радянською [51, 52].

Основні недоліки діючої системи нормування:

- нормування питомих витрат електроенергії базується на побудові фактичних енергобалансів (відсутній процес нормалізації);
- побудова фактичних енергобалансів здійснюється в умовах невизначеності вихідних даних;
- відсутня чітка та об'єктивна процедура контролю та аналізу виконання встановлених норм.

Результати побудови енергобалансу намагаються максимально наблизити до фактичного середнього річного обсягу споживання електроенергії. Такий енергобаланс характеризує не прогресивний, а реально досягнутий на підприємстві рівень ефективності використання енергії з усіма існуючими їх понаднормативними втратами та нераціональним споживанням. На підставі таких фактичних енергобалансів за діючими методиками встановлюються норми питомих витрат електричної енергії, хоч за визначенням вони мають відображати мінімально необхідні витрати енергії на одиницю продукції у конкретних, прогресивних умовах виробництва [48].

На залізничному транспорті необхідна така система нормування, яка б не тільки враховувала споживання електроенергії, а ще мала б стимулюючий характер. Така система нормування включає в себе три складові: розрахунок норми, облік фактичної витрати енергії та стимулювання. Перша складова, визначає вибір методу, за допомогою якого розраховується дана норма.

Залежно від використовуваного методу можна оцінити точність розрахунку норми і визначити похибку, яку дає обраний спосіб. Облік фактичної витрати електроенергії дозволяє визначити як безпосередні витрати енергії, тобто досконалу корисну роботу, так і рівень вдосконалення технічної оснащеності.

Основним якісним показником всієї системи планування споживання та економії енергоресурсів на залізничному транспорті є норма – планова міра витрати енергії на виконання одиниці транспортної роботи, тобто на $10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$ брутто [53]. Система норм повинна періодично переглядатися залежно від змін умов експлуатаційної роботи, останніх досягнень науково - технічного прогресу. Визначаючи норми необхідно враховувати, що їх виконання є матеріально стимулюючим чинником у боротьбі за економію енергетичних ресурсів, мобілізацію внутрішніх резервів на залізничному транспорті.

Визначення норм для тягових споживачів здійснюється наступними методами (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Методи визначення норм витрат електроенергії для тягових споживачів

В основу методу корегуючих коефіцієнтів покладено дані тягово - енергетичних паспортів локомотивів, а також загальні формули і положення тягових розрахунків. Норма витрати електроенергії на поїзну роботу є сумою витрат: на роботу по переміщенню поїзда, на пов'язані із зупинками втрати

кінетичної енергії поїзда, і витрат на розгін рухомого складу, а також на роботу двигуна і допоміжних машин електровоза на холостому ході.

В [54] запропоновано визначати норму витрати електроенергії на поїзд, кВт · год/10⁴ т · км. за формулою

$$e = e_0 \cdot k_{\text{сп}} \cdot k_{\mu} \cdot k_i \cdot k_{\tau} + z'(\Delta e_{\text{т}} + \Delta e_{\text{р}}) + e_{\text{сл}}(k_{\text{в}} + Q_{\text{с}} \cdot k_{\text{в}}'), \quad (1.1)$$

де e_0 – вихідні норми витрати електроенергії, які визначаються для

руху на площадці складу, що складається з чотиривісних вагонів;

$k_{\text{сп}}$ – коефіцієнт, що враховує зміну опору рухомого складу залежно від типу вагонів;

k_{μ} – коефіцієнт впливу ступеню використання вантажопідйомності вагонів (в даному випадку відношення фактичного статичного навантаження на вісь до базової величини 17,5 т);

k_i – коефіцієнт складності подолання нормованої ділянки;

k_{τ} – температурний коефіцієнт нормованого періоду;

z' – число зупинок, передбачених графіком руху поїздів на 100 поїздо/км;

$\Delta e_{\text{т}}$ – витрати електроенергії на відновлення кінетичної енергії, втраченої при гальмуванні, віднесені до 10 тис. т · км брутто;

$\Delta e_{\text{р}}$ – втрата електроенергії для електровозів постійного струму в реостатах при рушанні і розгоні, віднесена до роботи 10 тис. т · км брутто;

$e_{\text{сл}}$ – витрати електроенергії на допоміжні машини локомотива, віднесені до 10 тис. т · км брутто;

$k_{\text{в}}, k_{\text{в}}'$ – відповідно коефіцієнти використання потужності допоміжних машин електровоза в ході і на стоянках, одержуваних як частка номінальної потужності, фактично використовуваної для обслуговування локомотивів;

$Q_{\text{с}}$ – коефіцієнт часу стоянки, як відношення часу стоянок до загального часу за поїздку.

За методикою ВНИИЖТа [55] норма витрати електроенергії визначається за формулою:

$$e = e_0 \cdot k_Q \cdot k_V \cdot k_R \cdot \dots \cdot k_I, \quad (1.2)$$

де e_0 – базова (вихідна) витрата електроенергії;

k_Q , k_V , k_R – коефіцієнти впливу, відповідних зміні маси складу, швидкості, наявності вагонних букс на роликівих підшипниках і т. ін.;

k_I – коефіцієнт впливу фактора, що враховується першим.

При використанні формули (1.2) найбільш важливим є об'єктивний вибір коефіцієнтів впливу k_I . Для визначення коефіцієнтів використовують різноманітні методи, зокрема розкладання функції енерговитрат в ряд Тейлора. Коефіцієнти впливу повинні періодично переглядатися з метою наближення норм до фактично реалізованих.

Балансовий метод заснований на послідовному розрахунку складових витрат електроенергії на рух даного поїзда [56]. Загальна кількість енергії, що споживається поїздом може бути представлена у вигляді суми (1.3):

$$W = W_{nn} + W_{WO} + W_{kp,i} + W_{nT} + W_T + W_{TD} + W_{CH}, \quad (1.3)$$

де W_{nn} – витрата енергії за час пуску, кВт · год;

W_{WO} , $W_{kp,i}$ – витрата енергії на подолання відповідно основного опору руху поїзда, а також опору руху поїзда в кривих і на ухилах кВт · год;

W_{nT} , W_T – витрата енергії відповідно при пригальмовуванні та гальмуванні поїзда кВт · год;

W_{TD} – витрата енергії на покриття її втрат в тягових двигунах ЕРС за час руху поїзда кВт · год;

W_{CH} – витрата енергії на власні потреби ЕРС, включаючи живлення кіл управління, вентиляцію обладнання та кабін машиністів, опалення та освітлення кВт · год.

Графічний метод ґрунтується на використанні двох графічних залежностей, а саме $I_e(V)$, та $V(S)$. $I_e(V)$ – струм електрорухомого складу в функції швидкості руху поїзда. $V(S)$ – швидкість руху поїзда у функції пройденого шляху. Цей метод передбачає встановлення графічного масштабу енергії m_A , мм/(Вт·год.) (1.4), і побудову залежності $W(S)$ зміни витрат електроенергії у функції шляху [48]

$$m_A = \frac{m_I \times m_S}{m_V \times U_{\text{км}}} , \quad (1.4)$$

де m_I , m_S , m_V – масштаби відповідно струму електровоза, мм/А, шляху, мм/км і швидкості руху поїзда, мм/(км/год), прийняті при виконанні тягового розрахунку;

$U_{\text{км}}$ – номінальна напруга в контактній мережі, кВ.

При графічному методі витрата енергії визначається тільки на переміщення поїзда, тому необхідно додати до знайденої витрати енергії втрати в тягових двигунах, втрати енергії під час пуску, витрати на власні потреби електровоза за винятком енергії рекуперації, яка повертається в контактну мережу.

Чисельний метод виконання тягового розрахунку на ЕОМ полягає в чисельному інтегруванні рівняння руху поїзда одним з наближених методів. Висока продуктивність ЕОМ дає змогу економити час при обчисленнях, тому при використанні ЕОМ передбачають у розрахунковій програмі виконання тягового розрахунку в повному обсязі.

В області нормування витрат електроенергії для нетягових споживачів залізничного транспорту відомі роботи Кузнецова В. Г [57-62]. Основним методом розробки норм питомої витрати електричної енергії є розрахунково - аналітичний метод. Він передбачає визначення норм витрати електричної енергії розрахунковим методом за статтями витрати на основі прогресивних показників використання цих ресурсів у виробництві.

На даний момент на залізницях України норми витрат електроенергії для нетягових споживачів розраховуються за методикою ЦЕ - 0015 [63]. В основу «Методичних вказівок щодо визначення норм витрати електроенергії для стаціонарних споживачів залізниці» покладені єдині для всіх залізниць України науково обгрунтовані вихідні величини і поправочні коефіцієнти, які враховують місцеві умови роботи об'єктів залізниць. Основним показником обсягу роботи (послуги), щодо якого визначається норма питомої витрати, є одиниця перевізної роботи (10000 т. км брутто).

Наприклад, норма питомої витрати енергії для стаціонарних споживачів на основну роботу всіх залізниць, кВт год/10⁴ т. км брутто [63].

$$\omega_c = k_{mc} k_{cc} \left(37,261 - 3,515 \cdot 10^{-7} n_{cp} \right) = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} W_{di}}{n_{cp}}, \quad (1.5)$$

де k_{mc} – коефіцієнт, який враховує вплив технічної оснащеності залізниць на питому витрату електроенергії;

k_{cc} – коефіцієнт сезонності;

n_{cp} – річний обсяг основної роботи залізниць, 10⁴ т. км брутто;

W_{di} – витрата електроенергії за нормою для стаціонарних споживачів на основну роботу i -ої залізниці, кВт год/рік.

В [63] при визначенні норм витрати електроенергії запропоновані регресійні залежності, що враховують сезонність, нерівномірність завантаження, електрооснащеність праці та ін.

Аналіз залежності витрати електроенергії на тягу поїздів і на нетягові потреби від об'єму тонно - кілометрової роботи показав, що витрата електроенергії тяговими споживачами в значній мірі залежить від тонно - кілометрової роботи, але при цьому її вплив на споживання електроенергії нетяговими споживачами для деяких служб є несуттєвим. В межах окремих структурних підрозділів спостерігається відсутність значимої залежності між

витратами електроенергії на нетягові потреби і об'ємом тонно - кілометрової роботи.

Тому існуюча в теперішній час практика віднесення витрати електроенергії на нетягові потреби структурних підрозділів залізниць по видах діяльності з нормуванням об'єму електроспоживання на одиницю перевізної роботи не дозволяє здійснювати ефективний контроль і аналіз витрати електроенергії нетяговими споживачами.

Використання існуючих методик розрахунку питомих норм витрати електроенергії на випуск одиниці продукції по господарствах залізниць не дозволяє ефективно планувати роботу. Це пояснюється відмінностями в організації ремонтно - експлуатаційної діяльності структурних підрозділів господарств різних залізниць, викликаними різною мірою впровадження сучасних технічних систем, нестандартного устаткування і пов'язаними з цим змінами в технологічних процесах, що не може бути враховане при розрахунках по існуючих методиках визначення питомих норм, розроблених до початку впровадження вказаного устаткування. Тому дана система вимагає вдосконалень, які враховуватимуть вплив різних чинників і їх частковий внесок в зміну кількості споживаної електроенергії.

1.2 Інструментальні та методичні заходи контролю електроспоживання

До інструментальних заходів відносяться портативні аналізатори потужності, лічильники втрат та автоматизована система комерційного обліку електроенергії.

У Ростовському інституті інженерів залізничного транспорту на базі електронного лічильника електроенергії Ф 440 був розроблений лічильник втрат електроенергії Ф 440П змінного струму рис. 1.3 [64]. Метод виміру втрат енергії заснований на реєстрації величини ампер - квадрат - годин на фідерах тягових підстанцій.

Лічильник втрат енергії, встановлений на живлячому фідері, показує величину втрат в залежності від: ампер - квадрат - годин, які вимірюються лічильником в одиницю часу; розрахункового коефіцієнта втрат, постійного для конкретного фідера, що фізично представляє собою опір тягової мережі на плечі прикладання еквівалентного навантаження; періоду виміру втрат енергії; квадрату фактичного коефіцієнту трансформації трансформатору струму фідера підстанції.

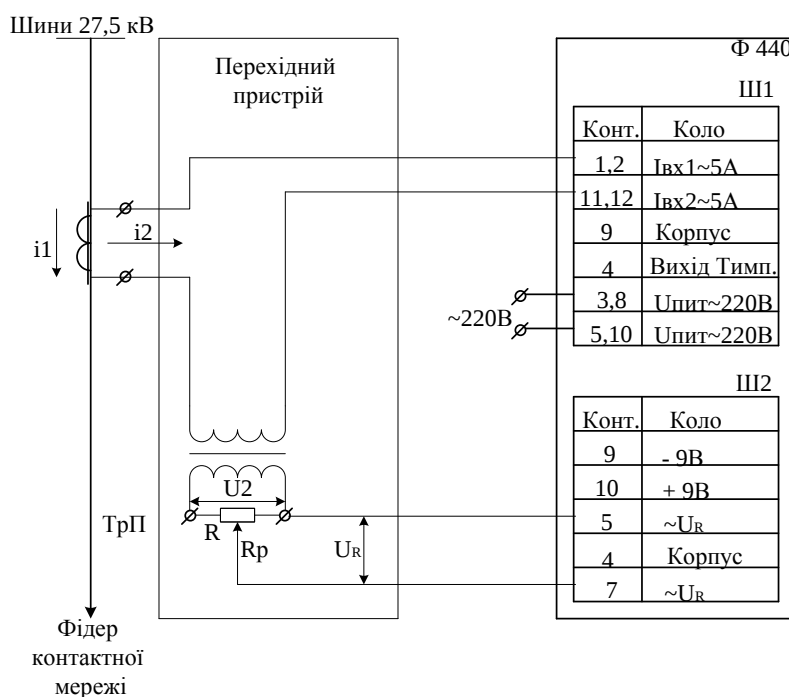


Рисунок 1.3 – Схема лічильника втрат енергії Ф 440П

До лічильника вводиться коефіцієнт втрат, який враховується в передаточній функції перехідного пристрою, і лічильник показує одразу втрати електроенергії. В [65] була розроблена методика визначення цього коефіцієнту.

Лічильник втрат Ф 440П може враховувати втрати в мережах при зміні навантаження до 200 % від номінального. Його похибка в діапазоні зміни навантажень не перевищує 2 % [66].

На основі лічильника кіловат - годин постійного струму типу СКВТ Ф 607, що випускається серійно був створений електронний лічильник ампер - квадрат - годин СКВТ Ф 607П (рис. 1.4). Для виміру середньоквадратичного значення струму, що контролюється, в електричну

схему лічильника СКВТ Ф 607 внесено ряд змін: видалено вузол заборони самоходу, відкориговані режими транзитів та мікросхем, модернізовано блок живлення в частині підвищення ізоляційної міцності.

Подібний лічильник втрат електроенергії можна реалізувати і на сучасній елементній базі, сполучаючи комерційний облік електроенергії з розрахунком втрат на базі єдиного пристрою, наприклад, лічильника Альфа Плюс (А2) та спеціалізованого програмного пакету AlphaPlus_LS. Остання розробка компанії Ельстер Метроніка – мікропроцесорний лічильник електроенергії Альфа А1800 з функцією обліку втрат (в модифікації лічильника присутня літера V) та спеціалізований програмний пакет Metercat (AlphaPlus W2.1) [67].

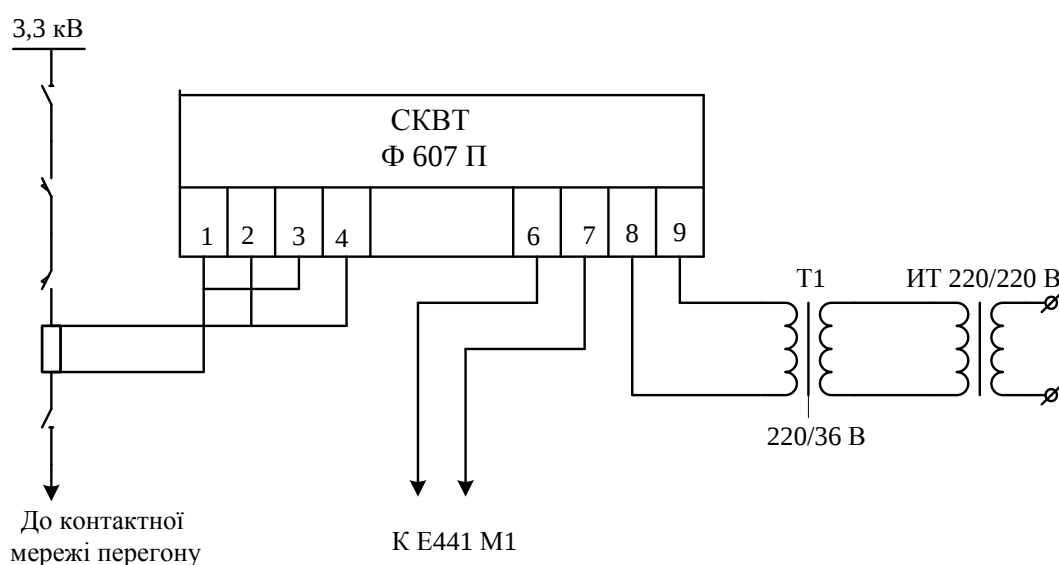


Рисунок 1.4 – Схема підключення лічильника втрат постійного струму типу СКВТ – Ф 607П

До методичних заходів відносяться зменшення небалансів та визначення втрат електроенергії.

Небаланси виникають внаслідок неточної фіксації приладами складових балансу, а також наявністю витрат, які не фіксуються приладами: технічних втрат на об'єкті, значення яких визначається розрахунковим шляхом, та комерційних втрат, які виникають внаслідок стороннього впливу [68].

Питанню визначення причин небалансів та зменшенню рівня наднормативних небалансів присвячено ряд праць [69-71].

У [72] в якості допустимих небалансів розглядаються два поняття: технічно зрозумілий небаланс електроенергії (ТНЕ), відповідний реальним умовам роботи приладів обліку, і нормативний небаланс електроенергії (ННЕ), відповідний «ідеальним» параметрами і режимам роботи вимірювальних пристроїв.

З метою визначення небалансів електроенергії, здійснення об'єктивної оцінки та прогнозування втрат на об'єктах електропостачання, на кожній тяговій підстанції, згідно з інструкцією [72], щомісячно заповнюється зведена відомість про надходження, переробку та відпуск електроенергії.

У [73] були обчислені небаланси електроенергії з травня 2010 р. по березень 2011 р.

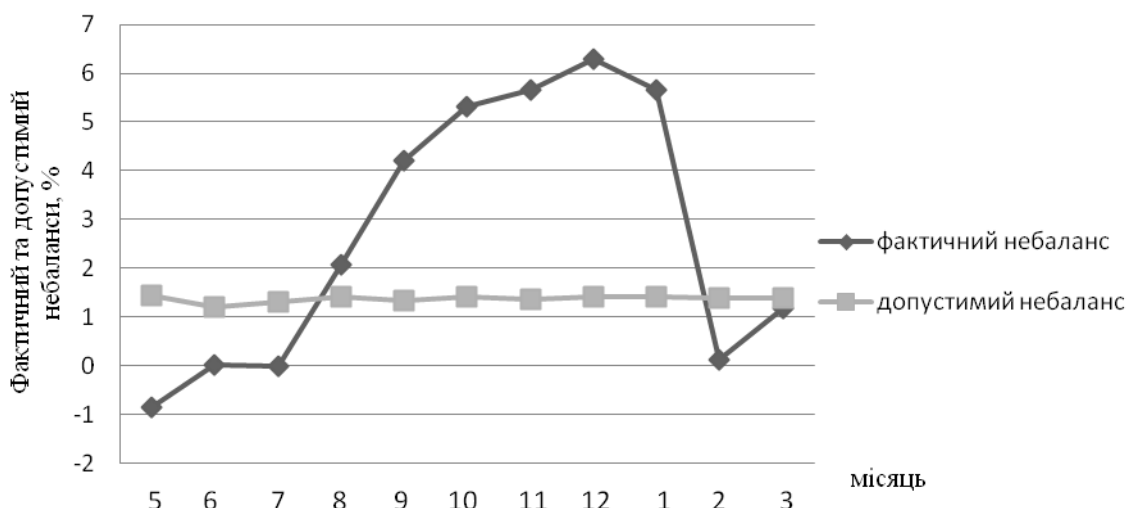


Рисунок 1.5 – Небаланси електроенергії на ТП Ш

Як видно із рисунка, з липня 2010 р. по січень 2011 р. фактичний небаланс перевищує припустимий. Одна із причин – недозавантаженості вимірювальних трансформаторів [73].

На сьогоднішній день досить гостро постає проблема із точністю вимірювання витрат електроенергії. Експлуатовані зараз вимірювальні комплекси працюють в ненормативних умовах, у зв'язку з чим їх реальні похибки істотно вище похибок, відповідних класів точності. Одна із основних причин – вимірювальні трансформатори струму та напруги експлуатуються за межами допустимого ГОСТ 1983 та ГОСТ 7746 [74, 75] діапазону вимірів їх

номінальних параметрів, що призводить до спотворення показань лічильників електроенергії.

Основні причини експлуатації вимірювальних трансформаторів за межами ГОСТ 1983 та ГОСТ 7746 [77, 78]:

- зміна потужності навантаження вторинного кола. Наприклад при заміні індуктивних лічильників на електронні, споживана потужність яких на порядок менше, або при збільшенні довжини ліній вимірювального кола, що призводить до значного збільшення потужності навантаження;

- зміна споживаної потужності об'єктами і пов'язану з цим зміну величини первинного струму. Наприклад при значному зменшенні (що характерно на даний час) або збільшенні об'ємів виробництва, перевезень.

Підходи до підвищення точності обліку електроенергії досить різноманітні. Наприклад в [79] пропонується, якщо похибки роботи вимірювальних трансформаторів струму та напруги носять систематичний характер, враховувати ці похибки в алгоритмах розрахунку та обліку АСКОЕ, корегуючи значення виміряних струмів та напруг. Таке корегування в АСКОЕ дозволить уникнути вимог по підвищенню класу точності вимірювальних трансформаторів в системах обліку електроенергії. При цьому може бути досягнутий значний економічний ефект як за рахунок підвищення точності роботи АСКОЕ, так і за рахунок того, що відпадає необхідність міняти наявні вимірювальні трансформатори на апарати з підвищеним класом точності.

Проблеми точності обліку електроенергії в країнах СНД та на заході вирішуються наступними способами:

- заміна вимірювальних трансформаторів на трансформатори з меншим значенням номінального навантаження вторинного кола;

- підключення до вимірювального кола додаткового навантаження.

У Європі застосовують додаткові навантаження у вимірювальних колах, оскільки це значно дешевше та ефективніше [69]. Однак для вимірювального трансформатору струму підключення звичайного опору є неприйнятним, бо в цьому випадку збільшуються кутові похибки. Через це західні виробники

почали випуск різноманітних видів додаткових навантажень, які не збільшують кутові похибки.

В [80] розглянуті основні методи визначення втрат електроенергії в залежності від технологічних різниць між електричними мережами та повноти інформації про параметри їх режимів роботи, а саме оперативний, характерних режимів, характерних діб, числа годин найбільших втрат, середніх навантажень.

Втрати електроенергії в лініях і трансформаторах визначаються розрахунковим шляхом на основі «Методики по розрахунку втрат електроенергії в трансформаторах і лініях електропередач» [81]. Крім втрат в лініях електропередач і трансформаторах тягових підстанцій при передачі електроенергії на електрорухомий склад (ЕРС) відбуваються втрати електроенергії в контактній мережі. Їх визначають відповідно до «Інструкції по розрахунку технологічних втрат електроенергії в пристроях тягового електропостачання» [82].

Наприклад, втрати електроенергії в контактній мережі постійного струму при вузловій схемі живлення, тис. кВт·год:

$$\Delta W_{KM1} = r_1 \cdot W_{PM}^2 \cdot \left(\frac{18.5}{N} + 0.003 \cdot l \right) \cdot 10^{-3}, \quad (1.6)$$

де r_1 – погонний активний опір одноколіїної лінії або однієї колії двоколіїної ділянки, Ом/км;

W_{PM} – місячне споживання електроенергії поїздами на міжпідстанційній зоні, тис. кВт·год;

N – середнє число пар поїздів на ділянці;

l – довжина міжпідстанційної зони, км.

Визначення втрат електроенергії в контактній мережі електрифікованих залізниць має ряд особливостей, які, у першу чергу, обумовлені змінним за величиною та місцезнаходженням навантажень, що не дозволяє врахувати цілий ряд факторів які впливають на величину втрат, а саме [83, 64]:

1. Лічильники, що встановлені на електровозах часто дають занижені значення про використану електроенергію. Це пояснюється рядом причин:

- нездатність лічильників враховувати мале навантаження при простоях біля забороняючих сигналів та на станціях;

- похибки вимірювання при підключенні обмотки напруги лічильника до обмотки власних потреб трансформатора електровоза змінного струму;

- випадки штучного спотворення показань лічильників окремими машиністами.

2. Межі окремих залізниць не відповідають межам плечей обслуговування локомотивів.

3. Від тягових підстанцій отримують живлення як тягові так і не тягові споживачі, витрата енергії яких частково враховується лічильниками цих споживачів, а частково розраховуються за встановленою потужністю трансформаторів.

4. Фідера, які живлять тягову мережу не завжди обладнані лічильниками витрати енергії на тягу.

У [64, 83-92] доведено, що втрати електроенергії в контактній мережі доцільніше визначати за допомогою непрямих способів.

1.3 Непрямі способи визначення втрат електроенергії в контактній мережі

Широкого розвитку питання обліку втрат електроенергії набуло ще у 70 - ті роки. Цьому питанню присвячені роботи [85-88].

Точне вимірювання втрат в контактній мережі неможливе через те, що навантаження носить стохастичний характер. З огляду на вищесказане був запропонований цілий ряд непрямих методів [89-92].

У [88] проводиться порівняння двох способів вимірювання втрат електроенергії в контактній мережі: перший – розроблений Південною залізницею (спільно з ДПТом), другий – МПТом.

Спосіб розроблений Південною залізницею спільно з ДПТом заснований на встановленні лічильників вольт - годин на шинах підстанцій та постах секціонування. Розрахункова формула першого способу вимірювань [88]:

$$\Delta W = c \cdot I_{\text{ср}} \cdot \Delta U_{\text{ср}} \cdot t, \quad (1.7)$$

де ΔW – величина втрат енергії в контактній мережі за час t , кВт·год;

$I_{\text{ср}}$ – середній струм тягової підстанції, що визначається за показниками лічильників витрати енергії на тягу поїздів і показниками лічильників вольт - годин підстанції, А;

$\Delta U_{\text{ср}}$ – середні втрати напруги в контактній мережі від підстанції до постів секціонування, що визначаються за показниками лічильників вольт - годин тягових підстанцій та постів секціонування, В;

c – поправочний коефіцієнт.

Спосіб запропонований МПТом заснований на вимірюванні величин ампер - квадрат - годин шляхом встановлення відповідних лічильників на фідерах тягових підстанцій. Розрахункова формула другого способу вимірювань [88]:

$$\Delta W = k_{\text{в}} \cdot I_{\text{ф}}^2 t, \quad (1.8)$$

де $k_{\text{в}}$ – коефіцієнт втрат, який фізично відповідає опору тягової мережі плеча прикладання еквівалентного навантаження;

$I_{\text{ф}}^2 t$ – сума показань лічильників ампер - квадрат - годин, встановлених на фідерах підстанцій, що живлять фідерну зону яка розглядається.

Спосіб Південної залізниці має ряд недоліків: похибка вимірювань досягає 10 % [88] і не може бути виправлена сторонніми коефіцієнтами; даний спосіб не може бути застосований на ділянках змінного струму. Найбільш перспективний спосіб визначення втрат енергії в тягових мережах – використання електронних лічильників втрат, встановлених на фідерах

контактної мережі та реєструючих інтегральне значення ампер - квадрат - годин. Ці пристрої потребують індивідуального налаштування для конкретної фідерної зони.

Значення коефіцієнта втрат для лічильників ампер - квадрат - годин визначено в [89] наступним чином:

$$k_B = \frac{r \cdot l}{1,94} \cdot \frac{\alpha \cdot \frac{N_0}{N_n} \sum_{p=1}^v \frac{w_{PT}^2 \cdot N}{N_p} + \frac{w_T^2 (n-1)(n^2-n+1)}{2,2n^3}}{\alpha \cdot \frac{N_0}{N_n} \sum_{p=1}^v \frac{w_{PT}^2 \cdot N}{N_p} + \frac{w_T^2 (n-1,33)}{1,4n}}, \quad (1.9)$$

де r – опір контактної мережі, Ом;

l – довжина ділянки, км;

α – коефіцієнт, що залежить від часу споживання струму поїздом;

N_0 – максимальна пропускна здатність ділянки;

N_n – пропускна здатність ділянки, що використовується;

v – число типів поїздів;

W_T – витрата енергії на тягу, кВт·год за час T ;

n – максимально можлива на даній ділянці кількість поїздів.

У [92] досліджені межі зміни коефіцієнта втрат в залежності від величин, що входять до нього, а саме:

- зміна розмірів руху до 10 % призведе до зміни k_B не більше 0,5 %;
- зміна часу споживання струму поїздом (залежить від режиму ведення поїзду) до 15 – 20 % вплине на зміну k_B до 1 %;
- коливання різнотипності поїздів до 16 % призведе до зміни k_B не більше 0,5 %;

Інші параметри являються практично постійними величинами для конкретної ділянки. Отже коефіцієнт k_B можна визначити для будь - якої ділянки електрифікованої залізниці. У [90] за графіками руху поїздів і кривими струмів локомотивів для великої кількості миттєвих схем були визначені втрати потужності в тяговій мережі та струми фідерів тягових підстанцій. За наступним виразом визначені коефіцієнти втрат.

$$k_{Bi} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta P_i}{\sum_{i=1}^m I_{\phi i}^2}, \quad (1.10)$$

де i – номер миттєвої схеми;

m – кількість миттєвих схем.

За графіками значень коефіцієнтів втрат визначено, що:

- маємо усталене значення коефіцієнта втрат;
- період часу за який це значення встановлюється 2,5 - 3 години.

Отже цілком можливо визначати втрати електроенергії в контактній мережі шляхом вимірювання квадрата фідерного струму.

Коефіцієнт втрат визначався на імітаційній моделі. В якості вихідних даних використовуються результати тягових розрахунків, параметри системи електропостачання та розміри руху. Враховувались можливості стоянок і обгонів вантажних і пасажирських поїздів при імовірнісній моделі графіка руху.

Однак, як показали досліди, коефіцієнт втрат залежить від величини зрівняльного струму, кількості поїздів на зоні і т. ін., що і визначається відчутною похибкою (до 7,5 %) цього способу. Похибку можна зменшити заклавши в механізм лічильника діапазон попередньо розрахованих коефіцієнтів втрат. У [91] проведено оцінку впливу зрівняльного струму на величину втрат енергії, що дозволило зробити наступні висновки: зрівняльні струми тим сильніше впливають на втрати потужності, чим менші навантаження від поїздів; в залежності від співвідношення тягового навантаження і зрівняльного струму втрати потужності можуть підвищитись у 1,5 – 12 разів.

Істотно похибка визначення втрат зменшується при розрахунку коефіцієнтів втрат в режимі реального часу. Рішення цієї задачі можливе при функціонуванні автоматизованої системи обліку електроенергії. Дійсно передаючи в системі обліку показання лічильників в мікро ЕОМ ІСЗ - 3 або в ЕОМ енергодиспетчерських пунктів, використовуючи імітаційну модель,

розраховувати коефіцієнти втрат з урахуванням дії зрівняльних струмів. Зауважимо, що в даному випадку для розрахунку коефіцієнту втрат необхідно мати імітаційні моделі ділянок, які використовують малий об'єм пам'яті та володіють великою швидкодією. В [93] був запропонований алгоритм, який дозволяє імітувати роботу системи електропостачання на міні ЕОМ енергодиспетчерських пунктів і визначати коефіцієнти втрат в режимі реального часу:

$$k_B = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta P(t)}{\left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m I_{\Phi ij}^2(t) \right)}, \quad (1.11)$$

де $I_{\Phi ij}^2$ - квадрат струму фідера в момент часу t , A^2 ;

m – кількість фідерів на тягових підстанціях А та В, живлячих дану фідерну зону;

T – час моделювання, год.

В [88] проводився факторний аналіз коефіцієнта втрат, на основі якого була отримана аналітична формула для його розрахунку

$$k_B = 0,878 + 0,017 \cdot I_y + 0,392 \cdot R_{ph} - 0,5141 \cdot \frac{N}{N_0} - 0,528 \cdot \alpha - 0,0122 \cdot I_y \frac{N}{N_0}, \quad (1.12)$$

де I_y – модуль зрівняльного струму, А;

R_{ph} – активна складова опору фідерної зони, Ом;

$\frac{N}{N_0}$ – степінь використання пропускної спроможності;

α – відношення повного часу ходу поїзда до часу його ходу під струмом.

Похибка при визначенні коефіцієнту втрат за формулою (1.12) в порівнянні з обчисленням на імітаційній моделі не перевищувала 5 %.

Коефіцієнт втрат розраховувався на імітаційній моделі лише один раз для конкретної фідерної зони і після введення до лічильника не корегувався. Стара елементна база не дозволяла корегувати коефіцієнти втрат автоматизовано.

Таким чином можна вдосконалити непрямий метод за рахунок врахування додаткових факторів – схеми живлення ділянки, зносу контактних проводів, кількості поїздів на розрахунковій зоні, температури навколишнього середовища, швидкості руху, струму електровоза.

Задачі дослідження

1. Аналіз стану контролю електроспоживання на електрифікованих залізницях показав, що:

- система нормування втрат та витрат електроенергії недосконала. На залізничному транспорті необхідна така система норм, яка б мала стимулюючий характер і періодично переглядалась залежно від зміни умов експлуатаційної роботи.

- в умовах реальної експлуатації на залізничному транспорті виникають небаланси електроенергії. Зменшити їх рівень можливо за допомогою уникнення неточної фіксації приладами складових балансу та зменшенням витрат які не фіксуються приладами.

- пошук шляхів зі зниження втрат електроенергії в контактній мережі можливий після вдосконалення методу визначення втрат з урахуванням специфіки електротранспорту.

2. Специфіка роботи залізничного транспорту потребує спеціальних методів визначення втрат електроенергії в контактній мережі. Відомі методи дають похибку на рівні 7,5%. Це обумовлено неточним визначенням коефіцієнту втрат. Запропоновано вдосконалити непрямий метод за рахунок врахування додаткових факторів: схеми живлення ділянки, зносу контактних проводів, кількості поїздів на розрахунковій зоні, температури навколишнього середовища, швидкості руху, струму електровоза.

У зв'язку з викладеним вище метою дисертаційної є удосконалення методу визначення втрат електроенергії в контактній мережі.

Для досягнення сформованої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) проаналізувати непрямі способи визначення втрат електроенергії в контактній мережі;
- 2) виділити фактори, що впливають на коефіцієнт втрат, та скласти їх математичні моделі;
- 3) отримати закони розподілу впливаючих факторів та визначити межі їх зміни;
- 4) записати аналітичні вирази для визначення коефіцієнта втрат для ділянок постійного та змінного струмів на основі повного факторного експерименту;
- 5) встановити закон розподілу та межі зміни коефіцієнта втрат. Надати рекомендації щодо регламенту його зміни;
- 6) експериментально підтвердити отримані теоретичні результати.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ НЕПРЯМИМ СПОСОБОМ

У загальному вигляді втрати електроенергії в контактній мережі визначаються таким виразом:

$$\Delta W = k_B \cdot \int_0^T I_{\Phi}^2(t) dt, \quad (2.1)$$

де ΔW – втрати електроенергії в контактній мережі, Вт·год;

k_B – коефіцієнт втрат, Ом;

$I_{\Phi}^2(t)$ – квадрат струму фідера в даний момент часу, А²;

T – час руху поїзда міжпідстанційною зоною, год.

Квадрат струму фідера вимірюється лічильником втрат, а коефіцієнт втрат необхідно ввести до лічильника. Коефіцієнт втрат у загальному вигляді є функцією від наступних величин:

$$k_{\epsilon} = f(k_{cx}; k_n; k_{zn}; k_V; k_I; k_t), \quad (2.2)$$

де k_{cx} – коефіцієнт, що враховує схему живлення контактної мережі;

k_n – коефіцієнт, що враховує кількість поїздів на розрахунковій зоні;

k_{zn} – коефіцієнт, що враховує знос контактних проводів;

k_V – коефіцієнт, що враховує зміну швидкості електрорухомого складу;

k_I – коефіцієнт, що враховує зміну струму, що споживає електровоз під час руху розрахунковою зоною;

k_t – коефіцієнт, що враховує зміну температури контактного проводу.

Отже для визначення коефіцієнта втрат необхідно визначити коефіцієнти із виразу (2.2).

2.1 Принципи визначення миттєвих та еквівалентних опорів для різних схем живлення контактної мережі

Запишемо співвідношення, яке в кожен момент часу є опором ділянки контактної мережі від шин тягової підстанції до навантаження та визначає втрати потужності від струму даного фідера контактної мережі:

$$r(t) = \frac{\Delta P(t)}{I_{\Phi}^2(t)}, \quad (2.3)$$

де $\Delta P(t)$ – миттєве значення втрат потужності в контактній мережі, Вт;

$I_{\Phi}^2(t)$ – квадрат діючого значення струму фідера в даний момент часу, A^2 .

Розглянемо найпростішу консольну схему живлення за умови прослідування міжпідстанційною зоною одного електрорухомого складу з постійним навантаженням та середньою швидкістю (рис. 2.1). В цьому випадку миттєве значення струму фідера в кожен момент часу дорівнюватиме струму навантаження. Оскільки останнє не змінюється, то квадрат струму фідера є постійною величиною на проміжку часу від початку руху (0) до значення T , яке дорівнює часу ходу поїзда міжпідстанційною зоною.

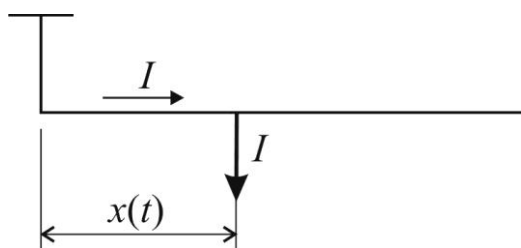


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема консольної схеми живлення

Втрати потужності в контактній мережі визначаються добутком квадрата струму фідера та опору відповідної ділянки контактної мережі. В загальному вигляді для консольної схеми живлення

$$\Delta P(t) = r_0 \cdot x(t) \cdot I_{\Phi}^2(t),$$

де r_0 – питомий опір контактної мережі, Ом/км;

$x(t)$ – відстань від шин тягової підстанції до навантаження в даний момент часу, км.

Підставляючи значення $\Delta P(t)$ для консольної схеми живлення в загальному вигляді до формули (2.3), отримаємо значення миттєвого опору за час руху поїзда фідерною зоною:

$$r(t) = \frac{r_0 \cdot x(t) \cdot I_{\Phi}^2(t)}{I_{\Phi}^2(t)} = r_0 \cdot x(t), \quad (2.4)$$

в свою чергу $x(t) = \frac{L}{T} \cdot t$,

де L – довжина міжпідстанційної зони, км;

T – час руху поїзда міжпідстанційною зоною, хв.

Перетворюючи рівняння руху поїзда міжпідстанційною зоною з довжиною L впродовж часу T , остаточно отримаємо:

$$r(t) = \frac{r_0 L}{T} \cdot t.$$

Таким чином, з останнього виразу видно, що для визначення миттєвих значень втрат електричної енергії необхідно в кожен момент часу t змінювати коефіцієнт втрат синхронно з переміщенням навантаження. На практиці більший інтерес має інтегральне значення втрат електричної енергії на деякому інтервалі T .

Уведемо визначення в загальному вигляді еквівалентного значення опору контактної мережі на періоді T :

$$r_{\text{екв}} = \frac{\Delta W}{\int_0^T I_{\Phi}^2(t) dt} = \frac{\int_0^T r(t) I_{\Phi}^2(t) dt}{\int_0^T I_{\Phi}^2(t) dt}. \quad (2.5)$$

Для консольної схеми живлення матимемо:

$$r_{\text{екв}} = \frac{\int_0^T \frac{r_0 L}{T} \cdot t \cdot I_{\Phi}^2(t) dt}{\int_0^T I_{\Phi}^2(t) dt}. \quad (2.6)$$

Оскільки прийнято припущення про постійність навантаження електрорухомого складу, значення $I_{\Phi}^2(t)$ вважатимемо постійною величиною та винесемо за знак інтегралу, отримаємо:

$$r_{\text{екв}} = \frac{I_{\Phi}^2 \int_0^T \frac{r_0 L}{T} t dt}{I_{\Phi}^2 \cdot T} = \frac{\frac{r_0 L}{T} \int_0^T t dt}{T} = \frac{r_0 L}{T^2} \left(\frac{t^2}{2} \Big|_0^T \right) = \frac{r_0 L}{T^2} \cdot \frac{T^2}{2} = \frac{1}{2} r_0 L. \quad (2.7)$$

Слід зауважити, що отримане значення $r_{\text{екв}}$ визначає еквівалентний опір контактної мережі за деякий період часу при прослідкуванні міжпідстанційною зоною одного поїзду.

Двостороння схема живлення (рис. 2.2) характеризується відомою залежністю [94], де струми фідерів визначаються обернено пропорційно до відстаней між електрорухомим складом та тяговими підстанціями.

Для визначення еквівалентного опору двосторонньої схеми живлення необхідно розділити втрати в контактній мережі на кожну з двох підстанцій. Умовимось вважати втратами в контактній мережі, що припадають на певну підстанцію, ті втрати, які визначаються струмом її фідера. Таким чином, для фіксованої миттєвої схеми такими втратами будуть втрати між шинами тягової підстанції та точкою струморозподілу. Оскільки тягове навантаження переміщується в просторі, визначимо в загальному вигляді, як розподіляється відома квадратична крива втрат в тяговій мережі між тяговими підстанціями під час прослідкування одного поїзду.

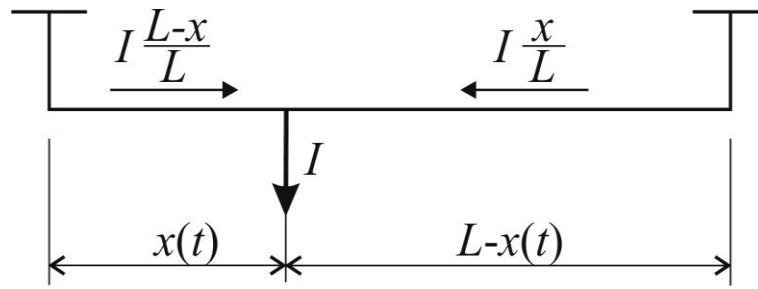


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема двосторонньої схеми живлення

Миттєві втрати потужності для двосторонньої схеми живлення в загальному виді визначаються сумою добутку струмів квадратів фідерів на відповідні опори тягової мережі

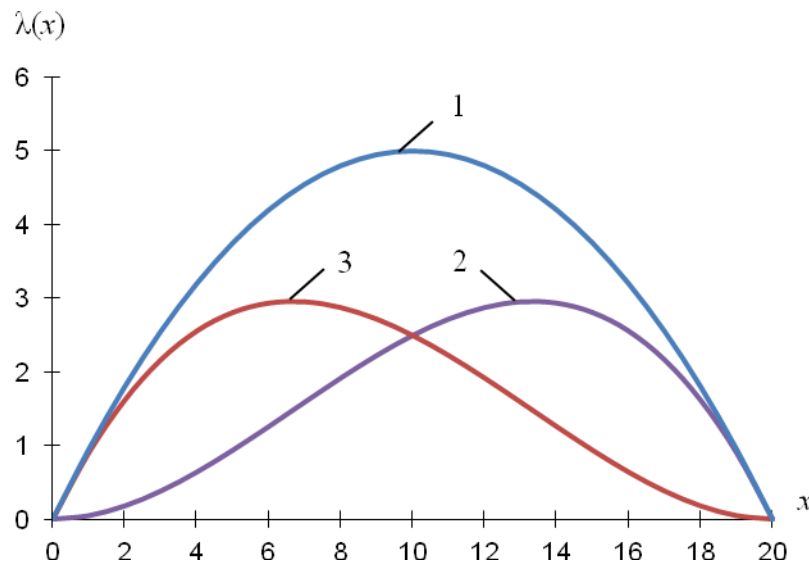
$$\begin{aligned} \Delta P(t) &= r_0 x(t) \left(I(t) \frac{L-x(t)}{L} \right)^2 + r_0 (L-x(t)) \left(I(t) \frac{x(t)}{L} \right)^2 = \\ &= r_0 \cdot I^2(t) \left[x(t) \frac{(L-x(t))^2}{L^2} + (L-x(t)) \frac{x(t)^2}{L^2} \right]. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Позначимо $x(t) \frac{(L-x(t))^2}{L^2} + (L-x(t)) \frac{x(t)^2}{L^2} = \lambda(x)$

де $I(t)$ – струм поїзда в даний момент часу, А.

Форму кривої миттєвих втрат для двосторонньої схеми живлення визначає вираз в дужках формули (2.8), при чому першим доданком визначається частина миттєвих втрат потужностей, яка припадає на першу тягову підстанцію, другим – на другу підстанцію при слідуванні одного поїзда.

Графічні залежності складової миттєвих втрат потужності та функції квадрату струмозподілу будемо представляти на прикладі міжпідстанційної зони довжиною 20 км з швидкістю поїзда 60 км/год. Так на рис. 2.3 показано розподіл загальних втрат потужностей для двосторонньої схеми між суміжними тяговими підстанціями.



1 – загальні; 2, 3 – складові втрат від струмів першої та другої підстанції;

Рисунок 2.3 – Складові миттєвих втрат потужності в контактній мережі для двосторонньої схеми живлення

В свою чергу квадрати струмів фідерів для двосторонньої схеми в загальному вигляді дорівнюватимуть

$$I_{\Phi 1}^2(t) = I(t)^2 \frac{(L - x(t))^2}{L^2}, \quad I_{\Phi 2}^2(t) = I(t)^2 \frac{x(t)^2}{L^2},$$

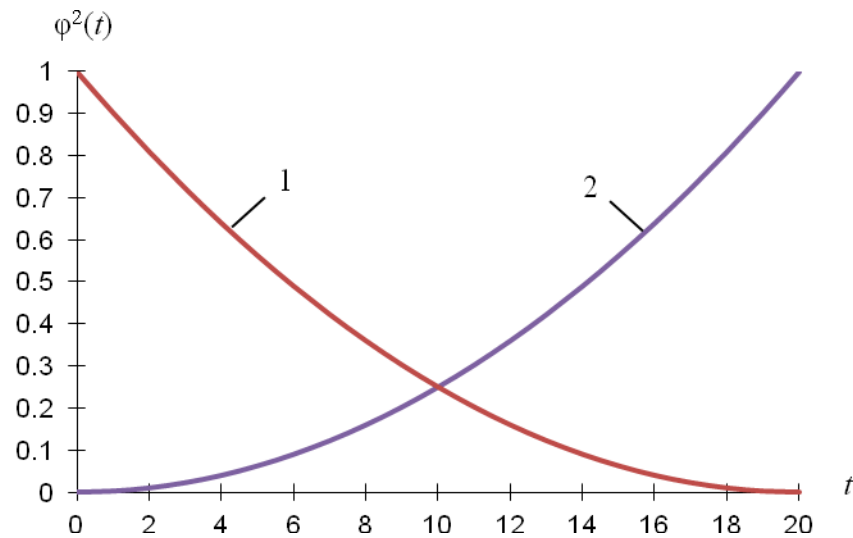
або після вираження координати $x(t)$ через середню швидкість поїзда

$$I_{\Phi 1}^2(t) = I(t)^2 \cdot \frac{\left(L - \frac{L}{T}t\right)^2}{L^2} = I(t)^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2, \quad I_{\Phi 2}^2(t) = I^2 \cdot \frac{t^2 L^2 / T^2}{L^2} = I^2 \left(\frac{t}{T}\right)^2.$$

Графічний вигляд отриманих залежностей для постійної величини навантаження визначається формою квадратів функцій струморозподілу, а саме

$$\varphi_1^2(t) = \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2, \quad \varphi_2^2(t) = \left(\frac{t}{T}\right)^2,$$

графіки яких представлені на рис. 2.4



1, 2 – фідери першої та другої підстанції

Рисунок 2.4 – Квадрати функції струмозподілу

Користуючись запропонованим визначенням миттєвого опору, та беручи до уваги необхідність розділення сумарних втрат потужності на частини, величин яких визначаються залежностями на рис. 2.3 (1,2), запишемо формули визначення миттєвих опорів для кожного фідера двосторонньої схеми живлення

$$r_{\Phi 1}(t) = \frac{r_0 I(t)^2 \frac{x(t)(L-x(t))^2}{L^2}}{I(t)^2 \frac{(L-x(t))^2}{L^2}} = r_0 x(t),$$

$$r_{\Phi 2}(t) = \frac{r_0 I(t)^2 \frac{(L-x(t))x(t)^2}{L^2}}{I(t)^2 \frac{x(t)^2}{L^2}} = r_0 [L-x(t)].$$

Застосовуючи визначення еквівалентного опору, визначимо його значення в загальному вигляді для одного з фідерів двосторонньої схеми живлення, замінюючи координату розташування навантаження $x(t)$ добутком середньої швидкості поїзда L/T та змінної часу t

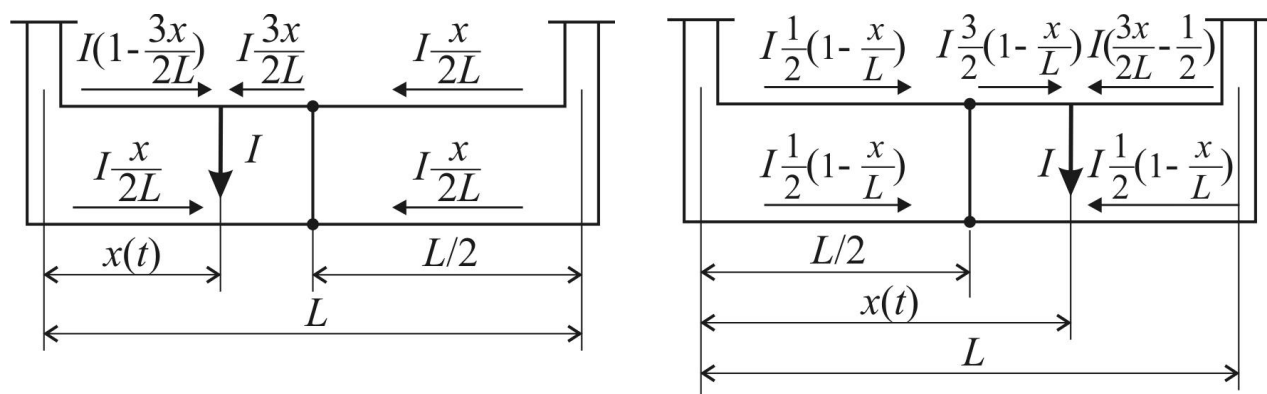
$$r_{\text{екв1}} = \frac{\int_0^T r_{\Phi 1}(t) I_{\Phi 1}^2(t) dt}{\int_0^T I_{\Phi 1}^2(t) dt} = \frac{\int_0^T r_0 \frac{L}{T} t \cdot I^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2 dt}{\int_0^T I^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2 dt}.$$

Винесемо постійні величини за знаки інтегралів, та розкриємо дужки в підінтегральних виразах

$$r_{\text{екв1}} = r_0 \frac{L}{T} \cdot \frac{\int_0^T \left(t - \frac{2t^2}{T} + \frac{t^3}{T^2}\right) dt}{\int_0^T \left(1 - \frac{2t}{T} + \frac{t^2}{T^2}\right) dt} = r_0 \frac{L}{T} \cdot \frac{\left(\frac{t^2}{2} - \frac{2t^3}{3T} + \frac{t^4}{4T^2}\right) \Big|_0^T}{\left(t - \frac{t^2}{T} + \frac{t^3}{3T^2}\right) \Big|_0^T},$$

$$r_{\text{екв1}} = r_0 \frac{L}{T} \cdot \frac{\frac{T^2}{2} - \frac{2T^2}{3} + \frac{T^2}{4}}{T - T + \frac{T}{3}} = r_0 L \cdot \frac{\frac{1}{2} - \frac{2}{3} + \frac{1}{4}}{\frac{1}{3}} = \frac{1}{4} r_0 L.$$

Найбільш розповсюдженою для нормального режиму роботи систем тягового електропостачання є вузлова схема живлення (рис. 2.5), яка має більш складні залежності розподілу струмів між фідерами тягових підстанцій.



а – розташування навантаження перед
постом секціонування

б – розташування навантаження за
постом секціонування

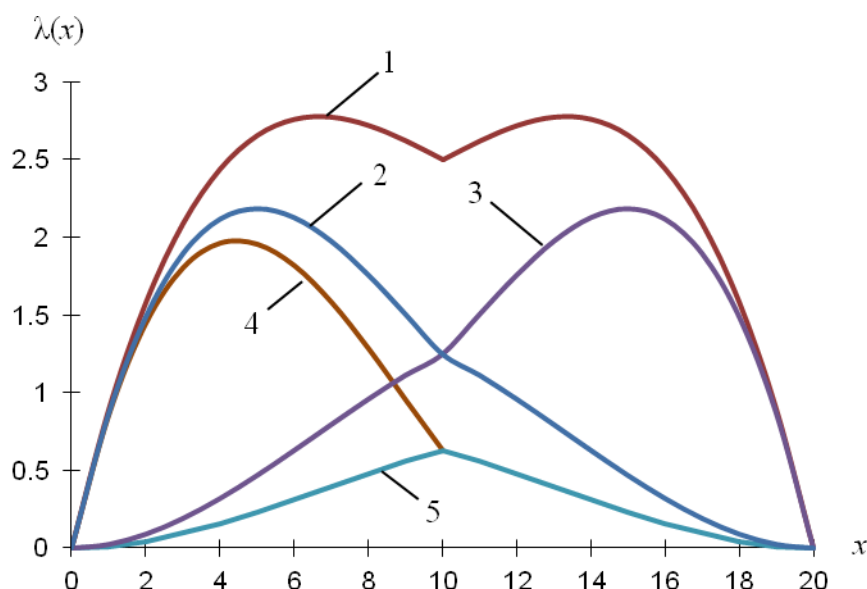
Рисунок 2.5 – Розрахункові схеми вузлової схеми живлення

За такої схеми живлення необхідно розглядати варіанти розташування

навантаження перед постом секціонування та після нього. В загальному вигляді миттєві втрати потужності для вузлової схеми живлення визначаються формулою

$$\Delta P(t) = \begin{cases} r_0 I(t)^2 \left[\left(1 - \frac{3x(t)}{2L}\right)^2 x + \left(\frac{3x(t)}{2L}\right)^2 \left(\frac{L}{2} - x(t)\right) + 3\left(\frac{x(t)}{2L}\right)^2 \cdot \frac{L}{2} \right], & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \\ r_0 I(t)^2 \left[\frac{3}{4} \left(1 - \frac{x(t)}{L}\right)^2 \frac{L}{2} + \frac{9}{4} \left(1 - \frac{x(t)}{L}\right)^2 \left(x(t) - \frac{L}{2}\right) + \left(\frac{3x(t)}{2L} - \frac{1}{2}\right)^2 (L - x(t)) \right], & \frac{L}{2} \leq x \leq L. \end{cases}$$

Для подальших досліджень розглянемо лише втрати від струмів попутного та суміжного фідера однієї тягової підстанції, сума яких визначає втрати, що приходяться на одну тягову підстанцію (рис. 2.6), розподіл складових миттєвих втрат потужностей між тяговими підстанціями за прийнятих припущень симетричний.



1 — загальні; 2, 3 — складові втрат від струмів першої та другої підстанції; 4 — складова втрат від струму попутного фідера;
5 — складова втрат від струму суміжного фідера

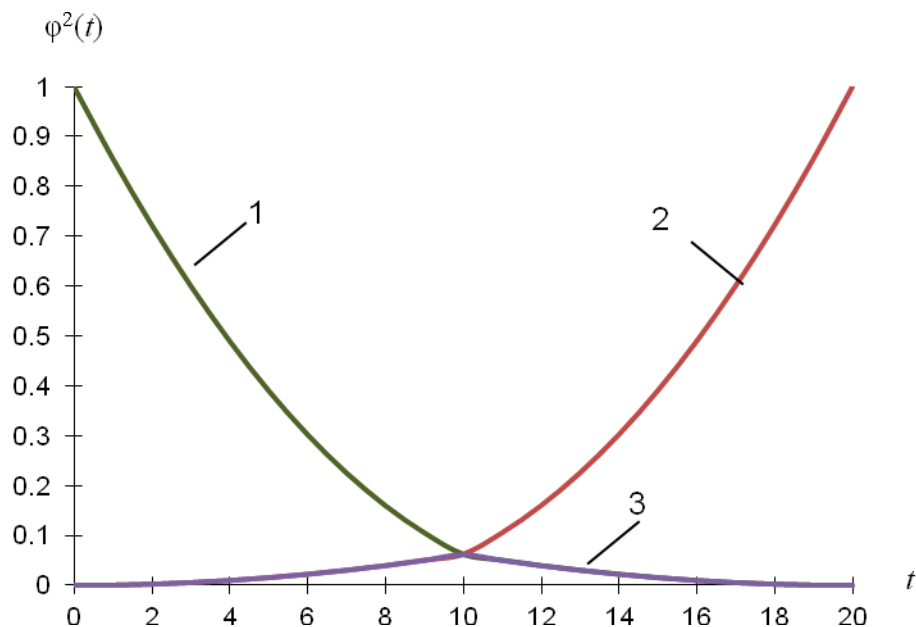
Рисунок 2.6 — Складові миттєвих втрат потужності в контактній мережі для вузлової схеми живлення

Для попутного та суміжного фідерів миттєві втрати потужності мають вигляд

$$\Delta P_{\text{поп}}(t) = \begin{cases} r_0 I(t)^2 \left(1 - \frac{3x(t)}{2L}\right)^2 x(t), & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \\ \frac{1}{4} r_0 I(t)^2 \left(1 - \frac{x(t)}{L}\right)^2 x(t), & \frac{L}{2} \leq x \leq L. \end{cases}$$

$$\Delta P_{\text{сум}}(t) = \begin{cases} r_0 I(t)^2 \left(\frac{x(t)}{2L}\right)^2 x(t), & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \\ \frac{1}{4} r_0 I(t)^2 \left(1 - \frac{x(t)}{L}\right)^2 x(t), & \frac{L}{2} \leq x \leq L. \end{cases}$$

В свою чергу, квадрати струмів фідерів вузлової схеми живлення визначаються наступними формулами. Графічний вигляд отриманих залежностей визначається формою функцій квадратів струморозподілу та представлений на рис. 2.7



1, 2 – попутні фідери першої та другої підстанції; 3 – суміжні фідери

Рисунок 2.7 – Квадрати функції струморозподілу

$$I_{\Phi.\text{поп}}^2(t) = \begin{cases} I(t)^2 \left(1 - \frac{3x(t)}{2L}\right)^2, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \\ \frac{1}{4} I(t)^2 \left(1 - \frac{x(t)}{L}\right)^2, & \frac{L}{2} \leq x \leq L, \end{cases}$$

$$I_{\Phi.\text{сум}}^2(t) = \begin{cases} I(t)^2 \left(\frac{x(t)}{2L}\right)^2, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \\ \frac{1}{4} I(t)^2 \left(1 - \frac{x(t)}{L}\right)^2, & \frac{L}{2} \leq x \leq L. \end{cases}$$

З використанням припущення про рівномірність руху поїзда міжпідстанційною зоною, залежності квадратів струму від часу матимуть вигляд

$$I_{\Phi.\text{поп}}^2(t) = \begin{cases} I(t)^2 \left(1 - \frac{3L/T}{2L} t\right)^2 \\ \frac{1}{4} I(t)^2 \left(1 - \frac{L/T}{L} t\right)^2 \end{cases} = \begin{cases} I(t)^2 \left(1 - \frac{3}{2} \frac{t}{T}\right)^2, & 0 \leq t \leq \frac{T}{2}, \\ \frac{1}{4} I(t)^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2, & \frac{T}{2} \leq t \leq T, \end{cases}$$

$$I_{\Phi.\text{сум}}^2(t) = \begin{cases} I(t)^2 \left(\frac{L/T}{2L} t\right)^2 \\ \frac{1}{4} I(t)^2 \left(1 - \frac{L/T}{L} t\right)^2 \end{cases} = \begin{cases} I(t)^2 \left(\frac{t}{2T}\right)^2, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \\ \frac{1}{4} I(t)^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2, & \frac{L}{2} \leq x \leq L. \end{cases}$$

Користуючись визначенням (2.4), знайдемо в загальному виді вираз миттєвого опору контактної мережі відносно попутного та суміжного фідерів, розглядаючи окремо варіанти розташування навантаження відносно поста секціонування

$$0 \leq x \leq \frac{L}{2}: r_{\text{поп}}(t) = \frac{\Delta P_{\text{поп}}(t)}{I_{\Phi.\text{поп}}^2(t)} = \frac{r_0 I(t)^2 \left(1 - \frac{3x(t)}{2L}\right)^2 x(t)}{I(t)^2 \left(1 - \frac{3x(t)}{2L}\right)^2} = r_0 x(t) = r_0 \frac{L}{T} t,$$

$$r_{\text{сум}}(t) = \frac{\Delta P_{\text{сум}}(t)}{I_{\Phi.\text{сум}}^2(t)} = \frac{r_0 I(t)^2 \left(\frac{x(t)}{2L} \right)^2 x(t)}{I(t)^2 \left(\frac{x(t)}{2L} \right)^2} = r_0 x(t) = r_0 \frac{L}{T} t,$$

$$\frac{L}{2} \leq x \leq L: r_{\text{поп}}(t) = r_{\text{сум}}(t) = \frac{r_0 I(t)^2 \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x(t)}{L} \right)^2 x(t)}{I(t)^2 \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x(t)}{L} \right)^2} = r_0 x(t) = r_0 \frac{L}{T} t.$$

На підставі визначення еквівалентного опору (2.5) , визначимо його значення в загальному вигляді для попутного фідера вузлової схеми живлення, враховуючи різні варіанти розташування навантаження відносно вузла сумою інтегралів відповідних функцій

$$\begin{aligned} r_{\text{екв.поп}} &= \frac{\int_0^T (r_{\text{поп}}(t) I_{\Phi.\text{поп}}^2(t)) dt}{\int_0^T I_{\Phi.\text{поп}}^2(t) dt} = \\ &= \frac{\int_0^{T/2} \left(r_0 \frac{L}{T} t \cdot I^2 \left(1 - \frac{3}{2} \frac{t}{T} \right)^2 \right) dt + \int_{T/2}^T \left(r_0 \frac{L}{T} t \cdot I^2 \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t}{T} \right)^2 \right) dt}{\int_0^{T/2} I^2 \left(1 - \frac{3}{2} \frac{t}{T} \right)^2 dt + \int_{T/2}^T I^2 \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t}{T} \right)^2 dt} = \\ &= r_0 \frac{L}{T} \frac{\int_0^{T/2} t \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \frac{t}{T} \right)^2 dt + \int_{T/2}^T t \cdot \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t}{T} \right)^2 dt}{\int_0^{T/2} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{t}{T} \right)^2 dt + \int_{T/2}^T \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t}{T} \right)^2 dt} = r_0 \frac{L}{T} \cdot \frac{2T}{11} = \frac{2}{11} r_0 L. \end{aligned}$$

Аналогічно до попереднього випадку, опускаючи перетворення підінтегральних виразів, отримаємо еквівалентний опір для суміжного фідера вузлової схеми живлення

$$\begin{aligned}
r_{\text{екв.сум}} &= \frac{\int_0^T r_{\text{сум}}(t) I_{\Phi.\text{сум}}^2(t) dt}{\int_0^T I_{\Phi.\text{сум}}^2(t) dt} = \\
&= \frac{\int_0^{T/2} r_0 \frac{L}{T} t \cdot I^2 \left(\frac{t}{2T} \right)^2 dt + \int_{T/2}^T r_0 \frac{L}{T} t \cdot I^2 \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t}{T} \right)^2 dt}{\int_0^{T/2} I^2 \left(\frac{t}{2T} \right)^2 dt + \int_{T/2}^T I^2 \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t}{T} \right)^2 dt} = \\
&= r_0 \frac{L}{T} \frac{\int_0^{T/2} t \cdot \left(\frac{t}{2T} \right)^2 dt + \int_{T/2}^T t \cdot \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t}{T} \right)^2 dt}{\int_0^{T/2} \left(\frac{t}{2T} \right)^2 dt + \int_{T/2}^T \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t}{T} \right)^2 dt} = r_0 \frac{L}{T} \cdot \frac{T}{2} = \frac{1}{2} r_0 L.
\end{aligned}$$

Отримані таким чином миттєві та еквівалентні характеристики опорів для кожної схеми живлення та $k_{\text{сх}}$ занесемо до табл.2.1

Таблиця 2.1 – Миттєві, еквівалентні опори та $k_{\text{сх}}$ для різних схем живлення

Схема живлення	$r(t)$	$r_{\text{екв}}$	$k_{\text{сх}}$
Консольна	$r_0 L \frac{t}{T}$	$\frac{1}{2} r_0 L$	$\frac{1}{2}$
Двостороння		$\frac{1}{4} r_0 L$	$\frac{1}{4}$
Вузлова*		$\frac{2}{11} r_0 L / \frac{1}{2} r_0 L$	$\frac{2}{11} / \frac{1}{2}$
Примітка. У чисельнику наведено значення для попутного фідера, у знаменнику – для суміжного			

2.2 Підходи до визначення коефіцієнта втрат електроенергії з урахуванням зносу контактних проводів та кількості поїздів на міжпідстанційній зоні

Опір контактних проводів визначається за відомою формулою [94]

$$r_{\text{км}} = \frac{10^9 \rho_{\text{м}}}{S'_{\text{м}} + S_{\text{а}}/_{1,7}}, \quad (2.9)$$

де $\rho_{\text{м}}$ – питомий опір мідних проводів, Ом·м;

$S'_{\text{м}}$ – сумарна площа поперечного перерізу паралельно з'єднаних мідних проводів контактної мережі, мм²;

$S_{\text{а}}$ – те ж алюмінієвих проводів, мм².

З урахуванням, що $\rho_{\text{м}} = 18,2 \cdot 10^9$ формула (2.9) матиме наступний вигляд

$$r_{\text{екв}} = \frac{18,2}{S'_{\text{м}} + S_{\text{а}}/_{1,7}}. \quad (2.10)$$

Виконавши перетворення із (2.10) отримаємо вираз (2.11) для опору контактних проводів з урахуванням зносу у відсотках

$$r_{\text{км}} = \frac{10^9 \rho_{\text{м}}}{S'_{\text{м}} + S_{\text{а}}/_{1,7} - \frac{(S'_{\text{м}} + S_{\text{а}}/_{1,7}) \cdot \Delta S\%}{100}} = \frac{10^9 \rho_{\text{м}}}{S'_{\text{м}} + S_{\text{а}}/_{1,7} \cdot 1 - \frac{\Delta S\%}{100}}, \quad (2.11)$$

де $\Delta S\%$ – середній знос контактних проводів у відсотках

або

$$r_{\text{км}} = \frac{18,2}{S'_{\text{м}} + S_{\text{а}}/_{1,7} \cdot 1 - \frac{\Delta S\%}{100}}. \quad (2.12)$$

Після перетворень отримаємо вираз (2.13) для визначення коефіцієнта втрат з урахуванням зносу контактних проводів для консольної схеми живлення

$$r_{\text{екв}} = \frac{18,2}{2 S'_{\text{м}} + S_{\text{а}}/_{1,7} \cdot 1 - \frac{\Delta S\%}{100}} L. \quad (2.13)$$

$$k_{\text{зН}} \frac{1}{2} r_0 L = \frac{18,2}{2 S'_{\text{м}} + S_{\text{а}}/_{1,7} \cdot 1 - \frac{\Delta S\%}{100}} L. \quad (2.14)$$

$$k_{\text{зН}} = \frac{18,2 S'_{\text{м}} + S_{\text{а}}/_{1,7} \cdot 2}{2 S'_{\text{м}} + S_{\text{а}}/_{1,7} \cdot 18,2 \cdot 1 - \frac{\Delta S\%}{100}}.$$

Після перетворень отримаємо наступний вираз

$$k_{\text{зн}} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta S\%}{100}} \cdot \quad (2.15)$$

На рис. 2.8 показана залежність зміни коефіцієнта втрат в залежності від зносу контактних проводів.

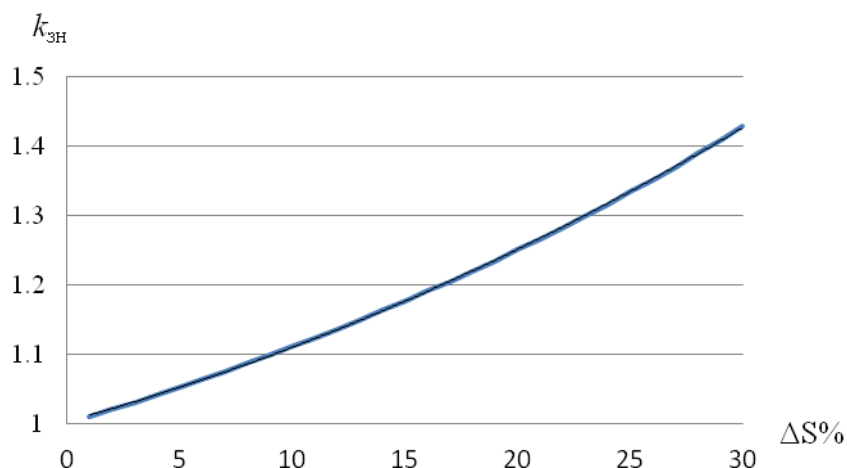


Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнта $k_{\text{зн}}$ від середнього зносу контактних проводів

Максимальний знос на графіку 30%, так як при такому значенні контактний провід замінюють [95].

Як правило на міжпідстанційній зоні знаходиться не один поїзд і це необхідно враховувати при визначенні коефіцієнта втрат. Прийmemo деякі припущення:

- 1) живлячі струми електровозів однакові;
- 2) відстань між електрорухомими складами однакова.

Будемо розглядати консольну схему живлення. Припустимо, що на міжпідстанційній зоні 2 поїзди.

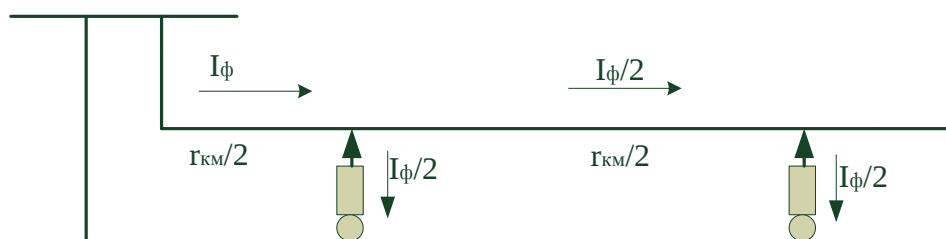


Рисунок 2.9 – Консольна схема живлення з двома навантаженнями

Тоді втрати потужності в контактній мережі будуть визначатися за виразом [86].

$$\Delta P = I_{\Phi}^2 \frac{r_{\text{км}}}{2} + \left(\frac{I_{\Phi}}{2} \right)^2 \frac{r_{\text{км}}}{2} = \frac{5}{8} I_{\Phi}^2 r_{\text{км}}, \quad (2.16)$$

де I_{Φ}^2 – квадрат струму фідера;

$r_{\text{км}}$ – опір контактної мережі міжпідстанційної зони.

У [86] розглянуто лише випадок із двома поїздами на міжпідстанційній зоні. Продовжимо міркування та отримаємо аналітичний вираз для n поїздів, попередньо розглянувши міжпідстанційну зону з трьома поїздами. Якщо на міжпідстанційній зоні 3 поїзди (рис. 2.10), то розрахункова формула матиме наступний вигляд

$$\Delta P = I_{\Phi}^2 \frac{r_{\text{км}}}{3} + \left(\frac{2I_{\Phi}}{3} \right)^2 \frac{r_{\text{км}}}{3} + \left(\frac{I_{\Phi}}{3} \right)^2 \frac{r_{\text{км}}}{3} = \frac{14}{27} I_{\Phi}^2 r_{\text{км}}. \quad (2.17)$$

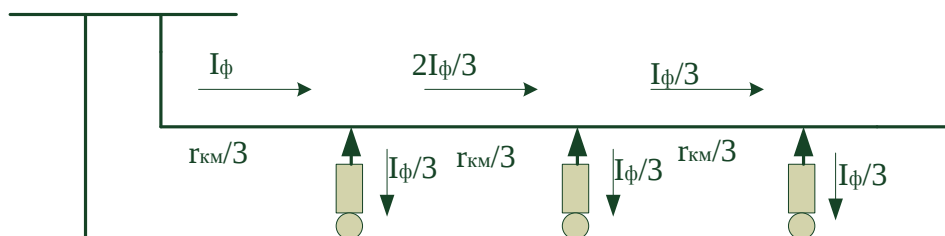


Рисунок 2.10 – Консольна схема живлення з трьома навантаженнями

Отже прослідкувавши закономірність можна зобразити розрахункову схему (рис. 2.11) та записати вираз для визначення втрат електроенергії для n поїздів на ділянці.

$$\begin{aligned} \Delta P = I_{\Phi}^2 \frac{r_{\text{км}}}{n} + \left(I_{\Phi} - \frac{I_{\Phi}}{n} \right)^2 \frac{r_{\text{км}}}{n} + \left(I_{\Phi} - \frac{2I_{\Phi}}{n} \right)^2 \frac{r_{\text{км}}}{n} + \left(I_{\Phi} - \frac{3I_{\Phi}}{n} \right)^2 \frac{r_{\text{км}}}{n} + \dots + \\ + \left(I_{\Phi} - \frac{(n-1)I_{\Phi}}{n} \right)^2 \frac{r_{\text{км}}}{n} = \frac{r_{\text{км}}}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{nI_{\Phi} - (i-1)I_{\Phi}}{n} \right)^2, \end{aligned} \quad (2.18)$$

де n – кількість поїздів на розрахунковій ділянці;

i – порядковий номер поїзда.

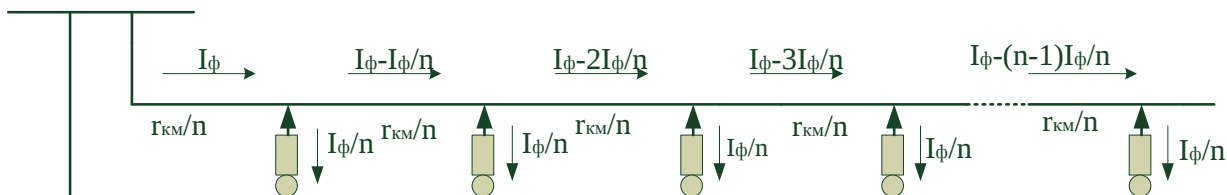


Рисунок 2.11 – Консольна схема живлення з n навантаженнями

Якщо у вираз (2.18) замість n підставити 3, то отримаємо вираз (2.17), отже отримана формула справедлива.

Оскільки для дійсної та еквівалентної схем повинні співпадати ΔP , то буде справедливий вираз

$$r_{\text{екв.сх}} I_{\phi}^2 = \frac{r_{\text{км}}}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{nI_{\phi} - (i-1)I_{\phi}}{n} \right)^2, \quad (2.19)$$

де $r_{\text{екв.сх}}$ – опір еквівалентної схеми.

Після перетворень при прийнятих припущеннях отримаємо вираз (2.20) для визначення коефіцієнта втрат з урахуванням кількості поїздів на міжпідстанційній зоні для консольної схеми живлення.

$$r_{\text{екв.сх}} = \frac{r_{\text{км}}}{n} \sum_{i=1}^n 1 - \frac{(i-1)}{n}. \quad (2.20)$$

або з урахуванням, що

$$r_{\text{км}} = r_0 L,$$

де L – довжина розрахункової зони.

Та дещо спростивши вираз отримаємо

$$r_{\text{екв.сх}} = r_0 L \frac{\sum_{i=1}^n n+1-i}{n^3}. \quad (2.21)$$

Поставлена задача зводиться до визначення суми квадратів n перших натуральних чисел, кількість яких визначається кількістю поїздів на фідерній зоні.

Отже, формалізуючи завдання, отримуємо, що необхідно визначити суму ряду

$$S = 1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots = \sum_{i=1}^n i^2. \quad (2.22)$$

Як відомо, сума значень деякого полінома k -го ступеня для натуральних чисел від 1 до n виражається у вигляді полінома $k+1$ -го ступеня. Використовуючи метод невизначених коефіцієнтів, визначимо коефіцієнти полінома, тобто

$$S = \sum_{i=1}^n i^2 = A + Bn + Cn^2 + Dn^3. \quad (2.23)$$

Для знаходження 4-х невідомих необхідно скласти систему рівнянь для 4-х значень $n = 1, 2, 3, 4$ і розв'язати її.

$$\begin{aligned} n = 1: & A + B + C + D = 1; \\ n = 2: & A + 2B + 4C + 8D = 5; \\ n = 3: & A + 3B + 9C + 27D = 14; \\ n = 4: & A + 4B + 16C + 64D = 30. \end{aligned}$$

Застосуємо матричний метод розв'язання систем лінійних рівнянь. Для цього необхідно обчислити основний визначник системи Δ матриці, складеної з коефіцієнтів при невідомих A, B, C і D , і додаткові визначники матриць, Δ_A , Δ_B , Δ_C і Δ_D , і, складені шляхом заміни стовпця коефіцієнтів при певному невідомому стовпцем вільних членів. В результаті отримаємо такі матриці і значення визначників:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 \\ 1 & 3 & 9 & 27 \\ 1 & 4 & 16 & 64 \end{vmatrix} = 12; \quad \Delta_A = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 5 & 2 & 4 & 8 \\ 14 & 3 & 9 & 27 \\ 30 & 4 & 16 & 64 \end{vmatrix} = 0; \quad \Delta_B = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 5 & 4 & 8 \\ 1 & 14 & 9 & 27 \\ 1 & 30 & 16 & 64 \end{vmatrix} = 2;$$

$$\Delta_C = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 5 & 8 \\ 1 & 3 & 14 & 27 \\ 1 & 4 & 30 & 64 \end{vmatrix} = 6; \quad \Delta_D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 5 \\ 1 & 3 & 9 & 14 \\ 1 & 4 & 16 & 30 \end{vmatrix} = 4.$$

Отримаємо наступні коефіцієнти:

$$A = \frac{\Delta_A}{\Delta} = \frac{0}{12} = 0; \quad B = \frac{\Delta_B}{\Delta} = \frac{2}{12} = \frac{1}{6}; \quad C = \frac{\Delta_C}{\Delta} = \frac{6}{12} = \frac{1}{2}; \quad D = \frac{\Delta_D}{\Delta} = \frac{4}{12} = \frac{1}{3}.$$

Тоді вираз (2.23) набуде наступного вигляду

$$S = \sum_{i=1}^n i^2 = \frac{n}{6} + \frac{n^2}{2} + \frac{n^3}{3}. \quad (2.24)$$

З огляду на це отримаємо

$$r_{\text{екв.сх}} = r_0 L \frac{\frac{n^3}{3} + \frac{n^2}{2} + \frac{n}{6}}{n^3} = r_0 L \frac{2n^2 + 3n + 1}{6n^2}, \quad (2.25)$$

або

$$r_{\text{екв.сх}} = r_0 L \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2n} + \frac{1}{6n^2} \right). \quad (2.26)$$

Введемо коефіцієнт k_n що враховує кількість поїздів на міжпідстанційній зоні

$$k_n = \frac{1}{3} + \frac{1}{2n} + \frac{1}{6n^2} \quad (2.27)$$

Залежність коефіцієнта k_n від кількості поїздів на міжпідстанційній зоні (n) представлена на рис. 2.12

Тоді вираз (2.31) матиме наступний вигляд

$$r_{\text{екв.сх}} = r_0 L k_n \quad (2.28)$$

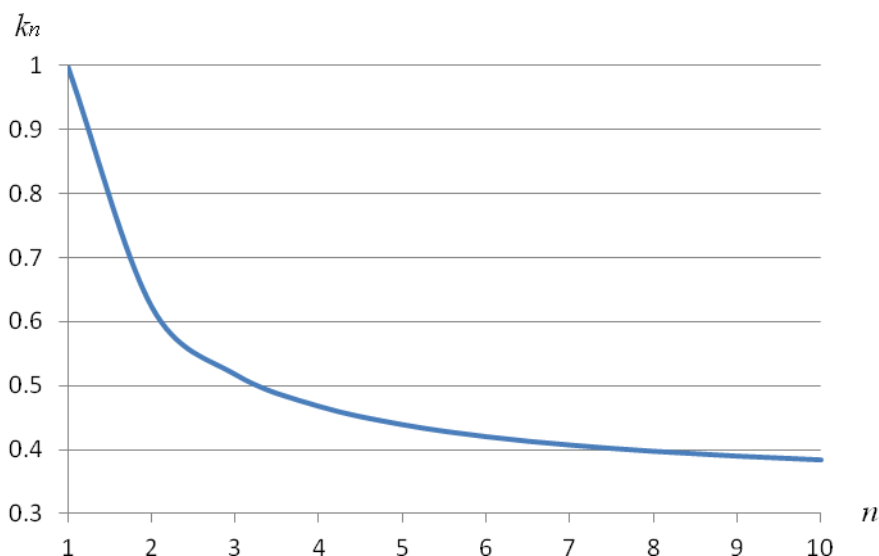


Рисунок 2.12 – Залежність коефіцієнта k_n від кількості поїздів на міжпідстанційній зоні

2.3 Принципи визначення коефіцієнта втрат з врахуванням швидкості та струму електрорухомого складу, температури нагрівання контактного проводу

Режим руху поїзда можна розділити на кілька фаз: розгін, усталений рух, вибіг, гальмування і стоянка. Режим ведення електровозу вибирається відповідно до розкладу та умов руху. Режимів руху поїзда в експлуатації може бути нескінченна безліч, так як вони визначаються багатьма факторами. Це профіль колії (підйом, ухил, площадка), порядок виведення пускових резисторів, втрати в тягових двигунах, розташування сигналів, сигнальних знаків та ін. На приміських ділянках неоднакові відстані між пунктами зупинок, стан колії, обмеження швидкості по стрілочних переводах, чистота рейок, показання сигналів, рівень напруги в контактній мережі, наповненість вагонів пасажирями, кліматичні умови, параметри обладнання електропоїзда, його регулювання та якість роботи і т. д. Всі ці та багато інших факторів впливають

на режим ведення поїзда, а отже, і на швидкість. Тому врахування всіх змін швидкості під час руху електрорухомого складу складна задача.

Для врахування впливу швидкості та струму на коефіцієнт втрат введемо коефіцієнти k_V та k_I які представляють собою відношення $r_{\text{екв}}$ при змінній швидкості (струмі фідера) до $r_{\text{екв}}$ при швидкості (струмі фідера), що не змінюється.

Запишемо $r_{\text{екв}}$ при змінній швидкості. Було введено визначення в загальному вигляді еквівалентного значення опору тягової мережі на періоді T (2.5). Замінімо у чисельнику виразу (2.5) $r(t)$ на добуток $r_0 \cdot x(t)$. Оскільки шлях пройдений точкою за проміжок часу від $t = a$ до $t = b$, дорівнює визначеному інтегралу від швидкості, то справедливий наступний вираз

$$r_{\text{екв}} = r_0 \frac{\int_0^T (\int_0^T V(t) dt) I_{\Phi}^2 dt}{\int_0^T I_{\Phi}^2 dt}. \quad (2.29)$$

Тоді k_V визначається відношенням (2.29) до (2.6)

$$k_V = \frac{\int_0^T (\int_0^T V(t) dt) dt}{\int_0^T \frac{L}{T} dt}. \quad (2.30)$$

Запишемо вираз (2.31) для визначення еквівалентного опору контактної мережі з урахуванням зміни швидкості руху електрорухомого складу

$$r_{\text{екв}} = r_0 V_{\text{ср}} T, \quad (2.31)$$

де $V_{\text{ср}}$ – середня дільнична швидкість.

Аналогічно отримаємо вираз для k_I

$$k_I = \frac{\int_0^T I_{\Phi}^2(t) dt}{\int_0^T I_{\Phi}^2(t) dt} \cdot \frac{I_{\Phi}^2 \int_0^T dt}{I_{\Phi}^2 \int_0^T dt} = \frac{I_e^2}{I_{\text{еф}}^2}, \quad (2.32)$$

де $I_{\text{еф}}$ – ефективний струм,

$$I_e = \sqrt{\frac{\int_0^T I_{\Phi}^2(t) dt}{\int_0^T dt}} = \sqrt{\frac{2 \int_0^T I_{\Phi}^2(t) dt}{T^2}}. \quad (2.33)$$

Обчислення еквівалентного струму (I_e) необхідно виконувати чисельним методом за допомогою виразу (2.33) для конкретної реалізації струму електровоза на ділянці.

Як приклад наведемо розрахунок еквівалентного струму для міжпідстанційної зони П-Р постійного струму.

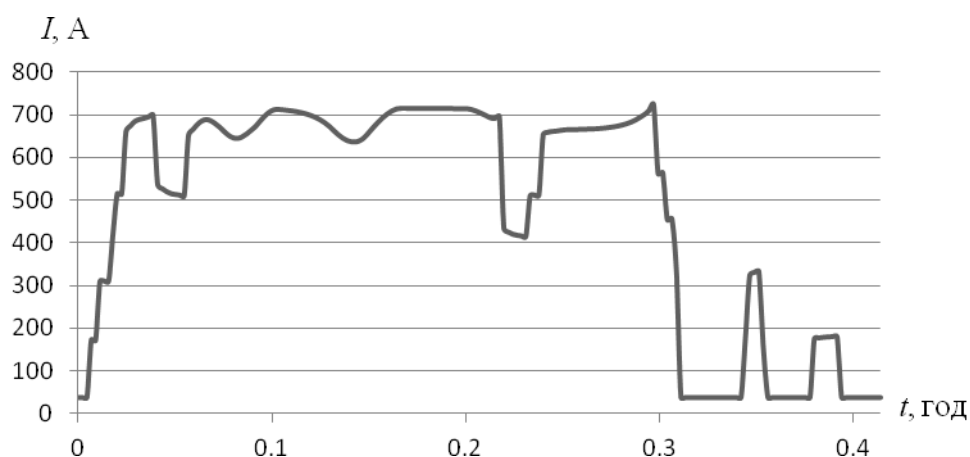


Рисунок 2.13 – Реалізація струму електровоза на ділянці П-Р

$$I_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 20851,4}{0,414^2}} = 492,5 \text{ А}.$$

Загальновідомо, що температура нагрівання контактної провідності впливає на його опір [94]. Температура провідності залежить від багатьох факторів. Вона змінюється під впливом температури навколишнього середовища. Провідник нагрівається від струму, що протікає по ньому та охолоджується вітром.

У наведених вище формулах не враховувалась зміна температури проводу, тому r_0 розглядалась як незмінна величина. Для знаходження r_0 в залежності від нагрівання контактного проводу запишемо рівняння теплового балансу для сталого режиму у загальному вигляді [96].

$$I_{\phi}^2 r_0 (1 + \alpha(t_{\text{пр}}^0 - 20)) + W_c = \pi d_{\text{пр}} (\beta_k + \beta_l)(t_{\text{пр}}^0 - t_{\text{н.с}}^0), \quad (2.34)$$

де I_{ϕ} – струм фідера, А;

r_0 – опір 1 м проводу при 20 °С, Ом/м;

α – температурний коефіцієнт опору проводу, 1/°С;

$t_{\text{пр}}^0$ – температура проводу, °С;

$t_{\text{н.с}}^0$ – температура зовнішнього середовища, °С;

β_k, β_l – коефіцієнти тепловіддачі проводу при конвективному і променистому теплообміні, Вт/(м·°С);

W_c – теплота сонячного випромінювання, що поглинається 1 м проводу в одиницю часу, Вт;

$d_{\text{пр}}$ – діаметр проводу, м.

Рівняння (2.34) можна спростити знехтувавши деякими складовими, а саме: випромінюванням, теплопровідністю та швидкістю вітру (так як середньорічна швидкість вітру по Україні не перевищує 4 м/с, тобто швидкість вітру практично не впливає на охолодження проводу). З огляду на вищесказане після деяких перетворень отримаємо наступний вираз

$$I^2 r_0 (1 + \alpha(t_{\text{пр}}^0 - 20)) = cS(t_{\text{пр}}^0 - t_{\text{н.с}}^0), \quad (2.35)$$

де c – коефіцієнт тепловіддачі;

S – площа поперечного перерізу проводу, мм².

Із рівняння (2.35) виразимо опір 1 м проводу

$$r_0 = \frac{cS(t_{\text{пр}}^0 - t_{\text{н.с}}^0)}{I^2(1 + \alpha(t_{\text{пр}}^0 - 20))}. \quad (2.36)$$

В свою чергу

$$t_{\text{пр}}^0 = \beta S(1 - e^{-\frac{t}{T^0}}) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T^0}}, \quad (2.37)$$

де t – час нагрівання;

T^0 – постійна нагрівання;

τ_0 – початкове перевищення температури проводу над температурою навколишнього середовища.

Зробимо припущення, що початкове перевищення температури проводу над температурою навколишнього середовища дорівнює нулю, тоді вираз (2.37) буде мати наступний вигляд

$$t_{\text{пр}}^0 = \beta S(1 - e^{-\frac{t}{T^0}}). \quad (2.38)$$

Підставивши (2.38) у (2.36) і взявши інтеграл від отриманого виразу по часу отримаємо k_t

$$k_t = \int_0^T \frac{cS(\beta S(1 - e^{-\frac{t}{T^0}}) - t_{\text{н.с}}^0) dt}{I^2 \left(1 + \alpha \left(\beta S(1 - e^{-\frac{t}{T^0}}) - 20 \right) \right)} dt \quad (2.39)$$

де T – час руху поїзда по розрахунковій зоні.

Так як коефіцієнт тепловіддачі, площа поперечного перерізу та струм не залежать від часу, то їх можна винести за знак інтегралу

$$k_t = \frac{cS}{I^2} \int_0^T \frac{\left[\beta S \left(1 - e^{-\frac{t}{T^0}} \right) - t_{\text{н.с}}^0 \right] dt}{\left[1 + \alpha \left(\beta S \left(1 - e^{-\frac{t}{T^0}} \right) - 20 \right) \right]} = \frac{cS}{I^2} \frac{\int_0^T \beta S \left(1 - e^{-\frac{t}{T^0}} \right) dt - \int_0^T t_{\text{н.с}}^0 dt}{\int_0^T dt + \alpha \int_0^T \left[\beta S \left(1 - e^{-\frac{t}{T^0}} \right) - 20 \right] dt} =$$

$$= \frac{cS}{I^2} \frac{\beta S \int_0^T \left(1 - e^{-\frac{t}{T^0}}\right) dt - t_{н.с}^0 \int_0^T dt}{\int_0^T dt + \alpha \left[\int_0^T \beta S \left(1 - e^{-\frac{t}{T^0}}\right) dt - \int_0^T 20 dt \right]} = \frac{cS}{I^2} \frac{\beta S \left(\int_0^T dt - \int_0^T e^{-\frac{t}{T^0}} dt \right) - t_{н.с}^0 T}{T + \alpha \left[\beta S \left(\int_0^T dt - \int_0^T e^{-\frac{t}{T^0}} dt \right) - 20T \right]}. \quad (2.40)$$

Після подальших перетворень отримаємо кінцеву формулу для визначення k_t

$$k_t = \frac{cS}{I^2} \frac{\beta S \left(T + T \left(e^{-\frac{T}{T^0}} - 1 \right) \right) - t_{н.с}^0 T}{T + \alpha \left[\beta S \left(T + T \left(e^{-\frac{T}{T^0}} - 1 \right) \right) - 20T \right]}. \quad (2.41)$$

Висновки до розділу 2

1. Запропоновані вирази для визначення миттєвих та еквівалентних опорів для різних схем живлення на основі яких встановлено, що миттєві опори для різних схем живлення однакові, а еквівалентні відрізняються на коефіцієнти (1/2 для консольної схеми живлення, 1/4 для двосторонньої та 1/2 та 2/11 для попутного та суміжного фідерів двосторонньої схеми).

2. На основі методу невизначених коефіцієнтів отримана залежність для визначення коефіцієнта втрат електроенергії, що враховує кількість поїздів на міжпідстанційній зоні.

3. Встановлено, що коефіцієнт втрат залежить від зносу контактних проводів обернено пропорційно.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ

Для визначення динаміки факторів, що впливають на втрати електроенергії в контактній мережі дослідимо закономірності зміни швидкості руху та кількості поїздів на міжпідстанційній зоні, проаналізуємо знос контактних проводів, зміну температури навколишнього середовища та струм електрорухомого складу.

На рис. 3.1 та рис. 3.2 приведені дослідні ділянки постійного струму Придніпровської залізниці (контактний провід 2МФ-100) та змінного струму Одеської залізниці (контактний провід МФ-100).

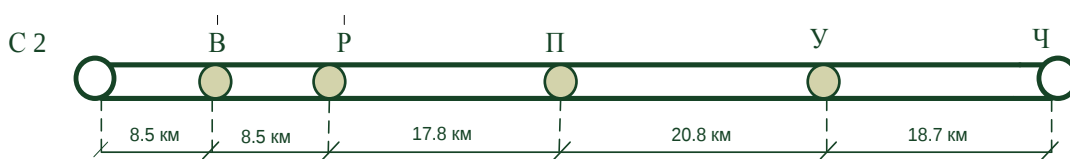


Рисунок 3.1 – Схема ділянки Чаплине - Синельникове 2 Придніпровської залізниці

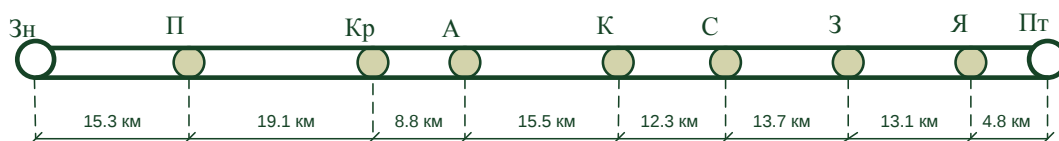


Рисунок 3.2 – Схема ділянки Знам'янка - П'ятихатки Одеської залізниці

3.1 Визначення закономірностей зміни швидкості руху та аналіз кількості поїздів на міжпідстанційній зоні

Для визначення закономірностей зміни швидкості руху та кількості поїздів на міжпідстанційних зонах проаналізуємо виконані графіки руху ділянок Чаплине - Синельникове 2 Придніпровської залізниці та Знам'янка - П'ятихатки Одеської залізниці за тиждень (табл. А.1 додатку).

На основі табл. А.1 додатку обчислимо середню дільничну швидкість на міжпідстанційних зонах Зн-П, П-Кр, Кр-А, А-К, К-С, С-З, З-Я, Я-Пт (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Фрагмент середніх швидкостей поїздів на міжпідстанційних зонах Одеської залізниці

№ поїзда п/п	Міжпідстанційна зона							
	Зн-П	П-Кр	Кр-А	А-К	К-С	С-З	З-Я	Я-Пт
1	91.80	47.75	44.00	46.50	52.71	48.35	87.33	32.00
2	41.73	95.50	66.00	31.00	12.95	91.33	98.25	12.00
3	83.45	81.86	75.43	62.00	73.80	74.73	78.60	57.60
4	70.62	88.15	40.62	58.12	61.50	63.23	49.12	57.60
5	57.38	52.09	88.00	27.35	23.81	13.70	78.60	24.00
6	54.00	44.08	44.00	35.77	92.25	74.73	56.14	28.80
7	45.90	95.50	88.00	93.00	73.80	37.36	41.37	24.00
8	45.90	20.11	44.00	51.67	25.45	34.25	37.43	26.18
9	48.32	57.30	37.71	32.07	30.75	48.35	52.40	19.20
10	35.31	19.76	44.00	84.55	23.06	91.33	32.75	28.80
11	32.79	54.57	40.62	48.95	49.20	63.23	71.45	57.60
12	83.45	52.09	40.62	44.29	56.77	54.80	49.13	28.80
13	91.80	54.57	37.71	51.67	49.20	58.71	60.46	36.00

Аналогічний аналіз проведений для ділянки Ч - С2 Придніпровської залізниці. Прослідкуємо зміну швидкості поїздів на міжпідстанційних зонах Ч-У, У-П, П-Р, Р-В, В-С2. (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Фрагмент середніх швидкостей поїздів на міжпідстанційних зонах Придніпровської залізниці

№ поїзда п/п	Міжпідстанційна зона				
	Ч-У	У-П	П-Р	Р-В	В-С2
1	74.80	96.00	89.00	63.75	42.50
2	86.31	37.82	76.29	51.00	25.50
3	66.00	31.20	96.80	70.00	55.00
4	37.40	83.20	56.21	56.67	25.50
5	59.05	73.41	46.43	36.43	31.88
6	48.78	62.40	62.82	39.23	22.17
7	74.80	39.00	46.43	72.86	18.21
8	74.80	26.00	98.67	39.23	51.00
9	74.80	49.92	71.20	42.50	22.17
10	112.20	83.20	71.20	51.00	102.00
11	62.33	56.73	71.20	51.00	10.20
12	37.40	56.73	53.40	39.23	28.33
13	34.00	29.71	106.80	51.00	170.00

На рис.3.3 наведено гістограму розподілу швидкостей поїздів на міжпідстанційних зонах Одеської залізниці на рис. 3.4 – на міжпідстанційних зонах Придніпровської залізниці. Розрахунки проведені в пакеті Crystal Ball.

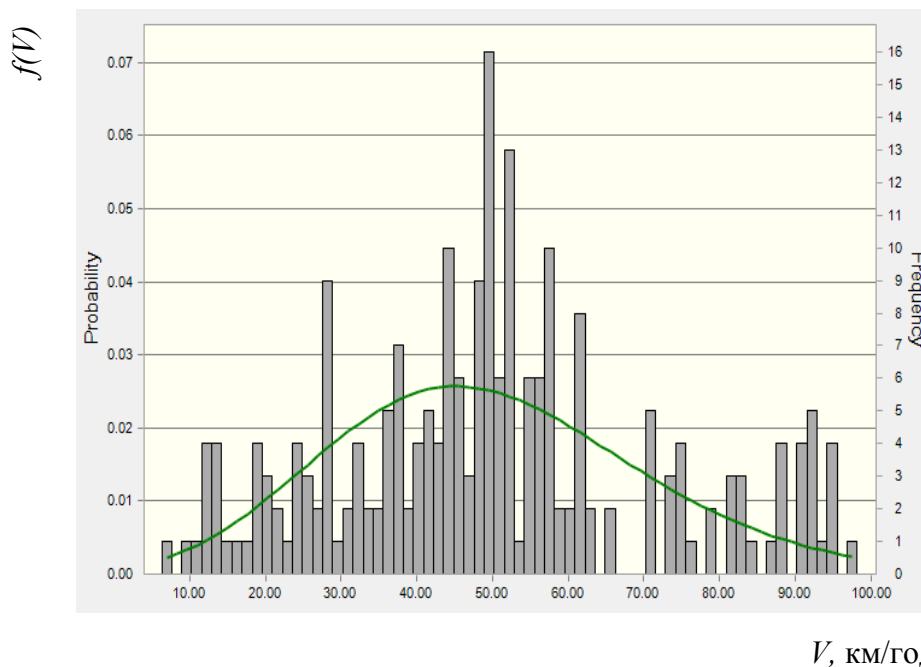


Рисунок 3.3 – Гістограма розподілу швидкостей поїздів на міжпідстанційних зонах Одеської залізниці

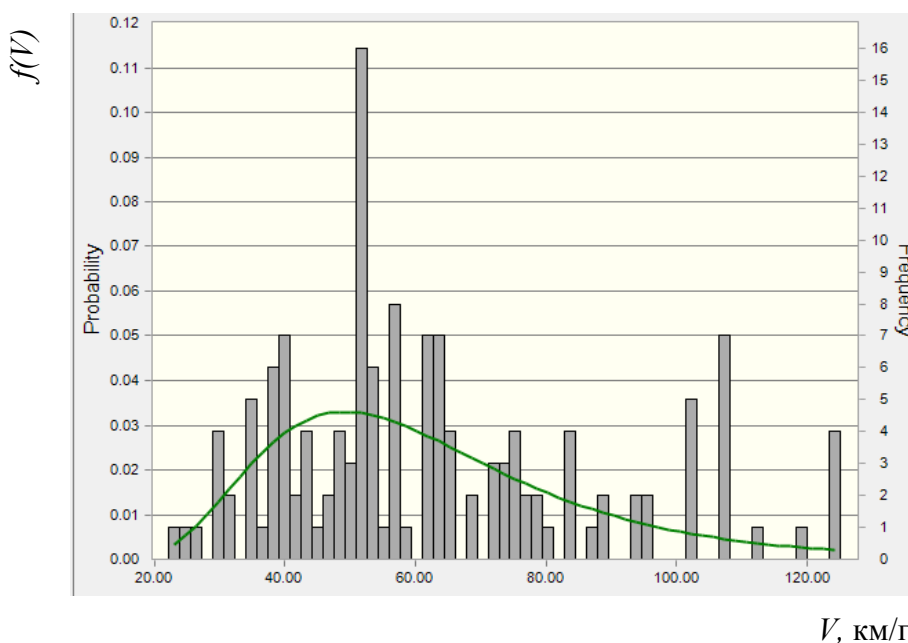


Рисунок 3.4 – Гістограма розподілу швидкостей поїздів на міжпідстанційних зонах Придніпровської залізниці

За результатами статистичних досліджень виявлено, що швидкості поїздів

на міжпідстанційних зонах підпорядковується логнормальному розподілу. Отримані наступні характеристики випадкових величин розподілу швидкостей поїздів на міжпідстанційних зонах табл. 3.3

Таблиця 3.3 – Характеристики розподілу швидкостей поїздів на міжпідстанційних зонах, км/год

Математичне очікування μ	Медіана Me	Мода Mo	Середнє квадратичне очікування, σ	Дисперсія D	Асиметрія γ_1	Експес γ_2	Коефіцієнт варіації V
Одеська залізниця							
49,87	48,32	45,27	21,24	451,29	0,44	3,36	0,42
Придніпровська залізниця							
62,77	57,81	49,13	25,57	653,71	1,42	6,81	0,407

Проаналізуємо виконані графіки руху та обчислимо кількості поїздів на міжпідстанційних зонах А-К Одеської залізниці (табл. 3.4) та Ч - У Придніпровської залізниці (табл. 3.5) за тиждень з кроком в 1 год.

Таблиця 3.4 – Кількість поїздів на міжпідстанційній зоні А-К Одеської залізниці

дата	час																							
	05.00-06.00	06.00-07.00	07.00-08.00	08.00-09.00	09.00-10.00	10.00-11.00	11.00-12.00	12.00-13.00	13.00-14.00	14.00-15.00	15.00-16.00	16.00-17.00	17.00-18.00	18.00-19.00	19.00-20.00	20.00-21.00	21.00-22.00	22.00-23.00	23.00-24.00	24.00-01.00	01.00-02.00	02.00-03.00	03.00-04.00	04.00-05.00
07	3	4	7	5	6	6	5	6	2	5	7	6	1	5	2	1	2	3	2	7	2	5	8	3
08	2	4	6	4	4	3	4	2	3	4	7	5	2	6	6	4	1	4	6	5	6	2	6	2
09	6	2	2	5	4	4	3	2	1	6	2	6	6	7	5	4	2	1	3	2	4	3	7	6
10	2	8	5	6	4	7	4	5	3	3	4	8	2	4	3	1	5	4	3	6	5	4	4	2
11	4	3	7	3	2	5	8	5	7	7	8	7	6	4	4	2	3	4	1	3	7	2	6	4
12	6	5	2	6	6	3	4	2	5	3	2	4	5	2	5	6	2	2	6	4	6	4	8	6
13	8	6	5	4	3	2	6	2	4	4	3	5	6	4	6	2	2	7	5	6	3	2	7	8

Таблиця 3.5 – Кількість поїздів на міжпідстанційній зоні Ч-У Придніпровської залізниці

дата	час																							
	05.00-06.00	06.00-07.00	07.00-08.00	08.00-09.00	09.00-10.00	10.00-11.00	11.00-12.00	12.00-13.00	13.00-14.00	14.00-15.00	15.00-16.00	16.00-17.00	17.00-18.00	18.00-19.00	19.00-20.00	20.00-21.00	21.00-22.00	22.00-23.00	23.00-24.00	24.00-01.00	01.00-02.00	02.00-03.00	03.00-04.00	04.00-05.00
01	3	6	3	7	1	4	3	5	5	3	3	4	2	3	3	3	6	3	5	2	1	2	5	5
02	0	2	1	2	2	2	4	0	2	4	4	2	2	2	4	2	6	3	4	5	5	2	5	9
03	4	4	1	2	3	4	3	4	4	4	3	8	1	3	3	3	4	1	3	3	1	1	4	9
04	5	2	3	6	4	1	4	2	3	7	3	7	2	2	3	3	4	1	6	3	2	6	5	7
05	2	5	1	4	1	2	6	3	4	4	4	6	1	3	3	2	3	2	6	5	2	4	6	6
06	4	2	0	4	3	2	4	1	3	5	3	8	4	3	3	3	4	3	5	3	5	5	3	6
07	7	6	0	4	4	2	3	4	3	4	4	8	3	2	2	2	5	3	2	6	3	3	6	5

На рис. 3.5 наведено гістограму розподілу кількості поїздів на міжпідстанційній зоні А-К Одеської залізниці, на рис. 3.6 – на міжпідстанційній зоні Ч-У Придніпровської залізниці.

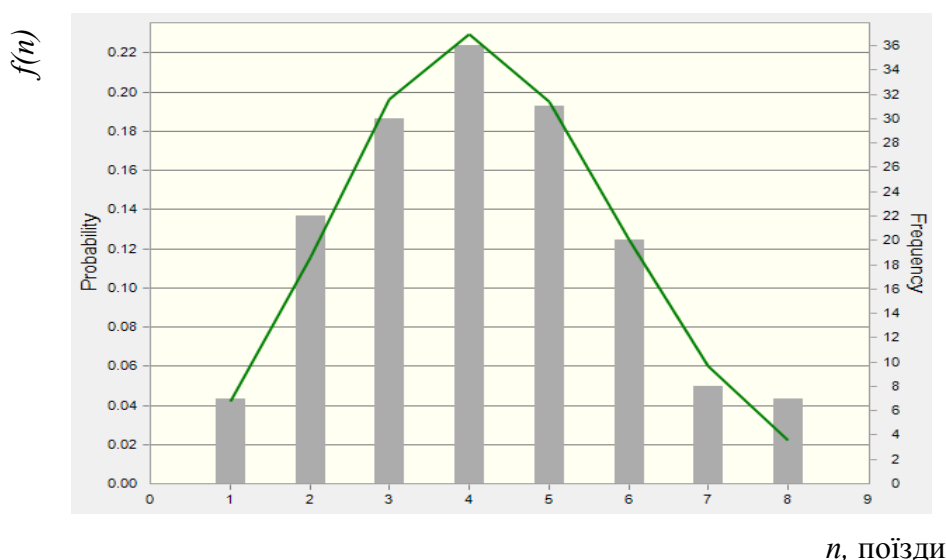


Рисунок 3.5 – Гістограма розподілу кількості поїздів на міжпідстанційній зоні А-К Одеської залізниці

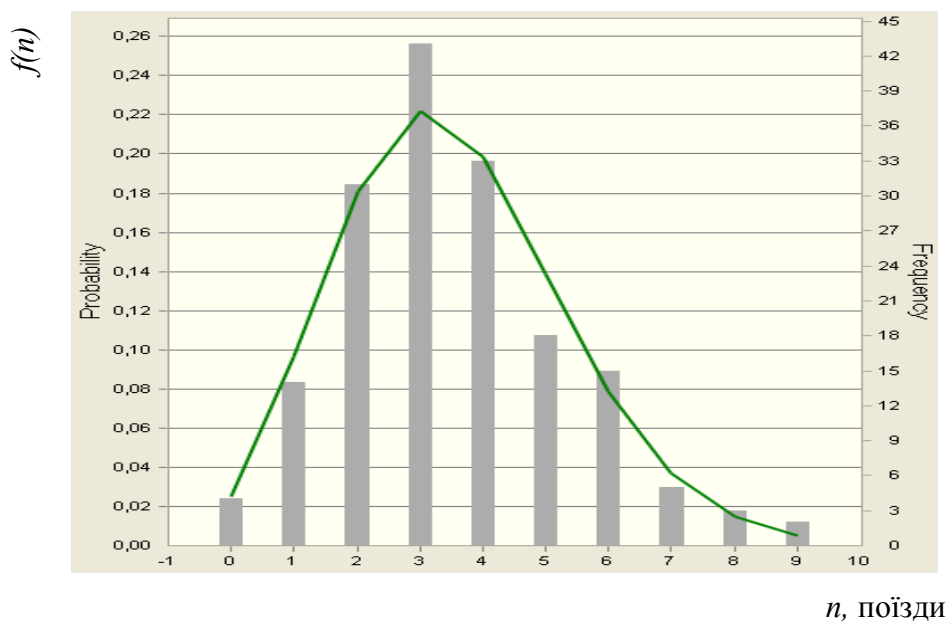


Рисунок 3.6 – Гістограма розподілу кількості поїздів на міжпідстанційній зоні Ч-У Придніпровської залізниці

Виконані дослідження показали, що кількість поїздів на міжпідстанційній зоні підпорядковується біноміальному розподілу (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Характеристики розподілу кількості поїздів на міжпідстанційних зонах, поїзди

Математичне очікування μ	Медіана Me	Мода Mo	Середнє квадратичне очікування, σ	Дисперсія D	Асиметрія γ_1	Екссес γ_2	Коефіцієнт варіації V
Одеська залізниця							
4,17	4,00	4,00	1,71	2,93	0,23	2,91	0,41
Придніпровська залізниця							
3,54	3,00	4,00	1,80	3,24	0,46	3,17	0,50

3.2 Дослідження зносу контактних проводів, зміни температури навколишнього середовища та струму електрорухомого складу

Проаналізуємо журнали стану контактного проводу в ЕЧК для ділянок Одеської та Придніпровської (табл. Б.1 додатку) залізниць. Обчислимо залишкову висоту контактних проводів представлених ділянок (додаток Б). За таблицями [95] визначимо середній знос контактних проводів (табл. Б.2 додаток, рис. 3.7 та рис. 3.8).

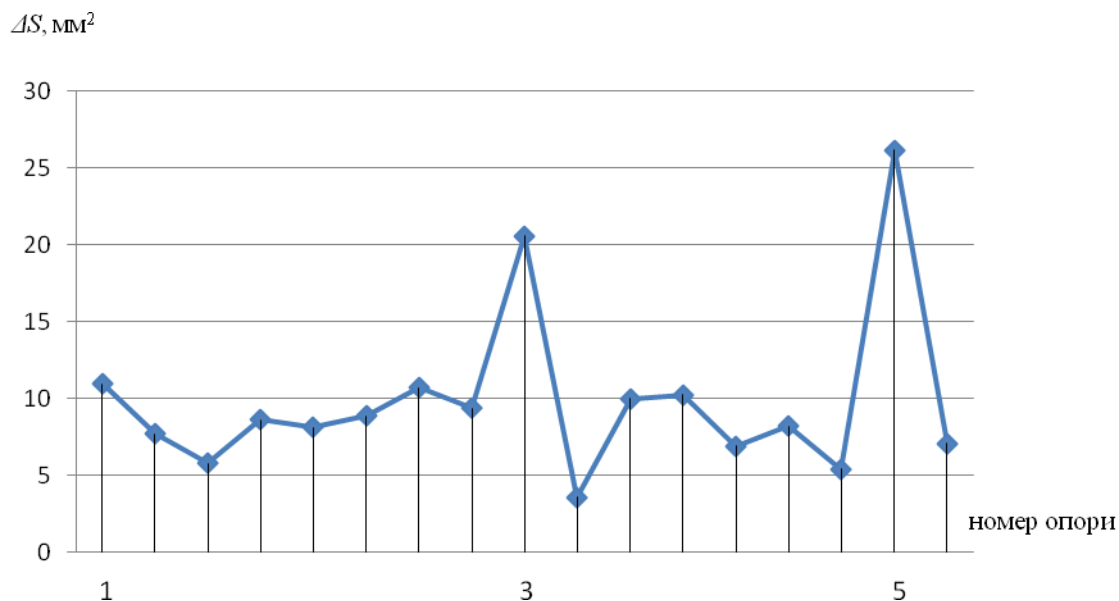


Рисунок 3.7 – Фрагмент зношування контактних проводів ділянки Одеської залізниці



Рисунок 3.8 – Фрагмент зношування контактних проводів ділянки Придніпровської залізниці (правий та лівий провід)

На рис. 3.9 наведено гістограму розподілу зносу контактних проводів для ділянок Одеської залізниці, а на рис. 3.10 – для ділянок Придніпровської залізниці. Розрахунки проведені в пакеті Crystal Ball.

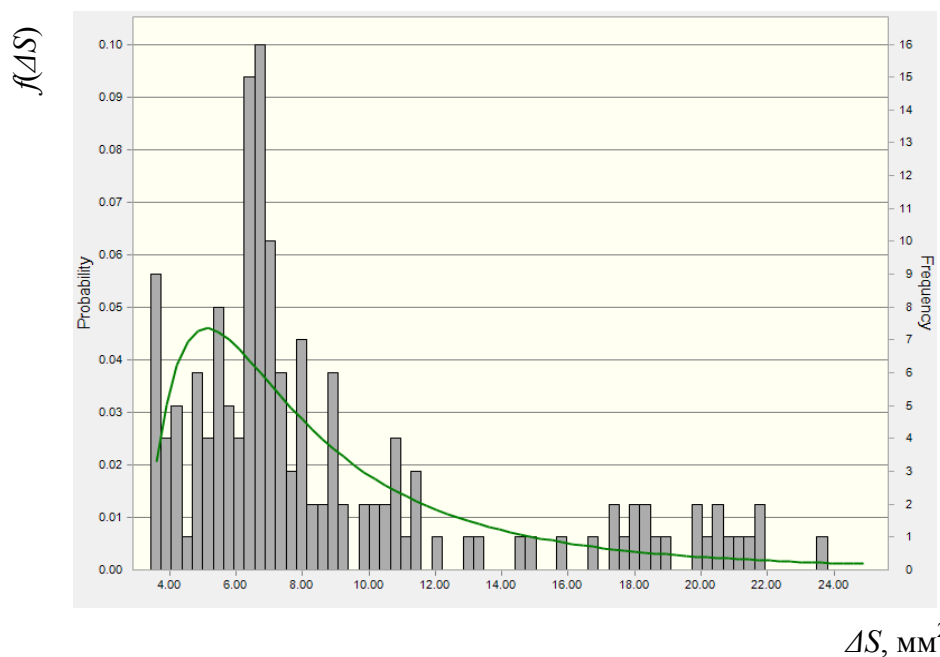


Рисунок 3.9 – Гістограма розподілу середнього зносу контактних проводів для ділянок Одеської залізниці

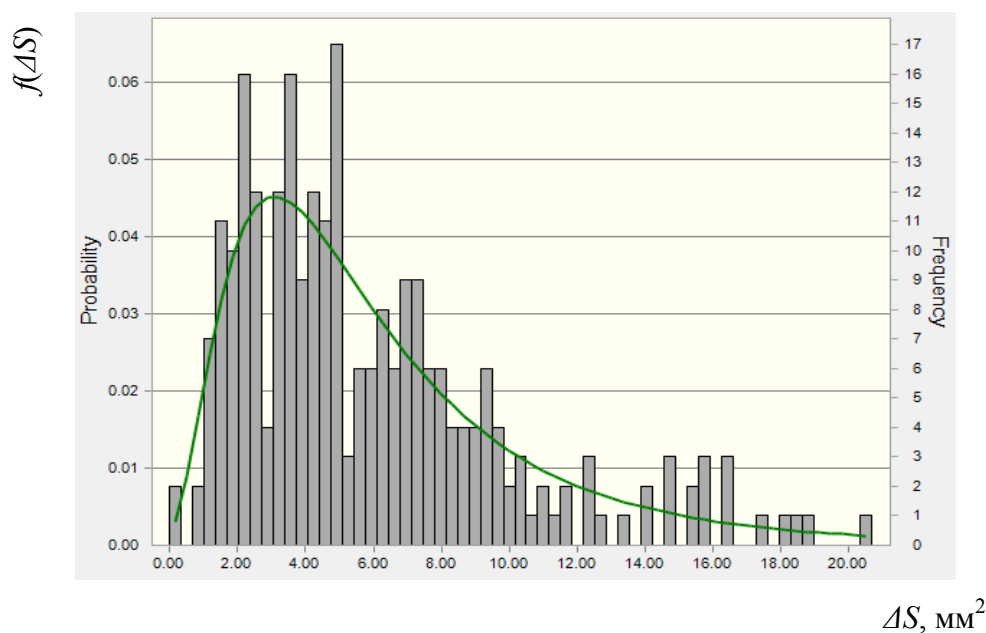


Рисунок 3.10 – Гістограма розподілу середнього зносу контактних проводів для ділянок Придніпровської залізниці

За результатами статистичних досліджень виявлено, що знос контактних проводів підпорядковується логнормальному розподілу. В табл. 3.7 представлені характеристики розподілу зносу контактних проводів.

Таблиця 3.7 – Характеристики розподілу середнього зносу контактних проводів, мм²

Математичне очікування μ	Медіана Me	Мода Mo	Середнє квадратичне очікування, σ	Дисперсія D	Асиметрія γ_1	Експес γ_2	Коефіцієнт варіації V
Одеська залізниця							
9,30	7,40	5,10	6,50	42,19	3,98	40,59	0,64
Придніпровська залізниця							
6,36	5,03	3,08	5,08	26,76	2,55	16,47	0,79

Для дослідження зміни температури на розрахунковій зоні проаналізуємо щоденники погоди за кожен день 2011 року. (додаток Б, рис. Б1-Б4) Обчислимо середньомісячні температури та побудований розподіл по місяцям 2011 року.

На рис. 3.11 наведено гістограму розподілу зміни температури за 2011 рік в Кіровоградській області, а на рис. 3.12 – в Дніпропетровській області. Розрахунки проведені в пакеті Crystal Ball.

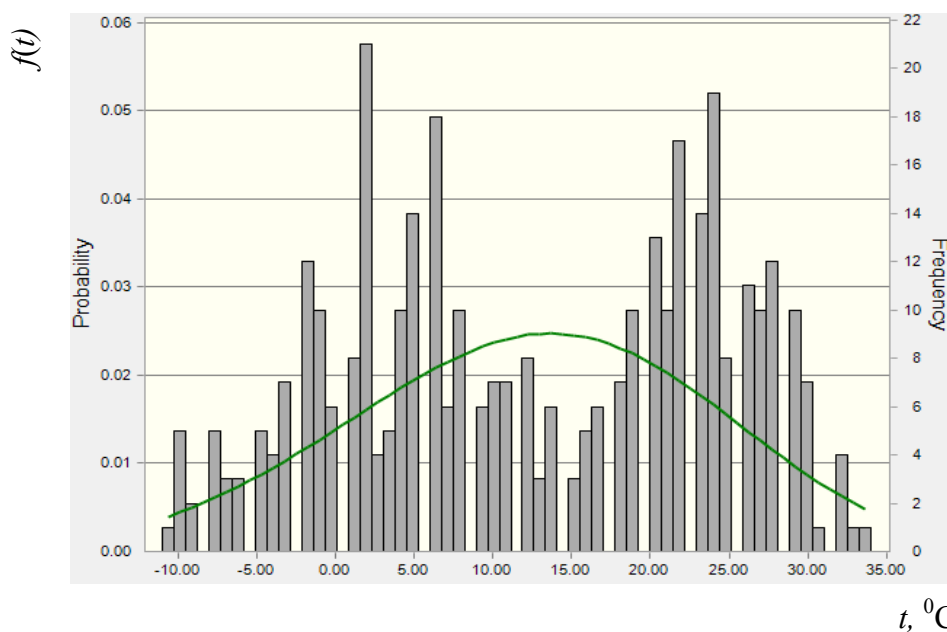


Рисунок 3.11 – Гістограма розподілу зміни температури в Кіровоградській області

За результатами статистичних досліджень виявлено, що зміна температури підпорядковується розподілу Вейбула. В табл. 3.8 отримані наступні характеристики випадкових величин розподілу зміни температури.

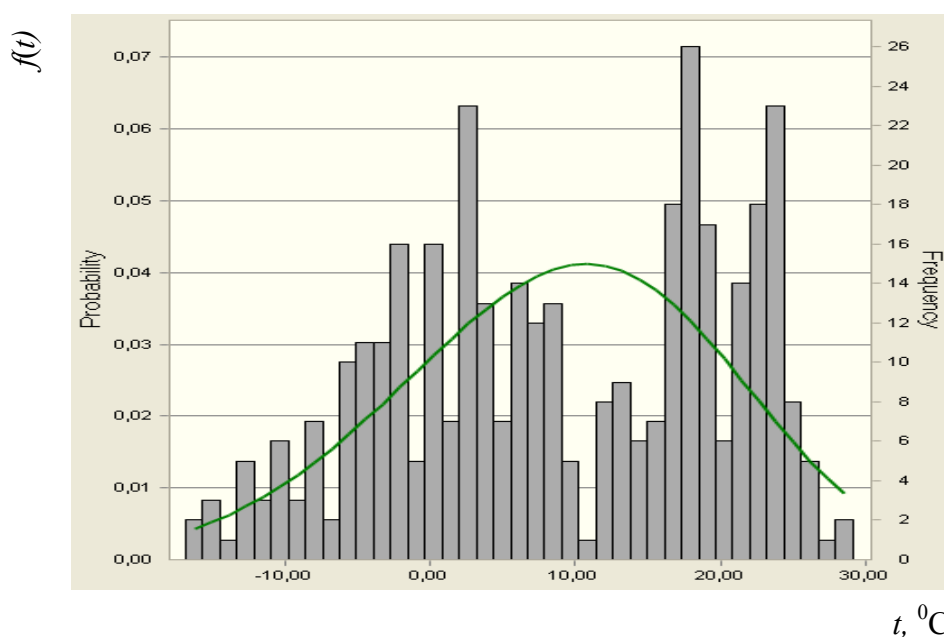


Рисунок 3.12 – Гістограма розподілу зміни температури
В Дніпропетровській області

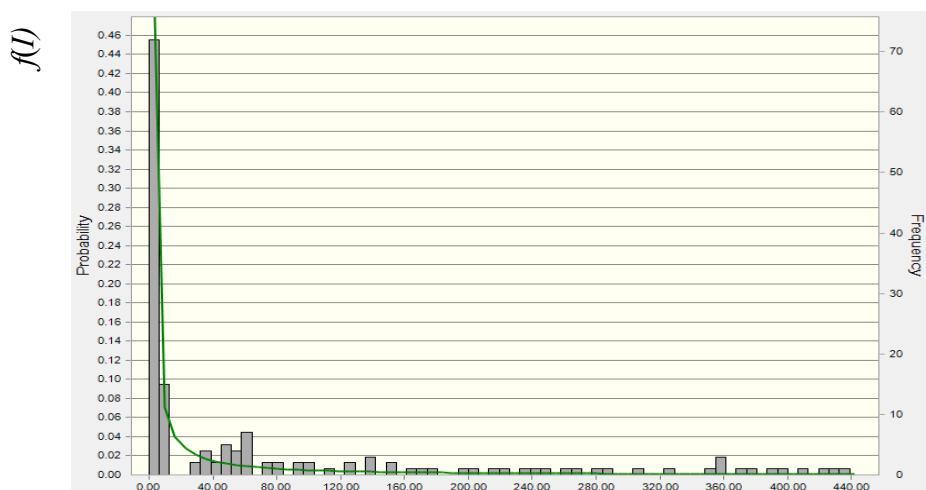
Таблиця 3.8 – Характеристики випадкових величин розподілу зміни температури, $^{\circ}\text{C}$

Математичне очікування μ	Медіана Me	Мода Mo	Середнє квадратичне очікування, σ	Дисперсія D	Асиметрія γ_1	Експес γ_2	Коефіцієнт варіації V
Одеської залізниці							
12,51	12,80	13,65	11,56	133,59	-0.093	2,75	0,92
Придніпровської залізниці							
8,92	9,43	10,71	11,21	125,77	-0,209	2,83	1,26

Проаналізуємо зміну струму поїзда за результатами тягових розрахунків.

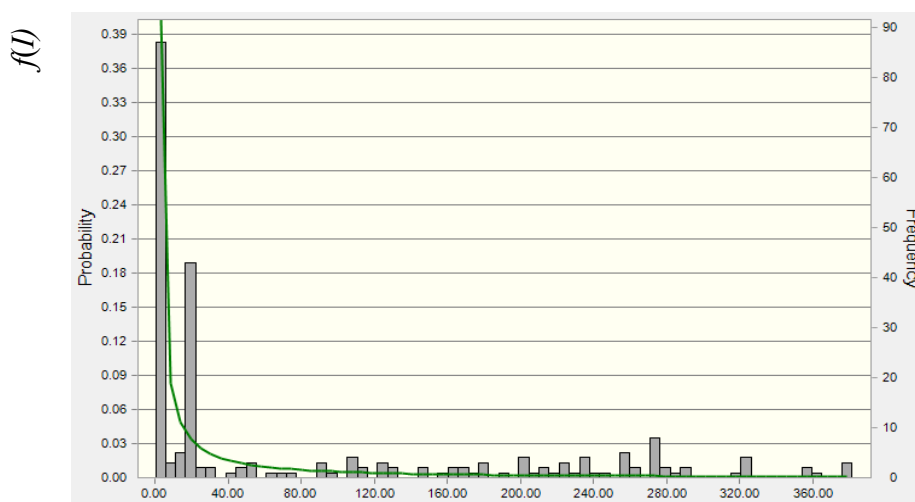
На рис. 3.13 наведено гістограму розподілу струму поїзда для ділянки постійного струму, а на рис. 3.14 для ділянки змінного струму. Розрахунки проведені в пакеті Crystal Ball.

За результатами статистичних досліджень виявлено, що зміна струму ЕРС підпорядковується логнормальному розподілу (табл. 3.9).



I, A

Рисунок 3.13 – Гістограма розподілу струму поїзда для ділянки постійного струму



I, A

Рисунок 3.14 – Гістограма розподілу струму поїзда для ділянки змінного струму

Таблиця 3.9 – Характеристики розподілу струму поїзда, А

Математичне очікування μ	Медіана Me	Мода Mo	Середнє квадратичне очікування, σ	Дисперсія D	Асиметрія γ_1	Експес γ_2	Коефіцієнт варіації V
Одеська залізниця							
2599,91	10,80	0	624552,60	$390,00 \cdot 10^9$	$1,39 \cdot 10^7$	$1,12 \cdot 10^{19}$	240,50
Придніпровська залізниця							
9204,64	5,28	0	16044866,70	$2,57,00 \cdot 10^{12}$	$5,2 \cdot 10^9$	$8,50 \cdot 10^{25}$	1743,13

3.3 Аналіз динаміки зміни «умовних» втрат електричної енергії в контактній мережі

Для електрифікованих залізниць властивий специфічний вид втрат – «умовні» втрати, на які не рідко списують всі недоліки у використанні енергетичних ресурсів різними службами та підрозділами залізниць. «Умовні» втрати в контактній мережі визначаються порівнянням витрати електроенергії за показниками лічильників електровозів і витратою електроенергії по тяговим підстанціям.

Проведемо аналіз динаміки зміни «умовних» втрат електричної енергії в контактній мережі за даними Одеської залізниці [7] На рис. 3.15 представлено динаміку фактичних та планових «умовних» втрат.

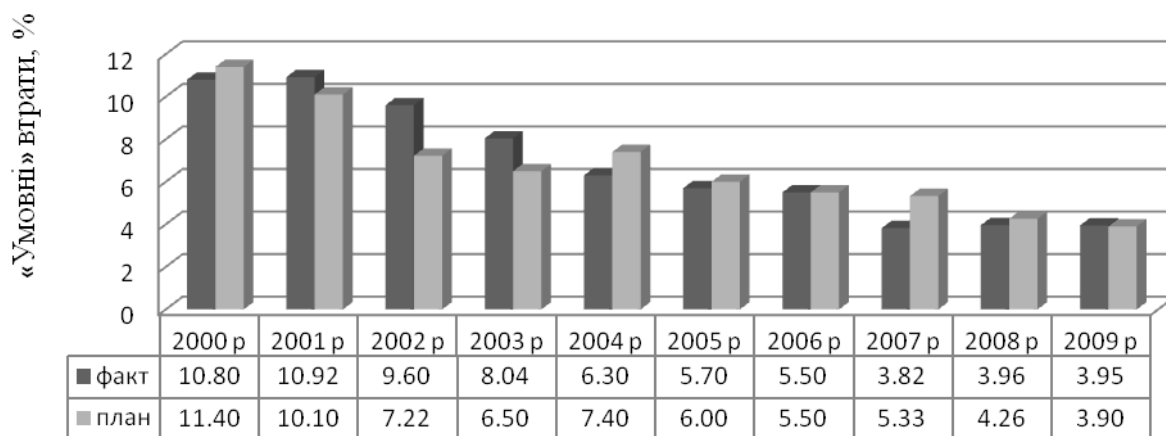


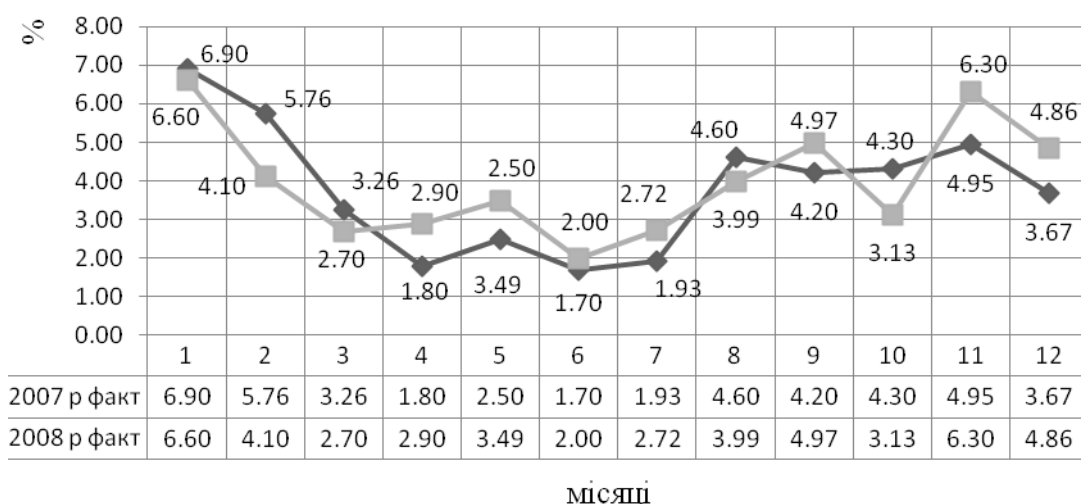
Рисунок 3.15 – «Умовні» втрати електроенергії в тяговій мережі за 2000 – 2009 рр.

Як бачимо з 2001 по 2003 та в 2009р. фактичні «умовні» втрати перевищували заплановані. «Умовні» втрати мають сезонний характер зміни. Знання їх закономірностей дозволяє їх нормувати, прогнозувати об'єм споживання енергії. Проте точність прогнозування низька. Однією з причин є непостійність споживання електроенергії. Проаналізуємо динаміку зміни «умовних» втрат по місяцям за 9 років. Із таблиці 3.10 видно, що «умовні» втрати в холодну пору року в порівнянні з теплим періодом істотно підвищуються.

Таблиця 3.10. – «Умовні» втрати електроенергії в тяговій мережі за 2002 - 2009 роки в порівнянні з планом

місяць	%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	рік, факт/план
рік														
2002 р	факт	14,18	8,74	8,62	4,57	7,46	4,56	8,25	5,83	5,80	2,10	8,30	7,91	9,60
	план	12,50	11,50	10,50	9,40	9,30	9,36	8,50	8,00	10,50	8,30	8,40	8,80	7,22
2003 р	факт	9,12	11,47	5,76	9,28	6,79	5,59	7,30	5,13	9,10	7,69	10,29	8,96	8,04
	план	7,80	7,50	7,20	6,00	5,80	5,00	6,40	6,40	7,00	5,90	5,90	6,20	6,43
2004 р	факт	13,30	9,81	3,98	3,40	4,00	4,43	5,70	3,40	5,40	6,20	8,80	7,47	6,32
	план	8,50	8,00	7,50	7,50	7,00	6,50	6,60	6,60	6,50	7,80	8,00	8,20	7,39
2005 р	факт	6,89	8,83	6,91	5,27	4,01	5,66	2,50	3,27	6,30	4,30	8,50	6,35	5,73
	план	9,00	8,50	8,00	4,00	4,00	3,90	4,20	4,20	5,40	6,80	7,00	7,20	6,02
2006 р	факт	10,35	5,80	5,60	3,70	4,20	5,20	3,98	3,98	6,20	6,10	5,90	5,80	5,50
	план	8,00	7,30	6,60	5,00	4,50	4,00	4,00	4,00	4,00	6,00	6,00	6,30	5,50
2007 р	факт	6,90	5,76	3,26	1,80	2,50	1,70	1,93	4,60	4,20	4,30	4,95	3,67	3,82
	план	8,00	7,30	5,70	4,30	4,30	4,30	4,40	4,40	4,70	5,00	5,00	6,40	5,33
2008 р	факт	6,60	4,10	2,70	2,90	3,49	2,00	2,72	3,99	4,97	3,13	6,30	4,86	3,96
	план	5,00	5,00	5,00	4,40	4,40	4,10	3,50	3,50	3,70	4,10	4,10	4,40	4,26
2009 р	факт	5,06	6,00	4,13	5,60	1,87	2,34	1,56	2,80	4,40	5,20	7,80	6,47	4,75
	план	4,80	4,40	4,00	2,80	2,80	6,30	2,72	2,30	4,50	6,80	7,00	6,20	5,03

Проаналізуємо помісячні «умовні» втрати за два роки (рис. 3.16)



Рис

унок 3.16 – «Умовні» втрати електроенергії в тяговій мережі за
2007 – 2008 рр.

Єдиною причиною виникнення сезонної зміни питомих втрат називають підвищення опору руху в холодну пору року. Проте динаміка реальних

показників споживання енергії потоком поїздів, в першу чергу, невідповідність сезонного ходу змінам температури, це твердження спростовує.

Дослідження підтвердили припущення, що причинами посиленої сезонної зміни служать особливості формування об'ємів споживання енергії, властиві залізничній магістралі, а саме:

- від контактної мережі живиться не тільки електрорухомий склад на лінії, але і електровози, які знаходяться у відстої. Крім того, частина енергії йде на технологічні потреби депо і інших підрозділів;

- зміна характеру потоку поїздів. У окремі періоди співвідношення роботи, що виконується локомотивами з навантаженими і порожніми поїздами, збільшується на користь навантажених. Різниця в їх питомих витратах досягає 2-2,5 рази. Якщо підвищення відносної частки роботи навантажених відбувається в літній час, то це викликає зниження питомої витрати по потоку поїздів в цілому і, отже, збільшення сезонної зміни. На рис. 3.17 приведена динаміка фактичних «умовних» втрат за період 1965 – 1971р.р. та 1996 – 2008 рр.

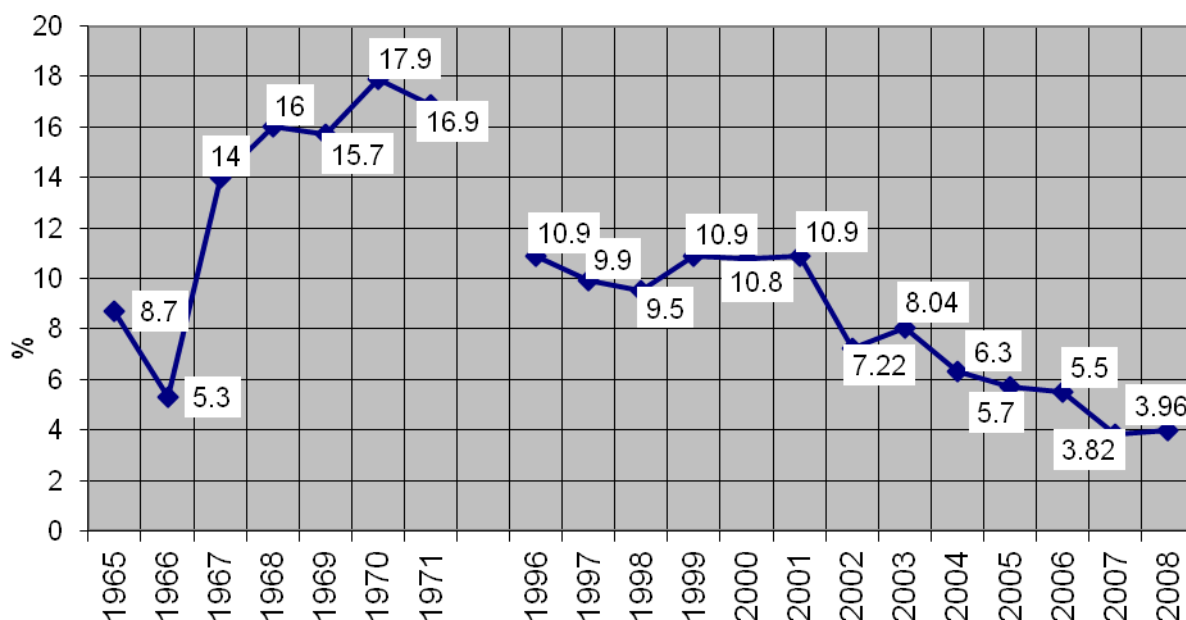


Рисунок 3.17 – Фактичні «умовні» втрати в тяговій мережі за період 1965 – 1971рр. та з 1996 по 2008

Аналіз споживання електроенергії по тяговим підстанціям Одеської залізниці показав, що споживання на тягових підстанціях в перехідний період

від літа до зими збільшується на 10-12 %. Близько 2 % з них викликані об'ємами енергії, які йдуть на обігрів пасажирських поїздів на шляху слідування. Сезонне збільшення втрат, зафіксоване лічильниками ЕРС, не перевищило 6-7 %. Отже, сезонна зміна споживання на тягових підстанціях на 2-4 % [7] перевищує аналогічну величину, визначену по лічильниках локомотивів.

Як з'ясували, сезонна зміна споживання електроенергії на тягу навантажених поїздів складає 5-6 %, порожніх 12-17 %. Вплив температури на втрату порожніми поїздами відомий. Відносна зміна опору руху при впливі одного і того ж чинника більше для вагонів, які характеризуються малим навантаженням на вісь.

Порівняємо фактичні «умовні» втрати електроенергії в тяговій мережі з плановими за 2005 р. (рис. 3.18).

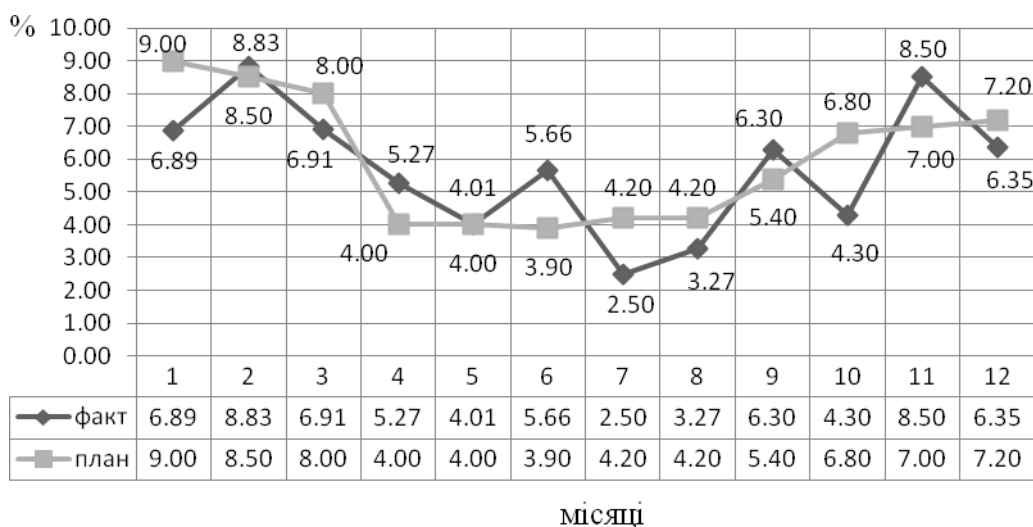


Рисунок 3.18 – Порівнювальна діаграма «умовних» втрат в контактній мережі (план/факт) 2005 р.

Графіки зміни «умовних» втрат в різні періоди зазнають значні відхилення від очікуваних. Так, в літній час щорічно спостерігається підвищена витрата для поїздів парного напрямку. Деякі місяці характеризуються скачками показника питомого споживання.

Причиною вказаних відхилень, окрім співвідношення частки навантажених і порожніх поїздів, є зміна умов пропуску потоку поїздів. У

літній час спостерігається ускладнення роботи через зростання вантажопотоку, вичерпання резервів пропускної спроможності. Крім того, влітку великий об'єм колійних ремонтних робіт і, відповідно, вікон. Дільнична швидкість в цей період знижується, і питома витрата енергії зростає.

Значення питомої витрати по групі поїздів, які обслуговуються локомотивами однієї серії, істотно залежить від фактичного розподілення складових виконаної роботи залежно від навантаження на вісь вагону. Якщо більшість навантажених має масу, близько до уніфікованої, питома витрата відповідає номінальному навантаженню 23 т/вісь. Для поїздів з легковажними вантажами показник навантаження знижується, питома витрата енергії росте. Номінальне навантаження для порожніх поїздів дорівнює 7 т/вісь.

Розглянемо залежність «умовних» втрат від об'єму перевезень у 2008 р. (рис. 3.19).

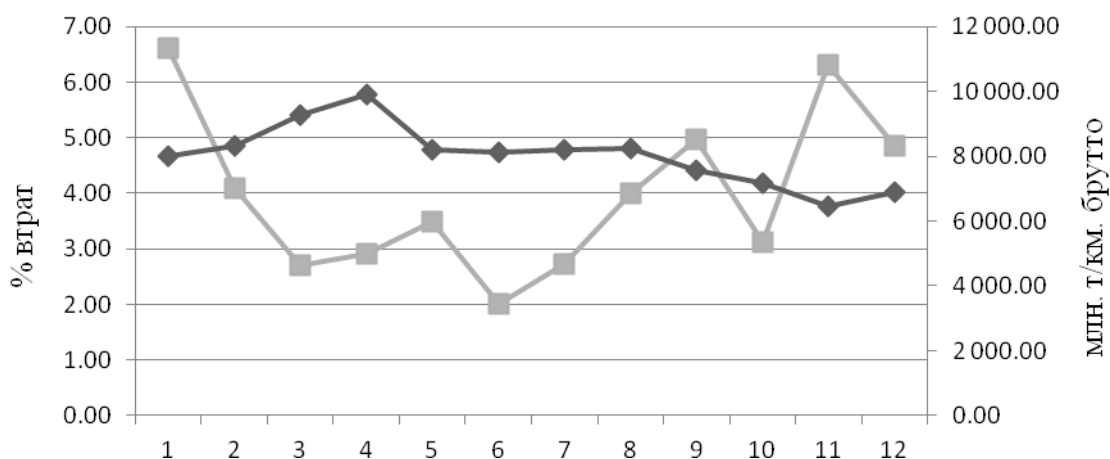


Рисунок 3.19 – Залежність «умовних» втрат в тязі від виконаної роботи за 2008 р.

Нижча питома витрата енергії в літній час групи стандартних парних поїздів в порівнянні з витратою всіх вантажних пояснюється тим, що на дистанції спостерігається зменшення долі поїздів з неповною загрузкою вагонів.

Подальші дослідження показали, що відбір енергії з контактної мережі для нетягових споживачів впливає на сезонні коливання і порівняний з впливом

вагового чинника. Дані, отримані при проведенні енергетичного обстеження електротяги, показують, що показник витрат зафіксований на тягових підстанціях, в зимовий час обтяжений інтенсивним споживанням по фідерах контактної мережі, які живлять парки депо. Витрата електроенергії системою деповського обліку фіксується не повністю, що обумовлене низькою чутливістю лічильників на ЕРС при малих навантаженнях. Недооблік витрати досягає 50 % від об'єму енергії, яка віддається через фідер контактної мережі, що живить депо. Другою причиною збільшення витрат в холодну пору року служить безконтрольний відбір енергії з контактної мережі на господарські і технологічні потреби локомотивних, вагонних депо, станцій і інших підрозділів.

Розглянуті чинники приводять до підвищення місячних витрат по ряду депо в зимовий час на 2-4 млн. кВт·год., або до 9 % всього звітного споживання по депо. Відповідно збільшується і показники небалансу між даними обліку на тягових підстанціях і ЕРС для відділення залізниці і залізниці в цілому.

Подальші дослідження [7] показали, що відбір енергії з контактної мережі для нетягових споживачів впливає на сезонні коливання.

Висновки до розділу 3

1. Експериментальне дослідження факторів, що впливають на коефіцієнт втрат, на ділянках постійного та змінного струмів показали що швидкості поїздів на міжпідстанційних зонах підпорядковуються логнормальному розподілу, а кількість поїздів – біноміальному розподілу. Мінімальне значення швидкості 50 км/год., а максимальне – 60 км/год. для вибраних ділянок Придніпровської та Одеської залізниць. Встановлено, що мінімальна кількість пар поїздів – 1, максимальна – 3 для ділянки Придніпровської залізниці та відповідно 8 і 2 для Одеської залізниці.

2. Середній знос контактних проводів підпорядковується логнормальному розподілу. Для обох дослідних ділянок мінімальне значення зносу 0%, а максимальне 30% для ділянки постійного струму та 25% для ділянки змінного

струму. Температура навколишнього середовища підпорядковується розподілу Вейбула. Для обох ділянок мінімальне значення температури -20°C , а максимальне – $+30^{\circ}\text{C}$. Струм ЕРС підпорядковується логнормальному розподілу. Встановлено, що мінімальні значення струму 800 А для ділянки постійного струму і 100 А для ділянки змінного струму, максимальні 900 А і 120 А відповідно.

3. Аналіз споживання електроенергії по тяговим підстанціям Одеської залізниці показав, що споживання електричної енергії в перехідний період від літа до зими збільшується на 10 – 12 %. Близько 2 % з них викликані витратою електроенергії, що використовується на обігрів пасажирських поїздів на шляху слідування. Сезонне збільшення витрат, зафіксоване лічильниками ЕРС, не перевищило 6 – 7 %. Отже, сезонна зміна споживання на тягових підстанціях на 2 – 4 % перевищує аналогічну величину, визначену по лічильниках локомотивів.

РОЗДІЛ 4

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВТРАТ НА ОСНОВІ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Експериментальні дослідження являються основним джерелом інформації для вивчення процесів споживання електричної енергії в контактній мережі електрифікованих залізниць. Метою таких досліджень є побудова математичної моделі для визначення коефіцієнту втрат. В процесі експерименту, обробки даних та формалізації результатів у виді моделі виникають похибки та втрачається частина інформації. Застосування методів планування експерименту дозволяє визначити похибки математичної моделі та судити про її адекватність.

Постановка експериментальних досліджень на залізниці – складна задача. Такі дослідження вимагають довгострокової зміни графіка руху та режиму ведення поїзду, що є неприйнятним для діючих ділянок залізниць. Тому вивчення втрат електроенергії в контактній мережі виконується методами імітаційного моделювання. Найпростішим планом першого порядку є план повного факторного експерименту (ПФЕ) вигляду 2^n . Якщо точність моделі виявляється недостатньою, то застосування методів планування експерименту дозволяє моделювати математичну модель з проведенням додаткових дослідів без втрати попередньої інформації з мінімальними втратами.

Процес визначення коефіцієнта втрат в загальному вигляді описується наступною функцією:

$$k_v = f(\Delta S\%; n; V_{cp}; I; t_{н.с.}^o), \quad (4.1)$$

де $\Delta S\%$ – знос контактних проводів у відсотках;

n – кількість поїздів на розрахунковій зоні;

V_{cp} – середня швидкість електровозу на ділянці;

I – струм електровозу;

$t_{н.с.}^o$ – температура навколишнього середовища.

4.1 План повного факторного експерименту 2^n для ділянки постійного струму

Для ділянки постійного струму Придніпровської залізниці (рис. 3.1) проведемо повний факторний експеримент (ПФЕ) 2^n . Геометричне відображення ПФЕ 2^n (наприклад $n=2$) із зазначенням номерів точок плану в факторному просторі представлено на рис. 4.1 [97], де +1 – верхнє значення факторів, -1 – нижнє значення факторів, 0 – середнє значення факторів.

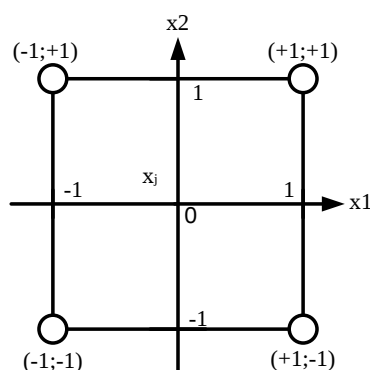


Рисунок 4.1 – Геометричне відображення плану 2^2

Для експерименту створена модель з наступними вихідними даними:

1. Схема живлення – двостороння.
2. Довжина ділянки – 18 км.
3. Підвіска – М-120+2МФ-100+А-185.
4. Мінімальний міжпоїзний інтервал 6 хв.

Вихідні параметри для визначення коефіцієнту налаштування лічильника втрат (знос контактних проводів у відсотках, кількість поїздів на розрахунковій зоні, середня швидкість електровозу на ділянці, струм електровозу, температура навколишнього середовища) мають наступні межі зміни (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Межі зміни вихідних параметрів

параметр	$\Delta S\%$	n , пар	V_{cp} , км/год	I , А	$t_{н.с.}^o, ^\circ C$
верхня межа	30	3	60	900	30
середина	15	2	55	850	5
нижня межа	0	1	50	800	-20

Межі зміни вихідних параметрів отримано в другому розділі.

На першому етапі складемо таблицю, в якій значення факторів знаходяться у всіх можливих поєднаннях і проведемо імітаційне моделювання для всіх варіантів (табл. 4.2). Прийmemo припущення, що модель коефіцієнту втрат лінійна.

Таблиця 4.2 – Фрагмент результатів моделювання для ділянки постійного струму

№ експер.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
втрати, кВт·год.	433.9	77.2	92.657	114.78	299.3	500.03	492.2	88.9	87.5	133	328.7
втрати, %	19.02	9.75	9.75	12.1	17.7	19.5	21.6	10	11.1	12.5	19.5
квадрат струму, тис. А ² ·год	455,0	64	76.832	76.83	346.55	575.87	455.01	81	64	97.24	346.55

На другому етапі на підставі отриманих результатів складемо систему з тридцяти двох рівнянь ($2^5=32$) з п'ятьма змінними. (У додатку табл. В.1 показаний її скорочений запис у вигляді матриці). Матрицю даного виду назвемо матрицею експерименту. У матриці експерименту другий, третій, четвертий, п'ятий і шостий стовпці представляють собою значення факторів, сьомий, восьмий і дев'ятий стовпці – значення відгуку системи, а перший стовпець містить одиниці, відповідні одиничним коефіцієнтам вільного члена моделі. Будемо вважати цей стовпець деяким віртуальним фактором, який завжди приймає одиничні значення.

На третьому етапі для спрощення рішення системи проведемо нормування факторів. Верхнім значенням факторів присвоїмо нормоване значення +1, нижнім значенням – -1, середньому значенню –0. У загальному вигляді нормування фактора виражається наступною формулою [98].

$$\tilde{x}_i = \frac{2x_i - x_{iB} - x_{iH}}{x_{iB} - x_{iH}}, \quad (4.2)$$

де x_{iv} – верхнє значення фактора;

x_{in} – нижнє значення фактора.

З урахуванням нормування факторів матриця експерименту прийме наступний вигляд (додаток табл. В.2.)

Побудована матриця експерименту володіє всіма властивостями матриці повно факторного експерименту[98]:

- 1) число рядків в матриці дорівнює 2^n ;
- 2) нульовий стовпець матриці складається із одиниць

$$\tilde{x}_{oi} = 1;$$

- 3) в стовпцях $1 \dots n$ знаходяться всі можливі 2^n поєднання значень

$$-1 \text{ та } +1;$$

- 4) в останньому стовпці знаходяться результати випробувань, отримані при значеннях факторів, записаних у відповідних рядках у стовпцях $1 \dots n$;

- 5) сума елементів нульового стовпця дорівнює 2^n

$$\sum_{i=1}^{2^n} \tilde{x}_{oi} = 2^n;$$

- 6) сума елементів будь-якого стовпця, крім нульового і останнього, дорівнює нулю

$$\sum_{i=1}^{2^n} \tilde{x}_{ki} = 0, \quad (k = 1 \dots n);$$

- 7) два останніх вирази можна об'єднати в єдине співвідношення

$$\sum_{i=1}^{2^n} \tilde{x}_{ki} = 2^n \delta_{ko}, \quad (k = 0 \dots n),$$

де δ_{ij} – одинична матриця, $(i, j = 0 \dots n)$;

8) сума квадратів елементів будь-якого (крім останнього) стовпця завжди дорівнює 2^n

$$\sum_{i=1}^{2^n} \tilde{x}_{ki}^2 = 2^n, \quad (k = 0 \dots n);$$

9) сума добутків відповідних елементів двох будь-яких стовпців (крім останнього) дорівнює нулю

$$\sum_{i=1}^{2^n} \tilde{x}_{ki} \tilde{x}_{mi} = 0, \quad (k, m = 0 \dots n, k \neq m);$$

10) два останні вирази можна записати як ортогональність стовпців матриці

$$\sum_{i=1}^{2^n} \tilde{x}_{ki} \tilde{x}_{mi} = 2^n \delta_{km}, \quad (k, m = 0 \dots n).$$

На четвертому етапі визначимо дисперсію ($S_{y_u}^2$) для кожного експерименту [99]

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{ug} - \bar{y}_u)^2}{f_u}, \quad (4.3)$$

де g та n_u – номер та кількість дублів експерименту відповідно;

y_{ug} – результат g -го повторення u -го експерименту;

$\bar{y}_u$ – середнє арифметичне значення всіх дублів u -го експерименту;

f_u – число ступенів свободи в u -ому експерименті при визначенні u -ої дисперсії.

$$f_u = n_u - 1.$$

В даному випадку $f_u = 2$

На п'ятому етапі проведемо перевірку відтворюваності експериментальних даних за допомогою критерію Кохрена. Розрахункове значення критерію Кохрена визначається за формулою [100].

Для нашого випадку $\sigma_{\text{розрах}} = 0.162$.

Табличне значення для рівня значимості 0,05, числа ступенів свободи 2 та кількості експериментів 32 відповідно $\sigma_{\text{табл}} = 0.198$ [101].

Оскільки $\sigma_{\text{розрах}} < \sigma_{\text{табл}}$, то ряд дисперсій однорідний.

Модель коефіцієнта втрат представимо у вигляді загального рівняння

$$\begin{aligned} y = & b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_1x_2 + b_7x_1x_3 + b_8x_1x_4 + b_9x_1x_5 + b_{10}x_2x_3 + \\ & + b_{11}x_2x_4 + b_{12}x_2x_5 + b_{13}x_3x_4 + b_{14}x_3x_5 + b_{15}x_4x_5 + b_{16}x_1x_2x_3 + b_{17}x_1x_2x_4 + b_{18}x_1x_2x_5 + \\ & + b_{19}x_1x_3x_4 + b_{20}x_1x_4x_5 + b_{21}x_2x_3x_4 + b_{22}x_2x_4x_5 + b_{23}x_3x_4x_5 + b_{24}x_1x_3x_5 + b_{25}x_2x_3x_5 + \\ & + b_{26}x_1x_2x_3x_4 + b_{27}x_1x_2x_3x_5 + b_{28}x_1x_3x_4x_5 + b_{29}x_1x_2x_4x_5 + b_{30}x_2x_3x_4x_5 + b_{30}x_1x_2x_3x_4x_5. \end{aligned}$$

Для розрахунку коефіцієнтів регресії побудуємо розширену матрицю (табл. В.3 додаток), яка враховує взаємодію факторів.

Оскільки сума членів у другому, третьому, четвертому, п'ятому та шостому стовпцях матриці дорівнюють нулю, вільний член моделі можна знайти, склавши всі тридцять два рівняння

$$\tilde{b}_0 = 1.119.$$

Щоб знайти який-небудь інший коефіцієнт моделі, змінимо знаки в рівняннях таким чином, щоб у відповідному стовпці виявилися одні одиниці, після чого складемо 32 рівняння.

В загальному випадку [102]

$$\tilde{b}_k = \frac{1}{2^n} \sum_{i=1}^{2^n} y_i \tilde{x}_{ki}, \quad (4.4)$$

де $\tilde{x}_{ki}$ – i -тий член у k -тому стовпці нормалізованої матриці;

y_i – відгук системи у i -тому експерименті.

З огляду на вищесказане знайдемо всі коефіцієнти (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Нормалізовані коефіцієнти рівняння регресії

$\tilde{b}_1$	$\tilde{b}_2$	$\tilde{b}_3$	$\tilde{b}_4$	$\tilde{b}_5$	$\tilde{b}_6$	$\tilde{b}_7$	$\tilde{b}_8$	$\tilde{b}_9$	$\tilde{b}_{10}$	$\tilde{b}_{11}$	$\tilde{b}_{12}$	$\tilde{b}_{13}$	$\tilde{b}_{14}$	$\tilde{b}_{15}$	$\tilde{b}_{16}$
0.035	-0.176	0.026	0.043	0.085	-0.03	0.035	0.019	-0.02	0.022	0.041	-0.059	-0.029	0.023	0.041	0.039

Продовження таблиці 4.3

$\tilde{b}_{17}$	$\tilde{b}_{18}$	$\tilde{b}_{19}$	$\tilde{b}_{20}$	$\tilde{b}_{21}$	$\tilde{b}_{22}$	$\tilde{b}_{23}$	$\tilde{b}_{24}$	$\tilde{b}_{25}$	$\tilde{b}_{26}$	$\tilde{b}_{27}$	$\tilde{b}_{28}$	$\tilde{b}_{29}$	$\tilde{b}_{30}$	$\tilde{b}_{31}$
0.021	-0.017	-0.034	0.021	-0.022	0.044	-0.023	0.03	0.018	-0.041	0.036	-0.039	0.02	-0.028	-0.035

Перехід від нормованих до ненормованим факторів здійснюється зворотним перетворенням [102]

$$b_0 = \tilde{b}_0 - \sum_{i=1}^n \tilde{b}_i \frac{x_{iB} + x_{iH}}{x_{iB} - x_{iH}}, \quad (4.5)$$

$$b_k = \frac{\tilde{2b_k}}{x_{kB} - x_{kH}}, \quad (4.6)$$

де x_{iB} – верхня межа зміни фактора;

x_{iH} – нижня межа зміни фактора.

Визначимо коефіцієнти моделі в дійсних координатах

$$b_0 = 0.748.$$

Результати розрахунків зведемо до табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Коефіцієнти рівняння регресії в дійсних координатах

b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{16}
0.002	-0.176	0.005	0.001	0.003	-0.001	$23.342 \cdot 10^{-5}$	$1.283 \cdot 10^{-5}$	$-2.714 \cdot 10^{-5}$	0.002	$40.948 \cdot 10^{-5}$	-0.001	$-5.755 \cdot 10^{-5}$	$9.314 \cdot 10^{-5}$	$1.636 \cdot 10^{-5}$	$13.165 \cdot 10^{-5}$

Продовження таблиці 4.4

b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}	b_{27}	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}
$0.701 \cdot 10^{-5}$	$-1.106 \cdot 10^{-5}$	$-0.229 \cdot 10^{-5}$	$0.028 \cdot 10^{-5}$	$-2.222 \cdot 10^{-5}$	$0.874 \cdot 10^{-5}$	$-0.091 \cdot 10^{-5}$	$0.405 \cdot 10^{-5}$	$3.653 \cdot 10^{-5}$	$-0.138 \cdot 10^{-5}$	$0.239 \cdot 10^{-5}$	$-0.515 \cdot 10^{-5}$	$0.014 \cdot 10^{-5}$	$-0.056 \cdot 10^{-5}$	$-0.002 \cdot 10^{-5}$

Наявність похибки у визначенні коефіцієнтів регресії обумовлено коливаннями значень функції відгуку при дублюванні експерименту в кожному досліді. При достатньо малих значеннях коефіцієнтів b_i абсолютна похибка їх визначення ($2 \cdot D_{b_i}$), обумовлена похибкою визначення значень функції відгуку, може виявитись недопустимо великою. В цьому випадку значення коефіцієнтів будуть визнані статистично незначними і будуть виключені з регресійної моделі.

Оскільки дублювання експерименту рівномірне, дисперсію оцінок коефіцієнтів рівняння регресії можна обчислити за наступною формулою [103].

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{n_u N}, \quad (4.7)$$

де S_y^2 – кількість дослідів;

n_u – кількість дублів в кожному досліді;

N – кількість дослідів.

Так як ряд дисперсій однорідний, то середню дисперсію експерименту можна визначити наступним чином [103]

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N S_{yu}^2}{N}, \quad (4.8)$$

де S_{yu}^2 – значення дисперсій у кожному досліді.

$$\sum_{u=1}^N S_{yu}^2 = 144.367 \cdot 10^{-5} \text{ отже}$$

$$S_y^2 = 4.511 \cdot 10^{-5}.$$

Тоді дисперсія оцінок коефіцієнтів $S_{bi}^2 = 0.047 \cdot 10^{-5}$.

Середньоквадратична похибка оцінки коефіцієнтів визначається за формулою [103]

$$S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2}. \quad (4.9)$$

Для даного випадку $S_{bi} = 68.549 \cdot 10^{-5}$.

Визначено довірчий інтервал коефіцієнтів регресії Δ_{bi}

$$\Delta_{bi} = t_{\alpha; f_2} \cdot S_{bi}, \quad (4.10)$$

де $t_{\alpha; f_2}$ – критерій Стюдента, який залежить від рівня значимості (α) та числа ступенів свободи (f_2) при визначенні дисперсії експерименту.

Для представленого випадку $f_2 = 64$.

Вибравши рівень значимості $\alpha = 0.05$ при числі ступенів свободи 64 із довідкових таблиць [101] визначено критерій Стюдента $t_{\alpha; f_2} = 2.04$.

Тоді довірчий інтервал $\Delta_{bi} = 0.0014$.

Коефіцієнти рівняння регресії, абсолютна величина яких дорівнює довірчому інтервалу або більше його, визнаються статистично значимими. Тобто, для статистично значимих коефіцієнтів повинна виконуватись умова [102]

$$b_i > \Delta_{bi}. \quad (4.11)$$

Із табл. 4.4 за допомогою умови (4.11) виберемо статистично значимі коефіцієнти рівняння регресії.

Статистично значимими коефіцієнтами, точність оцінки яких можна вважати задовільною, являються коефіцієнти $b_0, b_1, b_2, b_3, b_5, b_{10}$.

З огляду на наведені вище судження остаточно отримуємо модель в дійсних координатах

$$y = 0.748 + 0.002x_1 - 0.176x_2 - 0.005x_3 + 0.003x_5 + 0.002x_2x_3.$$

Рівняння регресії має наступний вигляд

$$k_B = 0.748 + 0.002\Delta S\% - 0.176n - 0.005V_{cp} + 0.003t_{н.с.}^o + 0.002nV_{cp} \quad (4.12)$$

Перевіримо модель (4.12) на адекватність за наступним алгоритмом:

1. Обчислимо теоретичні значення функції відгуку в кожному досліді

2. Порівняємо розрахункові ($y_{u_{\text{розрах}}}$) та експериментальні ($y_{u_{\text{експ}}}$) значення функцій відгуку та знайдену дисперсія неадекватності ($S_{\text{неад}}^2$) [99].

В нашому випадку $f_1 = 26$, а $S_{\text{неад}}^2 = 0.04$.

3. Визначимо критерій Фішера ($F_{\text{розрах}}$) [104] $F_{\text{розрах}} = 938.431$.

4. Перевіримо наступну умову:

$$F_{\text{розрах}} < F_{\text{табл}}, \quad (4.13)$$

де $F_{\text{табл}}$ – табличне значення критерію Фішера, що визначається в залежності від рівня значимості та числа ступенів свободи.

Для заданих параметрів $F_{\text{табл}} = 1.68$ [101].

Умова (4.13) не виконується, отже модель не може бути визнана адекватною. Добудуємо план експерименту до плану другого порядку (композиційний план) та сформуємо функцію відгуку у вигляді повного квадратичного поліному, без втрати інформації про попередньо зроблені досліді.

4.2 Ортогональний центрально - композиційний план другого порядку для ділянки постійного струму

До ортогонального центрально-композиційного плану (ОЦКП) входять:

1. Ядро – існуючий план ПФЕ 2^n (N_0).
2. Центральна точка плану (n_0) (для цього плану $n_0 = 1$).
3. По дві "зіркові" точки для кожного фактора.

Плече зіркових точок (α) визначається за наступною формулою [97].

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{N \cdot N_0} - N_0)}, \quad (4.14)$$

$$\alpha = 1.596.$$

При цьому в кожній площині, що містить вісь y і координатну вісь i -го фактора (що проходить через центр плану), виявляються три значення фактора x_i й три відповідних значення y . Загальна кількість точок в плані ОЦКП складає [97].

$$N = 2^n + 2n + n_0,$$

В даному випадку $N = 43$.

З огляду на вищесказане проведено ще 11 експериментів (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. – Дослідження втрат електроенергії для ділянки постійного струму

№ експер.	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
втрати, кВт·год.	261.22	283.83	102.1	455.04	309.54	242.75	241.45	305.59	242.29	299.08	272.58
втрати, %	15.66	17.03	11.16	21.9	16.53	16.1	15.38	17.3	14.5	17.9	16.3
квадрат струму, тис. А ² ·год	246.6	246.6	78.79	445.96	278.02	220.83	218.44	276.47	246.6	246.6	246.6

Середні втрати для ділянки Придніпровської залізниці за результатами експерименту склали 12,4 %, а середній коефіцієнт втрат– 1,16 Ом.

Отримана матриця ОЦКП, яка задовольняє наступній вимозі – сума елементів будь-якого стовпця (крім $j = 0$), включаючи стовпці, що відповідають квадратам фактора, дорівнює нулю. Перетворення елементів цих стовпців здійснюється у вигляді [97]

$$x'_{ki} = x_{ki}^2 - a,$$

де a – величина, що залежить від числа факторів [97].

$$a = \sqrt{\frac{2^n}{2^n + 2n + n_0}}, \quad (4.15)$$

$$a = 0.86266.$$

Матриця експерименту представлена в додатку В (табл. В.4).

На наступному етапі визначена дисперсія ($S_{y_u}^2$) для кожного експерименту та проведена перевірка відтворюваності експериментальних даних за допомогою критерію Кохрена.

Розрахункове значення критерію Кохрена $\sigma_{\text{розрах}} = 0.125$.

Табличне значення для рівня значимості 0.05, числа ступенів свободи 2 та кількості експериментів 43 відповідно $\sigma_{\text{табл}} = 0.158$ [101].

Оскільки $\sigma_{\text{розрах}} < \sigma_{\text{табл}}$, то ряд дисперсій однорідний.

Модель коефіцієнту втрат представлена у вигляді загального рівняння

$$\begin{aligned} y = & b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_1 x_2 + b_7 x_1 x_3 + b_8 x_1 x_4 + b_9 x_1 x_5 + b_{10} x_2 x_3 + \\ & + b_{11} x_2 x_4 + b_{12} x_2 x_5 + b_{13} x_3 x_4 + b_{14} x_3 x_5 + b_{15} x_4 x_5 + b_{16} x_1 x_2 x_3 + b_{17} x_1 x_2 x_4 + b_{18} x_1 x_2 x_5 + \\ & + b_{19} x_1 x_3 x_4 + b_{20} x_1 x_4 x_5 + b_{21} x_2 x_3 x_4 + b_{22} x_2 x_4 x_5 + b_{23} x_3 x_4 x_5 + b_{24} x_1 x_3 x_5 + b_{25} x_2 x_3 x_5 + \\ & + b_{26} x_1 x_2 x_3 x_4 + b_{27} x_1 x_2 x_3 x_5 + b_{28} x_1 x_3 x_4 x_5 + b_{29} x_1 x_2 x_4 x_5 + b_{30} x_2 x_3 x_4 x_5 + b_{31} x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 + \\ & + b_{32} x_1^2 + b_{33} x_2^2 + b_{34} x_3^2 + b_{35} x_4^2 + b_{36} x_5^2. \end{aligned}$$

Коефіцієнти рівняння регресії визначені за наступним виразом [97] та представлені в табл. 4.6

$$\tilde{b}_k = \frac{\sum_{i=1}^N \tilde{x}_{ki} y_i}{\sum_{i=1}^N \tilde{x}_{ki}^2}. \quad (4.16)$$

Таблиця 4.6 – Нормалізовані коефіцієнти рівняння регресії

$\tilde{b}_0$	$\tilde{b}_1$	$\tilde{b}_2$	$\tilde{b}_3$	$\tilde{b}_4$	$\tilde{b}_5$	$\tilde{b}_6$	$\tilde{b}_7$	$\tilde{b}_8$	$\tilde{b}_9$	$\tilde{b}_{10}$	$\tilde{b}_{11}$	$\tilde{b}_{12}$
1.542	0.030	-0.165	0.017	0.033	0.083	-0.030	0.040	0.023	-0.020	0.023	0.040	-0.054

Продовження таблиці 4.6.

$\tilde{b}_{13}$	$\tilde{b}_{14}$	$\tilde{b}_{15}$	$\tilde{b}_{16}$	$\tilde{b}_{17}$	$\tilde{b}_{18}$	$\tilde{b}_{19}$	$\tilde{b}_{20}$	$\tilde{b}_{21}$	$\tilde{b}_{22}$	$\tilde{b}_{23}$	$\tilde{b}_{24}$
-0.025	0.023	0.040	0.039	0.022	-0.022	-0.038	0.021	-0.021	0.040	-0.022	0.030

Продовження таблиці 4.6

$\tilde{b}_{25}$	$\tilde{b}_{26}$	$\tilde{b}_{27}$	$\tilde{b}_{28}$	$\tilde{b}_{29}$	$\tilde{b}_{30}$	$\tilde{b}_{31}$	$\tilde{b}_{32}$	$\tilde{b}_{33}$	$\tilde{b}_{34}$	$\tilde{b}_{35}$	$\tilde{b}_{36}$
0.013	-0.042	0.041	-0.039	0.025	-0.024	-0.039	-0.002	0.020	-0.002	-0.003	-0.006

Здійснимо перехід від нормованих до дійсних факторів. Результати розрахунків зведемо до табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Коефіцієнти рівняння регресії в дійсних координатах

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}
1.439	0.004	-0.378	0.001	0.001	0.005	$-99.0625 \cdot 10^{-5}$	$26.646 \cdot 10^{-5}$	$1.552 \cdot 10^{-5}$	$-2.679 \cdot 10^{-5}$	0.003	$40.156 \cdot 10^{-5}$	-0.001

Продовження таблиці 4.7

b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}
$-4.931 \cdot 10^{-5}$	$9.388 \cdot 10^{-5}$	$1.611 \cdot 10^{-5}$	$13.094 \cdot 10^{-5}$	$0.728 \cdot 10^{-5}$	$-14.438 \cdot 10^{-5}$	$-0.256 \cdot 10^{-5}$	$0.029 \cdot 10^{-5}$	$-2.147 \cdot 10^{-5}$	$0.792 \cdot 10^{-5}$	$-0.087 \cdot 10^{-5}$	$0.402 \cdot 10^{-5}$

Продовження таблиці 4.7

b_{25}	b_{26}	b_{27}	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}	b_{32}	b_{33}	b_{34}	b_{35}	b_{36}
$2.644 \cdot 10^{-5}$	$-0.140 \cdot 10^{-5}$	$0.272 \cdot 10^{-5}$	$-0.005 \cdot 10^{-5}$	$0.016 \cdot 10^{-5}$	$-0.048 \cdot 10^{-5}$	$-0.003 \cdot 10^{-5}$	$-15.897 \cdot 10^{-5}$	0.021	$-35.914 \cdot 10^{-5}$	$-5.947 \cdot 10^{-5}$	$-23.671 \cdot 10^{-5}$

Надалі визначимо дисперсію оцінок коефіцієнтів рівняння регресії
Середня дисперсія експерименту (4.7) $S_y^2 = 4.347 \cdot 10^{-5}$.

$$S_{bi}^2 = 0.034 \cdot 10^{-5}.$$

Середньоквадратична похибка оцінки коефіцієнтів (4.9) складає

$$S_{bi} = 58.05 \cdot 10^{-5}.$$

При рівні значимості $\alpha = 0.05$ та числі ступенів свободи 86 із [101] визначений критерій Стюдента $t_{\alpha; f_2} = 1.9867$.

Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії складає:

$$\Delta_{bi} = 0.00115.$$

Із табл. 4.7 за допомогою умови (4.11) виберемо статистично значимі коефіцієнти рівняння регресії.

Статистично значимими коефіцієнтами, точність оцінки яких можна вважати задовільною, являються коефіцієнти $b_0, b_1, b_2, b_5, b_{10}, b_{33}$.

З огляду на наведені вище судження остаточно отримана модель в дійсних координатах

$$y = 1.439 + 0.004x_1 - 0.378x_2 + 0.005x_5 + 0.003x_2x_3 + 0.021x_2^2.$$

Рівняння регресії має наступний вигляд

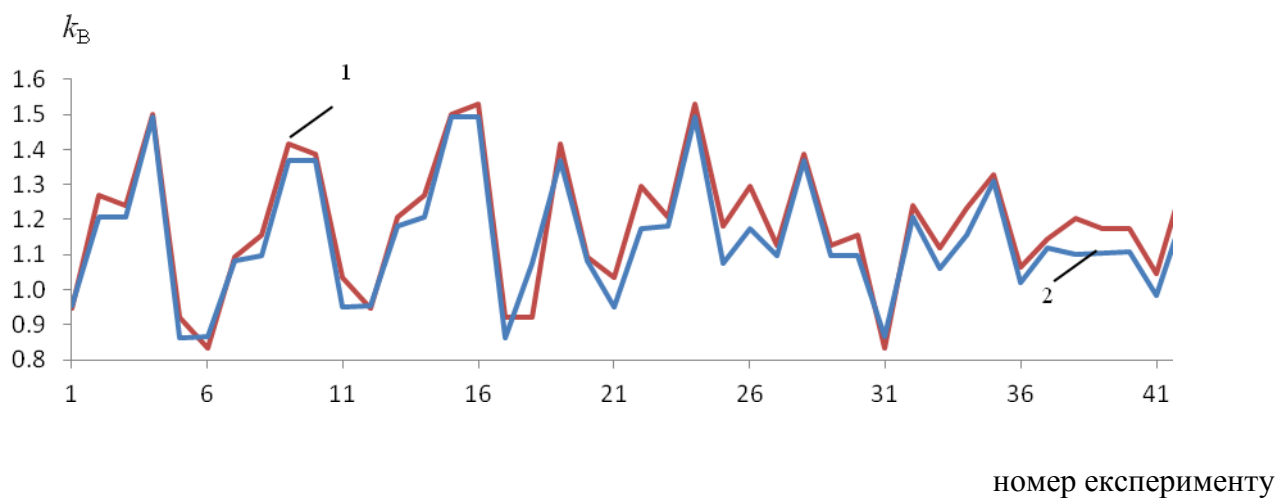
$$k_B = 1.439 + 0.021n^2 - 0.378n + 0.003nV_{cp} + 0.004\Delta S\% + 0.005t_{н.с.}^0. \quad (4.17)$$

Проведено перевірку моделі (4.17) на адекватність. Розрахункове значення критерію Фішера

$$F_{розрах} = 1.091.$$

Для заданих параметрів $F_{\text{табл}}=1.6$ [101].

Умова (4.13) виконується, отже модель адекватна.



1 – k_B за рівнянням регресії; 2 – k_B за результатами моделювання

Рисунок 4.2 – Коефіцієнти втрат за результатами експерименту та за отриманим рівнянням регресії для ділянки постійного струму

Як видно із рис. 4.2, коефіцієнти втрат, знайдені за результатами моделювання та за рівнянням регресії, майже не відрізняються, що свідчить про високу точність отриманих рівнянь.

4.3 Повний факторний експеримент для ділянки змінного струму

Проведемо повний факторний експеримент для ділянки змінного струму (рис. 3.2) за такими вихідними даними:

1. Схема живлення – двостороння роздільна.
2. Довжина ділянки – 50 км.
3. Підвіска – М-95+МФ-100.
4. $\cos \varphi$ електровозу 0,8.
5. Мінімальний між поїзний інтервал 10 хв.

Вихідні параметри для визначення коефіцієнта втрат та межі їх зміни представлені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8. – Межі зміни вихідних параметрів

параметр	$\Delta S\%$	n , пар	V_{cp} , км/год	I , А	$t_{н.с.}^o$, °C
верхня межа	25	8	60	120	30
середина	12,5	5	55	110	5
нижня межа	0	2	50	100	-20

На першому етапі складено таблицю у якій значення факторів знаходяться у всіх можливих поєднаннях (43 варіанти) і проведено імітаційне моделювання. Фрагмент результатів моделювання представлені в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Фрагмент результатів моделювання для ділянки змінного струму

№ експер.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
втрати, кВт·год.	997.737	110.547	137.834	172.261	675.96	1341.212	1165.811	147.848	128.415	230.463	724.04
втрати, %	8.3	2.49	2.6	3.25	7.34	9.29	9.7	2.77	2.89	3.62	7.86
квадрат струму, тис. А ² ·год	154.89	14.962	18.426	18.426	113	223.05	154.89	21.545	14.962	26.533	113

Середні втрати для заданої ділянки за результатами моделювання склали 6,3%, а середній коефіцієнт втрат – 5,58 Ом.

На другому етапі складено систему із 43 рівнянь з п'ятьма змінними. У матриці експерименту другий, третій, четвертий, п'ятий і шостий стовпці представляють собою значення факторів, сьомий, восьмий і дев'ятий стовпці – значення відгуку системи, а перший стовпець містить одиниці, відповідні одиничним коефіцієнтам вільного члена моделі. Будемо вважати цей стовпець деяким віртуальним фактором, який завжди приймає одиничні значення.

На третьому етапі проведемо нормування факторів. Побудована матриця експерименту володіє всіма властивостями матриці повно факторного експерименту.

На наступному етапі визначимо дисперсію ($S_{y_u}^2$) для кожного експерименту та проведемо перевірку відтворюваності експериментальних даних за допомогою критерію Кохрена.

Розрахункове значення критерію Кохрена складає

$$\sigma_{\text{розрах}} = 0.107.$$

Табличне значення для рівня значимості 0.05, числа ступенів свободи 2 та кількості експериментів 32 відповідно [101] $\sigma_{\text{табл}} = 0.158$.

Оскільки $\sigma_{\text{розрах}} < \sigma_{\text{табл}}$, то ряд дисперсій однорідний.

Модель коефіцієнту втрат представлена у вигляді загального рівняння

$$\begin{aligned} y = & b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_1 x_2 + b_7 x_1 x_3 + b_8 x_1 x_4 + b_9 x_1 x_5 + b_{10} x_2 x_3 + \\ & + b_{11} x_2 x_4 + b_{12} x_2 x_5 + b_{13} x_3 x_4 + b_{14} x_3 x_5 + b_{15} x_4 x_5 + b_{16} x_1 x_2 x_3 + b_{17} x_1 x_2 x_4 + b_{18} x_1 x_2 x_5 + \\ & + b_{19} x_1 x_3 x_4 + b_{20} x_1 x_4 x_5 + b_{21} x_2 x_3 x_4 + b_{22} x_2 x_4 x_5 + b_{23} x_3 x_4 x_5 + b_{24} x_1 x_3 x_5 + b_{25} x_2 x_3 x_5 + \\ & + b_{26} x_1 x_2 x_3 x_4 + b_{27} x_1 x_2 x_3 x_5 + b_{28} x_1 x_3 x_4 x_5 + b_{29} x_1 x_2 x_4 x_5 + b_{30} x_2 x_3 x_4 x_5 + b_{31} x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 + \\ & + b_{32} x_1^2 + b_{33} x_2^2 + b_{34} x_3^2 + b_{35} x_4^2 + b_{36} x_5^2. \end{aligned}$$

Надалі визначені нормалізовані коефіцієнти рівняння регресії (табл. 4.10) [97].

Таблиця 4.10 – Нормалізовані коефіцієнти рівняння регресії ділянки змінного струму

$\tilde{b}_0$	$\tilde{b}_1$	$\tilde{b}_2$	$\tilde{b}_3$	$\tilde{b}_4$	$\tilde{b}_5$	$\tilde{b}_6$	$\tilde{b}_7$	$\tilde{b}_8$	$\tilde{b}_9$	$\tilde{b}_{10}$	$\tilde{b}_{11}$	$\tilde{b}_{12}$
7.595	0.251	-0.569	-0.041	-0.037	0.788	-0.019	0.0003	0.032	0.024	0.036	0.033	-0.049

Продовження таблиці 4.10

$\tilde{b}_{13}$	$\tilde{b}_{14}$	$\tilde{b}_{15}$	$\tilde{b}_{16}$	$\tilde{b}_{17}$	$\tilde{b}_{18}$	$\tilde{b}_{19}$	$\tilde{b}_{20}$	$\tilde{b}_{21}$	$\tilde{b}_{22}$	$\tilde{b}_{23}$	$\tilde{b}_{24}$
0.003	-0.022	0.012	-0.009	-0.021	-0.008	0.003	0.004	0.004	-0.028	-0.010	-0.064

Продовження таблиці 4.10

$\tilde{b}_{25}$	$\tilde{b}_{26}$	$\tilde{b}_{27}$	$\tilde{b}_{28}$	$\tilde{b}_{29}$	$\tilde{b}_{30}$	$\tilde{b}_{31}$	$\tilde{b}_{32}$	$\tilde{b}_{33}$	$\tilde{b}_{34}$	$\tilde{b}_{35}$	$\tilde{b}_{36}$
-0.049	0.002	0.002	-0.002	-0.003	0.019	0.004	0.102	0.215	0.081	0.064	0.102

Здійснимо перехід від нормованих до дійсних коефіцієнтів. Результати розрахунків зведемо до табл. 4.11

Таблиця 4.11. – Коефіцієнти рівняння регресії в дійсних координатах для ділянки змінного струму

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}
9.022	0.024	-0.72	-0.008	-0.004	0.033	$-97.250 \cdot 10^{-5}$	$0.638 \cdot 10^{-5}$	$-8.625 \cdot 10^{-5}$	$0.493 \cdot 10^{-5}$	$-2.896 \cdot 10^{-5}$	$-0.715 \cdot 10^{-5}$	$-5.625 \cdot 10^{-5}$

Продовження таблиці 4.11

b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}
$0.017 \cdot 10^{-5}$	$0.006 \cdot 10^{-5}$	$0.381 \cdot 10^{-5}$	$-0.561 \cdot 10^{-5}$	$-0.038 \cdot 10^{-5}$	$-0.858 \cdot 10^{-5}$	$-9.700 \cdot 10^{-5}$	$0.007 \cdot 10^{-5}$	$0.013 \cdot 10^{-5}$	$2.583 \cdot 10^{-9}$	$-0.002 \cdot 10^{-5}$	$0.039 \cdot 10^{-5}$

Продовження таблиці 4.11

b_{25}	b_{26}	b_{27}	b_{28}	b_{29}	b_{30}	b_{31}	b_{32}	b_{33}	b_{34}	b_{35}	b_{36}
$2.875 \cdot 10^{-9}$	$0.008 \cdot 10^{-5}$	$0.072 \cdot 10^{-5}$	$0.016 \cdot 10^{-5}$	$0.006 \cdot 10^{-5}$	$0.004 \cdot 10^{-5}$	$2.864 \cdot 10^{-9}$	0.008	0.056	0.016	0.006	0.004

Обчислимо дисперсію оцінок коефіцієнтів рівняння регресії. Середня дисперсія експерименту (4.7) $S_y^2 = 0.0107$.

$$S_{bi}^2 = 8.32 \cdot 10^{-5}.$$

Середньоквадратична похибка оцінки коефіцієнтів (4.9) складає

$$S_{bi} = 0.00912.$$

Із [101] визначаємо критерій Стюдента $t_{\alpha; f_2} = 1.9867$.

Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії складе

$$\Delta_{bi} = 0.0181.$$

Із табл. 4.11 за допомогою умови (4.11) виберемо статистично значимі коефіцієнти рівняння регресії. Статистично значимими коефіцієнтами, точність оцінки яких можна вважати задовільною, являються коефіцієнти b_0 , b_1 , b_2 , b_5 , b_{33} .

З огляду на наведені вище судження остаточно отримана модель в дійсних координатах

$$y = 9.022 + 0.024x_1 - 0.72x_2 + 0.033x_5 + 0.056x_2^2.$$

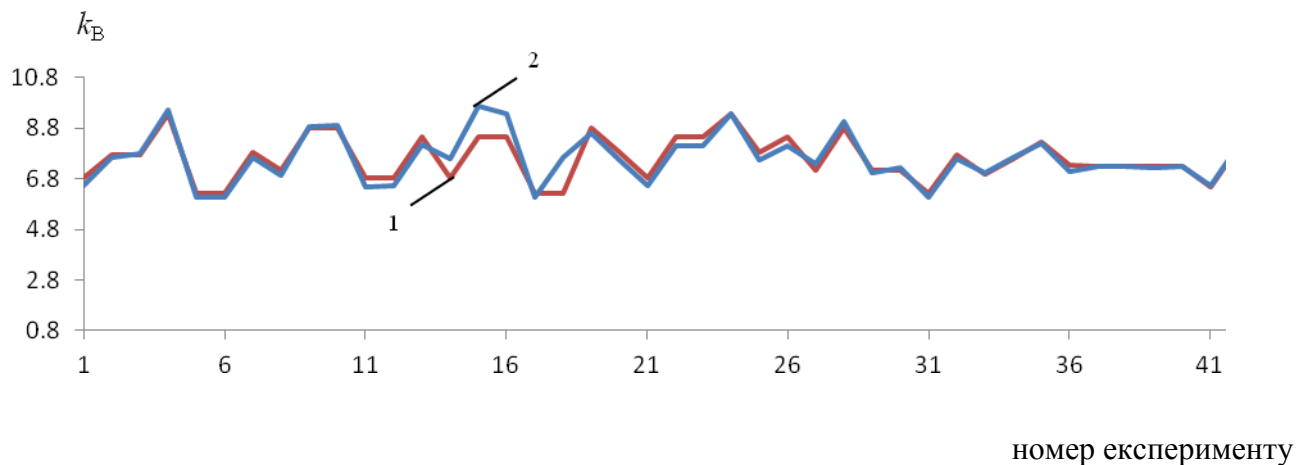
Рівняння регресії матиме вигляд

$$k_B = 9.022 + 0.056n^2 - 0.72n + 0.024\Delta S\% + 0.033t_{\text{н.с.}}^0. \quad (4.18)$$

Проведено перевірку моделі (4.18) на адекватність. Розрахункове значення критерію Фішера $F_{\text{розрах}} = 1.192$.

Для заданих параметрів $F_{\text{табл}} = 1.6$ [101].

Умова (4.13) виконується, отже модель адекватна.



1 – k_B за рівнянням регресії; 2 – k_B за результатами моделювання

Рисунок 4.3 – Коефіцієнти втрат за результатами експерименту та за отриманим рівнянням регресії для ділянки змінного струму

Як видно із рис. 4.3 коефіцієнти втрат отримані за результатами моделювання та за рівнянням регресії майже не відрізняються, що свідчить про високу точність отриманих рівнянь.

Висновки до розділу 4

1. Математичне моделювання для ділянок Придніпровської (постійного струму) та Одеської (змінного струму) залізниць показало, що середні втрати електроенергії в контактній мережі на представлених ділянках складають 12,4 % та 6,3 % відповідно.

2. На основі повного факторного експерименту отримані рівняння регресії для визначення коефіцієнту втрат для ділянок постійного та змінного струмів. На основі імітаційного моделювання визначено, що середній коефіцієнт втрат для ділянки постійного струму 1,16 Ом, а для ділянки змінного струму 5,58 Ом для прийнятих схем живлення.

РОЗДІЛ 5

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ОБЛІКУ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ

5.1 Регламент зміни коефіцієнта втрат

В попередньому розділі отримані рівняння регресії для визначення коефіцієнта втрат, але не вирішеним залишається питання про регламент його зміни. Для практичного застосування результатів дисертаційної роботи необхідно знати як часто змінювати коефіцієнт втрат. Для вирішення цього питання скористаємося методом Монте-Карло.

Метод Монте-Карло та моделювання за його допомогою досить широко представлені в [105-112]. Моделювання для визначення характеру зміни коефіцієнта втрат проведемо в середовищі Crystal Ball за наступним алгоритмом (рис. 5.1).

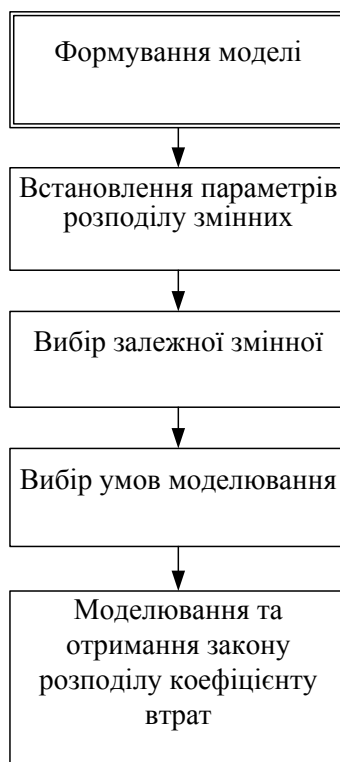


Рисунок 5.1 – Алгоритм моделювання за допомогою методу Монте-Карло
в середовищі Crystal Ball

Для формування моделі задамося вихідними параметрами та законами розподілу змінних (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для моделювання

Вихідні дані моделі	Закон розподілу	Параметри закону
Кількість поїздів на розрахунковій зоні	Біноміальний	$P=0,0822$, $n=43$
Зношування контактних проводів	Логнормальний	$m=17,2$, $\sigma=5,67$
Температура навколишнього середовища	Вейбула	$k=50,51$, $v=4,6924$
Швидкість руху електрорухомого складу	Логнормальний	$m=47,52$, $\sigma=22,07$

Для моделювання використаємо рівняння регресії (4.17) та (4.18) для визначення коефіцієнтів втрат для постійного та змінного струмів.

В результаті моделювання отримані гістограми розподілу коефіцієнта втрат для ділянок постійного та змінного струмів (рис. 5.2 та рис. 5.3), встановлено, що коефіцієнти втрат підпорядковуються логнормальному розподілу. Отримані наступні характеристики розподілу коефіцієнта втрат (табл. 5.2)

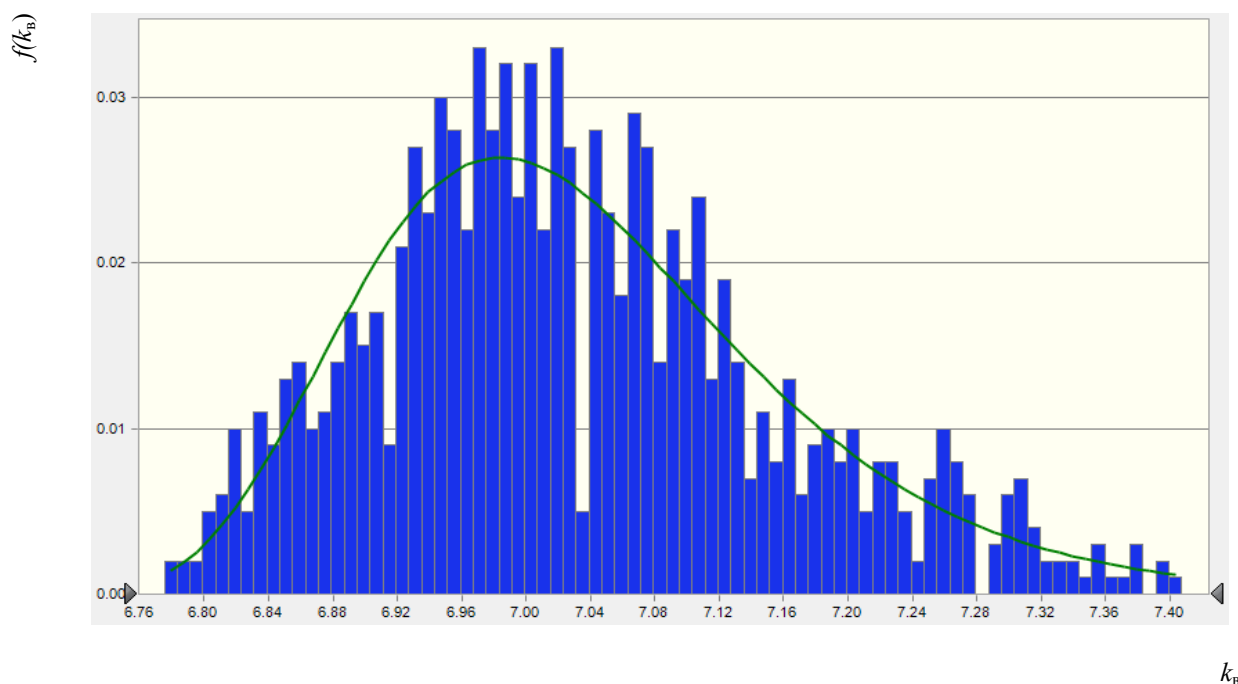


Рисунок 5.2 – Гістограма розподілу коефіцієнта втрат для ділянки змінного струму (Одеська залізниця)

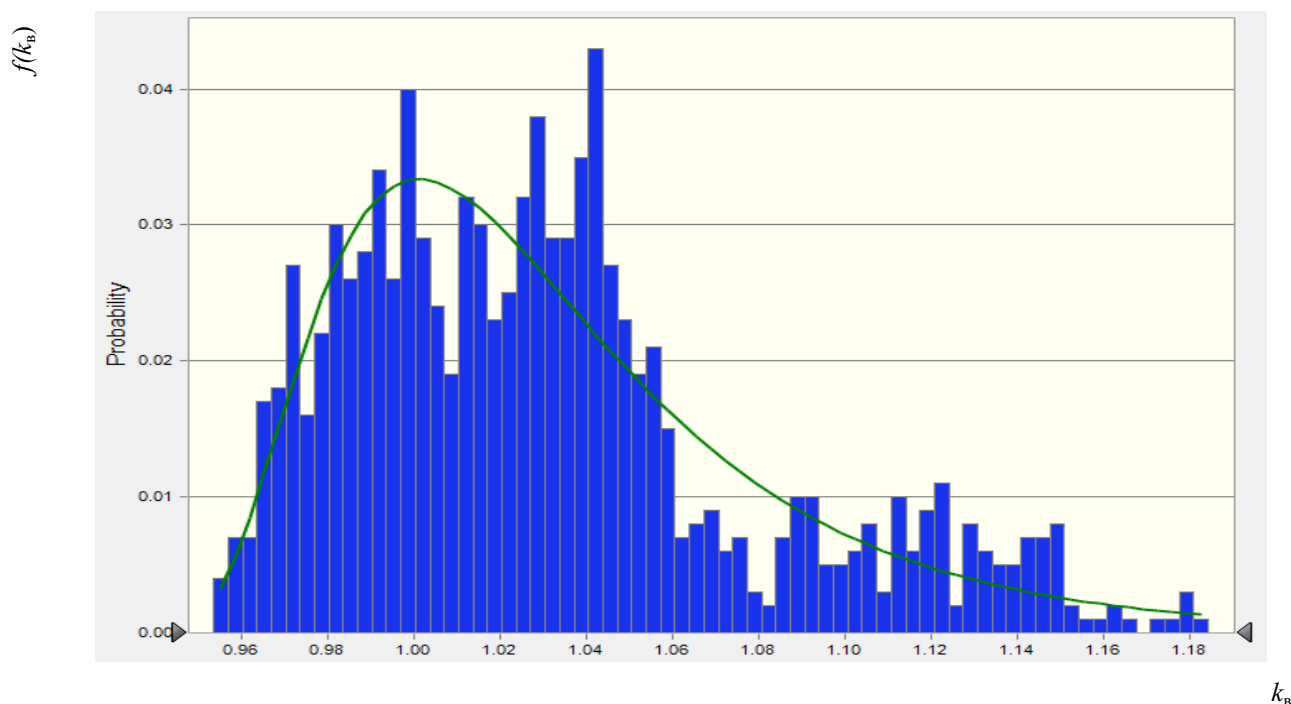


Рисунок 5.3 – Гістограма розподілу коефіцієнта втрат для ділянки постійного струму (Придніпровська залізниця)

Таблиця 5.2 – Характеристики розподілу коефіцієнта втрат електроенергії

Математичне очікування μ	Медіана Me	Мода Mo	Середнє квадратичне очікування σ	Дисперсія D	Асиметрія γ_1	Ексцес γ_2	Коефіцієнт варіації V
Одеська залізниця							
7,04	7,02	6,98	0,13	0,02	0,87	4,38	0,02
Придніпровська залізниця							
1,03	1,02	1,0	0,06	0,00	1,79	9,19	0,05

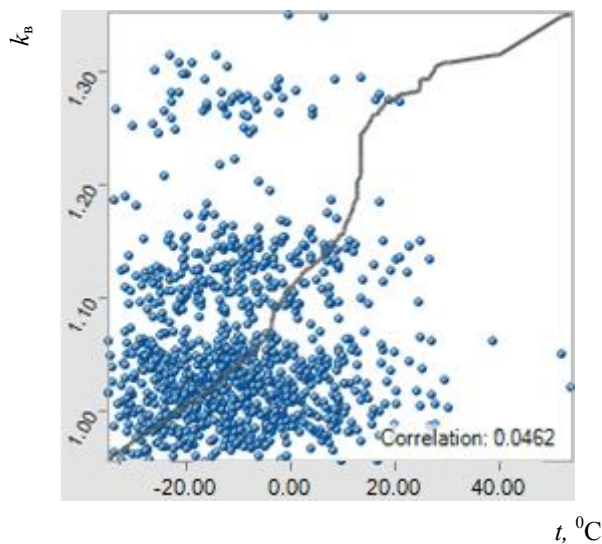
За результатами моделювання встановлено, що на досліджуваних ділянках коефіцієнт втрат змінюється в таких межах (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Межі зміни коефіцієнта втрат

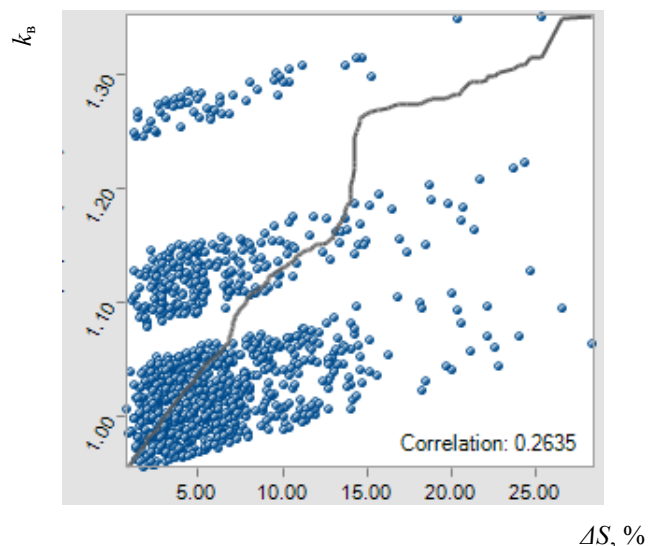
Значення k_B	Ділянка постійного струму	Ділянка змінного струму
Мінімальне значення	0,94	6,56
Максимальне значення	1,33	7,79

Для надання рекомендацій щодо регламенту зміни коефіцієнта втрат визначимо ступінь впливу кожного з факторів. Для ділянки постійного струму

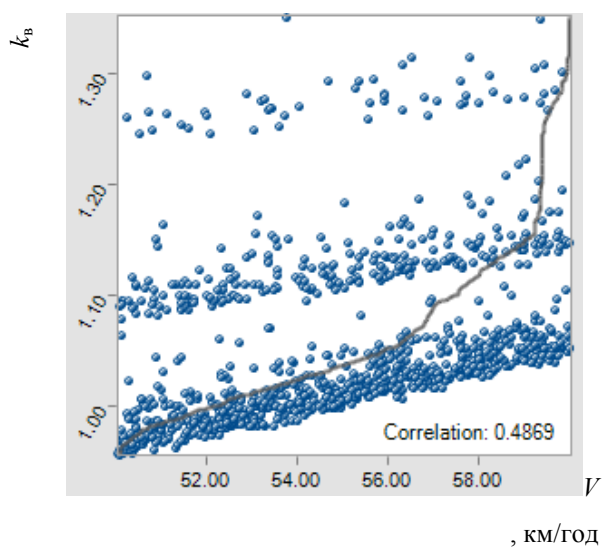
коефіцієнт кореляції (рис. 5.4) між коефіцієнтом втрат і температурою навколишнього середовища складає 0,0462; між коефіцієнтом втрат і зношуванням контактного проводу – 0,2635, між коефіцієнтом втрат і швидкістю руху електрорухомого складу – 0,4865, між коефіцієнтом втрат і кількістю поїздів на розрахунковій зоні – (-0,7942).



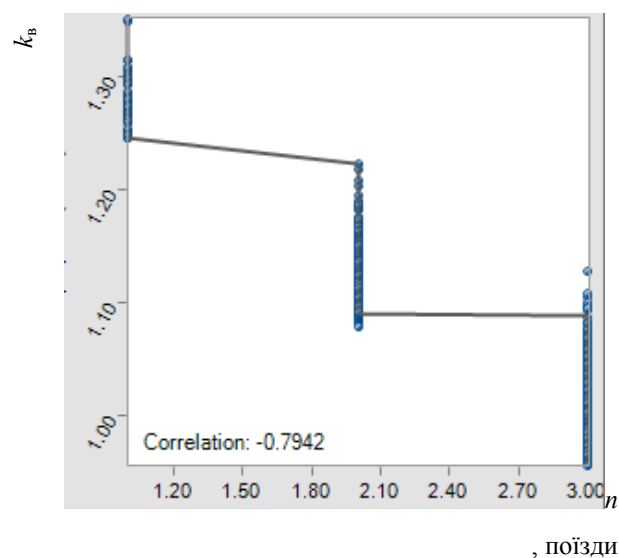
a – температура навколишнього середовища;



б – зношування контактних проводів;



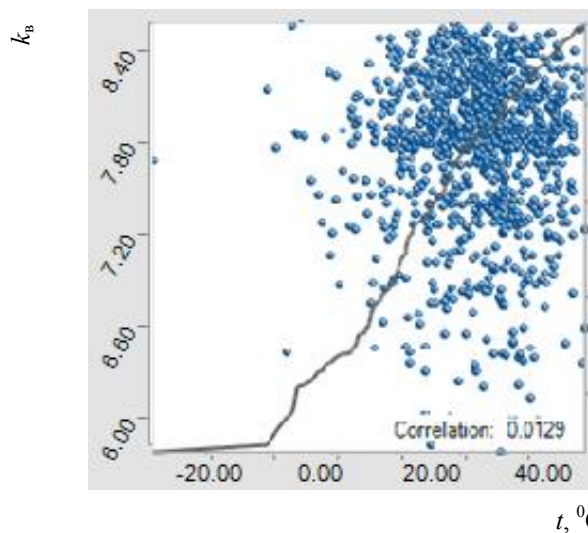
в – швидкість руху ЕРС;



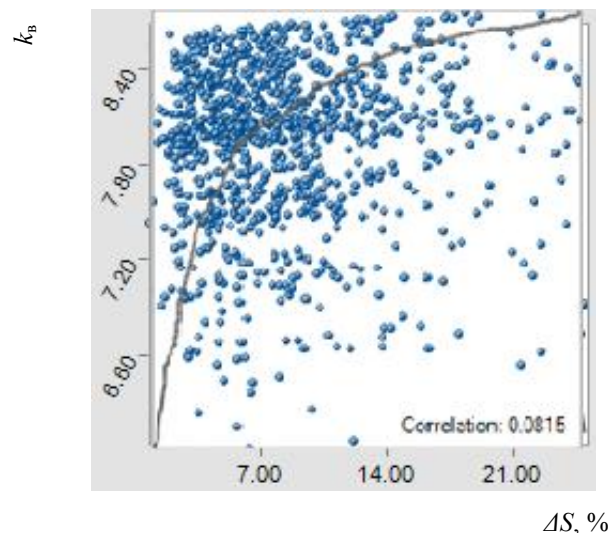
г – кількість поїздів на міжпідстанційній зоні;

Рисунок 5.4 – Кореляція коефіцієнта втрат для ділянки постійного струму

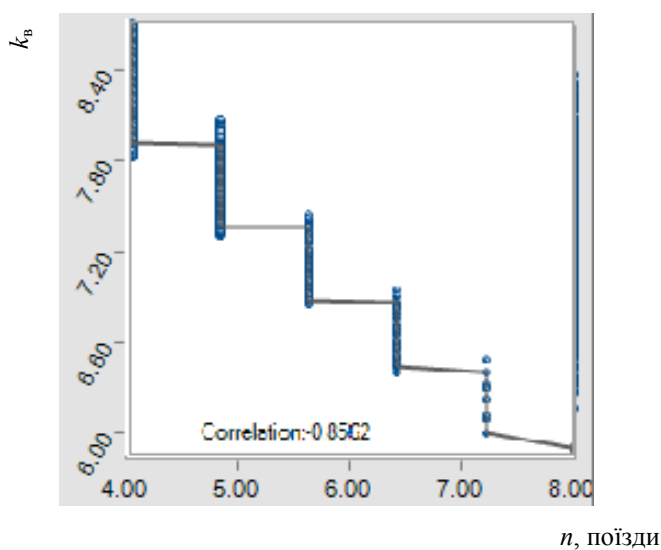
Для ділянки змінного струму коефіцієнт кореляції (рис. 5.5) між коефіцієнтом втрат і температурою навколишнього середовища складає 0,0129; між коефіцієнтом втрат і зношуванням контактних проводів – 0,0815; між коефіцієнтом втрат і кількістю поїздів на розрахунковій зоні – (-0,8562).



a – температура навколишнього середовища;



б – зношування контактних проводів;



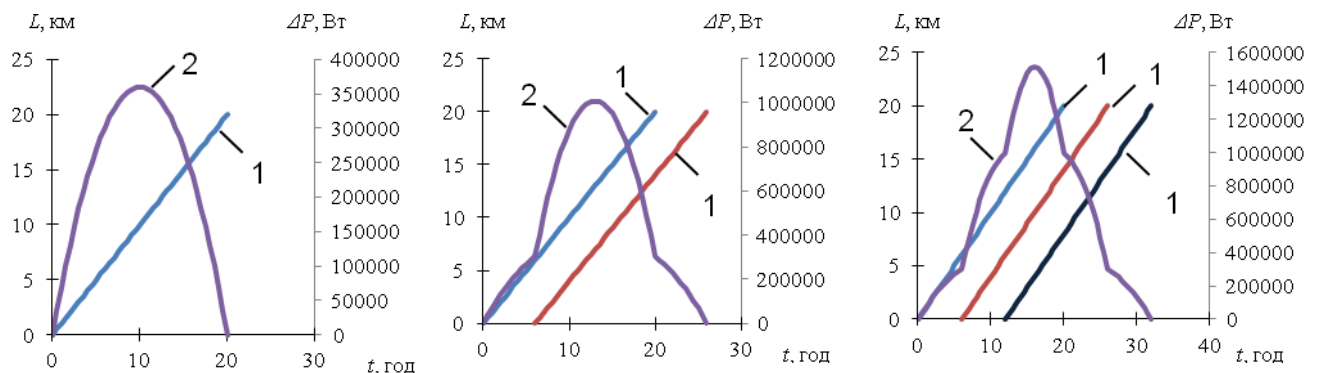
в – кількість поїздів на міжпідстанційній зоні;

Рисунок 5.5 – Кореляція коефіцієнта втрат для ділянки змінного струму

Як видно із рис. 5.4, 5.5 найбільша кореляція між коефіцієнтом втрат і кількістю поїздів на розрахунковій зоні (-0,7942 для ділянки постійного струму, -0, 8562 для ділянки змінного струму). Оскільки кореляція від’ємна, значить із

збільшенням числа поїздів зменшується коефіцієнт втрат. Це підтверджується залежністю (2.27) та рис. 2.12 отриманими у другому розділі.

З огляду на вищесказане дослідимо вплив кількості поїздів на ділянці постійного струму (Ч-У Придніпровської залізниці) із двостороннім живленням на коефіцієнт втрат. Схема живлення – двостороння. На першому етапі побудуємо розподіли миттєвих втрат потужності в контактній мережі при різних кількості поїздів (рис. 5.6).



а – один поїзд;

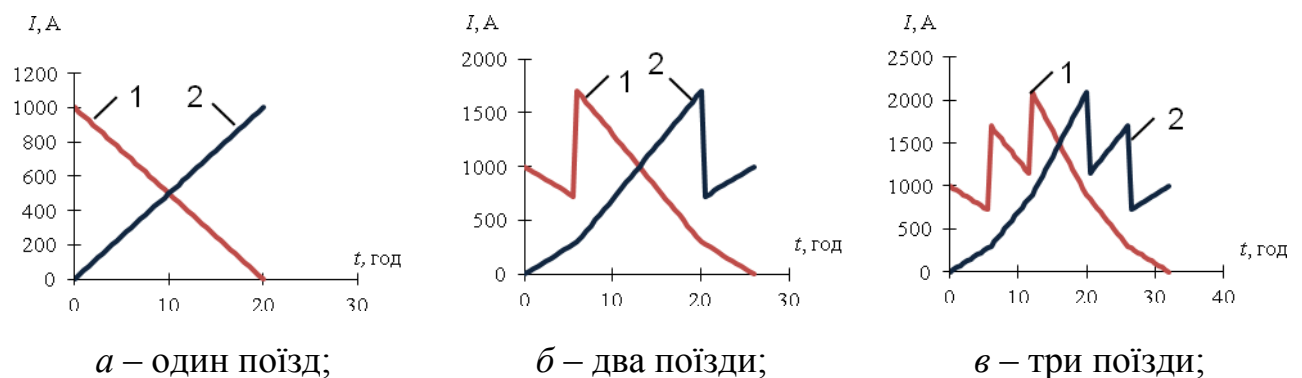
б – два поїзди;

в – три поїзди;

1 – нитка графіка руху, 2 – загальні миттєві втрати в контактній мережі

Рисунок 5.6 – Миттєві втрати потужності в контактній мережі

Оскільки для визначення коефіцієнта втрат необхідно знати струми фідерів, то на другому етапі побудуємо струми першого та другого фідера при одному, двох, та трьох поїздах на ділянці (рис. 5.7).



а – один поїзд;

б – два поїзди;

в – три поїзди;

1 – струм першого фідера, 2 – струм другого фідера

Рисунок 5.7 – Струми фідерів тягової підстанції

Оскільки лічильники втрат встановлюються на кожному фідері та потребують індивідуального налаштування, то необхідно знати яка частина втрат припадає на перший фідер, а яка на другий. На третьому етапі побудуємо миттєві втрати потужності окремо від кожного з фідерів (рис. 5.8).

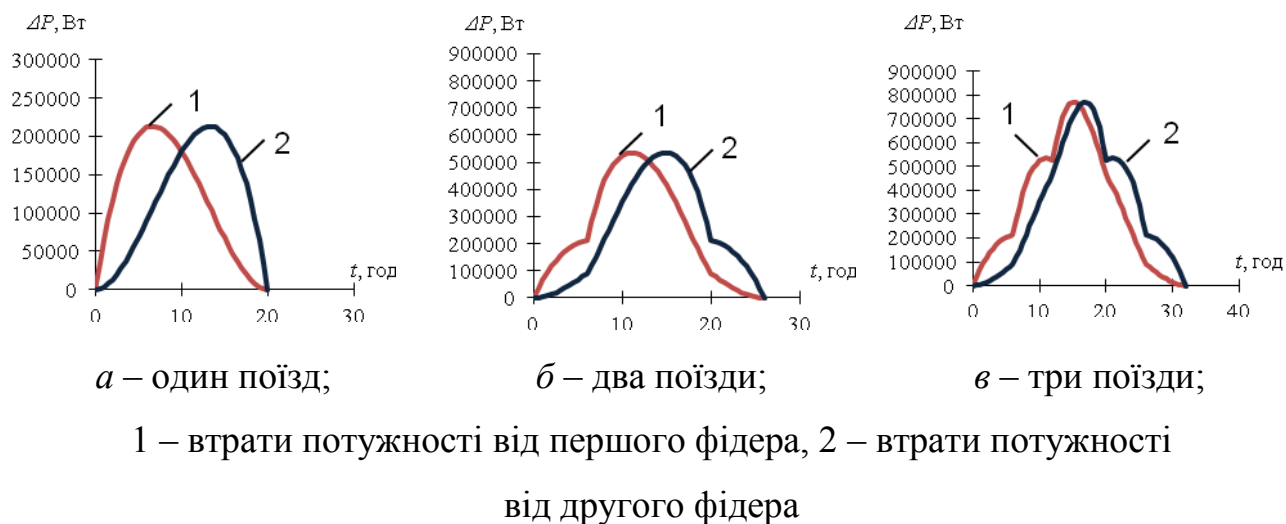


Рисунок 5.8 – Втрати потужності в контактній мережі від першого та другого фідерів

Поділивши рис. 5.8 на 5.7 отримаємо миттєві та еквівалентні коефіцієнти втрат для різної кількості поїздів (рис. 5.9).

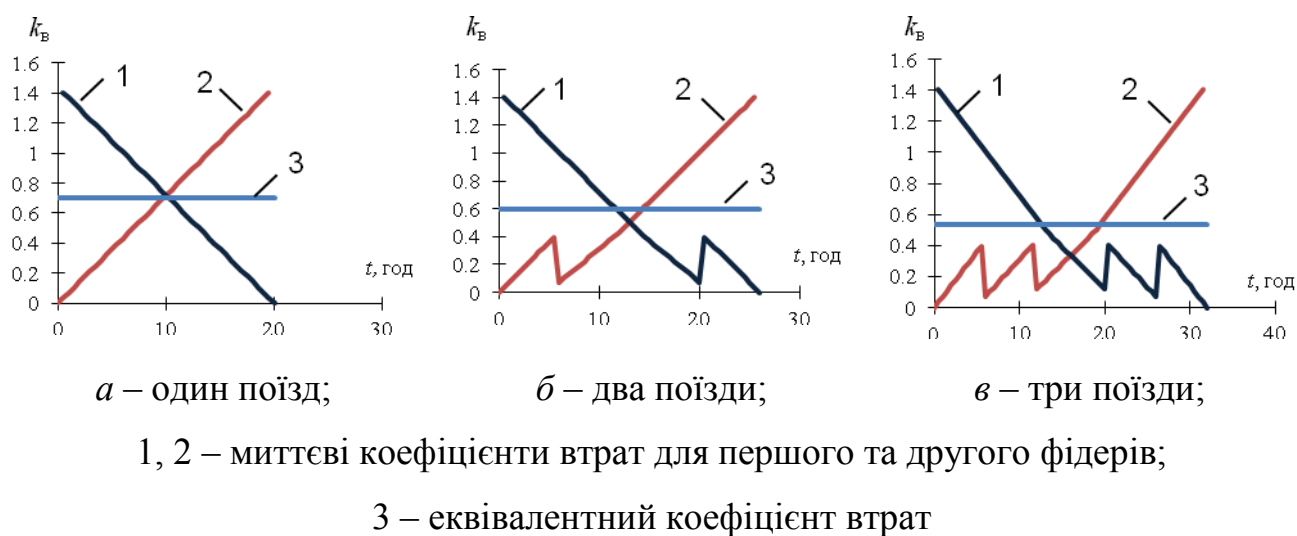


Рисунок 5.9 – Миттєві коефіцієнти втрат для першого та другого фідерів та їх еквівалентне (середнє) значення

Середнє значення коефіцієнта втрат при одному поїзді на ділянці 0,7, при двох 0,6, при трьох 0,53.

На прикладі ділянки Ч-У Придніпровської залізниці розглянемо як в реальних умовах змінювався коефіцієнт втрат. На основі даних по розподілу кількості поїздів на та отриманих коефіцієнтів втрат побудуємо залежність зміну коефіцієнта втрат у часі за тиждень (рис. 5.10).

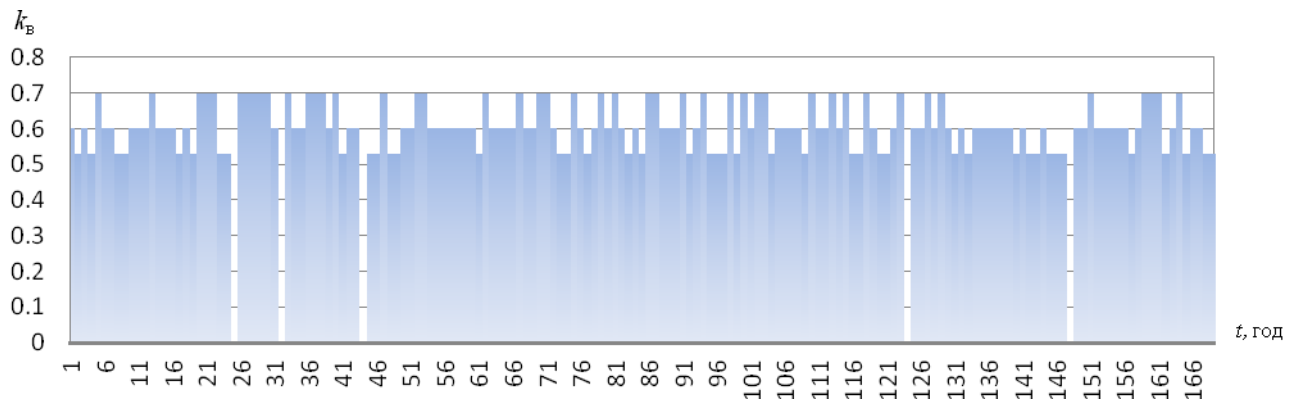


Рисунок 5.10 – Зміна коефіцієнта втрат за тиждень на ділянці
ЧапLINE -УльянівКА Придніпровської залізниці

Аналогічні дослідження виконано для ділянки Одеської залізниці.

Для надання рекомендацій щодо регламенту зміни коефіцієнта обчислено похибку від усереднення коефіцієнтів втрат за дві, три, чотири години і т. д. до 168 год. (рис. 5.11). Всі розрахунки проводились в середовищі Mathcad (додаток Г).

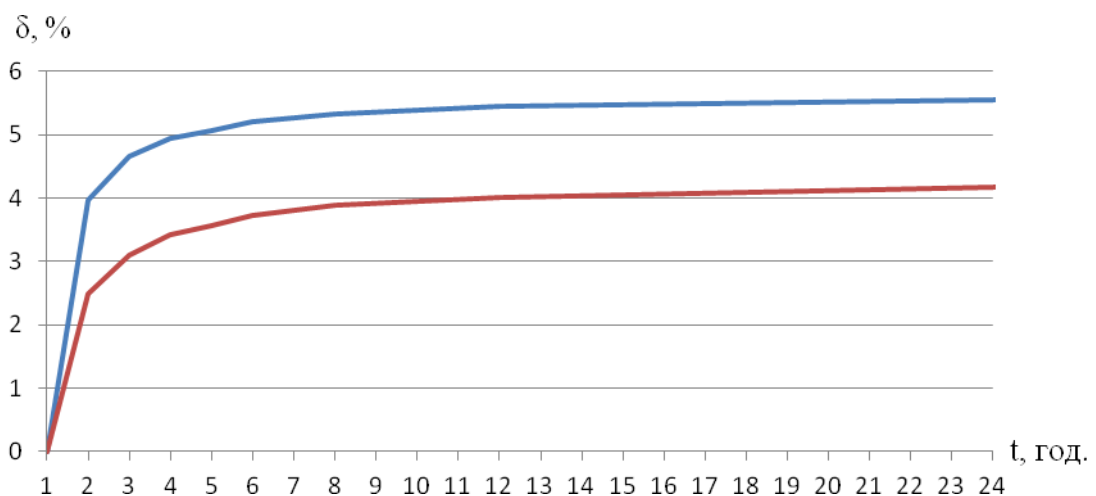


Рисунок 5.11 – Похибка визначення втрат електроенергії в залежності від
періодичності зміни k_v за добу

Дослідження показали, що із плином часу похибка змінюється незначно: через тиждень вона встановлюється на рівні 5,8 % для змінного струму та 4,3 % для постійного струму і надалі зростає на соті частки відсотка.

Регламент зміни коефіцієнта втрат залежить від необхідної точності. Для ділянки змінного струму якщо необхідно щоб похибка не перевищувала 5 %, то коефіцієнт втрат потрібно змінювати кожні 4 години (рис. 5.11). Якщо ж достатня точність із похибкою 6 %, то лічильник можна не переналаштовувати. Що ж стосується ділянки постійного струму, то за тиждень похибка не перевищує 4,3 % і надалі змінюється дуже не значно, отже лічильник можна не переналаштовувати. Достатньо введення середнього значення коефіцієнта втрат для представленої ділянки.

5.2 Схемна реалізація пристрою для вимірювання втрат електроенергії в контактній мережі

Лічильники втрат електричної енергії не набули широкого застосування при обліку споживання електричної енергії на тягових підстанціях, крім того досить мало на яких підстанціях встановлено лічильники безпосередньо на приєднаннях фідерів контактної мережі. Лише один тип з сучасних лічильників в якості додаткової опції має функцію інтегрування квадрату струму, а у більшості своїй така можливість у інших лічильниках відсутня. Але в дистанціях електропостачання використовуються сучасні портативні аналізатори споживаної потужності, зокрема прилад EDL-175 компанії *Satec* [113]. Однією з його функціональних можливостей є інтегрування діючого значення струму, тобто розрахунок ампер-годин, що вимірюються за допомогою кліщів Роговського та узгоджувального пристрою, який перетворює споживаний струм і відповідний сигнал за допомогою окремого інтегратора. Вихідний сигнал з інтегратора підключається до спеціальних роз'ємів основного приладу, який виконує подальше обчислення діючого значення струму та його інтегрування в часі.

Використовуючи описану функцію пристрою, можна визначити ампер-квадрат-години, тобто інтеграл від квадрата струму, якщо виконати перетворення сигналу між інтегратором кліщів Роговського та безпосередньо самим пристроєм.

В загальному випадку прилад виконує визначення діючого значення струму за його миттєвим значенням на періоді основної частоти T

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}.$$

Визначимо передаточну функцію пристрою узгодження, щоб у кінцевому випадку після виконання операції інтегрування було отримано квадрат діючого значення струму, тобто вирішимо функціональне рівняння

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T F^2[i(t)] dt} = I^2, \quad (5.1)$$

де $F[i(t)]$ – невідома функція.

Припустимо, що шукана функція дорівнює квадрату миттєвого значення струму, тобто $F[i(t)] = i^2(t)$. Підставимо припущення у рівняння (5.1) та перевіримо його.

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^4(t) dt} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^4 \sin^4 \omega t dt} = I_m^2 \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{1}{\omega} \left[-\frac{\cos \omega t \sin^3 \omega t}{4} - \frac{3 \sin 2\omega t}{16} - \frac{3\omega t}{8} \right]_0^T} = \\ &= \frac{\sqrt{6}}{4} I_m^2 \neq I^2. \end{aligned}$$

Тобто припущення відносно $F[i(t)]$ хибне, оскільки результат не дорівнює квадрату діючого значення вхідного сигналу.

Аналізуючи попередній результат, робимо припущення, що передаточна функція дорівнює добутку діючого та миттєвого значення струму, тобто $F[i(t)] = I \cdot i(t)$. Виконаємо відповідну підстановку у рівняння (5.1) та перевіримо його.

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 \cdot i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 \cdot I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{I^2 \cdot I_m^2}{2}} = I^2 \equiv I^2.$$

Шукана передаточна функція дорівнює добутку діючого та миттєвого значення струму.

Відповідно до передаточної функції, побудуємо структурну схему узгоджую чого пристрою.

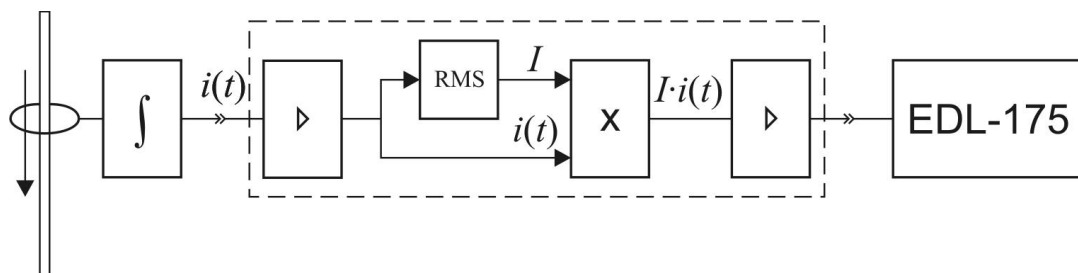


Рисунок 5.12 – Структурна схема пристрою узгодження

Для схемотехнічної реалізацію пристрою (рис. 5.12) застосуємо дві аналогові мікросхеми AD637 та AD633, які виконують операції визначення діючого значення та множення сигналів. Для узгодження вхідного та вихідного сигналу застосуємо прецензійні операційні підсилювачі ОР-07.

Мікросхема AD633 (рис. 5.13) представляє собою функціональний, чотири квадрантний аналоговий помножувач. Він складається із високоомних диференціальних входів X та Y і сумуючого входу Z . Повне масштабування напруги низькоомного виходу 10 В проводиться за допомогою вбудованого стабілітрона. Нелінійність входу у складає менше 0,1 %, а вихідний шум не більше 100 мкВ у смузі частот від 10 Гц до 10 кГц [114].

Напруга живлення мікросхеми AD633 становить від ± 8 В до ± 18 В. Входи

X та Y мають від'ємну полярність, але вони повністю диференційні і у багатьох модифікаціях можуть мати зворотну полярність, або можуть бути керованими.

Сигнали на диференційних входах X та Y перетворюються у струм. Результат множення цих струмів генерується ядром. Характеристика вбудованого стабілітрону забезпечує загальний коефіцієнт масштабу 10 В. Вузлова точка Z (табл. 5.4) дозволяє додавати два, або більше входи, збільшувати коефіцієнт посилення, перетворювати вихідну напругу на струм, та налаштовувати різні додатки.

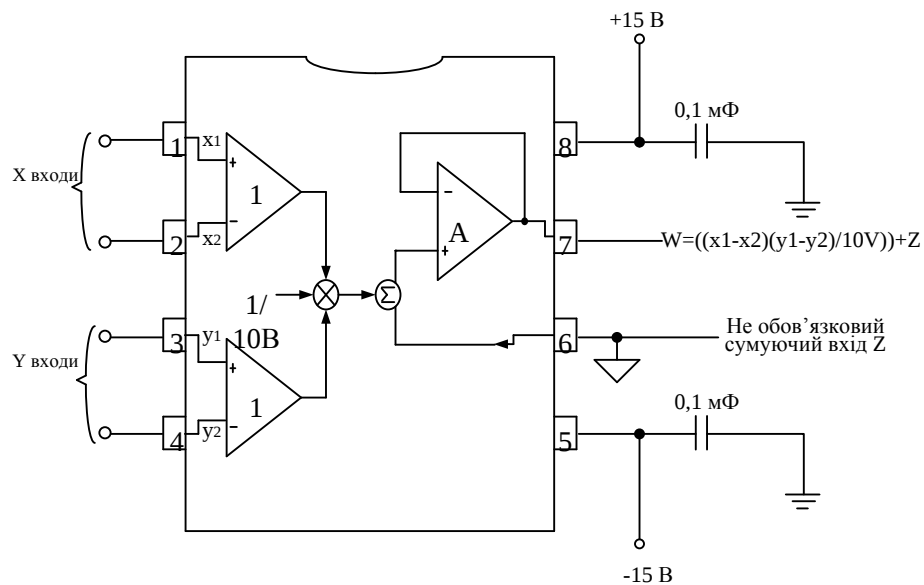


Рисунок 5.13 – Основні з'єднання множника AD633

Таблиця 5.4 – Опис виводів мікросхеми AD633

Вивід	Мнемоніка	Функція
1	x_1	неінвертуючий x вхід множника
2	x_2	інвертуючий x вхід множника
3	y_1	неінвертуючий y вхід множника
4	y_2	інвертуючий y вхід множника
5	$-V_s$	від'ємна шина живлення
6	Z	сумуючий вихід
7	W	вихідний сигнал
8	$+V_s$	додатна шина живлення

Функція передачі (W) в загальному вигляді визначається виразом

$$W = \frac{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{10V} + Z .$$

Функціональна блок-схема високочастотного перетворювача AD637, що обчислює діюче значення сигналу представлена на рис 5.14 [115].

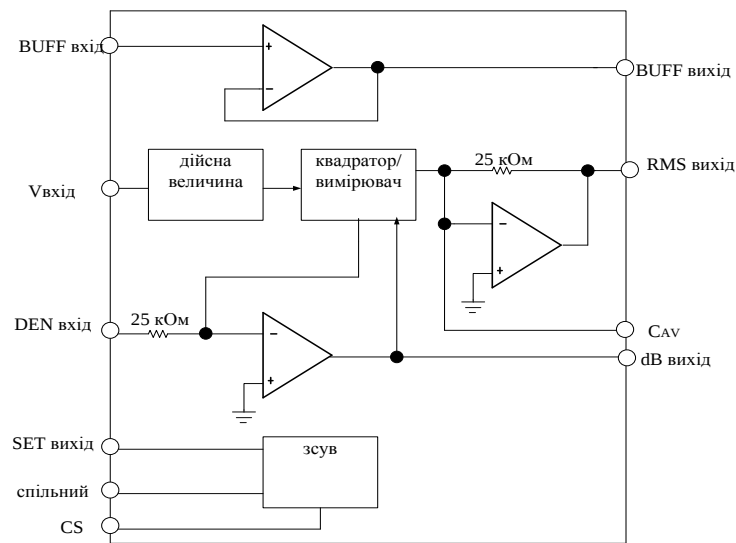


Рисунок 5.14 – Функціональна блок-схема AD637

AD637 захищена від перепадів напруги. Перетворювач для промислового застосування працює в діапазоні температур від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Фільтр зменшує рівень пульсацій, тим самим підвищуючи точність. Опис виводів мікросхеми представлений в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Опис виводів мікросхеми AD637

Вивід	Мнемоніка	Функція
1	BUFF вхід	буферний вхід
2,12	NC	не використовується
3	загальний	загальна точка
4	вихід OFFSET	зсув сигналу
5	CS	вибір чіпу
6	DEN вхід	вхід дільника
7	Db вихід	Db вихід
8	C_{AV}	підключення усереднюючого конденсатору
9	RMS вихід	вихід діючого значення
10	$-V_s$	від'ємна шина живлення
11	$+V_s$	додатна шина живлення
13	V_{IN}	сигнальний вхід
14	BUFF вихід	буферний вихід

З урахуванням наведеного вище запропонована схемотехнічна реалізація пристрою для вимірювання втрат електроенергії в контактній мережі (рис. 5.15).

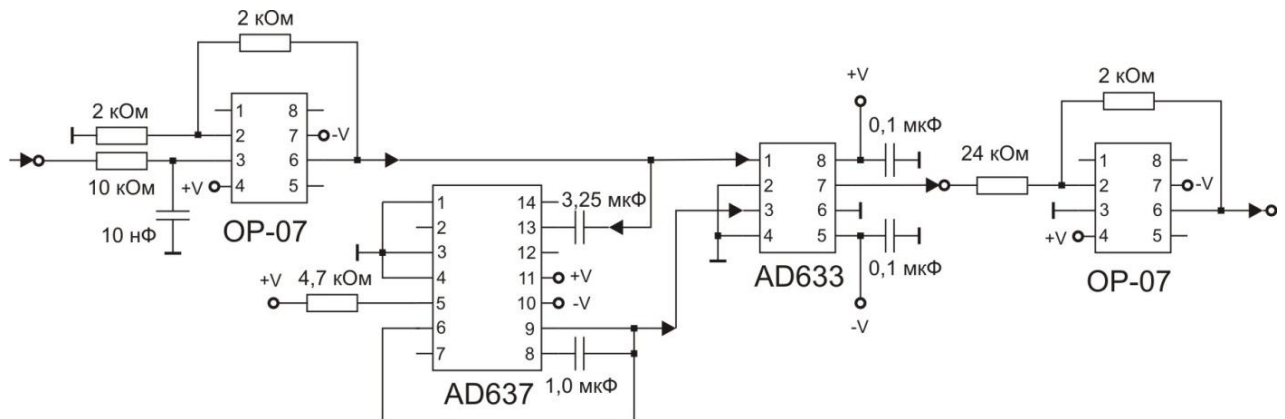


Рисунок 5.15 – Схемна реалізація пристрою

5.3 Результати вимірювань витрат та втрат електроенергії

На ділянці Кароліно - Бугаз – Білгород - Дністровський проведено порівняння витрат електроенергії, за показниками лічильників тягової підстанції Білгород - Дністровський та лічильниками електрорухомого складу [3]. Експеримент проводився на ділянці Кароліно - Бугаз – Білгород - Дністровський, живлення якої здійснювалось консольно від тягової підстанції Білгород - Дністровський фідером контактної мережі № 3 (рис. 5.16).

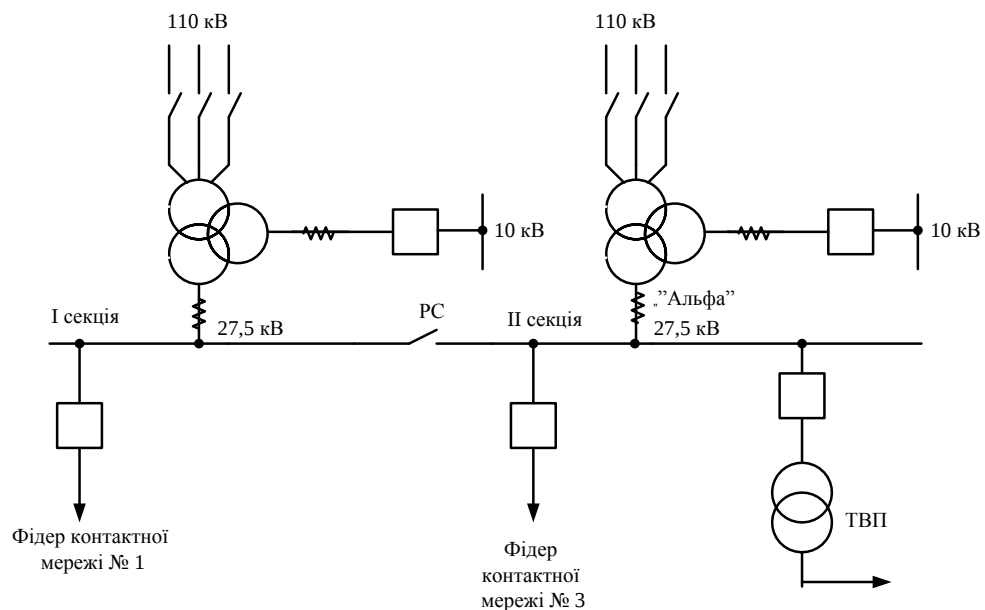


Рисунок 5.16 – Спрощена схема живлення контактної мережі на період проведення експерименту

Ділянка одноколійна, довжиною 30 км. Контактний провід МФ-100, несучий трос ПБСМ-70. З метою визначення витрати електроенергії на тягу поїздів на тяговій підстанції Білгород - Дністровський була зібрана схема роздільного живлення секцій шин 27,5 кВ. Від II секції шин (ТП-2) отримували живлення тільки фідер контактної мережі № 3, а фідера ДПР, ТВП і 10 кВ отримували живлення від I секції шин (ТП-1). Облік електроенергії на тягу поїздів здійснювався лічильником «Альфа», встановленим на вводі 27,5 кВ тягового трансформатора № 2. З 10⁰⁰ 21 лютого до 10⁰⁰ 22 лютого по ділянці прослідувало 18 поїздів, з них: 2 пасажирських, 8 електропоїздів та 8 вантажних (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Відомість споживання електроенергії за період експерименту

№ поїзда	№ електровоза	Час проходження нейтральної вставки		Показники лічильника на нейтральній вставці		Витрата електроенергії, кВт·год
		Туди	Назад	Туди	Назад	
685	1850	21.02	21.02	700510	700565	1200
3056	1850	16 ¹⁷	18 ⁴⁷	776980	777045	
3001	1060	21.02	21.02	904596	904702	2160
3058	1060	16 ⁵⁵	20 ²⁰	482966	483076	
4303	2040	22.02	22.02	404790	404790	1080
3052	2040	6 ⁵⁵	9 ⁵⁵	160695	160749	
3051	1850	22.02	22.02	700756	700838	1830
686	1850	2 ⁰⁰	5 ²⁶	777257	777358	
3057	1058	21.02	21.02	358044	358127	1440
3004	1058	18 ¹⁵	21 ⁰⁴	155638	155699	
6311	642	21.02	22.02	905691	905795	939,6
6344	642	22 ²⁵	8 ⁵³	110769	110878	
				448583	448696	
				711014	711122	
				397839	397971	
6309	633	21.02	22.02	456655	456767	861
6342		19 ²⁰	5 ⁵⁰	837625	837743	
				201245	201368	
				332785	332931	
6303	374	21.02	21.02	567057	567172	1049,12
6348		10 ³⁷	15 ³⁵	317991	318113	
				161317	161427	
				669602	669748	
				637352	637491	
6305	634	21.02	21.02	193882	194022	873,16
		13 ⁰⁰	18 ¹⁰	264773	264895	
				648377	648415	
				192968	193085	
				817248	817365	

Витрата електроенергії за лічильниками електрорухомого складу (табл. 5.7) склала – 11433 кВт·год. За добу експерименту витрата активної електроенергії на тягу поїздів за показниками лічильника ТП - 2 підстанції Білгород - Дністровський склала (табл. 5.7).

Таблиця 5.7 – Показники лічильника ТП - 2 підстанції Б.Д ($K_{розр} = 33000$)

Дата та час	Показники лічильника
10 ⁰⁰ 21 лютого	0143,02
10 ⁰⁰ 22 лютого	0143,40

Із табл. 5.6 електроенергія віддана в контактну мережу по лічильникам підстанції Б.Д.: $W_{\pi} = 0,38 \cdot 33000 = 12540$ кВт·год.

Втрати в контактній мережі склали:

$$\Delta W_{\text{км}} = 12540 - 11433 = 1107 \text{ кВт·год.}$$

$$\Delta W_{\text{км}} = \frac{12540 - 11433}{12540} \cdot 100\% = 8,8\%$$

На сьогоднішній день втрати електроенергії в контактній мережі визначаються розрахунковим шляхом за затвердженою методикою. Для консольного живлення одноколійної ділянки [72]:

$$\Delta W_{\text{км}} = r_1 \cdot W_{\text{рм}}^2 \cdot \left(\frac{1850}{N} + 0.92 \cdot l \right) \cdot 10^{-6}, \quad (5.2)$$

де $\Delta W_{\text{км}}$ – втрати електроенергії в контактній мережі, кВт·год;

r_1 – погонний активний опір одноколійної лінії Ом/км;

N – середнє число пар поїздів на ділянці;

l – довжина міжпідстанційної зони, км;

$W_{\text{рм}}$ – місячне споживання електроенергії поїздами на міжпідстанційній зоні, тис. кВт·год.

Якщо на основі цієї формули визначити втрати електроенергії для ділянки К.Б-Б.Д, то вони складуть 1243,2 кВт год., а за результатами

експерименту – 1107 кВт год. Як бачимо, розрахунок втрат електроенергії за інструкцією вносить похибку 12,3 %.

Втрати електроенергії на даній ділянці виміряні за допомогою пристрою запропонованого в попередньому підрозділі склали 1166,8 кВт год. Похибка δ склала 5,4 %.

На ділянці П - О протягом 10 годин проведено порівняння кількості електроенергії, врахованої лічильниками тягових підстанцій О та П і лічильниками електровозів. Для цього експерименту планувалося зібрати консольну схему живлення контактної мережі від тягової підстанції П. В процесі експерименту у зв'язку зі скаргами машиністів на низьку напругу, в районі станції О з 10^{00} до 12^{20} і з 16^{28} до 20^{00} здійснювалося паралельне підживлення контактної мережі фідерами № 4 (через ЗМВ) і № 5 підстанції О (рис. 5.17)

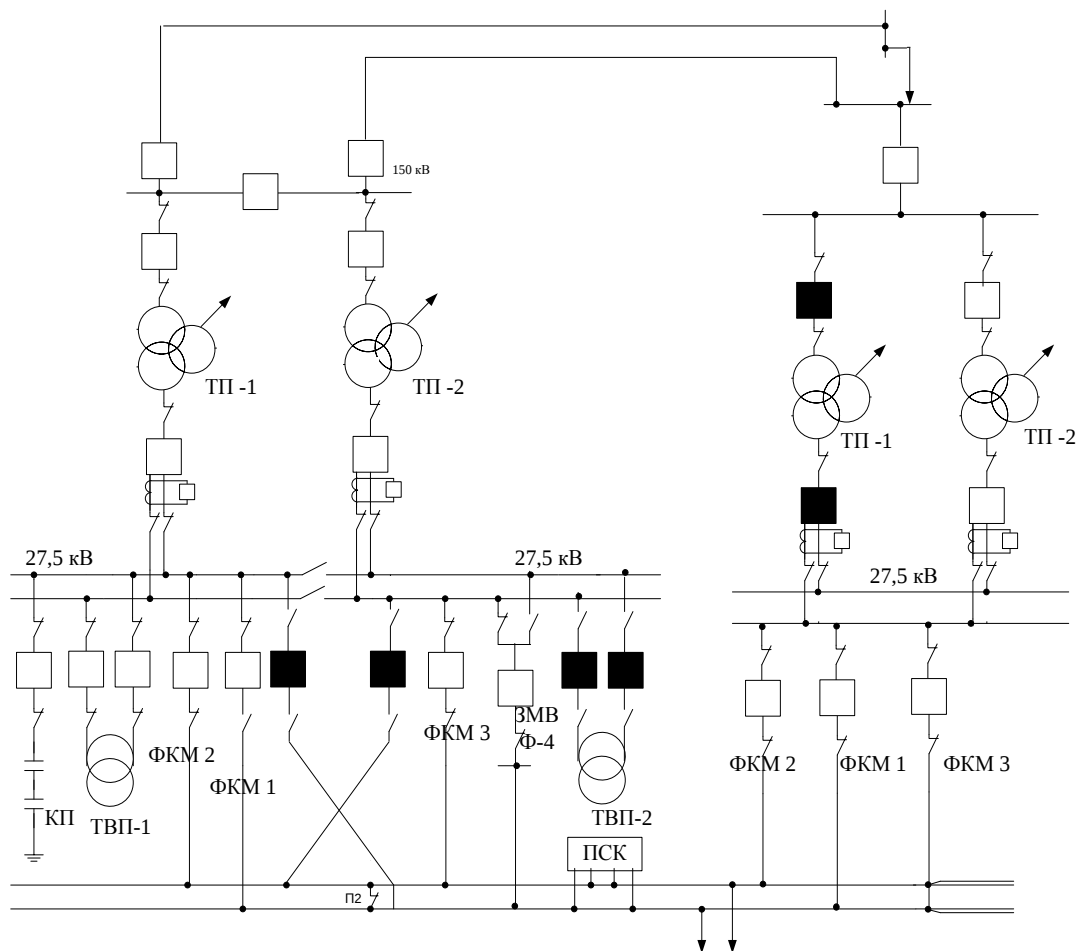


Рисунок 5.17 – Спрощена схема живлення дослідної ділянки П - О

Ділянка двоколійна з включеним постом секціонування по станції Щ і роз'єднувачем П2 станції О. Лічильники комерційного обліку підключені на вводах 27,5 кВ.

З 10⁰⁰ до 20⁰⁰ 25 квітня по вказаній ділянці прослідувало 54 поїзди. Поїзди супроводжувалися працівниками дистанцій електропостачання, які спільно з локомотивними бригадами записували показання лічильників на початку і кінці ділянки, час проходження нейтральних вставок. За час експерименту витрата електроенергії на тягу поїздів за показниками лічильника тягової підстанції склала (табл. 5.8, табл. 5.9).

Таблиця 5.8 – Показники лічильника тягової підстанції П ($K_{\text{тп}}-1000/5 = 200$; $K_{\text{тп}}-27500/127 = 216,53$; $K_{\text{розр}} = 200 \cdot 216,53 = 43307,09$)

Час	Показники лічильника
10 ⁰⁰	61,142
20 ⁰⁰	62,736

Витрати електроенергії, яка віддана в контактну мережу по лічильниках підстанції П: $W_{\text{п}} = 1,594 \cdot 43307,09 = 69031,5$ кВт·год.

Таблиця 5.9 – Показники лічильника тягової підстанції О. ($K_{\text{тп}}-750/5 = 150$; $K_{\text{тп}}-27500/100 = 275$; $K_{\text{розр}} = 150 \cdot 275 = 41250$)

Час	Показники лічильника
10 ⁰⁰	102,152
20 ⁰⁰	102,482

Витрати електроенергії, яка віддана в контактну мережу по лічильниках підстанції О: $W_{\text{о}} = 0,33 \cdot 41250 = 13612,5$ кВт·год.

Сумарні витрати електроенергії ТП П. та О.:

$$W_{\Sigma} = 69031,5 + 13612,5 = 82644,0 \text{ кВт·год.}$$

У зв'язку з тим, що до контактної мережі підключені ще й нетягові споживачі – від загальної витрати електроенергії по тяговим підстанціям віднімається споживання сторонніх споживачів за 10 годин – 208,36 кВт·год.

Тоді витрати електроенергії:

$$W_T = 82644 - 208,36 = 82435,64 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Проаналізуємо витрату електроенергії. Витрати електроенергії на тягу поїздів за лічильниками комерційного обліку становить 82435,64 кВт·год. не враховуючи втрати в тягових трансформаторах, а витрата електроенергії за лічильниками електровозів склала – 76430 кВт·год. Тоді втрати в контактній мережі складають:

$$\Delta W_{\text{км}} = \frac{82435,64 - 76430}{82435,64} \cdot 100\% = 7,28\%$$

З врахуванням втрат в трансформаторах отримаємо: по підстанції П. втрати в трансформаторі ТП - 2 складають 0,86 %, тоді фактичне споживання дорівнює:

$$W_H = \frac{69031,5 \cdot 0,86}{100} + 69031,5 = 69625,17 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

В трансформаторі ТП - 2 на підстанції О. втрати складають 1,5 %, тоді фактичне споживання дорівнює:

$$W_H = \frac{13612,5 \cdot 1,5}{100} + 13612,5 = 13816,69 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Сума витрат електроенергії обох підстанцій на тягу поїздів без врахування сторонніх споживачів складе

$$W_{\Sigma} = 69625,17 + 13816,69 - 208,36 = 83233,5 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Втрати електроенергії на дослідній ділянці з урахуванням втрат в трансформаторах склали

$$\Delta W_{\text{км}} = 83233,5 - 76430 = 6803,5 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

$$\Delta W_{\text{км}} = \frac{83233,5 - 76430}{83233,5} \cdot 100\% = 8,17\%$$

Втрати електроенергії визначені за (5.2) складають 7640,3 кВт год. Розрахунок втрат електроенергії за інструкцією вносить похибку 12,3 %. Втрати електроенергії на даній ділянці виміряні за допомогою пристрою запропонованого в попередньому підрозділі склали 7170,9 кВт год. Похибка δ склала 5,4 %

Висновки до розділу 5

1. Дослідження імовірнісного характеру коефіцієнта втрат електроенергії на основі методу Монте-Карло показало, що коефіцієнт втрат для дослідних ділянок змінного та постійного струмів підпорядковується логнормальному розподілу. Середнє значення коефіцієнта втрат для ділянки постійного струму складає 1,03, а для ділянки змінного – 7,04. Найбільший вплив на коефіцієнт втрат має кількість поїздів на міжпідстанційній зоні (для постійного струму коефіцієнт кореляції -0,7942, а для змінного -0,8562).

2. Сформовано наукові рекомендації щодо регламенту зміни коефіцієнта втрат. Встановлено, що для забезпечення похибки не більше 5 % для ділянки Одеської залізниці (змінного струму) необхідно змінювати коефіцієнт втрат кожні 4 години, а для ділянки Придніпровської залізниці (постійного струму) лічильник втрат можна не переналаштувати.

3. Розроблено перетворювач струму, який у поєднанні з портативним аналізатором потужності дозволяє вимірювати квадрат струму. Налаштування цього пристрою з запропонованим коефіцієнтом втрат дозволяє вимірювати втрати електроенергії в контактній мережі за відсутності лічильника.

4. Експериментальні дослідження показали, що запропонований вдосконалений непрямий метод визначення втрат електроенергії в контактній мережі підвищує точність визначення втрат електроенергії на 6,9 % в порівнянні з розрахунком за діючою методикою.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є закінченою науковою працею, у якій на основі теоретичних і експериментальних досліджень вирішена актуальна науково-технічна задача удосконалення методу визначення втрат електроенергії в контактній мережі.

У результаті досліджень одержано такі основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації:

1. На основі аналізу непрямих способів визначення втрат електроенергії в контактній мережі встановлено, що відомі методи мають похибку на рівні 7,5 %. Це зумовлено неточним визначенням коефіцієнта втрат. Тому пропонується вдосконалити непрямий метод врахуванням додаткових факторів: схеми живлення ділянки, зносу контактних проводів, кількості поїздів на розрахунковій зоні, температури навколишнього середовища, швидкості руху, струму електровоза.

2. На основі методу невизначених коефіцієнтів отримано залежність для визначення коефіцієнта втрат електроенергії, що враховує кількість поїздів на міжпідстанційній зоні. Встановлено, що опір еквівалентної схеми для різної кількості поїздів у загальному вигляді являє собою суму квадратів натурального ряду чисел.

3. Встановлено ймовірнісну природу факторів, що впливають на коефіцієнт втрат, визначено межі їх зміни та закони розподілу. Показано, що кількість поїздів на міжпідстанційній зоні підпорядковується біноміальному розподілу; швидкості поїздів на міжпідстанційних зонах, знос контактних проводів, струм поїзда – логнормальному розподілу; зміна температури – розподілу Вейбула.

4. На основі математичного моделювання роботи тягової мережі ділянок Придніпровської та Одеської залізниць встановлено, що середні втрати на досліджуваних ділянках складають 12,4 та 6,3 % відповідно. На основі повного факторного експерименту отримані рівняння регресії для визначення коефіцієнта втрат для ділянок постійного та змінного струмів.

5. На основі методу статистичних випробувань доведено, що коефіцієнт втрат електроенергії для ділянок змінного та постійного струмів підпорядковується логнормальному розподілу. Середнє значення коефіцієнта втрат для ділянки постійного струму складає 1,03, а для ділянки змінного струму – 7,04. Найбільший вплив на коефіцієнт втрат має кількість поїздів на міжпідстанційній зоні (для постійного струму коефіцієнт кореляції -0,7942, а для змінного -0,8562).

6. Надано рекомендації щодо регламенту зміни коефіцієнта втрат. Для забезпечення похибки менше 5 % для ділянки Одеської залізниці (змінного струму) необхідно змінювати коефіцієнт втрат кожні 4 години, а для ділянки Придніпровської залізниці (постійного струму) – приймається стале значення цього показника.

7. Розроблено вдосконалений метод контролю втрат електроенергії в контактній мережі на основі вимірювального комплексу, що складається з перетворювача струму та портативного аналізатора потужності. Використання в цьому методі коефіцієнта втрат, методика обчислення якого розроблена в дисертації, дає можливість підвищити точність визначення втрат електроенергії на 6,9 % порівняно з розрахунком за діючою методикою.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджено в службах електропостачання Донецької та Одеської залізниць, у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бітюков С. Д. Оптимізація витрат Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів / С. Д. Бітюков, В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – 2011. – № 122. – С. 93-100.
2. Кузнецов В. Г. Дослідження небалансів електроенергії на тягових підстанціях / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність. – 2011. – С. 181-185.
3. Кузнецов В. Г. Експериментальне дослідження «умовних втрат» електроенергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, Ю. М. Сергатий, Т. І. Кирилюк // Восточно - Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4/8. – С. 29-33.
4. Кузнецов В. Г. Облік втрат електричної енергії в тяговій мережі непрямим способом / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – № 42. – С. 103-109.
5. Босий Д. О. Удосконалення непрямого методу обліку втрат електричної енергії в контактній мережі / Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/8 (59). – С. 35-39.
6. Кирилюк Т. І. Способи підвищення ефективності електроспоживання на залізницях України / Т. І. Кирилюк // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 108 (102). – С. 15-25.
7. Кирилюк Т. І. Аналіз динаміки зміни «умовних» втрат електричної енергії в тяговій мережі / Т. І. Кирилюк // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 1. – С. 42-45.
8. Кузнецов В. Г. Визначення втрат енергії в системі тягового електропостачання / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Тези доп. 1-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Енергозбереження на залізничному транспорті», 2010, Місхор. – Д. : ДНУЗТ, 2010. – С. 8.
9. Кузнецов В. Г. Підвищення ефективності використання електроенергії не тяговими споживачами залізничного транспорту / В. Г. Кузнецов,

- Т. І. Кирилюк // Матеріали 3-ї Міжнародної науково - техн. Інтернет - конференції «Новітні технології в електроенергетиці». – 2010. – С. 65-66.
10. Барна А. І. Дослідження небалансів електроенергії на Львівській залізниці / А. І. Барна, В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Тези доп. 2-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Енергозбереження на залізничному транспорті», 2011, Жденієво. – Д. : ДНУЗТ, 2011. – С. 8.
 11. Бітюков С. Д. Проблеми небалансів електроенергії в системі тягового електропостачання / С. Д. Бітюков, В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Тези доп. 4-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». – Д. : ДНУЗТ, 2011. – С. 14-15.
 12. Оптимізація витрат Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів / С. Д. Бітюков, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко, Т. І. Кирилюк // Тези доп. 2-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Енергозбереження на залізничному транспорті», 2011, Жденієво. – Д. : ДНУЗТ, 2011. – С. 10-11.
 13. Кирилюк Т. І. Підвищення ефективності енергоспоживання на залізницях України / Т. І. Кирилюк // Тези доп. 5-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Транселектро-2011». – Д. : ДНУЗТ, 2011. – С. 32-34.
 14. Кузнецов В. Г. Облік втрат електричної енергії в тяговій мережі непрямим способом / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Тези доп. 72-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Д. : ДНУЗТ, 2012. – С. 93-94.
 15. Кузнецов В. Г. Удосконалення непрямого способу визначення втрат електричної енергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Тези доп. 3 - ї Міжнародної науково-практ. конф. «Енергозбереження на залізничному транспорті», 2012, Воловець. – Д. : ДНУЗТ, 2012. – С. 37-38.
 16. Кирилюк Т. І. Визначення коефіцієнту налаштування лічильника втрат в загальному вигляді / Т. І. Кирилюк, Д. О. Босий // Тези доп. 4 - ї Міжнародної

- науково-практ. конф. «Транселектро-2012», 2012, Місхор. – Д.: ДНУЗТ, 2012. – С. 25.
17. Постанова про порядок нормування питомих витрат паливно - енергетичних ресурсів у суспільному виробництві: затв. Наказ Кабінету Міністрів України 15.07.97 № 786. – К., 1997. – 28 с.
 18. Закон України про енергозбереження: Введений в дію постановою Верховної Ради України 01.07.94 № 75/94 – К., 1994. – 24 с.
 19. Основні положення з нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві: затв. Наказом Державного комітету України з енергозбереження 22.10.02 № 37 – К., 2002. – 30 с.
 20. Абаджер Н. Н. К вопросу о корректировке норм расхода электроэнергии / Н. Н. Абаджер, С. Г. Мирочник // Промышленная энергетика. – 1970. – № 5. – С. 10-12.
 21. Авилов-Карнаухов Б. Н. Нормирование электроэнергии для угольных шахт / Б. Н. Авилов-Карнаухов – М.: Улетехиздат, 1958. – 199 с.
 22. Волобринский С. Д. Вопросы нормирования и прогнозирования электропотребления при многономенклатурном производстве / С. Д. Волобринский // Труды VII международной конф. по промышленной энергетике. – Киев. – 1972. – С. 12
 23. Воротницкий В. Э. Нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях: результаты, проблемы, пути решения / В. Э. Воротницкий // Энергоэксперт. – 2007. – № 3. – С. 10-19.
 24. Воротницкий В. Э. Норматив потерь электроэнергии в электрических сетях. Как его определить и выполнить. // Новости электротехники. – 2003. – № 6. / Режим доступа: www.news.elteh.ru/arh/2003/24/11.php: 2012.
 25. Гофман И. В. Нормирование потребления энергии и энергетические балансы промышленных предприятий. / И. В. Гофман – М.: Энергия, 1966. – 319 с.
 26. Гунин В. М. Опыт нормирования и прогнозирования электропотребления предприятия на основе математической обработки статистической отчетности / В. М. Гунин // Промышленная энергетика. – 2000. – № 2. – С. 2-5.

27. Дзевенцкий А. Я. Метод нормирования электроэнергии на предприятиях с изменяющимися режимами потребления мощности / А. Я. Дзевенцкий, Ф. А. Хашимов, А. З. Шукуров // Промышленная энергетика. – 1996. – № 5. – С. 4-6.
28. Ермолаев А. Т. О нормировании и использовании резервов экономии электроэнергии на промышленных предприятиях / А. Т. Ермолаев // Промышленная энергетика. – 1979. – № 7. – С. 54-56.
29. Железко Ю. С. Расчёт нормативных характеристик технических потерь электроэнергии / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко // Электрические станции. – 2002. – № 2. – С. 46-51.
30. Железко Ю. С. Нормирование технологических потерь электроэнергии в сетях - новая методика расчёта / Ю. С. Железко // Новости электротехники. – 2003. – № 5. / Режим доступа www.news.elteh.ru/arh/2003/23/04.php: 2012.
31. Кудрин Б. И. О теоретических основах и практике нормирования и энергосбережения / Б. И. Кудрин // Промышленная энергетика. – 2000. – № 6. – С. 33-36.
32. Мелехин В. Т. Основные направления совершенствования нормирования при системном подходе к использованию топливно - энергетических ресурсов / В. Т. Мелехин // Промышленная энергетика. – 1983. – № 8. – С. 5-8.
33. Находов В. Ф. Нормирование и оценка эффективности электропотребления в промышленности: Дис... канд. техн. наук: 05.09.03 – К. , 1986. – 183 с.
34. Никифоров Г. В. Совершенствование нормирования и планирования электропотребления в промышленном производстве / Г. В. Никифоров // Промышленная энергетика. – 1999. – № 3. – С. 27-29.
35. Сальников А. Х. Нормирование потребления и экономия топливно - энергетических ресурсов / А. Х. Сальников, Л. А. Шевченко – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.
36. Усихин В. Н. О нормировании и планировании электропотребления на промышленных предприятиях / В. Н. Усихин // Промышленная энергетика. – 1997. – № 4. – С. 30-37.

37. Щелоков Я. М. О нормировании энергетических показателей / Я. М. Щелоков // Промышленная энергетика. – 2007. – № 10. – С. 50-53.
38. Ястребов П. П. Использование и нормирование электрической энергии в процессах переработки и хранения хлебных культур / П. П. Ястребов – М. : Колос, 1973. – 311 с.
39. Вейц В. И. Экономия электрической энергии в промышленности. / В. И. Вейц – М. : Госэнергоиздат, 1947. – 208 с.
40. Тайц А. А. Методика нормирования удельных расходов электрической энергии. / А. А. Тайц – М. : Госэнергоиздат, 1966. – 183 с.
41. Тайц А. А. Применение математических методов при нормировании удельных расходов электроэнергии в промышленности. / А. А. Тайц, М. Р. Брдлик – М. : МИЭИ им. С. Орджоникидзе, 1973. – 55 с.
42. Гофман И. В. Организация и планирование энергохозяйства промышленных предприятий / И. В. Гофман, Г. Л. Госпитальник – М. : Госэнергоиздат, 1954. – 440 с.
43. Авилов-Карнаухов Б. Н. Расчёт энергии для угольных шахт Донбасса по корреляционной связи / Б. Н. Авилов-Карнаухов // Электричество. – 1957. – № 4. – С. 60.
44. Константинов Б. А. Использование кибернетических методов в промышленной энергетике / Б. А. Константинов, Д. М. Воскобойников // Электричество. – 1976. – № 10. – С. 70-71.
45. Волобринский С. Д. Определение фактических удельных расходов электроэнергии и прогнозирование электропотребления при многономенклатурном производстве / С. Д. Волобринский, А. И. Гельфарб, А. К. Михайлов // Промышленная энергетика. – 1970. – № 5. – С. 26.
46. Олейников В. К. Анализ и планирование электропотребления на горных предприятиях. / В. К. Олейников – М. : Недра, 1983. – 192 с.
47. Сайтбаталова Р. С. Статистическая оценка фактического удельного расхода электроэнергии на выпуск продукции / Р. С. Сайтбаталова, Р. У. Галеева, Н. А. Филиппов // Промышленная энергетика. – 2002. – № 12. – С. 29-30.

48. Праховник А. В. Контроль ефективності енерговикористання - ключова проблема управління енергозбереженням / А. В. Праховник, В. Ф. Находов, О. В. Борисенко // Энергосбережение. – 2009. – № 8. – С. 41-54.
49. Дроздов В. А. О точности расчета электрических нагрузок промышленных предприятий / В. А. Дроздов, С. А. Фридман // Промышленная энергетика. – 1978. – № 2. – С. 29-32.
50. Кудрин Б. И. Основы комплексного метода расчета электрических нагрузок / Б. И. Кудрин. // Промышленная энергетика. – 1986. – № 11. – С. 23-27.
51. Находов В. Ф. Энергосбережение и проблема контроля эффективности энергоиспользования / В. Ф. Находов // Промэлектро. – 2007. – № 1 – С. 34-42.
52. Находов В. Ф. Аналіз діючих в Україні методик нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів / В. Ф. Находов, О. В. Борииченко, К. К. Кочетова // Промэлектро. – 2007. – № 2. – С. 42-48.
53. Обухов В. П. Аналитический метод оперативного нормирования расхода электроэнергии на тягу поездов: Дис. канд. техн. наук: 05.22.07 – М., 2002. – 160 с.
54. Осипов С. И. Основы электрической и тепловозной тяги. / С. И. Осипов – М.: Транспорт, 1985. – 408 с.
55. Развитие локомотивной тяги. / Под ред. Н. А. Фурфрянского и А. П. Бевзенко. – М.: Транспорт, 1982. – 303 с.
56. Теория электрической тяги. / Под ред. И. П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 295 с.
57. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії для споживачів залізничного транспорту: Монографія. – Дн-вск.: Вид-во Маковецький, 2012. – 216 с.
58. Кузнецов В. Г. Визначення витрати електроенергії за нормою для стаціонарних споживачів залізниць // Тези доп. 66-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Д.: ДНУЗТ – 2011. – С. 143.
59. Кузнецов В. Г. Визначення витрати електроенергії за нормою для стаціонарних споживачів на основну роботу залізниць / В. Г. Кузнецов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун.-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – № 14. – С. 55-58.

60. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій залізниць України / В. Г. Кузнецов // Тези доп. 1-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Транселектро-2007», 2007, Місхор. – Д. : ДНУЗТ, 2007 – С. 42.
61. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій / В. Г. Кузнецов, М. О. Іванов, Ф. О. Фічоряк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун.-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – № 21. – С. 61-68.
62. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання постійного струму / В. Г. Кузнецов, М. О. Іванов, А. А. Матусевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун.-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – № 25. – С. 30-33.
63. Методичні вказівки щодо визначення норм витрат електроенергії для стаціонарних споживачів залізниць. ЦЕ-0015: Затв. Наказ Укрзалізниці №545-Ц від 28.12.2006 р. / Розроб. В. Т. Доманський, В. Г. Кузнецов. - К. : Мін-во трансп. України. Держ. адмін. заліз. трансп. України. Укрзалізниця, 2007. – 108 с.
64. Быкадоров А. Л. Учёт потерь электроэнергии на электрифицированных участках переменного тока / А. Л. Быкадоров // Железнодорожный транспорт. – 1980. – № 4. – С. 57-59.
65. Доманский В. Т. Система информационно-управляющего обеспечения рациональных режимов электропотребления электрифицированных линий железных дорог: Автореф. дис....д-ра. техн. наук: 05.22.09 / Моск. гос. ун-т путей сообщ. – М. , 1993. – 48 с.
66. Кручинин В. П. Рациональные методы учёта электроэнергии / В. П. Кручинин // Железнодорожный транспорт. – 1983. – № 2. – С. 45-47.
67. Альфа А1800 счётчик электрической энергии трёхфазный многофункциональный: Паспорт. – М. : Эльстер Метроника, 2007. – 35 с
68. Железко Ю. С. Расчёт и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях. Руководство для практический расчётов. / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В Савченко – М. : Издательство НИЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.

69. Данилеян Н. Точность учёта электроэнергии зависит от правильности выбора и подключения измерительных трансформаторов / Н. Данилеян // Новости электротехники. – 2003. – № 3. / Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/21/12.php>: 2012.
70. Загорский Я. Т. Совершенствование систем и средств метрологического обеспечения измерений и учёта электроэнергии при её производстве, передаче, распределении и потреблении / Я. Т. Загорский, Я. В. Комкова // Электрические станции. – 2004. – № 8. – С. 46-50.
71. Заслонов С. В. Развитие методического и программного обеспечения для расчёта балансов электроэнергии в распределительных сетях / С. В. Заслонов, М. А. Калинина, И. А. Паринов // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 5. – С. 27-31.
72. Інструкція по зняттю показників приладів обліку електроенергії, їх запису та передачі даних енергодиспетчеру, структурному підрозділу «Енергозбут» та причетним організаціям на об'єктах електропостачання.: Затв. Наказ Укрзалізниці 12.10.2005 № 330-Ц. – К., 2005. – 39 с.
73. Дослідження наднормативних небалансів обліку електричної енергії на тягових підстанціях Донецької залізниці для тягової підстанції Штерівка і розробка рекомендацій по їх приведенню до нормативних вимог: звіт з НДР / кер. В. Г. Кузнецов. – ДР 0111U003606. – Д. : ДНУЗТ, 2011. – 116 с.
74. ГОСТ 1983-2001. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. Введен 2003.01.01. :2006. – 31 с.
75. ГОСТ 7746-2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия. Введен 2003.01.01. :2006. – 29 с.
76. Железко Ю. С. Недоучёт электроэнергии, допустимые небалансы и их отражение в нормативах потерь / Ю. С. Железко // Электрические станции. – 2003. – № 11. – С. 18-22.
77. Осика Л. К. Современные требования к измерительным приборам для целей коммерческого учёта электроэнергии. / Л. К.Осика // Электричество. – 2005. – № 3. – С. 2-9.

78. Пирогов В. Н. О повышении достоверности учёта и анализа допустимых и фактических небалансов электроэнергии на электростанциях, подстанциях и в сетях / В. Н. Пирогов, И. П. Старцев, И. П. Парцахашвили // Электрические станции. – 2003. – № 1. – С. 65-67.
79. Сопильняк В. Т. Погрешности измерительных трансформаторов тока: исследования, особенности, рекомендации / В. Т. Сопильняк // Новости электротехники. – 2004. – № 6(30). – С. 13-17.
80. Мирошник А. А. Повышение эффективности мониторинга потерь электроэнергии в распределительных сетях: Автореф. дис....канд. техн. наук: 05.14.02 / Національний технічний ун-т «Харківський політехнічний ін-т». – Харьков, 2009. – 20 с.
81. Методика по визначенню втрат електроенергії у трансформаторах і лініях електропередач.: Затв. заступником міністра енергетики України, головним державним інспектором України з енергетичного нагляду В. А. Дарчуком 18.02.1998. / Міністерство енергетики України. – К. , 1998. – 40 с.
82. Інструкція розрахунку технологічних втрат електроенергії в пристроях тягового електропостачання. ЦЕ-0007: Затверд. Наказом Укрзалізниці від 29.08.2003 р. № 342-ЦЗ. – К. : Мін-во трансп. України. Держ. адмін. заліз. трансп. України. Укрзалізниця, 2003. – 53 с.
83. Тевс А. А. Совершенствования метода оперативных расчётов потерь мощности и электроэнергии в элементах СЭС с использованием данных системы АИИСКУЭ: Автореф. дис....канд. техн. наук: 05.14.02 / Омский государственный технический университет. – Омск, 2007. – 27 с.
84. Быкадоров А. Л. Теоретические основы прикладных задач управления режимами работы системы электроснабжения железных дорог для АСУЭ: Дис....докт. техн. наук: 05.22.09 – Ростов-на-Дону, 1995. – 578 с.
85. Доманский В. Т. Экспериментальное определение потерь энергии в электротяговых сетях постоянного тока / В. Т. Доманский, В. Ф. Блохин, Г. А. Доманская // Весник ВНИИЖТа. – 1990. – № 5. – С. 29-32.

86. Быкадоров А. Л. Сравнительная оценка косвенных способов измерения потерь энергии в контактной сети переменного тока / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский // Труды Ростовского института инж.ж.д.транспорта. – 1979. – Вып. 153. – С. 20-27.
87. Бардушко В. Д. Анализ и параметрический синтез систем тягового электроснабжения: Автореф. дис....д-ра. техн. наук: 05.13.01 / ИрГУПС – Иркутск, 2001. – 42 с.
88. Крестьянов М. Е. К определению потерь электрической энергии в тяговой сети / М. Е. Крестьянов // Труды МИИТа. – 1971. – Вып. 380. – С. 3-12.
89. Марквардт К. Г. Косвенные способы определения потерь электрической энергии в тяговой сети / К. Г. Марквардт, А. Н. Кувичинский, Е. Н. Давыдов // Труды МИИТа. – 1969. – Вып. 302. – С. 102-108.
90. Быкадоров А. Л. Сравнительная оценка косвенных способов измерения потерь энергии в контактной сети переменного тока / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский // Труды Ростовского института инж.ж.д.транспорта. – 1979. – Вып. 153. – С. 20-27.
91. Доманский В. Т. Экспериментальное определение потерь энергии в электротяговых сетях постоянного тока / В. Т. Доманский, В. Ф. Блохин, Г. А. Доманская // Весник ВНИИЖТа. – 1990. – № 5. – С. 29-32.
92. Быкадоров А. Л. Исследование коэффициента настройки счётчиков потерь энергии на имитационной модели / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский, В. М. Ляшук // Сборник научных трудов ВЗИИТ. – 1984. – Вып. 121. – С. 62-68.
93. Быкадоров А. Л. Расчёт потерь энергии в тяговых сетях матричным методом / А. Л. Быквдоров, В. Т. Доманский // Труды МИИТа. – 1979. – Вып. 636. – С. 139-145.
94. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
95. Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць. ЦЕ-023: Затв. Наказ Укрзалізниці 20.11.2007 № 546-Ц – К. : Укрзалізниця, 2008. – 208 с.

96. Лут Н. Т. Расчёт поерь электрической энергии в распределительных сетях в реальном времени с учётом параметров окружающей среды / Н. Т. Лут // «Енергетика і автоматика» науковий журнал. – 2010. – № 1(3) / Режим доступу: elibrary.nubip.edu.ua/5408/1/10lmtpow.pdf: 2012.
97. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер – М. : Металлургия, 1968. – 155 с.
98. Окунь Я. Факторный анализ. / Перевод с польского Г. З. Давидовича – М. : Статистика, 1974. – 200 с.
99. Бродский В. З. Введение в факторное планирование эксперимента / В. З. Бродский – М. : Наука, 1976. – 223 с.
100. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. / Д. К. Монтгомери – Л. : Судостроение, 1980. – 384 с.
101. Табличные значения критериев / Режим доступа: www.chem.ssti.ru/files/subjects/OMS/tablichnye_znacheniya_kriteriev.pdf: 2012.
102. Налимов В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов , Н. А. Чернова – М. : Наука, 1965. – 340 с.
103. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента / Ч. Хикс– М. : Мир, 1967. – 406 с.
104. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь – М. : Физматлит, 2006. – 816 с.
105. Шрейдер Ю. А. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) / Ю. А. Шрейдер – М. : Физматлит, 1962. – 334 с.
106. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учеб. пособие для студентов втузов. – 9-е изд., перераб. и доп. / В. Е. Гмурман – М. : Высш. школа, 2004. – 404 с.
107. Ермаков С. М. Методы Монте-Карло и смежные вопросы / С. М. Ермаков – М. : Наука, 1975. – 473 с.
108. Севастьянов Б. А. Курс теории вероятностей и математической статистики / Б. А. Севастьянов – М. : Наука, 1982. – 256 с.

109. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие для втузов. Изд. 5-е, перераб. и доп. / В. Е. Гмурман – М., «Высш. школа», 1977. – 479 с.
110. Hammersley J. M. Monte Carlo Methods. / J. M. Hammersley, D. C. Handscomb – New York: John Wiley and Sons, 1964. – 178 p.
111. Spanier J. Monte Carlo principles and neutron transport problems. / J. Spanier, E. M. Gelbard – Addison-Wesley: Reading, 1969. – 234 p
112. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболев – М. :Наука, 1973. – 312 с.
113. Переносной анализатор качества электроэнергии / Режим доступа: www.SATEC EDL175 /satec-global.ru/catalog/edl175/satec_edl175: 2012.
114. Analog Multiplier AD633 / Режим доступа: www.analog.com/en/special-linear-functions/analog-multipliersdividers/ad633/products/product.html: 2012.
115. Analog Multiplier AD637 / Режим доступа: www.analog.com/en/special-linear-functions/rms-to-dc-converters/ad637/products/product.html: 2012.

ДОДАТОК А

Виконаний графіку руху поїздів

Таблиця А.1 – Фрагмент виконаного графіку руху поїздів ділянки Зн. – Пт. Одеської залізниці

Номер поїзда	Станція															
	Зн.	П.		Кр.		А.		К.		С.		З.		Я.		Пт.
2248														7:04	7:15	
1702													7:02	7:16	7:16	7:24
8112											7:01	7:13	7:13	7:26	7:26	7:36
6002	7:10	7:28	7:30	7:54	7:57	8:08	8:20	8:42	9:02	9:16	9:18	9:32	9:35	9:48	9:49	9:56
2224	7:16	7:38	7:38	8:02	8:02	8:14	8:14	8:34	8:34	8:48	8:48	9:05	9:25	9:40	9:40	9:50
70	8:03	8:14	8:14	8:26	8:26	8:34	8:36	8:40	8:40	9:00	9:00	9:10	9:10	9:20	9:20	9:26
42	8:09	8:22	8:22	8:36	8:36	8:43	8:45	8:58	8:58	9:08	9:08	9:19	9:19	9:29	9:29	9:34
324	8:22	8:38	8:38	8:41	8:44	9:04	9:06	9:20	9:20	9:32	9:34	9:45	9:45	10:00	10:00	10:06
2390	8:29	8:46	8:46	9:08	9:08	9:20	9:20	9:36	9:36	9:50	9:50	10:05	10:05	10:20	10:20	10:30
4362	8:38	8:47	8:47	9:22												
2392	8:46	9:06	9:06	9:32	9:32	9:44	9:44	10:00	10:00	10:14	10:14	10:29	10:29	10:43	10:43	10:53
5702	9:22	9:42														
3072	10:10	10:20	10:20	10:32	10:32	10:38	10:38	10:48	10:48	10:54	10:54	11:02	11:02	11:10	11:10	11:13
2230					11:11	11:24	11:24	11:44	12:01	12:18	12:18	12:35	12:35	12:50	12:50	13:00
2232	10:24	10:50	10:50	11:02	11:02	11:14	11:14	11:32	11:54	12:10	12:10	12:25	12:25	12:40	12:40	12:50
1410	10:32	10:58	10:58	11:18	11:18	11:32	11:50	12:10	12:10	12:25	12:25	12:42	12:42	12:57	13:02	13:12
2238	11:08	11:28	11:28	11:50	11:50	12:02	12:02	12:20	12:20	12:34	12:34	12:40	12:40	13:05	13:10	13:20

ДОДАТОК Б

Аналіз зносу контактних проводів та температури навколишнього середовища

Таблиця Б.1 – Фрагмент залишкової висоти контактного проводу на ділянці
Придніпровської залізниці

№ опори	Характеристика місця заміру	2005р.		2011р.	
		л	п	л	п
85		10.94	10.81	10.84	10.75
		11.3	11.18	11.12	10.99
87		10.92	10.53	10.56	10.47
	ПС	11.16	11.17	11.44	10.98
		11.34	11.09	10.97	10.91
89		11.13	11.02	10.58	11.65
	ПС	11.34	10.86	11.18	10.78
		11.08	11.36	10.6	11.13
91А		9.94	10.87	9.53	10.6
	СА	11.32	10.98	11.43	10.58
93		11.16	10.91	10.97	11.1
	ПС	11.04	11.31	10.97	11.21
	СА	10.87	11.47	10.82	11.26
95А		11.03	11.17	10.92	10.97
	СА	11.32	11.4	9.44	11.04
97		11.03	11.23	10.94	10.58
	ПС	10.81	10.89	11.28	10.9
		11.27	11.19	10.53	10.21
99		10.67	11.24	10.51	10.49
		10.6	11.2	10.82	10.64
101		10.77	10.93	10.57	10.83
	ПС	11.29	11.08	11.27	11.63
		10.93	10.97	10.76	10.78

Таблиця Б.2 – Фрагмент зносу контактних проводів на ділянці
Придніпровської залізниці

№ опори	Характеристика місця заміру	2005р.		2011р.	
		л	п	л	п
85		3.76	4.63	4.42	5.04
		1.68	2.31	2.65	3.44
87		3.89	6.67	4.97	7.14
	ПС	2.42	2.37	1.03	3.5
		1.48	2.83	3.56	3.95
89		2.6	3.25	6.29	0.28
	ПС	1.48	4.28	2.31	4.83
		2.89	1.39	6.14	2.6
91А		11.66	4.22	15.55	6.14
	СА	1.58	3.5	1.07	6.29
93		2.42	3.95	3.56	2.77
	ПС	3.13	1.63	3.56	2.15
	СА	4.22	0.9	4.56	1.88
95А		3.19	2.37	3.89	3.56
	СА	1.58	1.2	16.45	3.13
97		3.19	2.04	3.76	6.29
	ПС	4.63	4.08	1.78	4.02
		1.83	2.26	6.67	9.28
99		5.62	1.99	6.83	6.99
		6.14	2.2	4.56	5.84
101		4.9	3.82	6.37	4.49
	ПС	1.73	2.89	1.83	0.34
		3.82	3.56	4.97	4.83

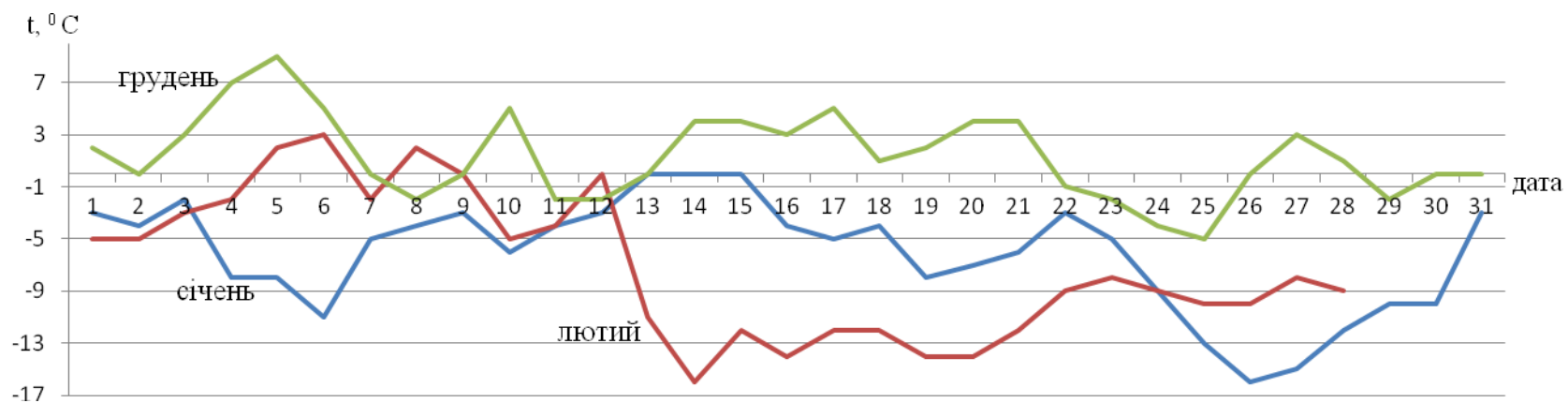


Рисунок Б.1 – Розподіл температури у грудні, січні, лютому 2011 р. у Дніпропетровській області

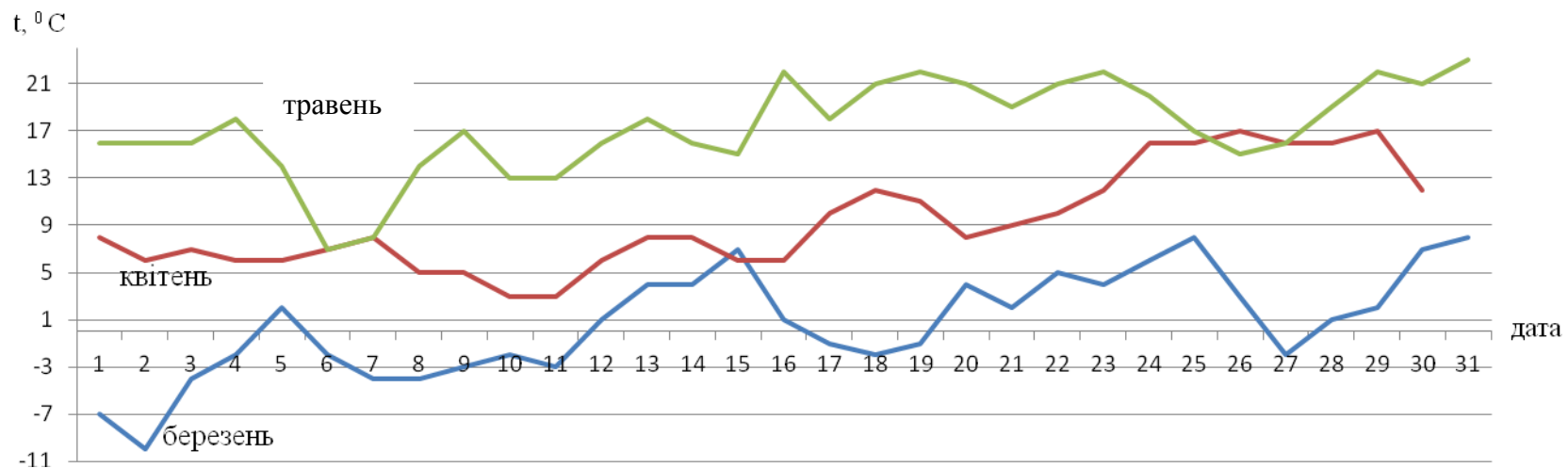


Рисунок Б.2 – Розподіл температури у березні, квітні, травні 2011 р. у Дніпропетровській області

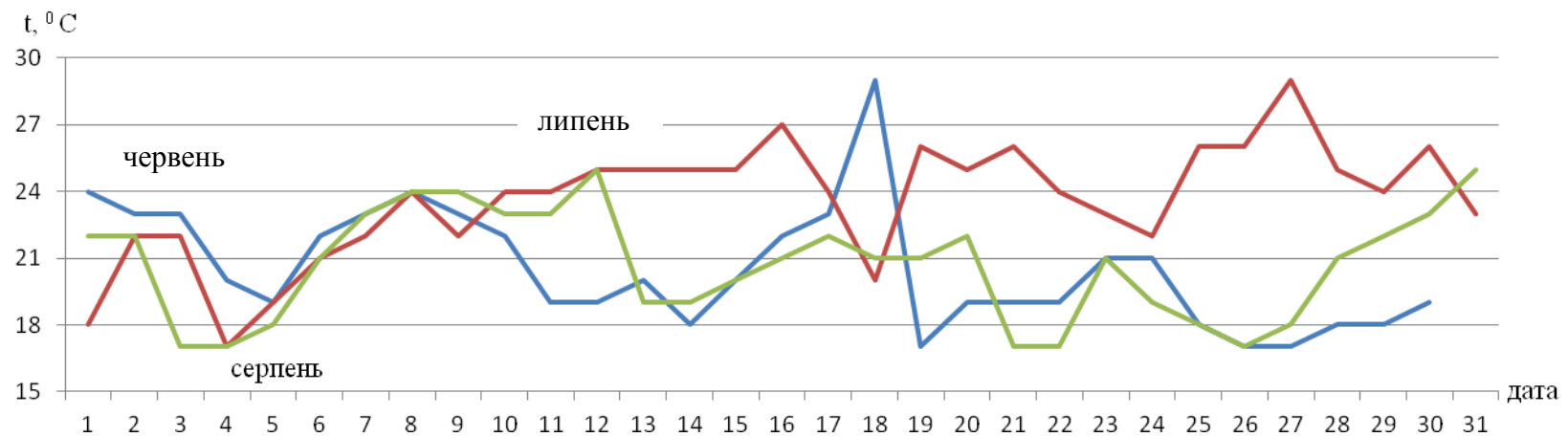


Рисунок Б.3 – Розподіл температури у червні, липні, серпні 2011 р. у Дніпропетровській області

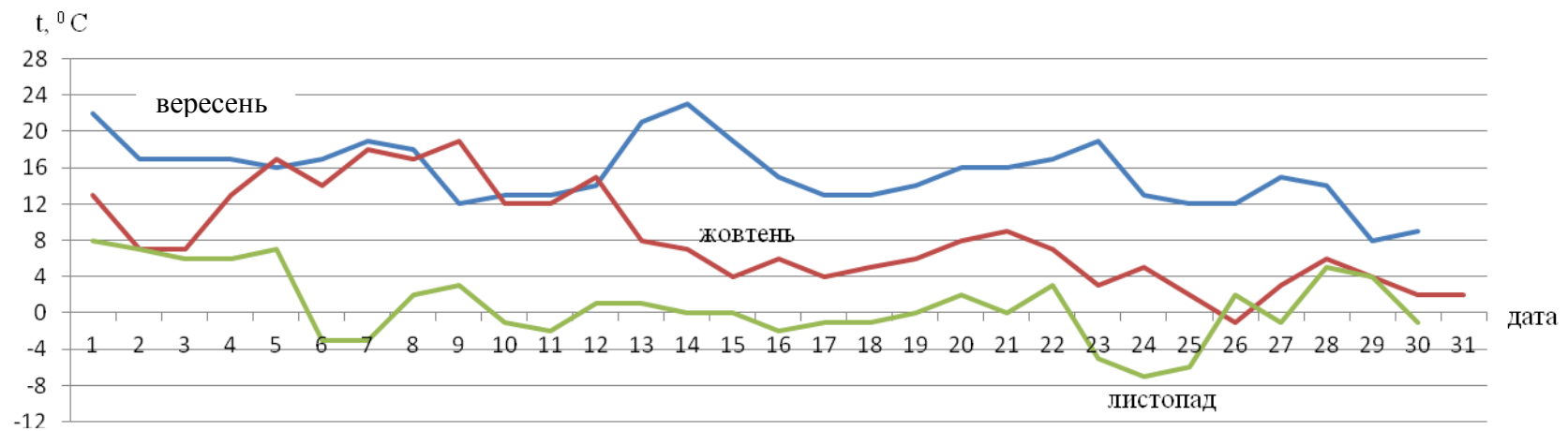


Рисунок Б.4 – Розподіл температури у вересні, жовтні, листопаді 2011 р. у Дніпропетровській області

ДОДАТОК В

Матриці повного факторного експерименту

Таблиця В.1 – Фрагмент матриці повного факторного експерименту для ділянки постійного струму

x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1	y_2	y_3
1	30	3	50	800	-20	0.955	0.953	0.956
1	30	1	60	800	-20	1.201	1.199	1.219
1	30	1	50	800	-20	1.212	1.211	1.215
1	30	1	50	800	30	1.501	1.496	1.506
1	0	3	60	800	-20	0.877	0.875	0.857
1	0	3	50	900	-20	0.867	0.866	0.874
1	0	3	50	800	30	1.087	1.084	1.089
1	0	1	60	900	-20	1.108	1.104	1.112
1	0	1	60	800	30	1.384	1.374	1.387
1	0	1	50	900	30	1.378	1.369	1.389

Таблиця В.2 – Фрагмент нормалізованої матриці повного факторного експерименту для ділянки постійного струму

№ рядка матриці	$\sim$ x_0	$\sim$ x_1	$\sim$ x_2	$\sim$ x_3	$\sim$ x_4	$\sim$ x_5	y_1	y_2	y_3
1	+	+	+	-	-	-	0.955	0.953	0.956
2	+	+	-	+	-	-	1.201	1.199	1.219
3	+	+	-	-	-	-	1.212	1.211	1.215
4	+	+	-	-	-	+	1.501	1.496	1.506
5	+	-	+	+	-	-	0.877	0.875	0.857
6	+	-	+	-	+	-	0.867	0.866	0.874
7	+	-	+	-	-	+	1.087	1.084	1.089
8	+	-	-	+	+	-	1.108	1.104	1.112
9	+	-	-	+	-	+	1.384	1.374	1.387
10	+	-	-	-	+	+	1.378	1.369	1.389

Таблиця В.3 – Фрагмент розширеної матриці повного факторного експерименту для ділянки постійного струму

x0	x1	x2	x3	x4	x5	x1x2	x1x3	x1x4	x1x5	x2x3	x2x4	x2x5	x3x4	x3x5	x4x5	x1x2x3	x1x2x4	x1x2x5	x1x3x4	x1x4x5	x2x3x4	x2x4x5	x3x4x5	x1x3x5	x2x3x5	x1x2x3x4	x1x2x3x5	x1x3x4x5	x1x2x4x5	x2x3x4x5	x1x2x3x4x5	y
1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	0.954
1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1.206
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1.206
1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1.494
1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0.864
1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	0.868
1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1.082
1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1.098

Таблиця В.4 – Фрагмент матриці ортогонального центрально-композиційного плану для ділянки постійного струму

[illegible]

ДОДАТОК Г

Похибки усереднення коефіцієнта втрат

Таблиця Г.1 – Фрагмент аналізу виконаних графіків руху та результатів обчислення похибок усереднення коефіцієнта втрат для ділянок постійного та змінного струмів

Час, год	Кількість поїздів на ділянці, шт.		Похибка коефіцієнту втрат для ділянки, %	
	А-К Одеської залізниці	Ч-У Придніпровської залізниці	А-К Одеської залізниці	Ч-У Придніпровської залізниці
1	3.00	3.00	0	0
2	4.00	3.00	3.973	2.494
3	3.00	3.00	4.653	3.103
4	1.00	1.00	4.946	3.433
5	1.00	1.00	5.062	3.576
6	4.00	3.00	5.208	3.726
7	3.00	3.00	5.321	3.883
8	3.00	3.00	5.443	4.018
9	3.00	2.00	5.556	4.166
10	5.00	2.00	5.64	4.249

Розрахунок похибки усереднення

```

av(vec,s) := if s ≥ 1
              i ← 0
              while i < rows(vec)
                for n ∈ 0..s - 1
                  resi+n ←  $\left( \frac{\sum_{j=i}^{i+s-1} \text{vec}_j}{s} \right)$  if (i + s - 1) ≤ rows(vec)
                  otherwise
                    for nn ∈ 0..rows(vec) - i - 1
                      resi+nn ←  $\left( \frac{\sum_{j=i}^{\text{rows}(\text{vec})-1} \text{vec}_j}{\text{rows}(\text{vec}) - i} \right)$ 
                    break
                  i ← i + s
              res
              error("Some error") otherwise
  
```

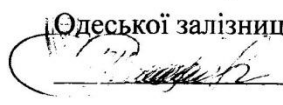
ДОДАТОК Д

Акти впровадження дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби електропостачання

Одеської залізниці

 А. Г. Сажин

«___» _____ 20__ р.

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи

Кирилук Тетяни Ігорівни

на тему: «Удосконалення методу контролю втрат електроенергії в контактній мережі електрифікованих залізниць»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Кирилук Т. І. прийняті до виконання службою електропостачання Одеської залізниці при розробці заходів з енергозбереження в системі електропостачання тяги поїздів змінного струму.

Особливо важливими як в теоретичному, так і в практичному плані вважаємо такі результати:

1. Аналітичний вираз залежності втрат електроенергії від кількості поїздів на міжпідстанційній зоні.
2. Рівняння регресії для визначення коефіцієнту втрат електроенергії для ділянок змінного струму.
3. Закономірності зміни умовних втрат електроенергії в контактній мережі змінного струму. Встановлено, що сезонна зміна споживання електроенергії на тягу поїздів складає 5 – 6 %.
4. Схемотехнічна реалізація перетворювача струму для задач визначення втрат електричної енергії в контактній мережі.

Начальник Знам'янської
дистанції електропостачання

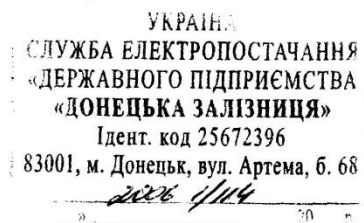


О. І. Критін

Головний інженер Знам'янської
дистанції електропостачання



Ю. П. Холодов



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби електропостачання
 Донецької залізниці

 С. Д. Бітюков
 «___» _____ 20__ р.

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи

Кирилюк Тетяни Ігорівни

на тему: «Удосконалення методу контролю втрат електроенергії в
 контактній мережі електрифікованих залізниць»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Кирилюк Т. І. прийняті до виконання службою електропостачання Донецької залізниці при розробці заходів з енергозбереження в системі електропостачання тяги поїздів постійного струму.

Особливо важливими як в теоретичному, так і в практичному плані вважаємо такі результати:

1. Отримана регресійна залежність для обчислення коефіцієнту втрат електричної енергії в контактній мережі для ділянок постійного струму.

2. Визначені закономірності зміни кількості поїздів на міжпідстанційній зоні, швидкості поїздів, зносу контактних проводів, струму поїзда, температури навколишнього середовища, що впливають на втрати електроенергії.

3. Запропоновано вдосконалений непрямий метод обліку втрат електроенергії в контактній мережі, що підвищує точність визначення величини втрат на 6,9% в порівнянні з розрахунком.

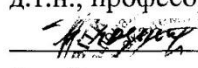
4. Запропонований перетворювач, який у поєднанні з портативними аналізаторами потужності (наприклад, EDL-175 компанії Satec) дозволяє вимірювати втрати електроенергії в контактній мережі.

Головний інженер
 служби електропостачання

 В. Л. Савченко

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор Дніпропетровського
національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна,
д.т.н., професор

 Б.Є. Боднар



використання результатів дисертаційної роботи

Кирилюк Тетяни Ігорівни

на тему: **«Удосконалення методу контролю втрат електроенергії в
контактній мережі електрифікованих залізниць»**

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті (дисципліна «Енергозбереження» для студентів п'ятого курсу спеціальності 7.05070103 «Електротехнічні системи електроспоживання»), прийняті до використання наукові та практичні результати, викладені в кандидатській дисертації Кирилюк Т.І.:

1. Модель навантаження тягової мережі для задач контролю втрат електроенергії, яка дає можливість враховувати кількість поїздів на міжпідстанційній зоні при визначенні коефіцієнта втрат.
2. Рівняння регресії для визначення коефіцієнту втрат для ділянок постійного та змінного струмів.
3. Вирази для визначення коефіцієнтів втрат електроенергії для різних схем живлення контактної мережі.

Начальник НМУ університету,
к.т.н., доцент



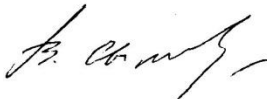
О.О. Матусевич

Декан факультету
«Електрифікація залізниць»,
к.т.н., доцент



А.І. Кійко

Зав. каф. «Електропостачання
залізниць»
д.т.н., доцент



В.Г. Сиченко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник служби електропостачання
Донецької залізниціС. Д. Бітюков
«26» жовтня 2012 р.**А К Т**

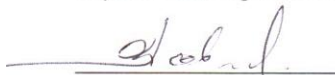
впровадження результатів науково-дослідної роботи

При виконанні науково-дослідної роботи по госпрозрахунковій тематиці «Оптимізація витрат Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів з розробкою рекомендацій», шифр 23.66.10.10, № держреєстрації 0111U003607, обґрунтовано принцип модернізації тягових підстанцій Донецької залізниці з урахуванням вимог з енерго- та ресурсозбереження, проаналізовано профілі споживання електроенергії за рік на тягу поїздів, на основі обробки експериментальних даних показано переваги переведу тяги поїздів на вищий рівень напруги, розраховано економічний ефект, створено моделі споживання електроенергії при використанні оптових цін.

Мета роботи – розробка рекомендацій, дотримання яких дозволить оптимізувати витрати Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів.

Очікувані результати від впровадження роботи – комплекс науково-обґрунтованих пропозицій, умов і заходів, що забезпечують реалізацію енергозберігаючих режимів роботи систем тягового і зовнішнього електропостачання залізниць.

Від «Замовника»

Головний інженер
служби електропостачання
 В. Л. Савченко

Від «Виконавця»

Доцент кафедри Електропостачання
залізниць ДНУЗТ, науковий керівник
НДР, к.т.н.
 В. Г. Кузнецов
Аспірантка кафедри Електро-
постачання залізниць ДНУЗТ
 Т. І. Кирилук

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник служби електропостачання

Донецької залізниці



С. Д. Бітюков

2012 р.

А К Т

впровадження результатів науково-дослідної роботи

При виконанні науково-дослідної роботи по госпрозрахунковій тематиці «Дослідження наднормативних небалансів обліку електричної енергії на тягових підстанціях Донецької залізниці і розробка рекомендацій по їх приведенню до нормативних вимог для тягової підстанції Штерівка», шифр 23.65.10.10, № держресстрації 0111U003606, досліджено небаланси електроенергії на тягових підстанціях, вивчено та досліджено існуючі та перспективні способи зниження рівнів наднормативних небалансів, розроблено рекомендації по уникненню небалансів електроенергії.

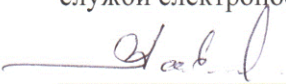
Мета роботи – розробка заходів, впровадження яких дозволить зменшити небаланси обліку електричної енергії на тягових підстанціях залізниці.

Очікувані результати від впровадження роботи – підвищення ефективності електроспоживання за рахунок приведення завантаження вимірювальних трансформаторів до вимог ГОСТ 7746-2001 та ГОСТ 1983-2001.

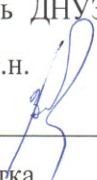
Від «Замовника»

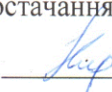
Від «Виконавця»

Головний інженер
служби електропостачання

 В. Л. Савченко

Доцент кафедри Електропостачання
заліниць ДНУЗТ, науковий керівник
НДР, к.т.н.

 В. Г. Кузнецов
Аспірантка кафедри Електро-
постачання заліниць ДНУЗТ

 Т. І. Кирилук