

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені
академіка В. Лазаряна

КАЛАШНИКОВ КОСТЯНТИН ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.331:621.311:656.224.4.05



**ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ШЛЯХОМ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОЇ
ДИСЛОКАЦІЇ ТЯГОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

Спеціальність 05.22.09 - електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2014

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Кузнецов Валерій Геннадійович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
професор кафедри «Електропостачання залізниць».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Саєнко Юрій Леонідович,
Приазовський державний технічний університет,
декан енергетичного факультету;

кандидат технічних наук, доцент
Ніколенко Анатолій Васильович,
Національна металургійна академія України,
завідувач кафедри «Електротехніка та електропривод».

Захист дисертації відбудеться «__» _____ 2014 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010.

Автореферат розіслано «__» _____ 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д-р техн. наук, доцент

А. М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Україна є енергодефіцитною державою, задовольняючи свої потреби в паливно-енергетичних ресурсах (ПЕР) за рахунок власного їх видобутку менше ніж на 50 %. Таке становище потребує підвищення енергоефективності роботи всіх галузей економіки і, зокрема, залізничного транспорту. Енергетична складова собівартості перевезень становить близько 20 %, енергозбереження є одним з головних завдань політики Укрзалізниці (УЗ). Керівництвом УЗ проводиться велика робота з економії ПЕР, успішно виконуються Програма підвищення енергоефективності та Програма зменшення споживання енергоресурсів бюджетними організаціями шляхом раціонального використання у сферах транспорту та зв'язку на 2010-2014 рр. Реалізація цих програм дозволила зменшити звітні втрати електроенергії на 17 % (від рівня втрат). Одним із напрямків енергозбереження на електрифікованих лініях залізничного транспорту є зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму, які складають близько 7 % від величини споживання на тягу поїздів. Існують резерви зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень.

На величину втрат електроенергії в тяговій мережі впливають такі фактори: параметри системи тягового електропостачання (СТЕ) – схеми живлення контактної мережі, довжина фідерної зони, потужність і напруга на шинах тягових підстанцій (ТП); параметри колії – опір руху, ухили; технічні дані електрорухомого складу (ЕРС) – максимальна швидкість, маса, потужність, струм; параметри експлуатації – інтервал руху, відстані між поїздами, розміри руху; інші фактори – кваліфікація машиністів, погодні умови тощо.

Зараз існують шляхи зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі за рахунок: застосування СТЕ підвищеної напруги, накопичувачів електроенергії, управління режимами СТЕ на базі інформаційних технологій, удосконалення методів обліку й контролю втрат електроенергії, розробки енергоефективних графіків руху поїздів (ГРП), регулювання транспортного потоку.

Розвитком керування режимами СТЕ займалися такі вчені – В. Т. Доманський, Г. А. Доманська, В. Б. Землянов, В. В. Корнієнко, В. Г. Кузнецов, К. Г. Марквардт, Р. І. Мірошніченко, О. М. Митрофанов, Е. С. Почаєвець; розробкою енергоефективних ГРП, регулюванням транспортного потоку – А. А. Абрамов, М. О. Гаранін, Г. В. Євдомах, А. Д. Каретніков, Д. Ю. Левін, А. В. Нікітін, В. В. Скалозуб, І. М. Шапкін; застосуванням накопичувачів електроенергії – Д. А. Бут, Т. А. Заруцька, Дж. Кернер, В. І. Омеляненко, М. І. Павелчик, М. В. Шевлюгін; регулюванням напруги на ТП, застосуванням вольтододаєткових пристроїв – Б. А. Аржанников, В. М. Варенцов, Ю. П. Гончаров, Л. А. Добрусин, В. М. Лебедев, А. Н. Марикін, В. Г. Сиченко та інші.

Водночас у дослідженнях зазначених вище авторів не розглядалися задачі зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору раціональної

дислокації поїздів між ТП, послідовності відправлення та інтервалів між поїздами. Зараз управління транспортним потоком на електрифікованих лініях здійснюється за графіком руху, який не враховує вплив показників транспортного потоку на енергетичні характеристики СТЕ. У результаті нерівномірний характер руху поїздів різної маси за розрахунковим ГРП призводить до підвищення втрат електроенергії в тяговій мережі.

Таким чином, задача зменшення втрат електроенергії шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень є актуальною для електрифікованого транспорту постійного струму.

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

Дисертаційна робота виконана за завданнями Укрзалізниці відповідно до державних програм і науково-дослідних робіт:

- Енергетична стратегія України на період до 2030 р., затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 15.03.2006 р. № 145;
- Державна цільова економічна програма енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2015 роки, затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 1 березня 2010 року № 243 із змінами, затвердженими Постановою Кабінету Міністрів від 27.04.2011 р. № 447 та від 25.01.2012 р. № 105;
- 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).

Автор брав участь у виконанні вказаної науково-дослідної роботи як виконавець.

Метою роботи є вирішення задачі зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. Виконати аналіз сучасного стану задачі зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму.
2. Розробити моделі СТЕ та транспортного потоку.
3. Дослідити можливості зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень.
4. Розробити принципи зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом визначення раціональних:
 - дислокації і інтервалів між тяговими навантаженнями;
 - послідовності відправлення поїздів різних категорій.
5. Розробити програмний комплекс для складання енергоефективних ГРП.
6. Виконати техніко-економічне обґрунтування запропонованих енергоощадних заходів.

Об'єкт дослідження – процес споживання електроенергії електротранспортом у СТЕ постійного струму.

Предмет дослідження – втрати електроенергії в тяговій мережі СТЕ.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення дисертації отримані за допомогою методу деформованого багатогранника (при визначенні оптимальної дислокації поїздів між ТП), евристичних алгоритмів (при визначенні оптимальної послідовності відправлення поїздів). Також використані методи дослідження експериментальних даних і математичної статистики (при дослідженні функцій розподілу інтервалів між поїздами і маси поїздів).

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 запропоновано принцип зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі за рахунок вибору раціональної дислокації тягових навантажень між тяговими підстанціями. Це дає можливість визначення раціональних відстаней між тяговими навантаженнями для побудови енергоефективних графіків руху поїздів.
2. Вперше запропоновано принцип визначення оптимальної послідовності відправлення поїздів і інтервалів між тяговими навантаженнями із застосуванням евристичного алгоритму пошуку мінімуму функції списку, що забезпечує зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі.
3. Набула подальшого розвитку математична модель енергооптимальної дислокації тягових навантажень між тяговими підстанціями на основі адаптованого методу деформованого багатогранника, який відрізняється від існуючого процесом проектування області допустимих значень. Це дає можливість обирати схеми розташування тягових навантажень між тяговими підстанціями на кожному кроці часу з мінімальними втратами потужності в тяговій мережі.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблені наукові принципи вибору раціональної послідовності відправлення поїздів дозволяють зменшити втрати електроенергії в тяговій мережі до 23 % від початкового рівня. Використання

- принципів вибору раціональної дислокації та інтервалів між тяговими навантаженнями дозволяє зменшити втрати електроенергії в тяговій мережі до 27 % від початкового рівня.
2. Розроблений програмний комплекс «Поток» для складання ГРП з урахуванням енергетичних характеристик СТЕ дає можливість застосування принципів зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі чергово-диспетчерським апаратом, інженерами-графістами під час організації перевізного процесу та складання ГРП.
 3. Застосування раціональної дислокації тягових навантажень на міжпідстанційній зоні дає можливість зменшення втрат електроенергії до 3 % від рівня витрат на тягу поїздів. Чистий дисконтований дохід для електрифікованих ділянок Придніпровської залізниці за 1 рік становить 1,4 млн грн.
 4. Результати дисертаційної роботи впроваджені в службах електропостачання Донецької і Придніпровської залізниць, Дніпропетровській дирекції залізничних перевезень, навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

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] – аналіз інтервалів між поїздами; [2] – розрахунки коефіцієнтів нерівномірності транспортного потоку; [3] – розрахунок наявної пропускної здатності ділянки та показників потоку поїздів за умовами електропостачання; [4] – дослідження залежності величини втрат електроенергії в тяговій мережі від порядку відправлення поїздів різних категорій; [5] – постановка задачі, визначення показників потоку поїздів, що забезпечують мінімум втрат електроенергії в тяговій мережі; [6,16] – дослідження залежності величини втрат потужності в тяговій мережі від дислокації поїздів і відстані між поїздами; [8] – визначення оптимальної дислокації поїздів між ТП за критерієм втрат потужності в тяговій мережі; [10] – розробка рекомендацій щодо зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі; [11-15] – розробка основних напрямків вирішення задачі зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі за рахунок регулювання транспортного потоку. [17] – вибір методів оптимізації для розв’язання задачі зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі за рахунок регулювання транспортного потоку. Роботи [7,9] написані автором без співавторів.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 3–5-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Електрифікація залізничного транспорту Транселектро», м. Місхор, м. Дніпропетровськ, 2009 – 2011 рр.; 2–4-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Енергозбереження на залізничному транспорті», м. Воловець,

м. Дніпропетровськ, 2011 – 2013 рр.; Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортного комплексу України: освіта, наука, виробництво», м. Ростов на Дону 2009 р.

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася:

- на науковому семінарі кафедри «Електропостачання залізниць» ДНУЗТ, лютий 2013 р.;
- науковому семінарі в Інституті залізничного транспорту, м. Варшава, Польща, лютий 2013 р.;
- міжкафедральному семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вересень 2013 р.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 17 наукових працях, у тому числі: 8 статей у фахових наукових виданнях, 1 стаття у науковому журналі, 8 тез доповідей у матеріалах конференцій, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму. Статті, опубліковані у фахових наукових виданнях, індексуються в таких наукометричних базах даних: Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), РИНЦ, ResearchBib, American Chemical Society [7]; BazTech, Index Copernicus [9].

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та трьох додатків. Основний текст роботи викладено на 134 сторінках. Дисертація містить 63 рисунки і 15 таблиць. Повний обсяг дисертації 185 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, доведено зв'язок її з науковими програмами й темами, визначено мету й завдання дослідження, сформульовано наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів, показано особистий внесок здобувача й апробацію результатів дисертації.

У першому розділі проаналізовано шляхи зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму.

У процесі електроспоживання в СТЕ виникають втрати електроенергії в пристроях контактної мережі й ТП. Завдання зменшення втрат електроенергії в СТЕ є складовою проблеми енергозбереження на підприємствах залізничного транспорту. Для її вирішення досліджено фактори, що визначають величину втрат потужності в тяговій мережі: коливання маси поїздів, а отже, і енергії, споживаної ЕРС; коливання напруги на струмоприймачах електровозів; зміна метеорологічних умов; особливості ведення поїздів машиністами; особливості організації руху і, як наслідок, зміна кількості поїздів, що одночасно перебувають в зоні живлення ТП; і відстані між ними (рис.1). Усе це викликає зміну навантажень ТП і впливає на величину втрат електроенергії в тяговій мережі.

Для з'ясування резервів зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі

проаналізовано схеми живлення контактної мережі (КМ). На одноколійних ділянках застосовуються роздільна, консольна й зустрічно-консольна схеми живлення, на двоколійних – роздільна, вузлова, паралельна, зустрічно-консольна, зустрічно-кільцева схеми. Вибір схеми живлення тяги поїздів здійснюють за критеріями надійності та економічності. Аналіз сучасного стану задачі зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі показав, що існують додаткові резерви зниження втрат шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень між ТП, послідовності відправлення поїздів різних категорій, інтервалів між поїздами (рис.2).



Рисунок 1 – Взаємодія факторів, що визначають величину втрат електроенергії в тяговій мережі

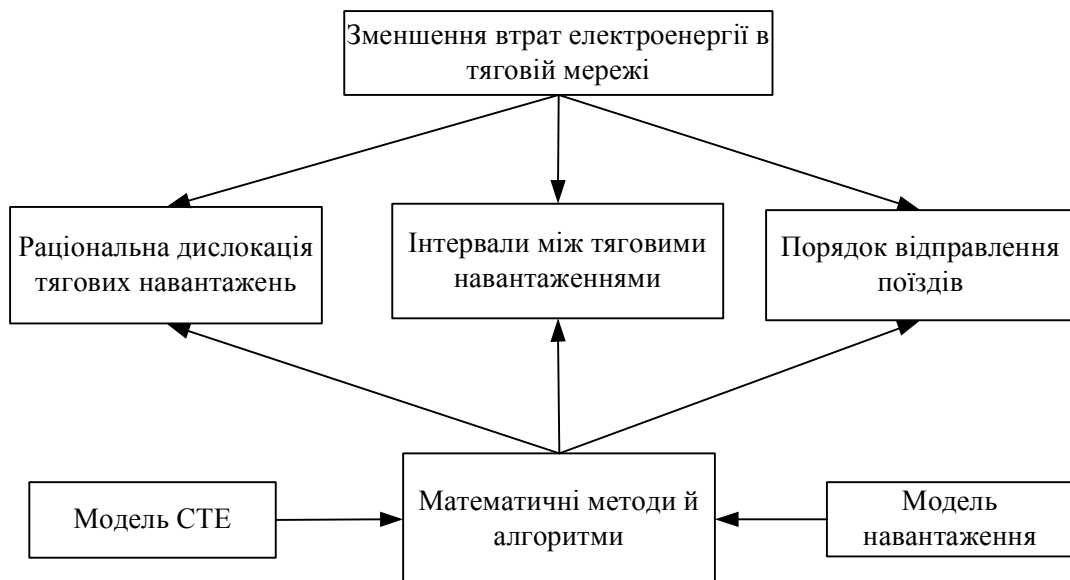
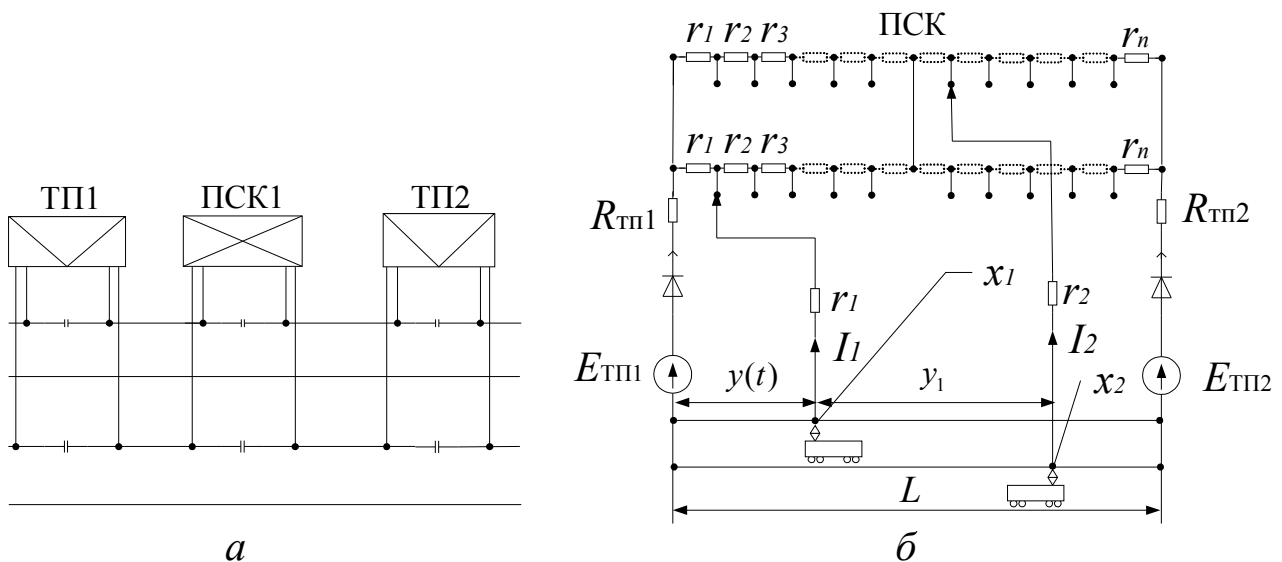


Рисунок 2 – Задача зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень

У *другому розділі* розроблено моделі СТЕ і транспортного потоку для вирішення задачі зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі. Особливістю цих моделей є можливість дослідження залежностей енергетичних характеристик СТЕ від дислокації тягових навантажень, показників транспортного потоку.

У дисертаційній роботі розроблено моделі СТЕ постійного струму для різних схем живлення контактної мережі, розглянуто принципи визначення втрат потужності в тяговій мережі для кожної з них, що забезпечує визначення втрат електроенергії в тяговій мережі за різних положень ЕРС між ТП. Для розрахунку втрат потужності в тяговій мережі в дисертаційній роботі використано метод, що базується на ГРП. Сутність цього методу полягає у виборі низки характерних перерізів ГРП з побудовою для них миттєвих схем навантажень, при цьому здійснюється редукція динамічної моделі до набору статичних. Для виконання моделювання досліджуваний інтервал розбивається на малі проміжки часу, всередині яких параметри СТЕ приймаються незмінними.

При розрахунку втрат електроенергії в тяговій мережі розглянуто найбільш поширені для нормального режиму роботи СТЕ схеми живлення контактної мережі. На рис. 3 зображена вузлова схема живлення, яка має складні залежності розподілу струмів між фідерами ТП.



$R_{ТП}$ – опір тягової підстанції; $E_{ТП}$ – е.р.с. тягової підстанції; $r_1, r_2, r_3 \dots r_n$ – миттєві опори тягової мережі; r_1, r_2 – опори поїздів; I_1, I_2 – струми поїздів; L – відстань між ТП; x_1, x_2 – дислокація поїздів між ТП; $y(t)$ – відстань між тяговою підстанцією та i -м поїздом; y_1 – відстань між поїздами

Рисунок 3 – Вузлова схема живлення контактної мережі (а) і модель СТЕ (б)

При розрахунку втрат електроенергії в тяговій мережі враховувалися варіанти розташування поїздів перед ПСК і після нього. У загальному вигляді втрати потужності для вузлової схеми живлення визначаються за формулою

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

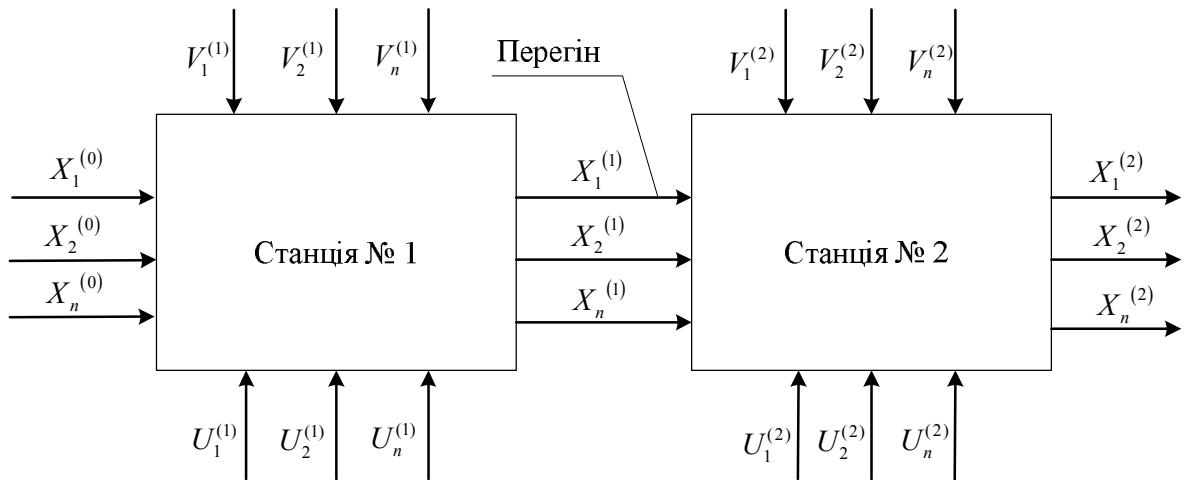
де r_0 – питомий опір контактної мережі, Ом/км;

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

$y(t)$ – відстань від шин ТП до навантаження від i -го поїзда, км;

L – відстань між ТП, км.

Далі в розділі розроблено модель транспортного потоку, яка дозволяє встановити межі зміни його показників. У цій моделі залізнична станція представлена як трансформатор транспортного потоку, що дозволяє під час розрахунків втрат електроенергії в тяговій мережі враховувати вплив показників транспортного потоку на величину втрат (рис. 4).



$X_i^{(0)} (i=1, \dots, n)$ – вхідні параметри; $U_i (i=1, \dots, n)$ – керуючі параметри;

$V_i (i=1, \dots, n)$ – обурюючі параметри; $X_i^{(n)} (i=1, \dots, n)$ – вихідні параметри

Рисунок 4 – Модель транспортного потоку

Параметри транспортного потоку під впливом трансформації можуть значною мірою відрізнятися від параметрів вихідного потоку. Тому для розв'язання задачі зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі за рахунок регулювання транспортного потоку досліджено закономірності та межі зміни його показників.

У результаті досліджень, виконаних для Чаплинської дільниці Придніпровської залізниці, встановлено, що величина втрат електроенергії в тяговій мережі змінюється в межах від 2 588,1 до 2 833,6 кВт·год при зміні

інтервалу між поїздами в межах від 6 до 15 хв, що складає 8,7 % від рівня втрат. Встановлено граничні показники транспортного потоку за умовами роботи СТЕ: максимальна інтенсивність транспортного потоку – 7,68 поїзда / год, максимальна густота транспортного потоку – 0,128 поїзда/км; потенціал зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом зменшення нерівномірності транспортного потоку (для схеми двостороннього живлення величина втрат змінюється на 18,9 %; для вузлової схеми живлення на 11,1 %).

На основі аналізу виконаних ГРП встановлено фактори, що впливають на можливість регулювання показників транспортного потоку з метою зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі: нерівномірність руху поїздів, неповне заповнення пропускної спроможності дільниці, обгін вантажних поїздів пасажирськими, виконання робіт з ремонту колії, контактної мережі, «відмови» в роботі різних пристроїв і т.д. З урахуванням цих чинників принцип зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі полягає в розв'язанні задачі побудови енергоефективних ГРП шляхом вибору раціональних: послідовності відправлення поїздів, дислокації та інтервалів між тяговими навантаженнями (рис. 5).

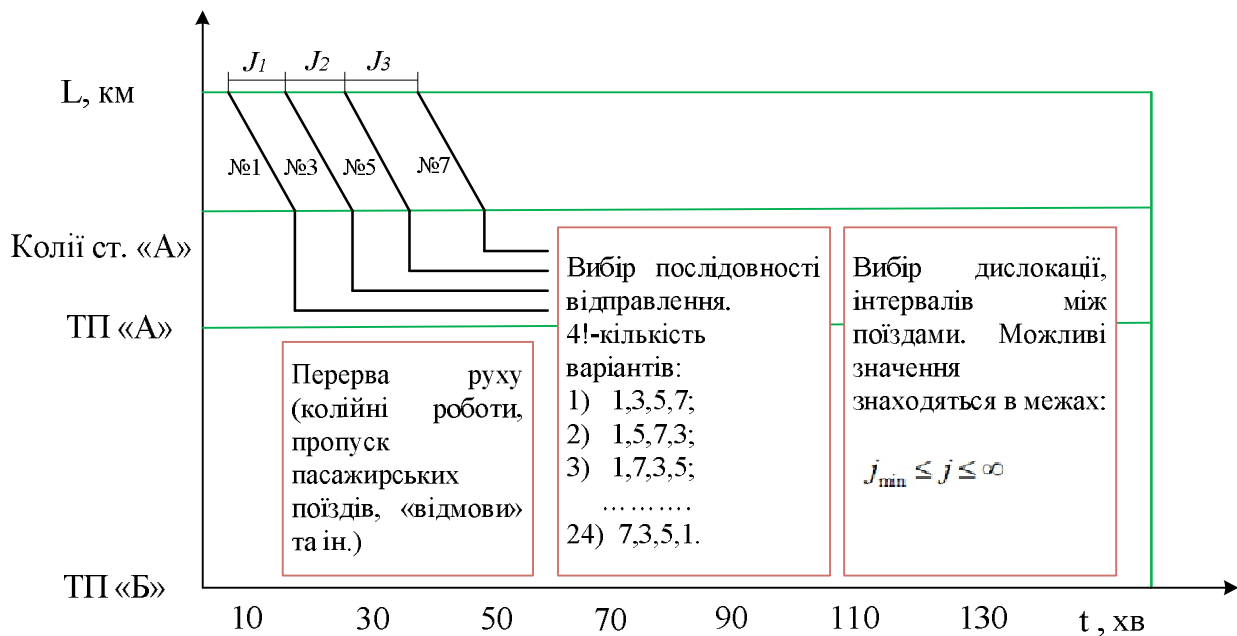


Рисунок 5 – Принцип зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень

У третьому розділі розроблено наукові принципи зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень. При цьому раціональні відстані між тяговими навантаженнями розраховуються на основі методу деформованого багатогранника, послідовність відправлення й інтервали між поїздами – на основі евристичного алгоритму.

Розроблена математична модель енергооптимальної дислокації поїздів між ТП дозволяє вибирати схеми розташування поїздів між ТП на кожному кроці часу, за яких втрати електроенергії в тяговій мережі мінімальні. Цільова функція задачі визначення оптимальних відстаней між тяговими

навантаженнями за критерієм мінімуму втрат потужності в тяговій мережі для двосторонньої схеми живлення має вигляд

$$C = f \left(\sum_{i=1}^n I_i \cdot r \cdot \begin{cases} \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^n I_i (L - l_i) \pm \left| \frac{U_A - U_B}{r \cdot L} \right| \right) \cdot l_i & \text{при } 1 \leq i \leq m \\ \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^n I_i \cdot l_i \pm \left| \frac{U_A - U_B}{r \cdot L} \right| \right) \cdot (L - l_i) & \text{при } m \leq i \leq n \end{cases} \right) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де n – загальна кількість поїздів, що перебувають на ділянці;

I_i – струм i -го поїзда;

r – опір тягової мережі;

L – відстань між ТП;

l_i – відстань між початком ділянки та i -тим поїздом;

U_A, U_B – напруга на шинах ТП А і В;

m – кількість поїздів до точки струмоподілу.

Спад напруги $\Delta U(x)$ та струми живлення $I(x)$ залежать від дислокації тягових навантажень між ТП. Таким чином, цільову функцію втрат потужності в тяговій мережі можна визначити як функцію від показників

$$\Delta P = f(l_1, Y_0) \quad l_1 \in [0, L], \quad (3)$$

де l_1 – дислокація першого поїзда;

$Y_0 = [y_1, \dots, y_i]$ – вектор відстаней між поїздами (y_i – відстань між $(i-1)$ -м та i -м поїздами).

На основі вищевказаного маємо вираз:

$$C = f(l_1, Y_0) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Визначено, що для будь-якої міжпідстанційної зони постійного струму з довжиною L цільова функція C є функцією відстаней між тяговими навантаженнями Y_0 , які повинні становити мінімум цільової функції $C \rightarrow \min$.

Якщо позначити дислокацію першого поїзда (тягового навантаження) як $l_1 = y_0$, а відстані між тяговими навантаженнями $l_{i,i+1} = y_i$, тоді цільова функція задачі набуде такого вигляду:

$$C = f(y_0, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Запропоновано підхід, за якого відстані між поїздами подано як ребра багатогранника. На рис. 6 наведено принцип побудови симплексу й область допустимих значень для трьох поїздів між ТП.

Обмеження щодо безпеки руху поїздів враховуються таким чином: мінімальна довжина ребра повинна бути не менше довжини блок-діляниці пристроїв СЦБ (сигналізації, централізації, блокування), максимальна – не більше довжини ділянки, що розглядається:

$$\min_{1 \leq i \leq n-1} y_i \geq l_{\min}, \quad (6)$$

$$l_i = y_0 + \sum_{i=1}^{n-1} y_i \leq L, \quad (7)$$

де $l_{\min}$ – мінімальна довжина блок-дільниці пристроїв СЦБ.

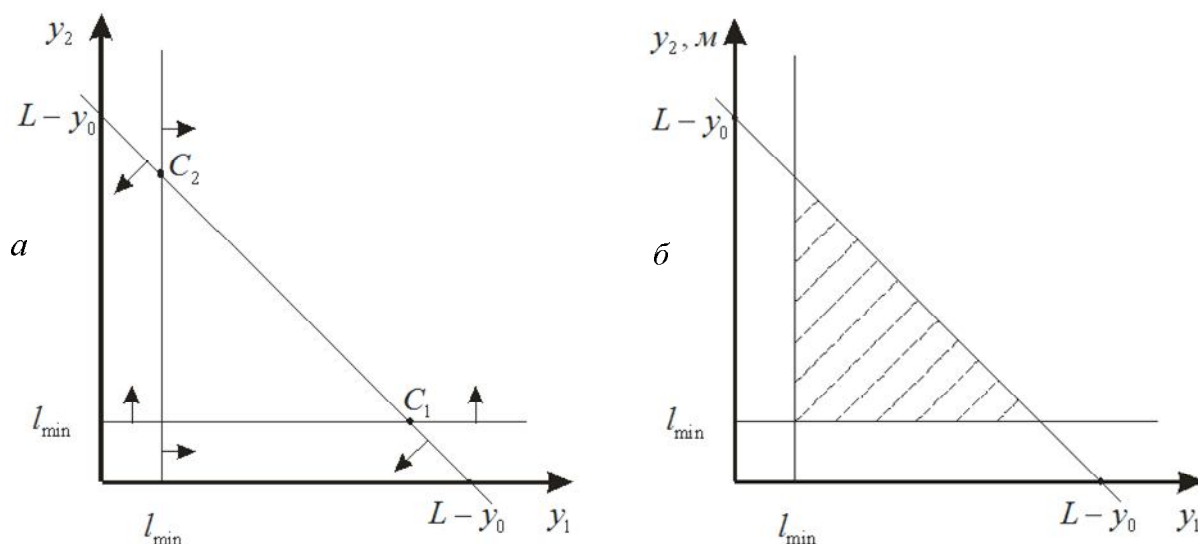


Рисунок 6 – Принцип побудови симплексу (а) і область допустимих значень (б) для трьох поїздів між тяговими підстанціями

Змінюючи дислокацію першого поїзда й використовуючи симплекс-метод деформованого багатогранника, здійснено вибір дислокації для трьох тягових навантажень (поїздів) на міжпідстанційній зоні з мінімальними втратами потужності в тяговій мережі. У дисертаційній роботі наведено принципи вибору раціональної дислокації для різної кількості тягових навантажень між ТП.

На основі евристичного алгоритму пошуку мінімуму функції списку розроблено принципи зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі за рахунок вибору оптимальної послідовності відправлення поїздів та інтервалів між поїздами, які формулюються таким чином: з можливих варіантів відправлення поїздів різних категорій (або інтервалів між поїздами) необхідно вибрати таку послідовність, якій відповідає мінімальне значення втрат електроенергії в тяговій мережі.

Цільова функція визначення втрат електроенергії в тяговій мережі має такий вигляд:

$$C = f(\Delta W) \rightarrow \min. \quad (8)$$

Поняття функції послідовності визначається таким чином – з деякою послідовністю $[w_1, w_2, \dots, w_n]$ за певним правилом F зіставляється дійсне число. Якщо w_i – це i -та категорія поїзда, а $i = \overline{1, 4}$, то в цьому випадку послідовностей пропуску поїздів буде $n! = 24$ варіанти, а з кожним варіантом пропуску поїздів зіставляється певне значення втрати електроенергії в тяговій мережі:

$$\left. \begin{aligned} [w_1, w_2, w_3, w_4] &\rightarrow \Delta W_1, \\ [w_2, w_1, w_3, w_4] &\rightarrow \Delta W_2, \\ &\dots \\ [w_4, w_3, w_2, w_1] &\rightarrow \Delta W_{24}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Основою евристичного алгоритму є елементарна операція варіації послідовності (списку). Якщо задано список $L' = [w_1, \dots, w_n]$, тоді елементарну операцію можна записати у вигляді:

$$L' \otimes (i, j), \quad (10)$$

де елементи w_i, w_j міняються місцями.

Графічно процес пошуку мінімуму функції послідовності зображений на рис. 7.

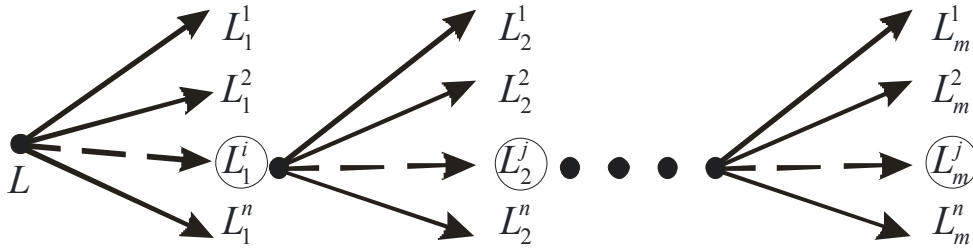


Рисунок 7 – Процес пошуку мінімуму функції послідовності

У четвертому розділі виконано практичну реалізацію теоретичних положень, розроблено програмний комплекс «Поток», призначений для побудови енергоефективних ГРП. Панель головного вікна програми показана на рис. 8.

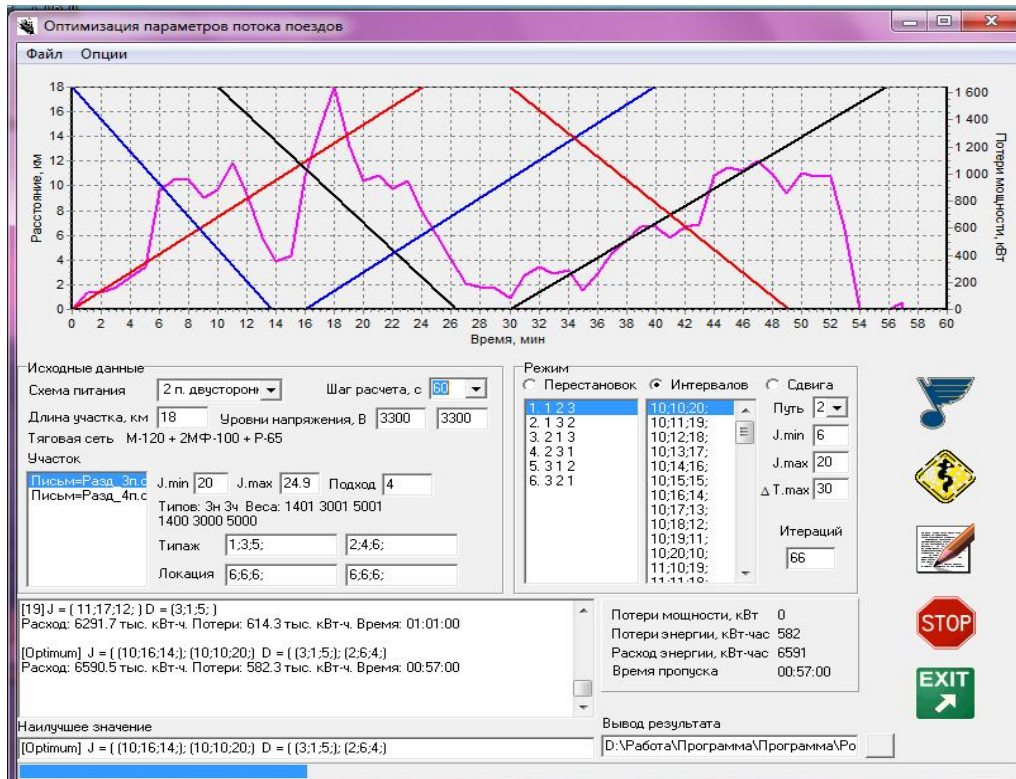


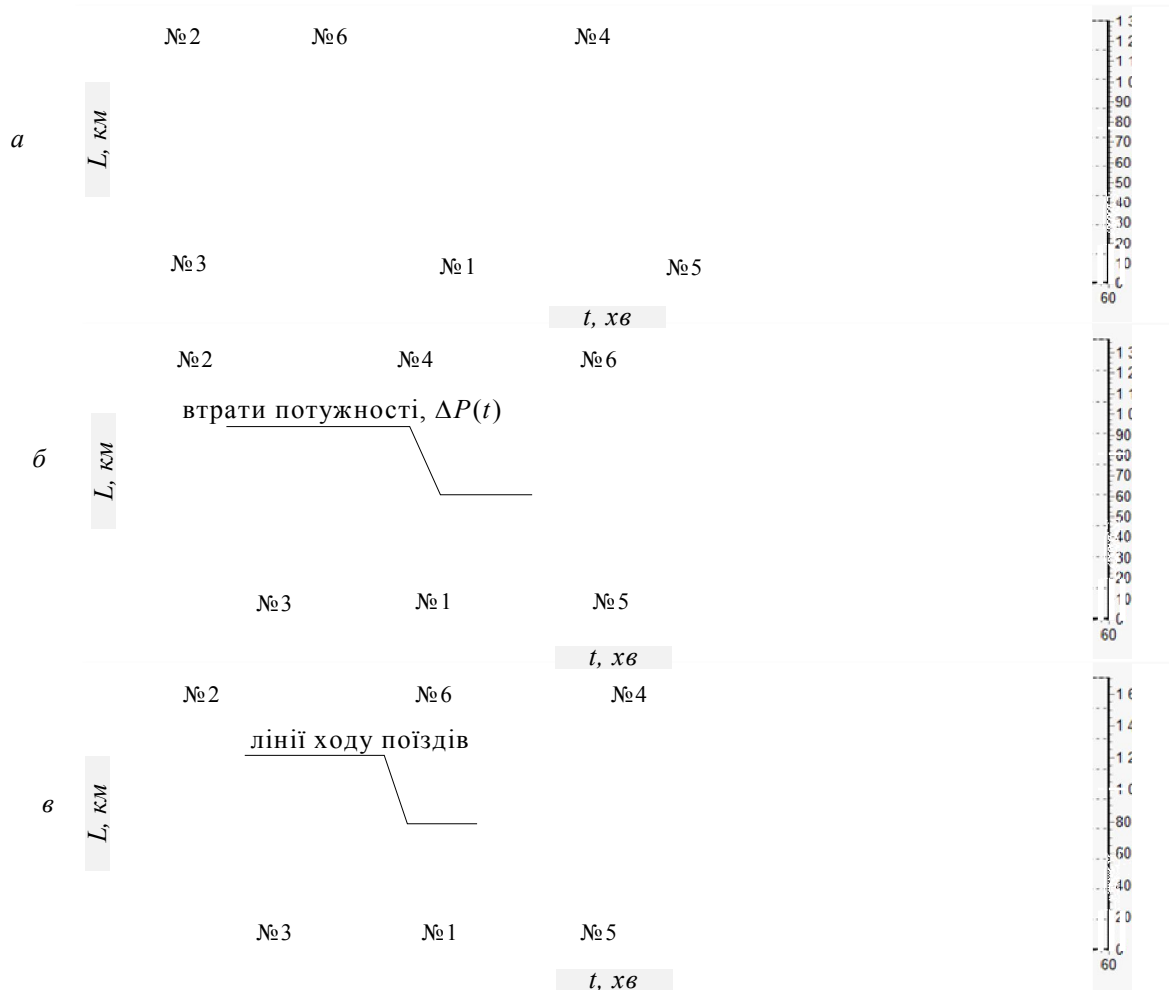
Рисунок 8 – Панель головного вікна програмного комплексу «Поток»

Методом імітаційного моделювання встановлена можливість зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень на 23-27 % (двостороння схема живлення – 23 %, вузлова і паралельна – 27 %). Визначено втрати електроенергії в тяговій мережі з

урахуванням послідовності відправлення поїздів різних категорій (масою 1 400, 3 000 і 5 000 т) з різними інтервалами між поїздами та дислокацією тягових навантажень між ТП. Результати розрахунків наведено в табл.1. ГРП, які мінімізують втрати електроенергії в тяговій мережі, показано на рис. 9.

Таблиця 1 – Втрати потужності з урахуванням дислокації тягових навантажень між ТП при двосторонній схемі живлення

Дислокація та оптимальні відстані між тяговими навантаженнями, км			Втрати потужності в тяговій мережі, кВт
Дислокація 1-го поїзда x_1	Дислокація 2-го поїзда x_2	Дислокація 3-го поїзда x_3	
0,1	1,1	2,3	656,7
0,2	1,2	2,3	657,5
0,3	1,3	2,3	1067
...	...	...	...
15,6	16,6	17,6	851
15,7	16,7	17,7	846



a – двостороння; b – вузлова; v – паралельна

Рисунок 9 – ГРП, які мінімізують втрати електроенергії в тяговій мережі

Для порівняння експлуатаційних витрат у разі застосування енергооптимальних ГРП та існуючих було виконано розрахунки втрат електроенергії в тяговій мережі для електрифікованих ділянок постійного струму Придніпровської залізниці за 2012 рік. При вартості електроенергії 0,99 грн/кВт·год економія складає 1,4 млн грн за 1 рік.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є закінченою науковою працею, у якій на основі теоретичних і експериментальних досліджень вирішена актуальна науково-технічна задача – зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень.

Основні результати й висновки полягають у такому.

1. Аналіз сучасного стану задачі зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі показав, що існують додаткові резерви зниження втрат шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень, регулювання транспортного потоку. У попередніх дослідженнях не розглядалися резерви зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі за рахунок вибору: дислокації поїздів між ТП, послідовності відправлення поїздів різних категорій, інтервалів між поїздами.
2. З використанням розробленої моделі СТЕ встановлена можливість регулювання інтервалів між тяговими навантаженнями з метою зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі. У результаті досліджень, виконаних для електрифікованої ділянки Придніпровської залізниці, встановлено, що величина втрат електроенергії в тяговій мережі змінюється в межах від 2 588,1 до 2 833,6 кВт·год при зміні інтервалу між поїздами в межах від 6 до 15 хв, різниця становить 8,7 % від рівня втрат. Встановлено потенціал зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом зменшення нерівномірності транспортного потоку: для схеми двостороннього живлення величина втрат змінюється на 18,9 %; для вузлової схеми живлення – на 11,1 %.
3. Розроблена модель транспортного потоку дозволяє встановити межі зміни його показників. У цій моделі залізнична станція представлена як трансформатор транспортного потоку, що дозволяє при розрахунках втрат електроенергії в тяговій мережі враховувати вплив показників транспортного потоку на величину втрат. У результаті досліджень, виконаних для електрифікованої ділянки Придніпровської залізниці, встановлено граничні показники транспортного потоку за умовами роботи СТЕ: максимальна інтенсивність транспортного потоку – 7,68 поїзда/год, максимальна густина транспортного потоку – 0,128 поїзда/км. Встановлено, що при управлінні транспортним потоком необхідно регулювати його показники з метою створення рівномірного навантаження на ТП та зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі.

4. Розроблена математична модель енергооптимальної дислокації тягових навантажень між ТП дозволяє вибирати схеми розташування тягових навантажень між ТП на кожному кроці часу, за яких втрати електроенергії в тяговій мережі мінімальні. Запропоновано підхід, за якого відстані між тяговими навантаженнями представлені як ребра багатогранника. Обмеження щодо безпеки руху поїздів враховуються таким чином: мінімальна довжина ребра повинна бути не менше довжини блок-діляниці пристроїв СЦБ, максимальна – не більше довжини діляниці, що розглядається.
5. Сформульований принцип зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі на основі методу деформованого багатогранника дозволяє розраховувати оптимальні відстані між тяговими навантаженнями для побудови енергоефективних ГРП. Розглянуто ситуації для різної кількості поїздів між ТП. Запропоновано принцип зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі на основі евристичного алгоритму пошуку мінімуму функції списку за рахунок вибору оптимальної послідовності відправлення та інтервалів між поїздами. При цьому послідовність поїздів різних категорій представляється як список, а кожній послідовності відправлення поїздів різних категорій відповідає певне значення втрат електроенергії в тяговій мережі.
6. Розроблено програмний комплекс по оптимізації режимів СТЕ за рахунок складання енергоефективних ГРП. У результаті експериментальної перевірки теоретичних положень дисертації, виконаної з використанням програмного комплексу «Поток», шляхом імітаційного моделювання встановлено межі зміни величини втрат електроенергії залежно від: послідовності відправлення поїздів для різних схем живлення – 20-23 % (двостороння – 20 %, вузлова і паралельна – 23 %); дислокації та інтервалів між тяговими навантаженнями – 23-27 % (двостороння – 23 %, вузлова і паралельна – 27 %). Таким чином, можна зменшити втрати електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень на 2-3 % від рівня витрат на тягу поїздів.
7. Виконані техніко-економічні розрахунки підтвердили ефективність застосування методів зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень. Чистий дисконтований дохід для електрифікованих ділянок Придніпровської залізниці за 1 рік становить 1,4 млн грн. Розрахунковий термін окупності запропонованих заходів склав 1 місяць.
8. Результати дисертаційної роботи впроваджені в службах електропостачання Донецької і Придніпровської залізниць, Дніпропетровській дирекції залізничних перевезень, навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Основні положення та результати дисертації опубліковано в таких працях:

Основні праці:

1. Кузнецов В. Г. Дослідження показників транспортного потоку на електрифікованій дільниці для визначення раціональних режимів системи тягового електропостачання / В. Г. Кузнецов, К. О. Калашников // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 3(82). – С. 57–61.
2. Кузнецов В. Г. Исследование зависимости потерь мощности в тяговой сети от показателей неравномерности потока поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 2. – С. 51–53.
3. Кузнецов В. Г. Визначення показників потоку поїздів, які обмежують пропускну здатність ділянки за умовами електропостачання / В. Г. Кузнецов, Г. Я. Мозолевич, К. А. Калашников // Гірнича електромеханіка та автоматика : науково-техн. зб. – 2011. – № 87. – С. 47–49.
4. Кузнецов В. Г. Оптимизация потерь электроэнергии в контактной сети железнодорожного транспорта / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Пр. ін-ту електродинаміки Нац. акад. наук України. – 2012. – № 33. – С. 18–21.
5. Кузнецов В. Г. Уменьшение потерь электроэнергии в контактной сети за счет регулирования графика движения поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Техническая электродинамика. Тематическое издание. – 2012. – С. 107–110.
6. Maksimczuk W. F. Badania rezerw zasilania poprzez racjonalne rozmieszczenie pociągów na odcinku / W. F. Maksimczuk, W. G. Kuzniecov, K. A. Kalasznikov, T. I. Kiriluk // Infrastruktura transportu. – 2013. – С. 28–31.
7. Калашников К. А. Модернизированный метод составления графика движения поездов с учетом потерь электроэнергии / К. А. Калашников // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. – 2013. – № 2/8(62). – С. 4–8.
8. Кузнецов В. Г. Определение оптимальной дислокации поездов между тяговыми подстанциями по критерию минимума потерь мощности в тяговой сет / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 5. – С. 2–13.
9. Kalasznikov K. A. Matematyczny model zagadnienia optymalnego przemieszczenia pociągów pomiędzy podstacjami trakcyjnymi według kryterium minimalnych strat mocy w sieci trakcyjnej / K. A. Kalasznikov // Problemy Kolejnictwa. – 2013. – № 159. – С. 31–44.

Додаткові:

10. Кузнецов В. Г. Оптимизация графика движения поездов с учетом энергетической составляющей / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Тр. Международной научно-практ. конф. «Проблемы и перспективы

- развития транспортного комплекса: образование, наука, производство», 2009, Ростов на Дону. – Ростов на/Д. : РГУПС, 2009. – С. 362–363.
11. Кузнецов В. Г. Підвищення енергетичної ефективності електротранспорту шляхом удосконалення процесу перевезень / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Тезиси докл. міжнародної конф. «Транселектро-2009», 2009, Мисхор. – Д. : ДПТ, 2009. – С. 54–55.
 12. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу роботи поїзного диспетчера на систему електропостачання / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Матеріали 1-й міжнародної научно-практ. конф. «Енергосбереження на залізничному транспорті», 2010, п. Мисхор. – Д. : ДНУЖТ, 2010. – С. 9–10.
 13. Кузнецов В. Г. Оптимизация взаимного расположения поездов на перегоне с учетом условий электроснабжения / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Тезисы 4-й Международной научно-практ. конф. «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте «ЕМС&S-R», 2011, Чинадиево. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 48–49.
 14. Кузнецов В. Г. Энергооптимальное управление потоком поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Материалы 2-й международной научно-практ. конф. «Енергосбереження на залізничному транспорті», 2011, пгт Ждениево. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 35–37.
 15. Кузнецов В. Г. Повышение энергоэффективности электротранспорта постоянного тока путем оптимизации управления транспортным потоком / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Материалы 5-й международной научно-практ. конф. «Электрификация транспорта Транселектро-2011». – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 40–41.
 16. Кузнецов В. Г. Исследование влияния дислокации и расстояния между поездами на величину потерь мощности в контактной сети / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Материалы 3-й Международной научно-практ. конф. «Енергосбереження на залізничному транспорті». – Д. : ДНУЖТ, 2012. – С. 38–39.
 17. Кузнецов В. Г. Применение методов оптимизации для решения задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет регулирования транспортного потока / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Материалы 4-й Международной научно-практ. конф. «Енергосбереження на залізничному транспорті и в промышленности». – Д. : ДНУЖТ, 2013. – С. 54–55.

АНОТАЦІЯ

Калашников К. О. Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний

університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2014.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень.

На основі аналізу існуючих методів зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі встановлено, що існують додаткові резерви зменшення втрат шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень, послідовності відправлення поїздів різних категорій, інтервалів між поїздами.

Сформульовано принцип зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі на основі методу деформованого багатогранника, який дозволяє розраховувати оптимальні відстані між тяговими навантаженнями для побудови енергоефективних ГРП. Розглянуто ситуації для різної кількості поїздів між ТП. Запропоновано принцип зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі на основі евристичного алгоритму пошуку мінімуму функції списку шляхом вибору оптимальної послідовності відправлення та інтервалів між поїздами. При цьому послідовність поїздів різних категорій представляється як список, а кожній послідовності відправлення поїздів різних категорій відповідає певне значення втрат електроенергії в тяговій мережі.

Розроблено програмний комплекс для складання енергоефективних ГРП. Проведено експериментальну перевірку теоретичних положень дисертації з використанням програмного комплексу «Поток». Чистий дисконтований дохід для електрифікованих ділянок Придніпровської залізниці за 1 рік становить 1,4 млн грн.

Ключові слова: втрати електроенергії, контактна мережа, інтервали між поїздами, послідовність відправлення поїздів, енергоефективність, тягові підстанції, дислокація поїздів, постійний струм, тягові навантаження.

АННОТАЦИЯ

Калашников К. А. Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок. — На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 — электротранспорт. — Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2014.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок.

На основе анализа существующих методов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети установлено, что существуют дополнительные резервы снижения потерь путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок, последовательности отправления поездов различных категорий, интервалов между поездами.

Выделены факторы, которые влияют на величину потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока: параметры СТЭ – схемы питания контактной сети, длина фидерной зоны, мощность и напряжение на шинах ТП; параметры пути – сопротивление движению, уклоны; технические данные ЭПС – максимальная скорость, масса, мощность, потребляемый ток; параметры транспортного потока – дислокация поездов между ТП, размеры движения, интервалы между поездами, последовательность отправления поездов различных категорий; прочие факторы – квалификация машинистов, погодные условия.

Установлен потенциал уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем уменьшения неравномерности транспортного потока: для схемы двухстороннего питания величина потерь изменяется на 18,9 %; для узловой схемы питания – на 11,1 %.

Разработаны модели СТЭ и транспортного потока, в которых ж.д. станция представлена как трансформатор транспортного потока с возможностью учета влияния показателей транспортного потока на величину потерь электроэнергии в тяговой сети. Установлены предельные показатели транспортного потока по условиям работы СТЭ для электрифицированного участка Приднепровской ж.д.: максимальная интенсивность транспортного потока – 7,68 поезда/час, максимальная плотность транспортного потока – 0,128 поезда/км.

Разработана математическая модель энергооптимальной дислокации тяговых нагрузок между ТП, позволяющая выбирать схемы расположения тяговых нагрузок между ТП на каждом шаге времени, при которых потери электроэнергии в тяговой сети минимальны. Предложен подход, при котором расстояния между тяговыми нагрузками представлены как ребра многогранника. Ограничения по безопасности движения поездов учитываются следующим образом: минимальная длина ребра должна быть не меньше длины блок-участка устройств СЦБ, максимальная – не более длины рассматриваемого участка.

Сформулирован принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети на основе метода деформируемого многогранника, который позволяет рассчитывать оптимальные расстояния между тяговыми нагрузками для построения энергоэффективных ГДП. Рассмотрены ситуации для различного количества поездов между ТП. Предложен принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети на основе эвристического алгоритма поиска минимума функции списка путем выбора оптимальной последовательности отправления и интервалов между поездами. При этом последовательность поездов различных категорий представляется как список, а каждой последовательности отправления поездов различных категорий поставлено в соответствие определенное значение потерь электроэнергии в тяговой сети.

Разработан программный комплекс для составления энергоэффективных ГДП. Проведена экспериментальная проверка теоретических положений диссертации с использованием программного комплекса «Поток» путем имитационного моделирования. Установлены пределы изменения величины

потерь электроэнергии в зависимости от: последовательности отправления поездов для различных схем питания – 20-23 % (двухсторонняя – 20 %, узловая и параллельная – 23 %); дислокации и интервалов между тяговыми нагрузками – 23–27 % (двухсторонняя – 23 %, узловая и параллельная – 27 %).

Проведены технико-экономические расчеты, подтверждающие эффективность применения методов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок. Чистый дисконтированный доход для электрифицированных участков Приднепровской ж.д. за 1 год составляет 1,4 млн грн.

Ключевые слова: потери электроэнергии, контактная сеть, интервалы между поездами, последовательность отправления поездов, энергоэффективность, тяговые подстанции, дислокация поездов, постоянный ток, тяговые нагрузки.

ABSTRACT

Kalashnikov K. A. Reduction of electricity losses in DC traction line by choosing a rational dislocation of traction loads. – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.22.09 – electric transport. – Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2013.

The dissertation is devoted to the solution of the important scientific and technical tasks - decreasing energy losses in traction line by choosing a rational dislocation traction loads.

Based on the analysis of existing methods of reducing electricity losses in traction lines it's established that there are additional reserves of decreasing losses by choosing a rational dislocation of the traction loads, sequence of departure of trains with different categories, intervals between trains.

It's formulated the principles of reducing electric power losses in traction lines based on the method of strain of the polytope, which allows to calculate the optimal distance between traction loads for building energy-efficient schedule of trains. The author proposed the principle of reduction of electricity losses in traction line on the basis of the heuristic algorithm for finding the minimum of the function list by selecting the optimal sequence of departure and intervals between trains. The sequence of trains with various categories is represented as a list, and each sequence of trains with different categories corresponds to a certain value of electricity losses in traction lines.

It's developed a software package designed to compute energy-efficient train schedule. An experimental verification of theoretical propositions in dissertation using software complex «Potok» on the basis of simulation showed a positive economic effect. The net product value for electrified sections of Pridneprovskaya railway for 1 year is 1.4 million UAH.

Keywords: the losses of electricity, a contact line, the traffic flow, the intervals between the trains, the sequence of the train departures, train schedules, energy efficiency, traction substations, the train's dislocation, traction loads.

Калашников Костянтин Олексійович

**ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ШЛЯХОМ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОЇ ДИСЛОКАЦІЇ
ТЯГОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Підписано до друку «17» січня 2014 р.
Формат паперу 60x84/16. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0.
Тираж 100 пр. Зам. №_____

Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №1315 від 31.03.2003

Адреса видавництва і дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010.