

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



КОСАРЄВ ЄВГЕН МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.331: 621.316

**ПОКРАЩЕННЯ РЕЖИМУ НАПРУГИ В СИСТЕМІ
ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ
ЗАЛІЗНИЦЬ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт
Галузь знань 27 – транспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

- Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор
Сиченко Віктор Григорович,
завідувач кафедри інтелектуальних систем електропостачання
Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна
Міністерства освіти і науки України, м. Дніпро
- Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор
Стасюк Олександр Іонович,
професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих
технологій Державного університету інфраструктури та
технологій Міністерства освіти і науки України, м. Київ
- кандидат технічних наук, доцент
Бурикін Олександр Борисович,
доцент кафедри електричних станцій і систем
Вінницького національного технічного університету
Міністерства освіти і науки України, м. Вінниця

Захист відбудеться «03» липня 2018 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна або на сайті університету <http://diit.edu.ua/> (Наука – Захисти у спеціалізованій вченій раді Д 08.820.01)

Автореферат розісланий «01» червня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Муха А. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електрифікований залізничний транспорт є базовою складовою транспортного сектору України та забезпечує функціонування і сталий розвиток економіки держави, він є однією з найбільш енергоємних галузей, що володіє високим потенціалом енергозбереження. Але сучасний стан тягового електропостачання, особливо на ділянках постійного струму, характеризується зростаючим дефіцитом питомої потужності для забезпечення необхідного режиму напруги в тяговій мережі. При цьому коефіцієнт використання режимної потужності та обладнання тягових підстанцій при забезпеченні графіка інтенсивного руху поїздів не перевищує 25 %, а втрати енергії в тяговій мережі при пікових навантаженнях збільшуються і досягають 10-15 % від споживаної енергії. Головним фактором цього є використання централізованої системи електропостачання, яка передбачає зосередження потужності на тягових підстанціях, розташованих на певній відстані (25-30 км, а подекуди до 12-18 км (Придніпровська залізниця) або до 7-8 км (Львівська залізниця), та живлення електрорухомого складу за двосторонньою схемою. Великі значення струмових навантажень та їх імпульсний характер, навіть при підвищенні напруги на шинах тягових підстанцій на 200 – 300 В відносно номінального значення, призводять суттєвих втрат напруги в контактній мережі та викликають зміну її рівня в межах 1500 В, що, в свою чергу, призводить до неможливості забезпечення заданого рівня напруги на струмоприймачі електрорухомого складу. Невідповідність рівня напруги нормованим значенням, в першу чергу, обмежує швидкість руху поїздів, технологічну можливість пропуску заданої кількості електрорухомого складу і перевезення встановленої вагової норми. Тому, однією з основних вимог до системи електропостачання при забезпеченні експлуатаційної роботи залізниць, а особливо при впровадженні швидкісного та важковагового руху є дотримання відповідного режиму напруги в контактній мережі при проходженні рухомого складу. Пристрої тягового електропостачання не повинні обмежувати максимальні швидкості руху нижче прийнятого експлуатаційними умовами рівня та забезпечувати відповідну якість напруги і високу енергоефективність.

Враховуючи вищевикладене, покращення режиму напруги в системі тягового електропостачання постійного струму є актуальною задачею та потребує наукового вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до таких державних програм:

1) Державна Програма енергонезалежності, ухвалена указом Президента України № 5/2015 Про стратегію сталого розвитку «Україна – 2020» від 12.01.2015 р., в частині забезпечення енергетичної безпеки і переходу до енергоефективного та енергоощадного використання та споживання енергоресурсів із впровадженням інноваційних технологій;

2) Енергетична стратегія України на період до 2030 р., схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 24.07.2013, в частині:

- розвитку електроенергетичної галузі;
- розширення пропускної спроможності залізничних коридорів.

3) Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, ухвалена Постановою Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р. (із змінами, внесеними згідно з Постанови № 970), в частині

- підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту на внутрішньому і зовнішньому ринку транспортних послуг;

- зменшення обсягу питомих витрат енергоресурсів на тягу поїздів;

4) Постанова Верховної Ради України «Про програму діяльності Кабінету Міністрів України» № 26-VIII від 11.12.2014 р. стосовно:

розділу 6 «Нова продовольча політика», а саме розвиток портової та залізничної інфраструктури для нарощування експорту (2015-2019 роки);

розділу 7 «Нова політика енергетичної незалежності», а саме інтеграція української енергосистеми в мережу європейських енергосистем ENTSO-E та підвищення енергоефективності за рахунок реалізації проектів з використанням альтернативних джерел енергії (Clean Energy).

Обрані дослідження безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за наступними темами:

- «Проведення досліджень та розробка рекомендацій щодо особливостей приєднання сонячних та вітрових електростанцій до тягових підстанцій електрифікованих залізниць» (№ 0113U007948);

- «Дослідження раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії та дослідження балансу електричної енергії в умовах спотворення її якості на тягових підстанціях постійного та змінного струму» (№ 0113U007949);

- «Дослідження раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії» (№ 0115U003918);

- «Дослідження режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій постійного струму та в тяговій мережі в умовах гірського перевалу» (№ 0115U003921)

- «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту» (№ 0115U002311)

- «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем» (№ 0116U006982).

- «Розробка енергоефективної технології сумісної роботи системи централізованого тягового електропостачання та системи розподілених альтернативних джерел електроенергії» (№ 0117U004481)

Результати дисертаційної роботи отримано в результаті виконання вказаних досліджень, у яких дисертант виступав виконавцем і є співавтором звітів з науково-дослідних робіт.

Мета та задачі дослідження. Покращення режиму напруги в системі тягового електропостачання постійного струму шляхом зменшення її діапазону зміни на струмоприймачі електрорухомого складу в децентралізованій системі живлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові задачі:

1. Дослідити режими напруги в системі тягового електропостачання постійного струму;

2. Удосконалити метод розрахунку напруги на струмоприймачі електрорухомого складу при розподіленій системі тягового електропостачання;

3. Розробити теоретичні та практичні підходи до побудови енергоефективної системи тягового електропостачання з поліпшеним режимом напруги;

4. Провести техніко-економічне обґрунтування розробленої системи розподіленого живлення для покращення режиму напруги.

Об'єкт дослідження – процес передачі електричної енергії електрорухомому складу електрифікованих залізниць.

Предмет дослідження – режими напруги на струмоприймачі електрорухомого складу.

Методи досліджень. В роботі використано: аналіз літературних та електронних джерел для визначення стану енергоефективності електропостачання електрифікованих залізниць; експериментальні вимірювання та статистичний аналіз для оцінки режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму; теоретичні та практичні дослідження, чисельні методи розрахунку та імітаційне моделювання для розвитку методів розрахунку режимів систем тягового електропостачання; техніко-економічний аналіз для обґрунтування застосування розробленої системи. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана на ЕОМ з використанням прикладних програмних засобів MS Excel, MathCad, LabView та Matlab. Імітаційне моделювання виконувалось у програмному середовищі iSET та Matlab.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше встановлено вплив обмеження напруги в тяговій мережі на втрати електроенергії в системі тягового електропостачання та визначено рівні напруги, які дозволяють при паралельній роботі тягових підстанцій і підсилюючих пунктів забезпечити енергооптимальний режим роботи електрифікованої ділянки.

2. Отримав подальший розвиток метод розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання оснований на функціях опору, що відрізняється можливістю врахування паралельної роботи ряду тягових підстанцій і підсилюючих пунктів в складі децентралізованої системи електропостачання, врахуванням споживання і генерації потужності на суміжних міжпідстанційних зонах та можливістю розрахунку більшої кількості джерел живлення з різними внутрішніми опорами, що дозволяє проводити розрахунки при примусовому розподілі потужності.

3. Отримав подальший розвиток сенсорний метод пошуку в застосуванні до визначення раціонального розташування підсилюючих пунктів, що дозволяє визначити найбільш слабку точку тягової мережі, розташування підсилюючого пункту в якій дозволяє зменшити втрати потужності при забезпеченні заданого рівня обмеження напруги та максимізувати ефективність використання підсилюючих пунктів.

Практичне значення отриманих результатів

Отримані в дисертації результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили створити передумови для:

1. Звуження діапазону зміни напруги на струмоприймачах електрорухомого складу з 793 В до 241 В завдяки встановленню на міжпідстанційній зоні підсилюючих пунктів, які забезпечують раціональний перерозподіл потоків потужності в тяговій мережі;

2. Досягнення максимально можливого зменшення добових втрат електроенергії в тяговій мережі з 12,1 до 7,97 МВт·год за рахунок обмеження напруги в контактній мережі на рівні, який складає на 7 % нижче рівня напруги холостого ходу тягових підстанцій.

3. Визначення оптимального місця розташування підсилюючих пунктів вздовж міжпідстанційної зони, що дозволило зменшити їх встановлену потужність до 14 % в порівнянні з розташуванням на існуючих постах секціонування;

4. Зменшення споживання електричної енергії з системи зовнішнього електропостачання до 33 % за рахунок живлення підсилюючих пунктів від джерел альтернативної енергії та використання батарейної системи накопичення.

Розроблені методики та практичні підходи для звуження діапазону зміни напруги на струмоприймачі електрорухомого складу прийнято до використання службою електропостачання регіональної філії «Львівська залізниця». Результати роботи впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та використовуються при підготовці бакалаврів і магістрів зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Особистий внесок здобувача. Постановка мети та задачі дослідження виконані спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, виконані в дисертаційній роботі, отримано дисертантом самостійно. У роботах, які написані в співавторстві, автору належать [1] – постановка задач для синтезу системи, методологія виконання розрахунків; [2] – принцип розрахунку розподілу втрат напруги в тяговій мережі, принцип генерації додаткового струму підсилюючим пунктом; [3] – теоретичні підходи до впровадження накопичувачів та альтернативних джерел живлення на залізничному транспорті; [4] – отримання виразів для розрахунків потужності підсилюючих пунктів різних варіантів підсилення тягової мережі; [5] – постановка задачі, проведення розрахунків; [6] – методологія виконання розрахунків, виведення формул та їх узагальнення; [7] – розробка алгоритму визначення струму підсилюючого пункту та його граничних значень, оптимізація розташування підсилюючого пункту; [9] – проведення варіантних розрахунків, аналіз та узагальнення результатів; [10] – аналіз попередніх досліджень та отриманих результатів; [11] – аналіз результатів вимірювання режимів напруги; [12] – аналіз результатів вимірювань на тягових підстанціях; [13] – розробка топології підсилюючого пункту та визначення його параметрів, проведення імітаційного моделювання; [14] – постановка задачі дослідження, розрахунок струмів підсилюючих пунктів, [16] – розробка керованого підсилюючого пункту; [17] – аналіз проблеми узгодження режимів роботи сонячної електростанції та системи тягового електропостачання; [19] – проведення варіантних розрахунків; [20] – побудова структури моделі, виведення розрахункових формул; [22] – аналіз існуючих методів розрахунку систем тягового електропостачання; [23] – аналіз існуючих систем накопичення електричної енергії; [25] – розробка імітаційної моделі; [26] – формування ідеї способу, проведення розрахунків; [27] – побудова розрахункових алгоритмів.

Роботи [8, 15, 18, 21, 24] – написані самостійно, без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і одержали схвалення на наступних вітчизняних та міжнародних конференціях: 74 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ 2014); V, VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості» (Воловець 2014, 2015); VIII, IX Міжнародна

науково-практична конференція «Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро» (Одеса 2015, Дніпро 2016); IV, VI Міжнародна науково-практична конференція «Advanced rail technologies» (Warsaw 2015, 2017); VII Міжнародна науково-практична конференція «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель 2015); I, II Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології перевізного процесу» (Моршин, 2016, Львів 2017); XXII Міжнародна науково-практична конференція «Силовая электроника та енергоефективність» (Одеса 2016); XIII науково-технічна конференція «Підвищення енергоефективності та надійності енергосистем і електромереж України» (Харків 2016); VI International Symposium of Young Researchers (Katowice 2017).

Публікації. Основний зміст дисертації опублікований у 27 наукових працях і матеріалах конференцій: 15 основних праць, з них: 3 – статті у журналах, що індексуються Scopus, 3 – статті в закордонних виданнях, 9 – статей у фахових виданнях і 12 додаткових, з них: з них 1 – патент на корисну модель, 1 – свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерна програма), 10 – тези доповідей та матеріали конференцій.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із анотації українською і англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний текст роботи викладений на 138 сторінках, містить 82 рисунки за текстом і 21 таблицю. Список літературних джерел із 155 найменувань займає 16 сторінок. Додатки займають 33 сторінки. Повний обсяг дисертації складає 188 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, наведено основні наукові положення й результати, що винесені на захист, а також подано відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію і публікації матеріалів досліджень.

У *першому розділі* проаналізовано режими напруги в системі електропостачання залізничного транспорту постійного струму.

Визначення режиму напруги в системі тягового електропостачання і оцінка його впливу на роботу електрорухомого складу і пристроїв електропостачання є одним з найбільш важливих завдань при побудові сучасної системи електроживлення залізничного транспорту. Від режиму напруги залежать такі параметри, як швидкість руху поїзда, зміна струму і тягового зусилля електровоза, можливість подолання інерційних підйомів, навантаження і робота окремих пристроїв електропостачання. В свою чергу, режим напруги залежить від великої кількості взаємопов'язаних і взаємовпливаючих факторів. Насамперед, це якість напруги, режими роботи системи зовнішнього електропостачання, кількість електрорухомого складу на фідерній зоні, параметри системи тягового електропостачання та режим ведення кожного електровоза. Нормований рівень напруги в тяговій мережі електрифікованої ділянки забезпечує рух поїздів з необхідною економічно доцільною швидкістю, встановленою умовами пропускну здатності. Такий режим забезпечує регламентовані витрати енергії на тягу з урахуванням втрат в системі електропостачання, необхідну надійність роботи електрорухомого складу (ЕРС) та пристроїв електропостачання. Робота ділянки при виму-

шеному режимі напруги призводить до необхідності використання резервної потужності і перевантаження обладнання тягових підстанцій. При цьому напруга на струмоприймачах стає нижчою допустимого рівня і виникає необхідність у зниженні розмірів руху та збільшенні інтервалу між поїздами.

Великий внесок в дослідження режимів напруги в енергетичних системах зробили: П. Д. Андрієнко, Б. О. Аржанніков, М. П. Бадьор, В. Д. Бардушко, В. А. Веніков, С. В. Власівський, Л. А. Герман, Г. К. Гетьман, Ю. П. Гончаров, О. Г. Гриб, С. П. Денисюк, А. Ф. Жаркін, І. В. Жежеленко, В. П. Закарюкін, І. І. Карташов, О. В. Кириленко, М. О. Костін, В. Г. Кузнецов, П. Д. Лежнюк, Р. Р. Мамошин, А. М. Марикін, К. Г. Марквардт, Р. І. Мірошніченко, М. В. Панасенко, Е. С. Почаєвець, Ю. Л. Саєнко, М. С. Сегеда, О. М. Сінчук, О. І. Стасюк, В.Т. Черемісін, Akagi H., A. D. Graham, A. Mariscotti, Rojek A., Szelag A., Zheng Xu та інші.

Режим напруги на шинах тягової підстанції визначається її рівнями та впливає на експлуатаційні характеристики функціонування електрифікованих залізниць і залежить як від навантаження, так і від коливань напруги системи зовнішнього електропостачання.

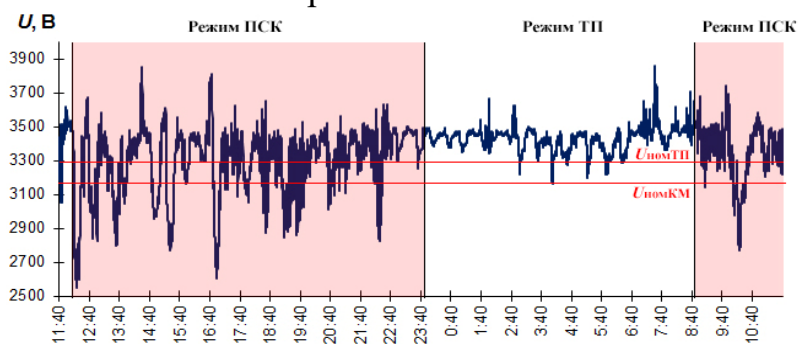


Рисунок 1 – Напруга на шинах 3,3 кВ ТП Ерастівка

Проведені експериментальні дослідження показали невідповідність режимів напруги на шинах тягових підстанцій встановленим нормам (рис. 1). Діапазон зміни напруги становив: 3185 – 3600 В в режимі тягової підстанції, 2600 – 3780 В в режимі поста секціонування.

Дослідження рівня завантаження тягових підстанцій при їх експлуатації показали, що в умовах сучасного стану тягового електропостачання постійного струму коефіцієнт використання режимної потужності не перевищує 15 % при повній встановленій потужності тягових підстанцій 20 МВт. Результати проведеного експерименту приведені на рис. 2.

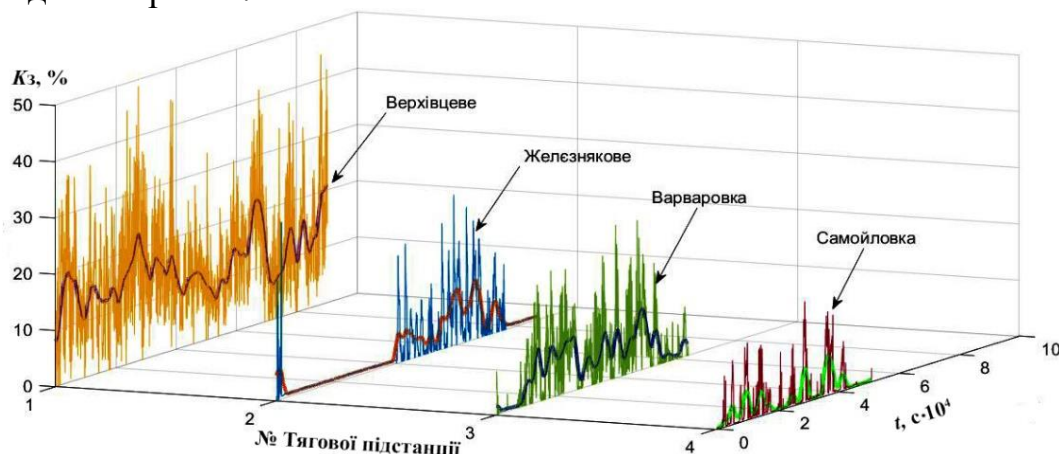


Рисунок 2 – Коефіцієнт завантаження (з усередненим значенням за 15 хв) тягових підстанцій на стороні випрямленої напруги

Використання нових, більш потужних електровозів або збільшення їх числа чи секцій для пропуску поїздів великої маси, супроводжується значним зростанням потужності та струму, що споживається з тягової мережі. Так, на Придніпровській залізниці на

ділянці К–Н при масі поїзда 6004 т два електровози ВЛ11 встановленою потужністю 4,6 МВт кожен, споживали сумарний тяговий струм до 3 кА (рис. 3). При цьому, в режимі тяги, напруга на струмоприймачах виходила за межі допустимих значень (рис. 4).

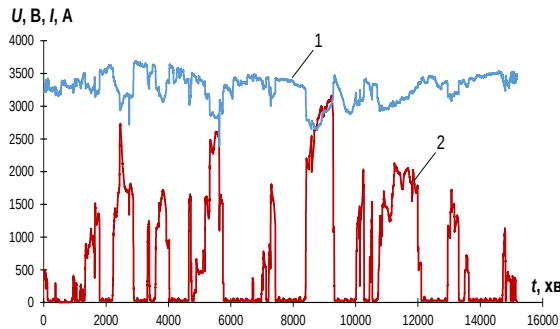


Рисунок 3 – Реалізація струму і напруги двохпоїзда: 1 – напруга на струмоприймачах; 2 – споживаний струм

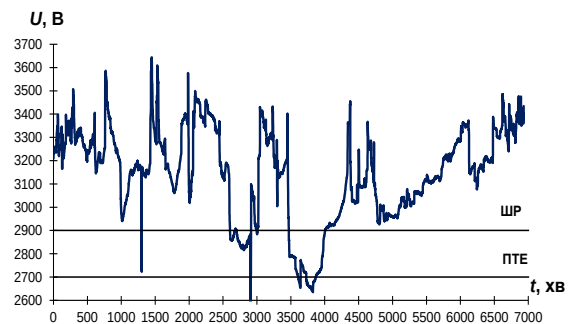


Рисунок 4 – Напруга на струмоприймачах в режимі тяги: ШР – норма напруги для швидкісного руху; ПТЕ – норма напруги за ПТЕ

Таблиця 1 – Числові характеристики напруги

Показник	Напруга на струмоприймачі ЕРС		
	Загалом	Тяга	Вибіг
$M(U)$	2906.11	2835.91	2935.63
$Mo(U)$	3013.00	2845.00	3036.00
$Me(U)$	2923.50	2840.00	2958.00
$D(U)$	12712.14	10767.09	10633.96
$\sigma(U)$	112.7482	103.7646	103.1211
$\min(U)$	2516.00	2536.00	2516.00
$\max(U)$	3134.00	3081.00	3134.00

Числові характеристики режиму напруги в різних режимах роботи електровозу приведені в таблиці 1. Їх аналіз показує, що на струмоприймачі електровоза напруга також має різкозмінний характер. Максимальні коливання в режимі тяги можуть досягати значення 545 В, а в режимі вибігу – 618 В.

Статистична обробка вимірних даних напруги на струмоприймачах 13 ЕРС на ділянці НД Вузол – П'ятихатки (рис. 5) показала, що при середньому значенні напруги на ділянці 3048 В довірчий інтервал її зміни становить 1048 В: від 2524 В до 3572 В, що також виходить за межі нормованих значень.

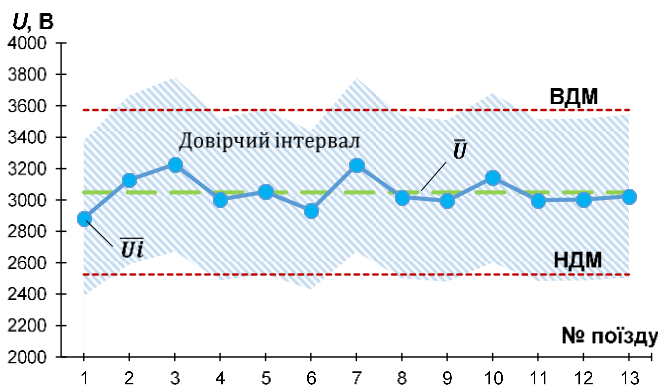


Рисунок 5 – Діапазон зміни напруги на ділянці НД Вузол – П'ятихатки

Отримані результати обумовлюють необхідність зменшення коливань напруги в тяговій мережі та забезпечення сталості його ймовірнісних характеристик в межах, передбачених нормативними документами для залізничного транспорту. При цьому для забезпечення більш високих енергетичних показників функціонування ЕРС необхідно ставити задачу зменшення діапазону зміни напруги на струмоприймачах протягом всього часу руху поїзда по перегону. Розробки вітчизняних

та закордонних вчених з підсилення систем тягового електропостачання постійного струму, в основному, орієнтовані лише на технічне переоснащення. Значно підсилити тягове електропостачання можна не лише за рахунок впровадження новітніх технологій і сучасного устаткування, а й при застосуванні систем розподіленого живлення, тобто, переходу до нової схемотехніки мережі електротяги. Актуальним варіантом підсилення системи 3,0 кВ є установка підсилюючих пунктів (ПП) на міжпідстанційній зоні, які будуть працювати за принципом децентралізованої системи, а при використанні для живлення

ПП джерел альтернативної енергії та систем накопичення можна досягти значного зниження споживання електричної енергії з системи зовнішнього електропостачання.

У **другому розділі** викладено підходи до побудови математичної моделі, основаної на удосконалених методах розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання з урахуванням паралельної роботи тягових підстанцій та керованих пунктів підсилення.

Розробка математичної моделі керованої розподіленої СТЕ повинна передбачати розташування на міжпідстанційній зоні ряду підсилюючих пунктів з можливістю регулювання їх вихідної потужності в режимі реального часу. Вочевидь, зміна схеми електропостачання призведе до додаткових ускладнень при моделюванні, що пов'язані з урахуванням впливу сусідніх фідерних зон та розподілом потужності паралельно працюючих тягових підстанцій і підсилюючих пунктів для забезпечення мінімуму втрат електричної енергії в тяговій мережі.

Побудова математичної моделі базується на визначенні функції опору розрахункової ділянки. Для різних схем живлення контактної мережі закономірність зміни опору тягової мережі відносно рухомого навантаження різна. Для основних схем живлення функції опору відомі, але для електрифікованої ділянки з кількістю тягових підстанцій і підсилюючих пунктів N та $N-1$ міжпідстанційних зон необхідно враховувати всі тягові підстанції і підсилюючі пункти, їх внутрішній опір та опір тягової мережі. Для цих випадків при визначенні функції опору, базуючись на погонних параметрах схеми, враховується місце розташування електровоза відносно вузлів паралельного з'єднання контактних підвісок. Узагальнена заступна схема зображена на рис. 6.

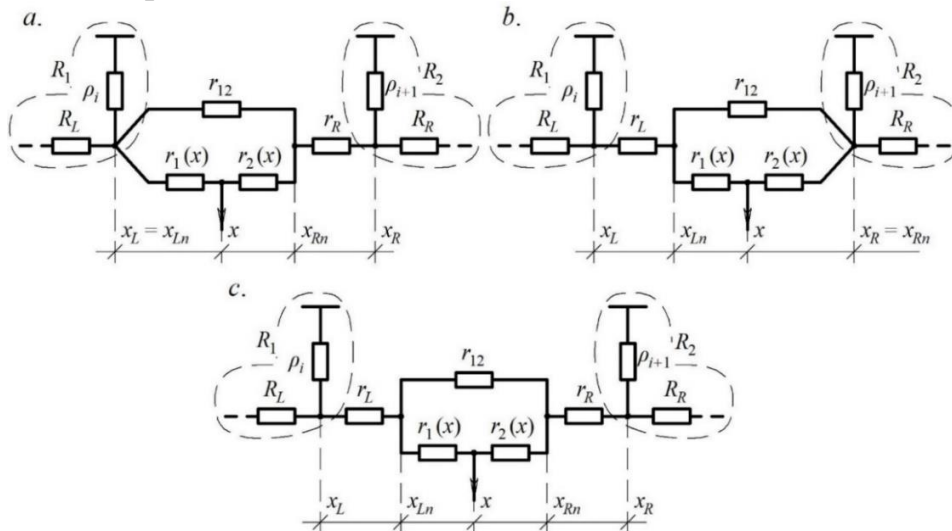


Рисунок 6 – Узагальнена схема заміщення двоколіїної ділянки тягової мережі

a – при знаходженні ЕРС між i -тою тяговою підстанцією/підсилюючим пунктом та першим ППЗ; b – при знаходженні ЕРС між другим ППЗ та $i+1$ тяговою підстанцією/підсилюючим пунктом; c – при знаходженні ЕРС між першим ППЗ та ПСК або ПСК та другим ППЗ

$$R_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_L(i)} + \frac{1}{\rho_i}}; \quad R_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_R(i+1)} + \frac{1}{\rho_{i+1}}} \quad (1)$$

$$r_L = \frac{1}{2}(x_{Ln} - x_L) \cdot r_0; \quad r_R = \frac{1}{2}(x_R - x_{Rn}) \cdot r_0 \quad (2)$$

Складові, що враховують внутрішній опір відповідної тягової підстанції/підсилюючого пункту та опір ділянки зліва / справа від неї. Опір ділянки між тяговою підстанцією/підсилюючим пунктом та

$$r_{12} = (x_{Rn} - x_{Ln}) \cdot r_0 \quad (3)$$

$$r_1(x) = (x - x_{Ln}) \cdot r_0; \quad r_2(x) = (x_{Rn} - x) \cdot r_0 \quad (4)$$

$$r_a(x) = \frac{r_1(x) \cdot r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}};$$

$$r_b(x) = \frac{r_2(x) \cdot r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}};$$

$$r_c(x) = \frac{r_1(x) \cdot r_2(x)}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}}.$$

Опір ділянки між вузлами паралельного з'єднання контактних підвісок.

Опір ділянки між тяговим навантаженням та найближчим вузлом паралельного з'єднання контактних підвісок.

Відповідно, опори ділянок $r_1(x)$, $r_2(x)$, r_{12} перетворюються зі схеми з'єднання «трикутник» в схему «зірка» з опорами в променах $r_a(x)$, $r_b(x)$, $r_c(x)$:

(5)

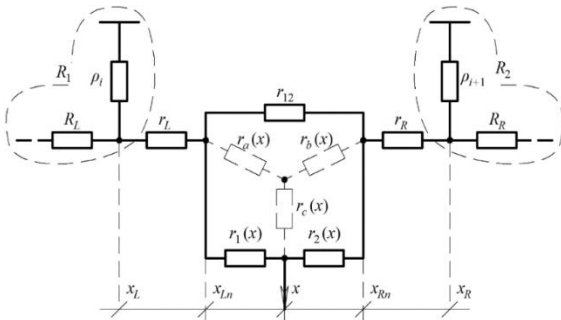


Рисунок 7— Розрахункова схема заміщення

В результаті функція опору матиме вигляд:

$$f_R(x) = \begin{cases} r_c(x) + \frac{1}{\frac{1}{r_a(x) + R_L + r_L} + \frac{1}{r_b(x) + R_2 + r_R}}, & x_{Ln} \neq x_{Rn} \\ \frac{1}{\frac{1}{R_L + r_L} + \frac{1}{R_2 + r_R}}, & x_{Ln} = x_{Rn} \end{cases} \quad (6)$$

Визначення напруги на струмоприймачі електрорухомого складу при русі розрахунковою ділянкою базується на функції строморозподілу тягових підстанцій (7). Результатом розрахунку даної функції $\bar{F}(x, S)$ є вектор, який складається з потенціалів у вузлах розрахункової схеми в місцях підключення фідерів тягових підстанцій, точок з'єднання контактних підвісок колій та ЕРС, що знаходиться на міжпідстанційних зонах.

$$\bar{F}(x, S) = |G| \cdot |A(S)|^{-1} \cdot \bar{B} \quad (7)$$

де $|G|$ – діагональна матриця провідностей тягових підстанцій; $|A(S)|$ – базисна матриця схеми, побудована за допомогою метода вузлових потенціалів; $\bar{B}$ – вектор задаючих струмів в вузлах.

Матриці $|A(S)|$, $|G|$ та $\bar{B}$ є динамічними та змінюють свій розмір в залежності від поїзної ситуації на розрахунковій ділянці та місцеположення окремого навантаження.

За допомогою отриманих потенціалів у вузлах схеми, опорів віток між ними та графіка руху поїздів визначається розподіл струмів в контактній мережі. Для цього

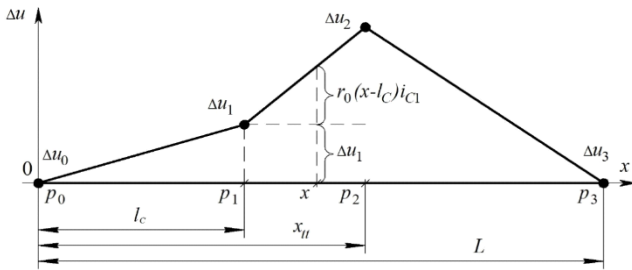


Рисунок 8 – Розподіл втрат напруги вздовж міжпідстанційної зони: $p_0 - p_3$ – точки перегину кривої втрат напруги; l_C – відстань від тягової підстанції до ПСК; x_{II} – відстань від тягової підстанції до місця розташування ЕРС; L – довжина міжпідстанційної зони

спочатку визначається струморозподіл у заданій схемі живлення від одного навантаження, далі за допомогою принципу суперпозиції визначається розподіл струмів в контактній мережі від усіх поїздів з урахуванням вирівнювальних струмів. Визначення функції розподілу втрат напруги передбачає використання функції розподілу струмів в контактній мережі з накопичуючим домноженням на відповідну відстань та питомий опір мережі.

При накопиченні використовується рекурсивний підхід, тобто визначення розподілу втрат напруги наступного інтервалу використовує втрату напруги попереднього рис. 8. За аналогією з функцією розподілу струмів в контактній мережі визначається розподіл втрат напруги в контактній мережі від усіх поїздів та з врахуванням впливу вирівнювальних струмів.

Величина напруги на струмоприймачі електровоза з урахуванням взаємного впливу кожного навантаження на попутній та, залежно від схеми живлення, на суміжній коліях визначається за наступним виразом:

$$U_j(x) = U_{ш} - I_j(x) \cdot f_R(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n_1} \Delta U'_k(x, x_k) - \sum_{k=n_1}^{n_1+n_2} \Delta U''_k(x, x_k), \quad (8)$$

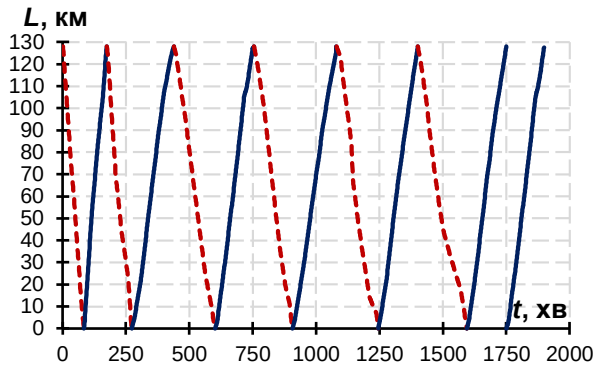
де k – номер навантаження на відповідній колії; n_1, n_2 – кількість навантажень на 1-й та 2-й коліях; $\Delta U'_k(x, x_k)$ – функція розподілу спаду напруги від k -го навантаження на попутній колії, В; $\Delta U''_k(x, x_k)$ – те ж на суміжній колії, В.

Різниця потужності, що згенерована тяговими підстанціями та пунктами підсилення і потужності, яку споживає ЕРС в кожній точці схеми визначає розподіл втрат потужності вздовж дослідної ділянки. Інтегрування втрат потужності за часом визначає втрати електроенергії при русі ЕРС дослідною ділянкою.

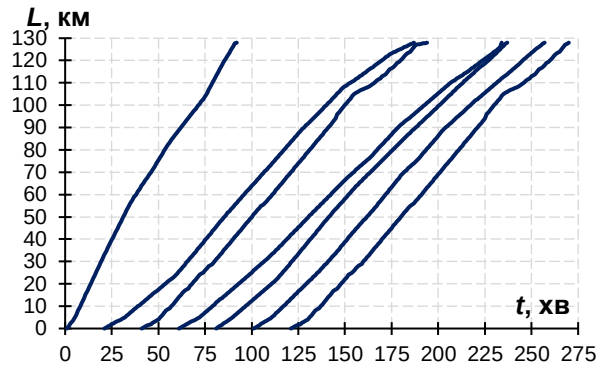
У **третьому розділі** викладені наукові підходи до побудови розподіленої системи тягового електропостачання: визначення раціональних місць розташування підсилюючих пунктів і їх потужностей, визначення оптимального рівня обмеження напруги на струмоприймачі ЕРС для забезпечення енергоефективного режиму роботи електрифікованої ділянки.

Визначення місця підключення підсилюючого пункту виконувалось на основі використання методу сенсорних вузлів. Реалізацію даного методу було розглянуто на прикладі електрифікованої ділянки Придніпровської залізниці довжиною 128 км. Можливі місця установки підсилюючих пунктів обрані з дискретністю 1 км. Визначення реакції можливих місць установки ПП відбувається внаслідок виконання графіків руху поїздів (ГРП), які реалізовані таким чином, що реакції можливих місць установки ПП визначались спочатку окремо від кожного навантаження, потім з поступовим ущільненням міжпоїзного інтервалу (рис. 9).

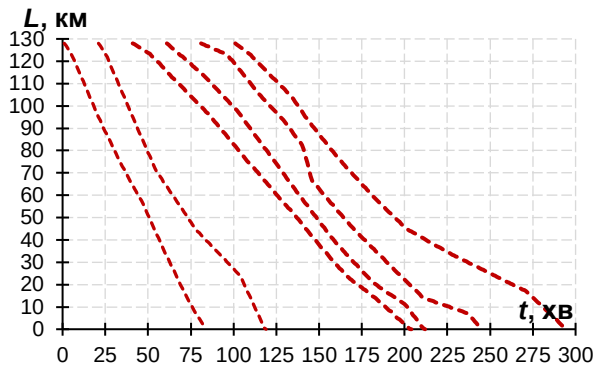
а.



б.



в.



г.

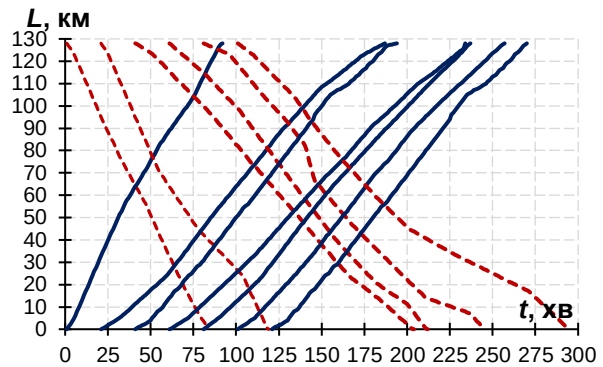


Рисунок 9 – Графік руху поїздів ділянкою:
а – ГРП № 1; б – ГРП № 2; в – ГРП № 3; г – ГРП № 4

Визначення сенсорних вузлів в системі здійснювалось наступним чином:

1. для кожного графіка руху, для кожного можливого місця установки підсилюючого пункту розраховувалась зміна напруги (інтервал 1 хв) впродовж реалізації графіка руху поїздів;

2. в кожній точці визначалось максимальне та мінімальне значення напруги;

3. точка з максимальною амплітудою коридору зміни напруги, тобто точка, яка відповідає умові (9), визначалась, як найчутливіший сенсорний вузол для заданої ділянки схеми (для кожної МПЗ).

$$s = \max_{[a;b]} (U_{\max_j} - U_{\min_j}) \quad (9)$$

де a – координата початку ділянки; b – координата кінця ділянки; j – номер досліджуваного вузла; $U_{\max_j}$ – максимальне значення напруги в j -тому вузлі;

$U_{\min_j}$ – мінімальне значення напруги в j -тому вузлі;

Результати розрахунку найчутливіших вузлів для дослідної ділянки відповідно до отриманих результатів наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Сенсорні вузли розрахункової ділянки

Графік руху поїздів	Координата найчутливішого вузла для кожної МПЗ							
ГРП № 1	12	28	51	71	81	91	106	118
ГРП № 2	12	35	51	71	81	92	106	118
ГРП № 3	13	28	55	66	76	87	109	115
ГРП № 4	9	33	54	66	76	92	106	125

Для подальших розрахунків для всіх досліджуваних ГРП прийняті наступні місця установки підсилюючих пунктів: 9 км, 33 км, 51 км, 66 км, 76 км, 91 км, 109 км, 125 км.

Потужності підсилюючих пунктів визначались, як добуток середнього значення струму за час роботи окремого ПП та середнього значення напруги в точці його підключення. При цьому, визначення струмів підсилюючих пунктів відбувалось за рахунок вирішення задачі оптимізації з мінімізацією цільової функції по зменшенню втрат електричної енергії в тяговій мережі: $\Delta W_{\text{TM}}(\vec{I}_{\text{ПП}}) \rightarrow \min$.

Оскільки втрати електроенергії визначались, як сума втрат потужності на певному інтервалі часу, то можна перейти до наступних умов оптимізації (10): у кожен момент часу, при зниженні напруги на струмоприймачі ЕРС нижче нормованого рівня необхідно визначити струми підсилюючих пунктів які б забезпечували при заданих умовах напругу рівну або вище U_3 з мінімально можливим рівнем миттєвих втрат потужності в системі тягового електропостачання при обмеженнях $U_3 \leq U_{\text{с}} \leq U_{\text{max}}$ та $I_{\text{ПП}} \leq I_{\text{max}}$.

$$\begin{cases} \Delta P(t_1, \vec{I}_{\text{ПП}}) \rightarrow \min, U_{t_1} \leq U_3 \\ \Delta P(t_2, \vec{I}_{\text{ПП}}) \rightarrow \min, U_{t_2} \leq U_3 \\ \dots \\ \Delta P(t_n, \vec{I}_{\text{ПП}}) \rightarrow \min, U_{t_n} \leq U_3 \end{cases} \quad (10)$$

Результати дослідження для розрахункової ділянки для ГРП №4 приведені на рис. 11.

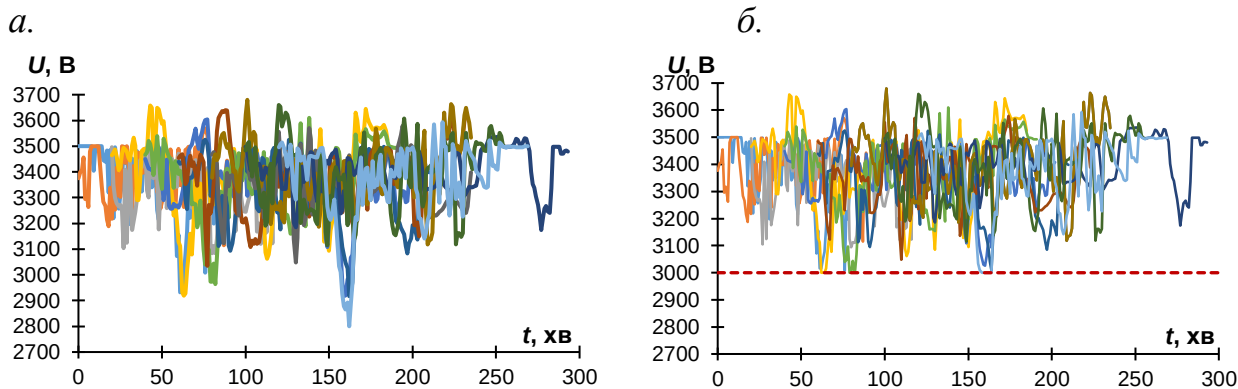


Рисунок 10 – Напруга на струмоприймачах ЕРС: а – до використання підсилюючих пунктів; б – після використання підсилюючих пунктів

За результатами розрахунків було встановлено, що для досягнення однакового ефекту, визначення оптимального місця розташування підсилюючих пунктів вздовж міжпідстанційної зони, дозволяє зменшити їх встановлену потужність до 14 % в порівнянні з розташуванням на існуючих постах секціонуванні за інших рівних обставин.

Як слідує з рис. 10 за допомогою запропонованої системи стає можливим обмеження нижнього рівня напруги, але залишається не вирішеним питання про оптимальне значення рівня напруги для забезпечення найбільш раціонального енергетичного режиму роботи системи тягового електропостачання.

Для визначення оптимальних рівнів напруги проводились варіантні розрахунки на математичній моделі при поступовому підвищенні напруги одночасно на шинах всіх тягових підстанцій від 3300 до 3600 В. При цьому змінювалась задана межа мінімального значення напруги на струмоприймачах ЕРС в діапазоні від 2900 В до значення напруги на шинах тягових підстанцій.

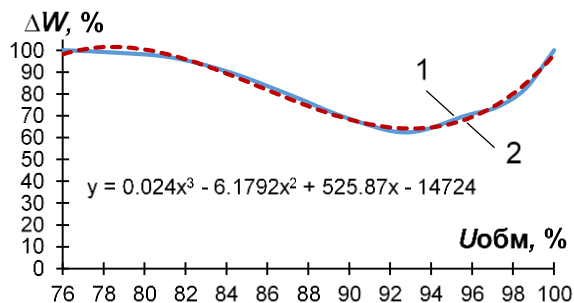
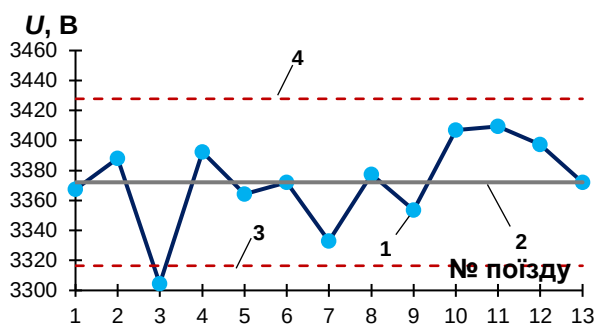


Рисунок 11 – Залежність рівня втрат потужності в тяговій мережі від рівня обмеження напруги:
1 – розрахункова крива; 2 – апроксимована крива

станцій 3500 В та за інших рівних обставин, обмеження нижнього рівня напруги на значенні 3000 В дозволяє зекономити на втратах електроенергії до 4 % в порівнянні з базовим розрахунком без підсилення, а при обмеженні нижнього рівня напруги на значенні $0,93U_{xx}$ (3255 В) економія на втратах електроенергії зростає до 33%. При цьому, статистична оцінка напруги на струмоприймачах електрорухомого складу показала, що при підсиленні системи тягового електропостачання усереднене значення математичного очікування напруги 13 електровозів зросло на 47 В, а 95 % довірчий інтервал його зміни звужився вдвічі (рис. 12). Значення математичного очікування напруги на струмоприймачі окремого ЕРС зросло на 25 – 90 В при звуженні 95 % довірчого інтервалу на 30 %.

а.



б.

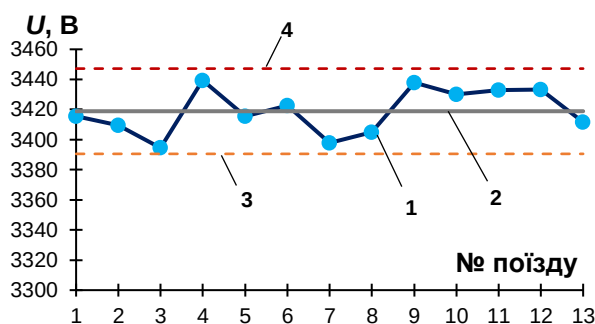


Рисунок 12 – Математичне очікування напруги на струмоприймачах ЕРС:

а – базовий розрахунок без підсилення; б – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами;
1 – математичне очікування напруги на струмоприймачі окремого ЕРС; 2 – усереднене значення математичного очікування; 3 – нижня довірча межа; 4 – верхня довірча межа

Проаналізувавши отриману залежність (рис. 11) можна відзначити, що доцільно підтримувати напругу на струмоприймачах на рівні, що відповідає інтервалу спаду кривої втрат електроенергії від вихідного до мінімального значення. Забезпечення рівня напруги близького до значення на шинах ТП недоцільне через зростання втрат енергії в результаті надлишкового регулювання та значного збільшення встановленої потужності підсилюючого пункту. Раціональний рівень напруги в контактній мережі можна визначити із співставлення величини втрат електроенергії та потужності підсилюючих пункту, необхідної для його забезпечення.

У *четвертому розділі* запропоновані схемотехнічні рішення для розподіленої системи тягового електропостачання з альтернативними джерелами електроенергії: запропонована загальна структура системи, визначено топології перетворювачів та частоту їх проміжних ланок, а також визначена ємність накопичувача.

Загальна структура системи наведена на рис. 13. Сонячні панелі встановлюються в смузі відчуження і з'єднуються одна з одною паралельно-послідовно в фотомодулі. Кожен фотомодуль приєднаний до узгоджуючого перетворювача (УП), який використовується для максимізації енергії, отриманої від фотомодуля, а також для гальванічної розв'язки від подальших частин системи.

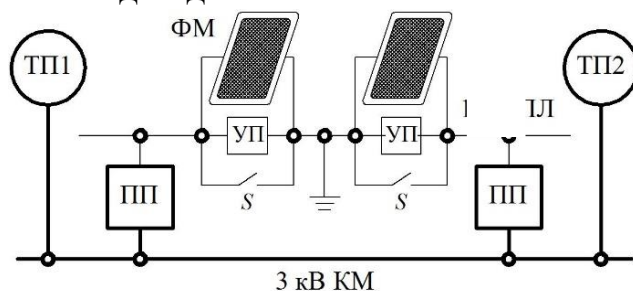


Рисунок 13 – Структурна схема розподіленої СТЕ з АДЖ:

ФМ – фотомодулі; ПЛ – поздовжня лінія; УП – узгоджуючий перетворювач;
S – шунтуючий ключ; ПП – перехідний перетворювач; КМ – контактна мережа

Схеми перехідного та узгоджуючого перетворювачів повинні забезпечувати високий рівень вихідної потужності та коефіцієнт корисної дії (ККД), здійснювати гальванічну розв'язку первинних і вторинних кіл, забезпечувати двосторонній напрям передачі електроенергії. Найбільш повно даним умовам відповідають напівмостові та повномостові схеми DC/DC перетворювачів (рис. 14).

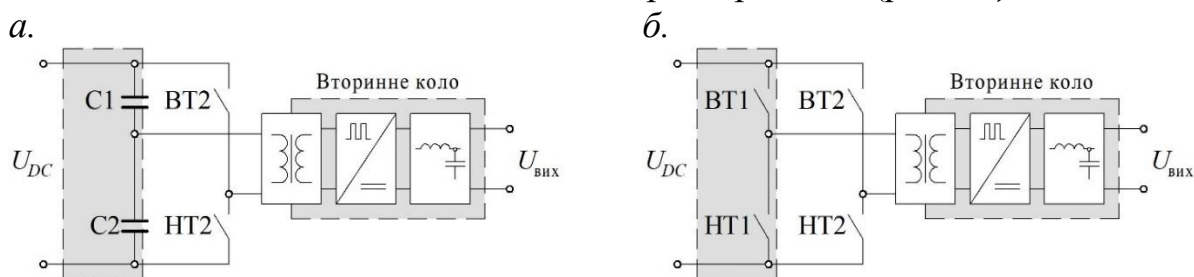


Рисунок 14 – Топології DC/DC перетворювачів:

а. – напівмостова; б. – повномостова

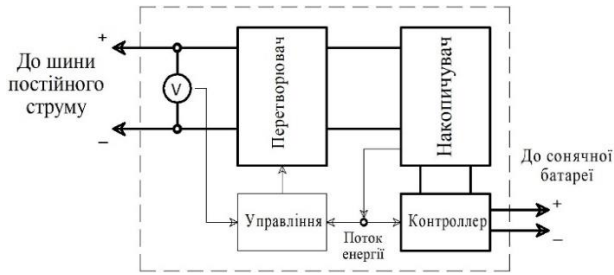
Для наявних в системі розв'язуючих трансформаторів DC/DC перетворювачів запропоновано найбільш перспективний магнітний матеріал – аморфний сплав ММ11-Н та значення робочої частоти проміжних ланок змінного струму (11), що дозволяє зменшити питомі втрати в магнітопроводі на 27 % та значно знизити масогабаритні показники трансформатора.

$$f_{кр} = \frac{3,98 \cdot 10^7}{A} \cdot \sqrt{\frac{\Delta T}{P}} \quad (11)$$

де A – коефіцієнт питомих втрат магнітного матеріалу (коефіцієнт Штейнметца); ΔT – температура перегріву магнітопроводу; P – потужність перетворювача.

Для живлення підсилюючих пунктів та їх автономної роботи у складі розподіленої системи визначено потужність сонячної електростанції (СЕС) та найбільш перспективний напрям накопичення електричної енергії – батарейну систему (БСНЕ) із застосуванням LiFePO_4 акумуляторів (рис. 15), яка дозволяє зменшити коливання споживаної потужності і рознести в часі фази накопичення та віддачі електроенергії. Імпульсний характер струму, що споживається ЕРС компенсується батарейною системою для отримання бажаного режиму напруги.

а.



б.

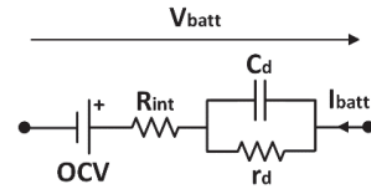


Рисунок 15 – Батарейна система накопичення енергії:
а – структурна схема; б – еквівалентна схема заміщення

Електричну модель накопичувача можна описати виразами 12 – 15, де перший вираз представляє закон Кірхгофа для схеми заміщення (рис. 15 б), другий – поліном n -го ступеня відношення між напругою холостого ходу та рівнем заряду накопичувача. Третє рівняння моделює закон зміни рівня заряду, відповідно до величини зарядного струму, і четвертий вираз – диференціальне рівняння, що описує роботу паралельної RC ланки.

$$U_H(t+dt) = OCV(t) - R_{BH}I_H(t) - u_d(t+dt) \quad (12)$$

$$OCV(SoC) = \alpha_n SoC^n + \alpha_{n-1} SoC^{n-1} + \dots + \alpha_0 \quad (13)$$

$$SoC(t+dt) = SoC(t) + \frac{U_H(t+dt)I_H(t)dt}{3600 \cdot C_H} \quad (14)$$

$$u_d(t+dt) + r_d C_d \left(\frac{u_d(t+dt) - u_d(t)}{dt} \right) = \begin{cases} r_d I_H(t) \\ 0 \end{cases} \quad (15)$$

де u_d – напруга паралельної RC ланки; dt – крок дискретизації за часом; $\alpha_n \dots \alpha_0$ – коефіцієнти інтерполяції; C_H – ємність накопичувача.

Ємності БСНЕ для кожного ПП визначаються на основі величини струму підсилюючого струму протягом всього часу проходження ЕРС (5 годин для ГРП №4). Знехтувавши величиною енергії рекуперації, враховуючи лише споживання, для дискретних вимірів струму ємність накопичувача визначається:

$$C_H = \int_0^{T_{n-1}} \sum_0^n |i_n| dt, \quad (16)$$

де C – ємність БСНЕ, А·год; n – порядковий номер дискретного виміру; i – миттєве значення струму БСНЕ, А;

Таблиця 3 – Параметри підсилюючих пунктів розподіленої системи

№ ПП	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6	ПП7	ПП8
Середній струм ПП, А	300	515	239	166	268	193	422	180
Установлена потужність ПП, кВт	1000	1600	800	630	1000	630	1600	630
Ємність БСНЕ, А·год	705	1210	565	390	630	455	990	425
Потужність СЕС, МВт	1,22	1,95	0,97	0,77	1,22	0,77	1,95	0,77

Живлення підсилюючих пунктів від альтернативних джерел енергії та використання накопичувачів в системі їх енергозабезпечення дозволило при виконанні заданого ГРП зменшити споживання електроенергії з системи зовнішнього електропостачання на 33 % з 45,2 МВт·год до 30 МВт·год.

У *п'ятому розділі* проведена оцінка економічної ефективності застосування системи розподіленого живлення. За результатами розрахунків було встановлено, що запропонована модернізація системи електричної тяги постійного струму, маючи відносні капіталомісткі витрати, характеризується строком окупності в 4,47 роки та фактичним коефіцієнтом ефективності капіталовкладень $E_f=0,224$, що більше нормативного в галузі та свідчить про економічну доцільність впроваджуваного заходу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена науково-прикладна задача покращення режиму напруги в системі тягового електропостачання постійного струму за рахунок розробки розподіленої системи, яка забезпечує перехід до нової енергоефективної схемотехніки живлення тягової мережі з децентралізацією генеруючих потужностей. Основні наукові результати та висновки полягають в такому.

1. Аналіз режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму показав їх часткову невідповідність встановленим нормам. Рівень напруги на струмоприймачах ЕРС не відповідає заданим вимогам навіть при підвищенні напруги на шинах тягових підстанцій на 200 – 300 В відносно номінального значення. Дослідженнями встановлено, що в СТЕ постійного струму діапазон зміни напруги на шинах тягових підстанцій може сягати 500 В, а рівень напруги на струмоприймачі ЕРС може змінюватись в межах 1500 В.

2. Виконане удосконалення методу розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання дозволило врахувати вплив примусового розподілу потужності на рівень напруги в тяговій мережі на ділянці при паралельній роботі тягових підстанцій та підсилюючих пунктів. На основі удосконаленого методу було побудовано математичну модель для виконання електричних розрахунків системи тягового електропостачання для ділянки з будь-якою кількістю тягових підстанцій та міжпідстанційних зон з урахуванням різних значень напруги холостого ходу тягових підстанцій та їх внутрішнього опору, різних схем підключення генеруючих потужностей до тягової мережі. Результати розрахунків свідчать про достатню точність, що відповідає умові $\delta \leq 5 \%$. Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

3. Запропоновано систему обмеження мінімального рівня напруги на струмоприймачі ЕРС для якої на основі сенсорного методу пошуку визначено раціональні місця розташування підсилюючих пунктів, що для досягнення однакового ефекту дозволяє зменшити їх встановлену потужність до 14 % в порівнянні з розташуванням на постах секціонування міжпідстанційних зон.

4. Для розподіленої системи тягового електропостачання визначено раціональний рівень обмеження мінімального значення напруги в контактній мережі, який

складає на 7 % нижче рівня напруги холостого ходу тягових підстанцій, та визначається за критерієм мінімуму втрат електроенергії в тяговій мережі. Забезпечення раціонального рівня напруги в тяговій мережі дозволило, при виконанні однакової поїзної роботи на ділянці, зменшити втрати електроенергії на 29 % в порівнянні з втратами при обмеженні напруги в тяговій мережі на рівні 3000 В та на 64 % – в порівнянні з обмеженням напруги в тяговій мережі на рівні 2900 В.

5. Проведені розрахунки для електрифікованої ділянки Придніпровської залізниці показали, що при виконанні заданого графіка руху, використання розробленої системи забезпечує задане значення нижнього рівня напруги в тяговій мережі (3255 В), тим самим зменшуючи добові втрати електричної енергії на 30 % з 12,1 до 7,97 МВт·год в порівнянні з базовим розрахунком без підсилення та звужуючи діапазон зміни напруги на 30 %.

6. Для реалізації системи децентралізованого електропостачання запропоновано структуру, що використовує установку розподілених сонячних генераторів електричної енергії в якості джерела живлення. Для системи визначено оптимальні топології узгоджуючого та перехідного DC/DC перетворювачів. Для перехідного перетворювача обрана мостова схема, що дозволяє при пікових струмах зменшити навантаження напівпровідникових ключів на 50 % в порівнянні з напівмостовою схемою. Для наявних в системі розв'язуючих трансформаторів DC/DC перетворювачів запропоновано найбільш перспективний магнітний матеріал та значення робочої частоти проміжних ланок змінного струму, що дозволяє зменшити питомі втрати в магнітопроводі на 27 % та значно знизити масогабаритні показники трансформатора.

7. Для живлення підсилюючих пунктів запропоновано алгоритм розрахунку потужності сонячної електростанції. Проведено аналіз найпоширеніших типів та визначено найбільш доцільний варіант застосування накопичувачів для розподіленої системи – LiFePO₄ батареї, що характеризуються найкращими енергетичними характеристиками: ККД, кількість зарядно-розрядних циклів, час заряду, здатність до перевантажень (можливість віддачі імпульсних струмів), частотні характеристики (здатність швидко віддавати енергію). Живлення підсилюючих пунктів від альтернативних джерел та використання накопичувачів робить їх автономними та дозволяє зменшити споживання електроенергії з системи зовнішнього електропостачання на 33 %. Для контролю рівня напруги в контактній мережі запропоновано розподілену систему вимірювань з бездротовою передачею даних, що дозволяє здійснювати моніторинг зміни рівня напруги для подальшого вибору режиму роботи підсилюючого пункту та контролю величини генерованої потужності.

8. Техніко-економічні розрахунки показали, що запропонована модернізація системи електричної тяги постійного струму, маючи відносні капіталомісткі витрати, характеризується строком окупності в 4,47 роки та фактичним коефіцієнтом ефективності капіталовкладень $E_{\phi}=0,224$, що більше нормативного в галузі енергетики та вказує на економічну доцільність впроваджуваного заходу.

Основні положення і результати дисертації опубліковано у виданнях, що індексуються Scopus:

1. E. M. Kosarev, V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, «Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current», *Archives of Transport*, vol. 35, iss. 3, pp. 63 - 70, 2015.

2. Ye. Kosariev, D. Bosyi, «Modeling of the controlled traction power supply system in the space-time coordinates», *Transport Problems*, vol. 12 (3), pp. 5 - 19, 2017.

3. Ye. Kosariev, D. Bosiy, O. Sablin, I. Khomenko, I. Kebal, S. Myamlin, «Intelligent technologies for efficient power supply in transport systems», *Transport Problems*, vol. 12 (SE), pp. 57 - 71, 2017.

у закордонних виданнях:

4. Е. Н. Косарев, Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, М. С. Пастушенко, «Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии», *Problemy Kolejnictwa*, iss. 162, pp. 65 - 82, 2014.

5. Е. Kosarev, D. Bosiy, «Calculation of the Traction Power Supply Systems Using the Functions of Resistance», *Problemy Kolejnictwa*, iss. 168, pp. 7 - 14, 2015.

6. Е. Н. Косарев, Д. А. Босый, «Особенности выполнения автоматизированных расчетов систем тягового электроснабжения постоянного тока», *Вестник БелГУТа*, №1(34), с. 18 - 22, 2017.

у фахових виданнях:

7. Е. Н. Косарев, В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, «Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающим пунктом», *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, сп. вып., т. 2, с. 8 - 18, 2014.

8. Є. М. Косарєв, «Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму», *Електрифікація транспорту*, № 9, с. 37 - 43, 2015.

9. Є. М. Косарєв, В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, «Оптимізація керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму з пунктами підсилення», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 95 - 103, 2015.

10. Е. Н. Косарев, Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, [и др.], «Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей», *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, № 30, т. 2, с. 98 - 108, 2015.

11. Є. М. Косарєв, В. Г. Сиченко, П. В. Губський, [та ін.], «Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму», *Електрифікація транспорту*, № 11, с. 61 - 70, 2016.

12. Є. М. Косарєв, О. І. Саблін, Д. О. Босий, [та ін.], «Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 73 - 79, 2016.

13. Є. М. Косарєв, В. Г. Сиченко, А. М. Муха, К. О. Хань, «Розробка керованого підсилюючого пункту для розподіленої системи тягового електропостачання», *Електротехніка і електромеханіка*, № 4 (1), с. 89 – 94, 2016.

14. Є. М. Косарєв, В. В. Замаруєв, Б. О. Стисло, «Покращення якості електричної енергії в системі електроживлення залізничного транспорту шляхом застосування накопичувачів електричної енергії.» *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, № 27 (1249), с. 360 - 364, 2017.

15. Є. М. Косарєв, «Математична модель керованої розподіленої системи тягового електропостачання постійного струму», *Електрифікація транспорту*, № 14, с. 15 - 27, 2017.

Додаткові праці

тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій:

16. Є. М. Косарєв, Д. О. Босий, «Необхідність застосування керованих підсилюючих пунктів для стабілізації напруги уздовж електрифікованої ділянки постійного струму», на *74 Міжнар. науково-практ. конф. Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*, Дніпропетровськ, 2014, с. 150 - 151.

17. Є. М. Косарєв, Д. О. Босий, «Проблеми ефективного використання сонячної енергії в системах тягового електропостачання постійного струму», на *V міжнар. науково-практ. конф. Енергозбереження на залізничному транспорті та у промисловості*, Воловець, 2014, с. 31 - 32.

18. Є. М. Косарєв, «Стабілізація напруги на заданому рівні в тяговій мережі електрифікованих залізниць постійного струму», на *VI міжнар. науково-практ. конф. Енергозбереження на залізничному транспорті та у промисловості*, Воловець, 2015, с. 66 - 67.

19. E. M. Kosarev, V. G. Sychenko, D. O. Bosyy, «Analysis the indicators of the electric energy quality in the electric traction systems» in *Advanced rail technologies*, Warszawa, 2015, pp. 125.

20. E. M. Kosarev, D. O. Bosiy, «Modeling of the traction power supply system in the space-time coordinates» на *VIII міжнар. науково-практ. конф. Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2015»*, Одеса, 2015, с. 13.

21. Е. Н. Косарев, «Распределенная система тягового электроснабжения для электрифицированных участков постоянного тока», на *VII междунар. научно-практ. конф. Проблемы безопасности на транспорте*, Гомель, 2015, с. 46.

22. Е. Н. Косарев, Д. А. Босый, «Автоматизация расчетов системы тягового электроснабжения постоянного тока», на *I міжнар. науково-практ. конф. Енергооптимальні технології перевізного процесу*, Моршин, 2016, с. 74.

23. Є. М. Косарєв, А. С. Чумаченко, «Інтеграція фотоелектричних джерел енергії з накопичувачами в мережі електрифікованого залізничного транспорту», на *IX міжнар. науково-практ. конф. Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2016»*, Дніпро, 2016, с. 13.

24. Ye. Kosariev, «Advantages of wayside energy storage systems for dc traction applications», на *II міжнар. науково-практ. конф. Енергооптимальні технології перевізного процесу*, Львів, 2017, с. 21.

25. Ye. Kosariev, V. Sychenko, M. Pulin, «Simulation model of the distributed system of DC traction power supply with solar generation» in *Advanced rail technologies*, Warszawa, 2017, p. 119.

охоронні документи:

26. Є. М. Косарєв, В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, «Спосіб стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму», *МПК H02J 1/00, H02J 13/00. № U201412905*, Квіт. 27, 2015.

27. Є. М. Косарєв, Д. О. Босий, «Комп'ютерна програма «Інтелектуальна система електропостачання транспорту» (Intelligence System of Electrified Transport)», *№ 60711*, Лип. 20, 2015.

АНОТАЦІЯ

Косарєв Є. М. Покращення режиму напруги в системі тягового електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротransпорт (27 – транспорт). – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена науково-прикладній задачі покращення режиму напруги шляхом зменшення діапазону її зміни на струмоприймачах електрорухомого складу в децентралізованій системі живлення. У роботі проаналізовано режими напруги в системі живлення електричного транспорту постійного струму та встановлено, що сучасний стан тягового електропостачання постійного струму не в змозі забезпечити необхідний режим напруги в тяговій мережі.

Запропоновано математичну модель, яка дозволяє виконувати електричні розрахунки розподіленої системи тягового електропостачання з альтернативними джерелами електроенергії.

Запропоновано систему обмеження мінімального рівня напруги на струмоприймачі ЕРС, яка дає змогу звужити діапазон зміни напруги та зменшити втрати електроенергії в тяговій мережі до 30 % по відношенню до існуючого рівня. На основі розробленої моделі розрахунку розподіленої системи тягового електропостачання удосконалено сенсорний метод оптимізації визначення місця установки підсилюючого пункту, що дозволяє при забезпеченні заданого рівня напруги на струмоприймачі електрорухомого складу зменшити витрати електроенергії на тягу поїздів та втрати потужності в тяговій мережі при мінімізації встановленої потужності підсилюючих пунктів.

Визначено технічні параметри системи розподіленого електропостачання та визначено раціональний рівень обмеження мінімального значення напруги в контактній мережі, який обумовлений напругою на шинах суміжних тягових підстанцій і визначається за критерієм мінімуму втрат електроенергії в тяговій мережі. Техніко-економічні розрахунки показали, що запропонована модернізація системи електричної тяги постійного струму, маючи відносні капіталомісткі витрати, характеризується строком окупності менше 4,5 років.

Ключові слова: режим напруги, система тягового електропостачання, постійний струм, розподілене електропостачання, пункт підсилення, рівень напруги, діапазон зміни напруги, втрати потужності, альтернативні джерела електроенергії.

ABSTRACT

Kosariev Ye. M. Voltage mode improvement in the DC traction power supply system of the electrified railways – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

The dissertation for the PhD degree in specialty 05.22.09 - electric transport (27 - transport). - Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2018.

The dissertation studies the scientific and applied issues of supplying a particular range of voltage changes on the current collector of the electric motive power at the decentralized

power system. The work analyzes the power supply system of the DC voltage mode of electric transport. The experiments show that the actual DC traction power supply is not capable of providing the sufficient traction network power while implementing the high-speed traffic.

The mathematical model allows performing calculations of the distributed traction power supply system with alternative sources of electric power. It involves using the regularities of the change in the traction network resistance with any number of traction substations and boost points. In combination with the functions of current distribution and the distribution of subsystem potentials make it possible to formalize electrotechnical calculations of electric traction systems and proceed from discrete to continuous representation.

The system of limiting the minimum voltage level on the current collector of the electric motive power is recommended to narrow the voltage variation range and reduce power losses in the traction network for 30 %. The rational level of the minimum voltage value limits in the contact network of the distributed power supply system is determined; it is 93% of traction substation open-circuit voltage and determined by the criterion of minimum power losses in the traction network. Ensuring a rational level of voltage in the traction network allowed, performing the same train operation on the area, to reduce the energy losses by 29% compared with the voltage limitation in the traction network at 3000 V and 64% compared with the voltage limitation in the traction network at 2900 V.

On the basis of the developed model for calculating the distributed traction power supply system, the sensory method was improved for optimization the location of the boost point installation. This method allows reducing the electric power consumption for trains traction and power losses in the traction network while minimizing the installed power of the boost points providing voltage level on the current collector of the electric motive power.

In order to implement a decentralized power supply system, a structure is proposed to use the installation of the distributed solar power generators as a power source. The system optimal topologies of alignment and transient DC/DC converters are defined. For the transient converter, the bridge circuit is chosen, which allows to reduce the load of semiconductor keys by 50% in comparison with the half-bridge circuit at peak currents. For the DC / DC converters in the system of solvers transformers, the most advanced magnetic material and the operating frequency of the intermediate AC links are proposed, which allows to reduce the specific losses in the magnetic circuit by 27% and significantly reduce the mass-gauge values of the transformer.

The calculations made for the electrified area of Pridneprovskaya Railway showed that during performing a given schedule of motion, the use of the developed system provides a predetermined value of the lower level of voltage on the current collector of the electromotive force, thereby reducing the loss of electric energy in the traction network by 30% from the existing level, and narrowing the range of change voltage by 30 %.

The feasibility and economic calculations have shown that the modernization of the DC electric traction system, having relative capital-intensive costs, is characterized by a pay-back period by 4,5 years.

Keywords: voltage mode, traction power supply system, DC, distributed power boost point, voltage level, the range of voltage variation, power losses, alternative energy sources.

КОСАРЄВ ЄВГЕН МИКОЛАЙОВИЧ

ПОКРАЩЕННЯ РЕЖИМУ НАПРУГИ В СИСТЕМІ
ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ПО-
СТІЙНОГО СТРУМУ

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку «21» «травня» 2018

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 0,9.
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим.

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:
49010, Дніпро, вул. Лазаряна, 2.