

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КОСАРЄВ ЄВГЕН МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 621.331

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

Спеціальність: 05.22.09 – електротранспорт

Галузь знань: 27 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

Науковий керівник Сиченко Віктор Григорович, доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2018

## АНОТАЦІЯ

Косарев 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 – електротранспорт (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 рівень питомої потужності тягової мережі. Розробки українських та закордонних вчених по підсиленню систем тягового електропостачання постійного струму, в основному, орієнтовані лише на технічне переоснащення. Тому необхідна розробка заходів з покращення режиму напруги в системі електропостачання залізничного транспорту, які б забезпечували перехід до нової енергоефективної схемотехніки живлення тягової мережі з децентралізацією генеруючих потужностей.

Запропоновано математичну модель, яка дозволяє виконувати електричні розрахунки розподіленої системи тягового електропостачання з альтернативними джерелами електроенергії та полягає в використанні закономірності зміни опору тягової мережі з будь-якою кількістю тягових підстанцій та підсилюючих пунктів аналітичними функціями, яка в сукупності з функціями струморозподілу та розподілу потенціалів у вузлах системи, дозволяє формалізувати електротехнічні розрахунки електротягових систем та перейти від дискретного до неперервного уявлення.

Адекватність моделі для вирішення поставлених задач підтверджена порівнянням результатів з експериментальними даними при відповідній тотожності розрахункових умов.

Запропоновано систему обмеження мінімального рівня напруги на струмоприймачі ЕРС, яка дає змогу звужити діапазон зміни напруги і зменшити втрати електроенергії в тяговій мережі до 30 % від існуючого рівня, в залежності від щільності графіка руху поїздів та забезпечити економію витрат електроенергії на тягу поїздів до 33 %.

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 до 4,5 років.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропонована система дозволяє звужити діапазон зміни напруги на струмоприймачі електрорухомого складу та зменшити втрати електроенергії в тяговій мережі до 30 % в залежності від щільності графіка руху поїздів.

Основні результати дослідження були використані в держбюджетних роботах «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем» (№ 0116U006982) та «Розробка енергоефективної технології сумісної роботи системи централізованого

тягового електропостачання та системи розподілених альтернативних джерел електроенергії» (№ 0117U004481)

Розроблені методики та практичні підходи для зменшення діапазону зміни напруги на струмоприймачі електрорухомого складу прийнято до використання службами електропостачання регіональних філій «Львівська залізниця» та «Південна залізниця». Результати роботи у вигляді математичної моделі 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».

**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 researches of

Ukrainian and foreign scientists, focused on enhancing the systems of DC traction power supply, mainly suppose only technical re-equipping. Taking this into account, the methods of voltage mode improvement in the rail transport electricity supplement system are to be developed. The above-mentioned methods should ensure using a new energy efficient circuitry power supply network and the power generators decentralization.

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 model adequacy for solving formulated problems is confirmed by comparing the results with the experimental data due to the corresponding identity of the calculated conditions.

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 % depending on the density of the train table, it also ensures the saving of electric power consumption for the trains traction up to 30 %.

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.

The technical parameters of the distributed power supply system and the rational level of the minimum voltage value limits in the contact network are determined, which is caused by the voltage on the busbars of the adjacent traction substations and determined by the criterion of minimum power losses in the traction

network. 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 payback period for 4.5 years.

The practical meaning of the obtained results is that the system is able to narrow the range of voltage variation on the current collector of the electromotive power by 30 %, while the power losses in the traction network decreases by 4 - 30% depending on the density of the train table.

The main results of the research were used in the taxpayer-funded research "Development of intelligent technologies for efficient energy supply of transport systems" (No. 0116U006982) and "Development of energy-efficient technology for the joint operation of the centralized traction power supply system and distributed alternative sources of power system (No. 0117U004481)

The developed methods and practical approaches for reducing the voltage range on the current collector of the electromotive power are accepted for use by the power supply service of the regional branch "Lvivska zaliznitsa". The results of work in the form of a mathematical model are implemented in the educational process of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V. Lazaryan and used in the preparation of bachelors and masters in the specialty "Power engineering, electrical engineering and electromechanics"

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

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 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. Bosiy, «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. E. 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. Косарев, 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. Косарев, 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. Косарев, 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. Косарев, 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. Косарев, 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. Косарев, «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. Косарев, 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. Косарев, 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. Косарев, «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. Косарев, 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.

**охранні 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.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	13
1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	23
1.1 Режими напруги в системі тягового електропостачання постійного струму .....	23
1.2 Експериментальні дослідження режимів напруги.....	26
1.2.1 Дослідження режиму напруги на шинах тягових підстанцій .....	27
1.2.2 Дослідження режиму напруги на струмоприймачах електрорухомого складу .....	34
1.2.3 Дослідження режиму напруги в системі тягового електропостачання при рекуперації енергії .....	39
1.3 Якість напруги у тяговій мережі постійного струму .....	41
1.4 Шляхи покращення режимів напруги у системі тягового електропостачання постійного струму .....	45
Висновки до розділу 1 .....	50
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КЕРОВАНОЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....	53
2.1 Аналіз методів розрахунку систем тягового електропостачання .....	53
2.2 Задачі для математичної моделі розподіленої системи тягового електропостачання .....	56
2.3 Розробка математичної моделі системи тягового електропостачання постійного струму .....	58
2.3.1 Побудова «Матриці схеми» .....	58
2.3.2 Визначення струморозподілу в системі без навантаження за умови розміщення на міжпідстанційній зоні підсилюючих пунктів з двонаправленими перетворювачами .....	59
2.3.3 Розрахунок вирівнюючих струмів.....	62
2.3.4 Розрахунок функції опору .....	64
2.3.5 Розрахунок напруги на струмоприймачі електрорухомого складу.....	68
2. 4 Перевірка математичної моделі на адекватність .....	78
Висновки до розділу 2 .....	82

3 ПОБУДОВА РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....	84
3.1 Визначення місця розташування підсилюючих пунктів.....	84
3.2 Розрахунок потужності підсилюючих пунктів .....	88
3.3 Визначення рівня обмеження мінімального значення напруги на струмоприймачах електрорухомого складу .....	91
3.4 Результати розрахунку енергетичних показників розподіленої системи .....	94
Висновки до розділу 3 .....	98
4 СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ .....	100
4.1 Загальна структура системи, визначення топології перетворювачів та частоти їх проміжних ланок .....	100
4.1.1 Структура системи та вибір топології узгоджуючого перетворювача .....	102
4.1.2 Вибір топології перехідного перетворювача .....	106
4.1.3 Визначення частоти проміжних ланок змінного струму в DC-DC перетворювачах.....	110
4.2 Розрахунок потужності сонячної електростанції та ємності накопичувача, необхідної для живлення підсилюючого пункту .....	116
4.3 Система вимірювань та контролю рівнів напруги для розподіленої СТЕ .....	126
Висновки до розділу 4 .....	127
5 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛЕНОГО ЖИВЛЕННЯ .....	129
Висновки до розділу 5 .....	135
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	136
БІБЛІОГРАФІЯ .....	139
ДОДАТОК А.....	155
ДОДАТОК Б .....	171
ДОДАТОК В.....	175

## ВСТУП

### Актуальність обраної теми

Транспортна інфраструктура будь-якої розвиненої країни відіграє важливу роль в економічному, соціальному та стратегічному значеннях. Українські залізниці мають в своєму розпорядженні близько 22 тис. км та забезпечують до 80 % вантажних і до 50 % пасажирських перевезень [1]. Перевезення залізничним транспортом в енергетичному балансі України займають частку споживання електроенергії на рівні 4 %, при цьому від 2,8 до 3,5 % загального балансу електроенергії безпосередньо витрачається на електричну тягу [1]. За всю історію експлуатації залізничного транспорту в Україні частка електрифікованих залізниць із загальної експлуатаційної довжини залізничних колій постійно збільшується, складаючи на цей час близько 10 тис. км, що у відношенні до загальної експлуатаційної довжини складає 47 % [2]. Постійне збільшення протяжності електрифікованих залізниць протягом останніх років обумовлене перевагами, які полягають у тому, що питомі витрати електричної тяги менше від тепловозної у 1,8-2,2 рази [1]. За обсягами вантажних перевезень залізниці України посідають четверте місце на Євразійському континенті, поступаючись лише залізницям Китаю, Росії та Індії. При цьому, вантажонапруженість залізниць України в 3-5 разів перевищує відповідний показник розвинених європейських країн [1].

Відповідно до основних напрямків розвитку залізничного транспорту [3] для забезпечення росту галузі, її стабільного та ефективного функціонування передбачено підвищення пропускної спроможності залізничних ліній і збільшення маси поїздів та їх швидкостей: вантажних до 100 – 120 км/год, пасажирських до 160 – 200 км/год. Для підвищення пропускної спроможності ділянок та впровадження великовагового руху поїздів потрібні локомотиви з більш високою одиничною потужністю, яку може забезпечити лише електротяга, про що свідчить досвід розвинених країн Європи та Азії.

Безпосередньо для електротягового рухомого складу обмеження провізної і пропускної спроможності виникає через відхилення режиму

напруги від нормальних умов, що викликає невиправдані втрати електроенергії в тягових мережах та, в цілому, ускладнює виробничо-господарську діяльність електрифікованих залізниць. Так, на ділянках постійного струму фактична величина напруги, в першу чергу, обмежує технологічну можливість пропуску заданої кількості електрорухомого складу і перевезення встановленої вагової норми, що визначаються за умовами безпеки руху. Тому однією з основних вимог до системи електропостачання при впровадженні швидкісного та важковагового руху є забезпечення заданого рівня напруги в контактній мережі при проходженні рухомого складу. Система тягового електропостачання (СТЕ) повинна забезпечувати першу категорію надійності живлення тягових та нетягових споживачів і не допускати короточасну втрату напруги на приєднаннях. Пристрої тягового електропостачання не повинні обмежувати максимальні швидкості руху нижче прийнятого експлуатаційними умовами рівня і забезпечувати відповідну якість напруги, стійкість до непередбачуваних впливів і високу енергоефективність [4]. Але вже зараз окремі, найбільш навантажені ділянки Укрзалізниці, працюють без належних резервів, необхідних для запланованого об'єму перевезень, що пов'язано з неготовністю елементів СТЕ забезпечити пропуск потужних поїздів [2]. Проблема якості напруги транспортних систем полягає в тому, що пристрої електропостачання проектувались у 60-х роках минулого сторіччя і не відповідають сучасним вимогам енергоефективності. На даний час, транспортна галузь переживає період глибокої системної кризи. Зазначене обумовлюється наявною системою управління транспортним енергокомплексом, станом виробничо-технічної бази і технологічним рівнем організації перевезень, який за багатьма критеріями не відповідає потребам суспільства та європейським стандартам якості надання транспортних послуг, перешкоджає підвищенню ефективності функціонування та потребує докорінного реформування та модернізації.

Сучасний стан тягового електропостачання, особливо на ділянках постійного струму, характеризується зростаючим дефіцитом електричної енергії для забезпечення необхідного рівня якості напруги в тяговій мережі

при впровадженні швидкісного руху. 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 [4]. Великі значення струмових навантажень в СТЕ постійного струму призводять до більш суттєвих втрат напруги в контактній мережі і, в свою чергу, до неможливості забезпечення заданого рівня напруги на струмоприймачі ЕРС. Моральний та технічний знос пристроїв тягового електропостачання призводить до неможливості збереження параметрів напруги та струму живлячої мережі. Головним обмежуючим фактором цього є централізована система електропостачання, яка передбачає зосередження потужності на тягових підстанціях, розташованих на певній відстані, та живлення електрорухомого складу за двосторонньою схемою. Таким чином, при русі тягового навантаження, втрати напруги набувають значної ваги в залежності від питомого опору тягової мережі, струмового навантаження, схеми живлення контактної мережі та довжини міжпідстанційної зони [5].

Експлуатація на залізницях України сучасного швидкісного рухомого складу наочно показала проблеми та обмеження, які містяться в інфраструктурі залізниць. В частині режиму напруги це стосується обмежень за величиною та постійною часу споживання тягової потужності. Окрім цього, поступове впровадження джерел альтернативної енергетики, в тому числі, і з приєднанням до тягових мереж, з одного боку викликає проблеми неузгодженості режимів їх роботи, а з іншого відкриває нові можливості у пошуку оптимальних розподілів потоків потужностей при живленні систем електричної тяги.

Існуючі способи підсилення системи тягового електропостачання постійного струму для підвищення якості напруги, в основному, орієнтовані лише на технічне переоснащення апаратного забезпечення, що не вирішує суть проблеми – централізоване живлення системи. Тому необхідна розробка нових заходів з підвищення якості напруги, спрямованих на звуження діапазону зміни напруги в тяговій мережі та розробка сучасної системи

електропостачання залізничного транспорту, яка б забезпечувала перехід до нової енергоефективної схемотехніки живлення з децентралізацією генеруючих потужностей. В сучасних умовах експлуатації електрифікованих залізниць це є актуальною задачею і 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 і завдання 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 дослідження.** 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 одержаних результатів роботи**

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 сусідніх 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 одержаних 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 «Проблеми безпеки на транспорті» (Гомель 2015); I, II Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології перевізного процесу» (Моршин, 2016, Львів 2017); XXII Міжнародна науково-практична конференція

«Силова електроніка 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.