

## АНОТАЦІЯ

Земський Д. Р. Підвищення ефективності передачі електроенергії для нетягових споживачів електрифікованих залізниць змінного струму. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)» (27 – Транспорт). – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2020.

Актуальність обраної теми обумовлена проблемами ефективного використання енергетичних ресурсів та забезпечення надійності роботи обладнання. В електроенергетиці одним із способів вирішення вказаних проблем є зниження технологічних втрат електроенергії та забезпечення електромагнітної сумісності працюючих пристроїв. Електрорухомий склад залізниць змінного струму є потужним нелінійним споживачем, що чинить асиметруючий вплив на трифазні мережі та генерує вищі гармоніки до систем зовнішнього та нетягового електропостачання.

У найгірших електромагнітних умовах перебуває обладнання нетягових споживачів, що отримують живлення від електричної мережі, складовою частиною якої є гальванічно зв'язана із тяговою мережею лінія, яка відома під назвою «два проводи-рейка» (ДПР). Причиною цього є характерне для ліній ДПР поєднання кондуктивного та польового впливу тягової мережі залізниці змінного струму, що призводить до зменшення ефективності передачі електричної енергії приєднаним споживачам. Крім того, через різні способи підключення суміжних підстанцій до живлячої мережі, неможливо забезпечити двостороннє живлення трифазного навантаження від ліній ДПР, що додатково збільшує втрати електроенергії при передачі.

Загальна довжина ліній ДПР в Україні – 4 тис. км, що складає 80 % від довжини електрифікованих змінним струмом залізниць. Щорічний обсяг переданої лініями ДПР електроенергії становить близько 250 млн. кВт·год, що складає близько 30 % від загальної електроенергії переданої споживачам, які живляться від мереж залізниці. Річні втрати електроенергії знаходяться на рівні 6 млн. кВт·год. Несиметрія напруги в лініях ДПР досягає значень 7,5...10,6 %, а несинусоїдність – 8,5...12,7 %, проти 4 % та 8 % відповідно у інших лініях нетягового електропостачання.

Враховуючи розповсюдженість ліній ДПР на залізницях змінного струму та визначені вище їх недоліки, об'єктом дослідження обрано процес передачі електроенергії лініями, що гальванічно зв'язані із тяговою мережею. Предметом дослідження є втрати електроенергії, показники несиметрії та несинусоїдності напруги у лініях нетягового електропостачання напругою 27,5 кВ.

Відповідно метою роботи є Метою дослідження є зменшення втрат та підвищення якості електричної енергії при її передачі лініями нетягового електропостачання, які гальванічно зв'язані через рейкову колію з тяговою мережею.

Аналіз наукових публікацій та відомих технічних рішень з питання електропостачання нетягових споживачів, проведений у першому розділі дисертації, дозволив зробити висновок про те, що проблему передачі електричної енергії лінією «два проводи-рейка» розглядають лише зі сторони її конструктивних недоліків, які полягають у розташуванні проводів лінії на опорах контактної мережі та використанні рейки у якості третьої фази, залишаючи недослідженим питання із двостороннім живленням споживачів.

Для вивчення енергетичних процесів у системі нетягового електропостачання розроблено математичну модель у фазних координатах на базі диференціальних рівнянь стану електричного кола, що дозволяє розрахувати показники якості електроенергії з урахуванням нелінійних параметрів тягового трансформатора, електрорухомого складу та схем підключення підстанцій до живлячої мережі.

Теорія використаного підходу для побудови математичної моделі та принцип роботи комп'ютерного алгоритму, застосованого для її реалізації, викладені у другому розділі дисертації.

До третього розділу включені результати двох експериментів з дослідження спотворень якості електричної енергії з використанням системи ДПР. Перший експеримент мав пасивний характер – вимірювались параметри режиму напруги на шинах 27,5 кВ тягової підстанції та у колі вторинної напруги комплектної трансформаторної підстанції (КТП) ДПР без зміни нормальної схеми електропостачання. Під час другого експерименту реалізовано три схеми живлення споживача від лінії ДПР: дві консольних та двосторонню від суміжних підстанцій, що є можливим на дослідній ділянці. За результатами другого експерименту виконано перевірку адекватності математичної моделі.

У четвертому розділі вирішується задача підвищення ефективності передачі електричної енергії нетяговим споживачам. Досліджується три способи живлення нетягових споживачів: консольне живлення від лінії ДПР при збереженні чергування приєднання фаз тягового трансформатора до системи зовнішнього електропостачання, двостороннє живлення від лінії ДПР за умови використання однакової схеми приєднання фаз трансформатора до живлячої мережі на суміжних тягових підстанціях та із використанням фазоповоротного пристрою. Детально описано метод забезпечення двостороннього живлення із використанням фазоповоротного пристрою.

Представлені результати чисельного розрахунку системи електропостачання ділянки залізниці із використанням трьох способів живлення споживача. Проведено співставлення показників несиметрії та несинусоїдності напруги живлення тягових підстанцій та нетягових споживачів. Визначені втрати потужності при різних варіантах живлення нетягових споживачів.

У п'ятому розділі приведений техніко-економічний розрахунок впровадження запропонованого способу, виконаний із визначенням чистої поточної вартості проекту та врахуванням прогнозу зростання тарифу на розподіл та постачання електроенергії.

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

- «Математико-інформаційне забезпечення процесу моделювання режимів роботи систем електричного транспорту», № держреєстрації 0119U103838;
- «Забезпечення паралельної роботи та підвищення якості електроенергії у лініях електропостачання нетягових споживачів залізниць змінного струму», № держреєстрації 0119U103771;
- «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем», № держреєстрації 0116U006982.

Наукова новизна дисертації полягає у наступному:

1. Вперше розроблено комплексну математичну модель взаємодії систем зовнішнього, тягового та нетягового електропостачання залізниці змінного струму, яка відрізняється від існуючих врахуванням різних схем підключення тягових під-

станцій до живлячої мережі, несиметрії та несинусоїдності тягового навантаження, параметрів магнітного кола трансформаторів та конструктивного виконання ліній нетягового електропостачання, що дозволяє достовірно визначити втрати та показники якості електроенергії у системі електропостачання для несиметричних та несинусоїдних режимів роботи.

2. Вперше на основі дослідження закономірності зміни систем векторів вихідної напруги тягових трансформаторів із врахуванням схеми їх підключення до первинної мережі запропоновано науково обґрунтований метод забезпечення двостороннього живлення ліній нетягового електропостачання від тягових шин підстанцій змінного струму з різними конфігураціями систем векторів напруги, що дозволяє забезпечити безперервну передачу електроенергії з меншими втратами.

3. Дістав подальшого розвитку метод моделювання режимів електричних мереж у фазних координатах, який відрізняється поєднанням пофазного підходу до складання схеми заміщення та використанням активних і обмінних характеристик нелінійного навантаження при розв'язанні системи диференціальних рівнянь, що дозволяє одночасно отримати показники несиметрії та несинусоїдності напруги в розподільчих мережах електрифікованих залізниць змінного струму.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Впровадження способу підвищення ефективності передачі електричної енергії на кожні 100 км у мережі нетягового електропостачання напругою 27,5 кВ дозволяє зменшити: втрати електроенергії з 270...350 МВт·год/рік до 160...210 МВт·год/рік; коефіцієнт несиметрії зворотної послідовності напруги з 1,8...1,9 % до 1,3 %; коефіцієнт несинусоїдності напруги з 7,00...8,21 % до 4,57...6,60 % відповідно.

2. Отримані аналітичні вирази показників несиметрії напруги для схем одностороннього та двостороннього живлення ліній «два проводи-рейка» у вигляді сукупності статистичних законів розподілу та рівнянь регресії дозволяють кількісно оцінити несиметрію напруги при реалізації окремої схеми живлення та показують зниження несиметрії при реалізації двосторонньої схеми живлення.

Ключові слова: лінія «два проводи-рейка», активна характеристика, обмінна характеристика, втрати електроенергії, електромагнітна сумісність, математичне моделювання, нетягове електропостачання, нетяговий споживач, система тягового електропостачання, фазні координати, фазоповоротний пристрій, якість електроенергії.

Список публікацій в яких опубліковані основні наукові результати дисертації, де:

– статті у фахових виданнях:

1. Босий Д. О., Земський Д. Р. Підвищення якості електроенергії у лініях «два проводи-рейка». *Електрифікація транспорту*. № 12. С. 76-81.

2. Земський Д. Р. Експериментальне дослідження якості електроенергії у споживачів, що живляться від лінії ДПР 27,5 кВ залізниць змінного струму. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 1 (136). С. 66–71.

3. Босий Д. О., Земський Д. Р., Хоменко В. Р. Аналітичне порівняння показників якості електроенергії за двома стандартами у мережі нетягового споживача залізниці змінного струму. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Енергетика: надійність та енергоефективність»*. 2019. № 29. С. 27-33.

– стаття у іноземному виданні, включеного до наукометричної бази «Scopus?»:

4. Zemskyi D. R., Bosyi D. O. Energy Efficient Modes of Distribution Power Supply Systems with Different Vector Group of Transformer : 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. *Conference proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2019. doi: 10.1109/ESS.2019.8764246.

– стаття у виданні, віднесеному до третього квартилю відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank та включеного до наукометричної бази Scopus:

5. Земський Д.Р., Сиченко В.Г., Босий Д.О. Моделювання сумісної роботи систем зовнішнього та тягового електропостачання залізниць змінного струму для оцінки якості електроенергії у несиметричних режимах. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 2. С. 74-85.

– стаття в періодичному науковому виданні держави, яка входять до Європейського Союзу:

6. Bosyi D., Zemskyi D. Increasing Power Supply Efficiency for “Two WireRail” Line Consumers. *Problemy Kolejnictwa*. Issue 188. pp. 93-102. DOI: 10.36137/1881E.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Земський Д. Р. Дослідження якості електричної енергії у лініях поздовжнього електропостачання залізниць змінного струму. *Перспективи взаємодії залі-*

зниць та промислових підприємств : матеріали II-ї Міжнародної науково-практичної конференції, м. Дніпро, 3-4 листопада 2016 р. Дніпро, ДНУЗТ, 2016. С. 31-32.

2. Земський Д. Р. Пошук шляхів модернізації та удосконалення електромагнітної сумісності ліній ДПР електрифікованих залізниць. *Безпека і електромагнітна сумісність на залізничному транспорті : матеріали VIII-ї Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Чернівці, 1-3 лютого 2017 р. Чернівці, 2017. С. 34-35.

3. Земський Д. Р. Проблеми ефективної роботи системи поздовжнього електропостачання нетягових споживачів залізниць змінного струму. *«Енергооптимальні технології перевізного процесу»*: матеріали II-ї Міжнародної науково-практичної конференції, м. Львів, 22-26 травня 2017 р., Львів, 2017. С.36-37.

4. Земский Д. Р. Электромагнитная совместимость линий ДПР с потребителями электроэнергии на дорогах переменного тока. *Проблемы безопасности на транспорте : материалы VIII Международной научно-практической конференции* : в 2 ч. Ч. 1, г. Гомель, 23-24 ноября, 2017 р., Гомель, 2017. С. 186-187.

5. Земський Д. Р. Моделювання впливу системи тягового електропостачання змінного струму на лінію два проводи-рейка. *Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО-2017»* : матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, м. Дніпро 20-21 грудня 2017 р. Дніпро, 2017. С.19-20.

6. Земський Д. Р. Моделювання процесу передачі електричної енергії лініями «два проводи-рейка». *Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації*: збірник наукових праць XVI-ї Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, м. Кременчук, 12–13 квітня 2018 р. Кременчук, 2018. С. 142-143.

7. Босый Д. А., Земский Д. Р. К вопросу о совместном моделировании систем тягового и внешнего электроснабжения несимметричных режимов работы. *Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов* : материалы IV Международной научно-практической конференции : в 2 ч. Ч. 1, 11-12 октября, 2018 р., Гомель, 2018. С. 11-12.

8. Босий Д. О., Земський Д. Р. Енергоефективні режими електропостачання розгалужених систем з нелінійними та несиметричними навантаженнями. *Енерго-*

*ефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2018): збірник наукових праць II Всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Харків 3-6 грудня 2018 р., Харків, 2018. С. 27-28.*

9. Босий Д. О., Земський Д. Р. Моделювання електромагнітних процесів в системах тягового електропостачання та зовнішній енергетиці. *Науково-технічний прогрес на транспорті: матеріали 79 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, м. Дніпро, 28 березня 2019 р. Дніпро, 2019. С. 10-11.*

10. Босый Д. А., Земский Д. Р. Математико-информационное обеспечение процесса моделирования режимов работы систем электроснабжения электрического транспорта. *Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1, г. Гомель, 28-29 ноября 2019 г. Гомель, 2019. С. 112-114.*

11. Босий Д.О., Земський Д. Р. Аналітичне порівняння показників якості електроенергії за двома стандартами в лініях нетягового електропостачання залізниць змінного струму. *Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2019) матеріали III Міжнародної науково-технічної конференція, м. Харків, 12-15 листопада 2019 р. Харків, 2019. С. 47.*

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Спосіб забезпечення двостороннього живлення ліній нетягового електропостачання на залізницях однофазного змінного струму: пат. 141152 Україна. № u201908882; заявл. 22.07.19; опубл. 25.03.20, Бюл. № 6.

## ANNOTATION

Zemskiy D. R. Increasing electricity transmission efficiency for non-traction consumers of alternating current railways. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript/

Dissertation for the Doctor of Philosophy Degree in specialty 275 “Transport Technologies (by Type)” (27 – Transport). – Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2020.

The relevance of the topic is due to the problems of efficient use energy resources and ensuring reliability of the equipment. In the power industry, one of the ways to solve these problems are to losses of electricity and ensure electromagnetic compatibility of devices.

The electric rolling stock of AC railways are a powerful non-linear consumer, which has an asymmetric effect on three-phase networks and generates higher harmonics to external and non-traction power supply systems.

Equipment of non-traction consumers supplying from the line, which is galvanically connected to the traction network, also known as, the “two wire-rail” line or TWR line, are in the worst electromagnetic conditions. Reducing the efficiency of electric power transmission to consumers in the concept of electromagnetic compatibility occurs through a combination of conductive and field effects on the TWR line. Addition, in most cases, it is not possible to provide bilateral power supply from the TWR lines that increases the loss of electricity when it is transmitted by the line.

The values of the voltage unbalance indicator and total harmonic distortion in the TWR lines are 7,5... 10,6 % and 8.5 ... 12,7 % but these rates are limited to 4 % (voltage unbalance) and 8 % (total harmonic distortion) in other non-traction power supply lines. Annual losses are 6 million kWh in TWR lines of Uralian railways. The total length of TWR lines in Ukraine is 4 thousand km, which is 80 % of the length of AC Railways. The annual volume of transmitted TWR lines is about 250 million kWh.

Due to the proliferation of DWP lines by AC railways and the disadvantages identified above, object of study is the process of transmission of electricity by lines galvanically connected to the traction network. The subject of the study is the efficiency of electricity supply, which is meant the transmission of electricity with the lowest loss-



es and the deterioration of its quality.

Accordingly, the purpose is to increase the transmission electricity efficiency by lines that are galvanically connected to the traction network.

Analysis of scientific publications and known technical decisions for the non-traction power supply consumers has been conducted in the first section of the dissertation. Only the design flaws of the line had been investigated by specialists, arrangement of line wires on the catenary mast and using of the rail as the third phase are reason of unbalance and harmonic distortion voltage. Therefore, the issue of bilateral electricity supply remains unexplored.

The mathematical model has been developed in phase coordinates, which based on Kirchhoff differential equations for electrical circuit. Electricity quality indicators with account nonlinear parameters of traction transformer, electric rolling stock and schemes of connecting substations to the power grid can be calculated by the this model. The theory of the applied approach for the construction of the mathematical model and the principle of operation of the computer algorithm applied for its implementation has been outlined in the second section of the dissertation.

The results of two experimental studies of the quality of electricity transmitted by the TWR line have been presented in third section. The first experiment was passive. The voltage on the buses of the substations 27,5 kV and the power circuit of the non-traction consumer was measured without changing the circuit. Two unilateral and one bilateral schemes of power supply from the TWR line were implemented during the second experiment. The mathematical model was verified according to the second experiment.

The problem of bilateral power supply to consumers is addressed in the fourth section. There are three ways to power supply of the non-traction consumers from the 27,5 kV network have been considered: unilateral power supply from the TWR line with alternation of substation connection to the public network; bilateral power supply from the TWR line without alternating substation connection to the public network; bilateral power supply from bus substation through phasing device and three-wire line was used instead of the TWR line. The method of providing bilateral power supply has been described.

Numerical calculation results of the three methods power supply non-traction

loads are presented. The using and proposing methods of power supply have been colated by quality and losses energy.

In the fifth section investment attractiveness of the decision was evaluated with account the growth in the price of electric energy and using the net present value method.

The main results of the study are related to the implementation of researches at Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan on the following topics:

- “Ensuring parallel operation and enhancing power quality in non-traction customers power lines for AC railway application”, No. 0119U103771;
- “Mathematical and Information Basis of Traction Power Supply Systems Modes Simulation”, No. 0119U103838;
- “The development of intelligent technologies for efficient energy transport systems”, No. 0116U006982.

Scientific novelty of the obtained results:

1. For the first time the complex mathematical model for simulation of external, traction and non-traction AC power supply systems was developed, which differs from the existing ones taking into account different schemes of traction substations connection to the mains, asymmetry and non-sinusoidal traction load, magnetic circuit parameters. Mathematical model allows to reliably determine the losses and indicators of power quality in the power supply system for asymmetric and non-sinusoidal modes of operation.

2. For the first time the scientifically proved method of providing two-way power supply of non-traction power supply lines from buses of AC substations with different systems of voltages vectors with lower losses, which based on research of change of vectors systems output voltage transformer taking into of schemes of their connection to the primary network.

3. The method of modeling electric network modes in phase coordinates was further developed, which differs by a combination of a phase-by-phase approach to the substitution scheme and the use of active and exchange characteristics of nonlinear loading in solving a system of differential equations. The method allows to obtain indicators of voltage asymmetry and nonsinusoidal networks of electrified alternating cur-

rent railways.

The practical significance of results:

1. The implementation of a proposed method increasing the efficiency of electricity transmission of non-traction network power supply for every 100 km with a voltage of 27,5 kV allows to reduce electricity losses from 270...350 MWh / year to 160...210 MWh / year, the voltage unbalance from 1,8...1,9% to 1,3% and the total harmonic distortion from 7,00...8,21% to 4,57...6,60%, respectively.

2. The dependence of voltage asymmetry indices for unilateral and bilateral power supply with “two wire-rail” line have been obtained in form of set statistical distribution laws and regression equations, which are allow quantifying the voltage unbalance in the implementation of a separate power supply scheme.

Keywords: “two wires-rail” line, active characteristic, exchange characteristic, power losses, electromagnetic compatibility, mathematical modeling, non-traction power supply, non-traction consumer, traction power supply system, phase coordinates, phase-shifting device, power quality.