

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

Кваліфікаційна наукова праця
На правах рукопису

ЗЕМСЬКИЙ ДЕНИС РОМАНОВИЧ

УДК 631.331

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ
НЕТЯГОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО
СТРУМУ

275 – Транспортні технології (за видами)

27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Д. Р. Земський

Науковий керівник Босий Дмитро Олексійович, доктор технічних наук, доцент

Дніпро – 2020

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 «ХПИ», 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.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НЕТЯГОВИХ СПОЖИВАЧІВ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ ЗМІННОГО СТРУМУ	22
1.1 Енергоефективність як орієнтир розвитку електроенергетичної галузі України	22
1.2 Ефективність роботи нетягових мереж залізниць.....	28
1.3 Відомі способи підвищення ефективності роботи мережі ліній «два проводи-рейка»	36
1.4 Висновки до розділу 1	42
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НЕСИМЕТРИЧНИХ ТА НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМІВ У СИСТЕМАХ НЕТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ	44
2.1 Обґрунтування підходів до побудови математичної моделі	44
2.2 Задачі та припущення, прийняті для розробки математичної моделі.....	45
2.3 Декомпозиція складних систем електропостачання нетягових споживачів та ідентифікація їх параметрів.....	47
2.3.1 Електроенергетична система	48
2.3.2 Трифазна лінія електропередачі	50
2.3.3 Тяговий трансформатор.....	54
2.3.4 Тягова мережа та електрорухомий склад	62
2.3.5 Лінія живлення нетягового навантаження та кінцевий споживач.....	67
2.4 Побудова математичної моделі системи електропостачання із врахуванням несинусоїдних та несиметричних режимів роботи.....	70
2.5 Висновки до розділу 2.....	76
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ЩО ПЕРЕДАЄТЬСЯ ЛІНІЄЮ «ДВА ПРОВОДИ- РЕЙКА».....	77
3.1 Методика проведення вимірювання показників якості.....	77
3.1.1 Схеми та засіб вимірювання	77
3.1.2 Підхід до аналізу показників якості електроенергії.....	80
3.2 Оцінка якості електричної енергії, що передається лінією «два проводи-рейка»	83
3.2.1 Результати досліджень показників якості електроенергії у місці приєднання споживача до лінії «два проводи-рейка» зі збереженням нормальної схеми живлення	84
3.2.2 Результати дослідження показників якості електроенергії в залежності від режиму живлення лінії «два проводи-рейка»	97

3.3 Оцінка адекватності методу розрахунку на основі експериментальних даних.....	108
3.4 Висновки до розділу 3.....	110
РОЗДІЛ 4 СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НЕТЯГОВИМ СПОЖИВАЧАМ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	113
4.1 Постановка задачі.....	113
4.2 Моделювання системи електропостачання залізниці та нетягових споживачів.....	114
4.2.1 Система електропостачання при односторонньому живленні нетягових споживачів від ліній «два проводи-рейка».....	118
4.2.2 Двостороннє живлення нетягових споживачів від ліній «два проводи-рейка».....	121
4.2.3 Застосування фазоповоротного пристрою.....	125
4.2.4 Двостороннє живлення нетягових споживачів від трипровідної лінії із використанням фазоповоротного пристрою.....	128
4.2.5 Зіставлення та аналіз результатів моделювання.....	132
4.3 Висновки до розділу 4.....	137
РОЗДІЛ 5 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДВОСТОРОННЬОГО ЖИВЛЕННЯ НЕТЯГОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЗАЛІЗНИЦІ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	139
5.1 Методика розрахунку економічної доцільності впровадження двостороннього живлення нетягових споживачів від шин 27,5 кВ тягової підстанцій.....	139
5.2 Складові від'ємного грошового потоку.....	140
5.3 Складові додатного грошового потоку.....	142
5.4 Чиста поточна вартість впровадження двостороннього живлення нетягового споживача.....	142
5.5 Висновки до розділу 5.....	144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	148
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА.....	167
ДОДАТОК Б ПРОГРАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	171
ДОДАТОК В СВДОЦТВО ПРО ПОВІРКУ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ.....	180
ДОДАТОК Г ВИКОРИСТАНІ ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ.....	183
ДОДАТОК Д АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	188

ВСТУП

Актуальність теми дисертації обумовлена тенденціями розвитку світової та національної економіки, функціонування якої потребує досягнення оптимального балансу між зростаючим попитом на енергію та її пропозицією, що обмежена доступними технологіями, запасами та локалізацією енергетичних ресурсів, політичними та економічними чинниками. На рівні держави підняте питання розглядають як проблему енергетичної безпеки країни, вирішення якої повністю гарантує задоволення поточних та майбутніх потреб населення у споживанні енергії та мінімізацією впливу паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) на навколишнє середовище [68, 102, 121].

У сучасному світі електроенергія знайшла широке застосування у промисловості та побуті завдяки відомим її властивостям, а загалом, електроенергетика, як галузь виробництва, має істотний вплив на рівень економічного розвитку країни. Традиційним напрямком розвитку електроенергетики є збільшення надійності функціонування електротехнічного обладнання та зменшення втрат під час виконання технологічних процесів виробництва, передачі та споживання електроенергії. Один із способів забезпечення ефективного та надійного функціонування електроенергетичної інфраструктури і обладнання, поява якого обумовлена факторами технологічного розвитку, є підтримка належного рівня електромагнітної сумісності [71, 91, 93, 187].

Сучасний етап розвитку суспільства супроводжується впровадженням у побуті, промисловості, транспорті та інших сферах людської діяльності чутливого до якості електричної енергії обладнання, що часто опиняється під загальним електромагнітним впливом електротехнічних пристроїв, режим роботи яких пов'язаний із несиметричним відбором потужності та генерацією у мережу вищих гармонік струму. Характерним прикладом такого поєднання є система електропостачання залізниць від якої отримують живлення нетягові споживачі, що розташовані уздовж залізничної колії. Нетягові споживачі можуть бути як у власності

залізниці, так і сторонніми юридичними особами або населенням, яким постачальник, використовуючи мережі залізниці, передає електричну енергію.

Як відомо, система тягового електропостачання є джерелом вищих гармонік струму, які генерують напівпровідникові перетворювачі, встановлені на тягових підстанціях та на електрорухомому складі у системах постійного та змінного струму відповідно. Також ефективність роботи системи нетягового електропостачання зменшує асиметруючий вплив електрорухомого складу, що є проблемою залізниць, електрифікованих змінним струмом [156]. Але у найгірших умовах перебувають нетягові споживачі залізниць змінного струму, лінії живлення яких гальванічно зв'язані через шини підстанції та рейкову колію із системою тягового електропостачання. Конструктивна особливість таких ліній відображена у їх назві – лінії «два проводи рейка» (ДПР). Крім того, такі мережі у більшості випадків нездатні забезпечити двостороннє живлення трифазного навантаження внаслідок дії електрорухомого складу на систему зовнішнього електропостачання, що відповідно збільшує втрати електроенергії при її передачі лінією. За даними Укрзалізничі лініями ДПР за рік передається близько 250 млн. кВт·год, при цьому 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 [156, 166, 180]. Загальна довжина ліній ДПР становить 4 369 км проти 5 315 км довжини електрифікованих залізниць змінним струмом в Україні.

Аналіз наукових публікацій з питання електропостачання нетягових споживачів, дозволяє зробити висновок про те, що проблему передачі електричної енергії лініями «два проводи-рейка» розглядають лише з сторони її конструктивних недоліків, які полягають у розташуванні проводів лінії на опорах контактної мережі та використанні рейки у якості третьої фази [77, 153, 176, 180]. Недослідженим залишається питання двостороннього живлення споживачів ДПР та відповідної зміни показників якості електроенергії при цьому.

Із розвитком нового типу відносин між учасниками ринку електричної енер-

гії набирає вагу клієнтоорієнтований підхід у діяльності енергетичних компаній та зростають вимоги споживачів до якості надання послуг. Відповідно до законодавства збитки споживача, викликані неналежною якістю електроенергії, компенсуються за рахунок власника мереж, на останнього також накладають штрафи на користь споживача за неусунення причин погіршення якості електричної енергії. Крім того, споживачі можуть приєднатися до мереж іншого власника у разі незадоволення якістю наданих послуг із розподілу електричної енергії.

У сучасних економічних умовах продовження експлуатації електричної мережі, яка має вказані вище недоліки, є актуальним, оскільки стосується не тільки збереження енергетичних ресурсів та надійності електропостачання як складової частини проблеми енергетичної безпеки, а також безпосередньо лежить у сфері інтересів Укрзалізниці як власника електричних мереж та групи споживачів електричної енергії, що живляться від ліній ДПР.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Обрані в дисертації напрями дослідження безпосередньо 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.

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

Мета та задачі дослідження

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.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Оцінити ступінь погіршення якості електричної енергії при її передачі лінією «два проводи-рейка».

2. Експериментально дослідити вплив реалізації схеми двостороннього живлення на якість електричної енергії, що передається споживачу лінією «два проводи-рейка».

3. Розробити математичну модель системи електропостачання нетягових споживачів із можливістю сумісного моделювання електроенергетичних процесів у системі тягового та зовнішнього електропостачання.

4. Розробити спосіб забезпечення двостороннього живлення нетягових споживачів, що отримують живлення від шин підстанції 27,5 кВ незалежно від схеми підключення тягових підстанцій до системи зовнішнього електропостачання.

5. Провести техніко-економічне обґрунтування впровадження запропонованого способу забезпечення двостороннього живлення нетягових споживачів.

Об'єкт дослідження

Процес передачі електричної енергії у трифазній системі електропостачання, що гальванічно пов'язана із тяговою мережею залізниці однофазного змінного струму.

Предмет дослідження

Втрати електроенергії, показники несиметрії та несинусоїдності напруги у лініях нетягового електропостачання напругою 27,5 кВ.

Методи дослідження

При аналізі результатів експериментальних вимірювань показників якості електричної енергії використано методи визначення числових характеристик розподілу випадкової величини, метод визначення критерію узгодженості Пірсона для перевірки гіпотези про тип закон розподілу та непараметричного коефіцієнта кореляції Спірмена для визначення зв'язку між показниками несиметрії напруги

та стуму. Застосовано методи математичного та комп'ютерного моделювання системи електропостачання у фазних координатах із урахуванням нелінійних параметрів електрорухомого складу під час дослідження способів живлення нетягових споживачів.

Наукова новизна отриманих результатів

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 підстанцій 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.

Особистий внесок

Постановку мети та задачі дослідження виконано 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 дисертації належить: розрахунок показників якості та аналіз електричної енергії з використанням методів математичної статистики [18] та [38]; огляд відомих способів підвищення ефективності передачі електричної енергії [37]; розробка підходу до побудови математичної моделі, перевірка на адекватність математичної моделі [83].

Робота [82] написана без співавторів.

Апробація результатів роботи

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались на наступних конференціях:

IV Міжнародна науково-технічна конференція «ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ», 11-13 жовтня 2017, м. Вінниця, Україна;

IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов», посвященной 65-летию БИИЖТа-БелГУТа. 11-12 октября 2018 г., г. Гомель, Беларусь.

2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 17-19 April, 2019 Kyiv, Ukraine.

III «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних сис-

тем (EEES-2019)», 12-15 листопад, 2019, Харків, Україна.

IX Международная научно-практическая конференция «ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ». 28-29 ноября 2019 г., г. Гомель, Беларусь.

Публікації.

Основні положення дисертації опубліковано у 18 публікаціях, з них: 4 – у фахових виданнях, серед яких одне включене до науко метричної бази Scopus, 2 – у іноземних науковому виданні, 1 – патент на корисну модель; 12 – у тезах доповідей та матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура і обсяг роботи

Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків. Основний текст роботи викладений на 131 сторінці, містить 90 рисунків за текстом і 48 таблиць. Список літературних джерел із 192 найменувань займає 19 сторінок, додатки – 28 сторінок. Повний обсяг дисертації складає 194 сторінки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НЕТЯГОВИХ СПОЖИВАЧІВ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Енергетична ефективність – пріоритетний напрямок функціонування та розвитку економік сучасних, розвинутих держав, що є реакцією на обмеженість паливно-енергетичних ресурсів та їх диспропорційність у різних регіонах планети. У політичному, екологічному та економічному аспекті її розглядають як важливий фактор підвищення рівня енергетичної безпеки, зменшення антропогенного впливу на навколишнє середовище та енергоємності виробництва.

За матеріалами інформаційно-консалтингової компанії «Enerdata» [6] у 1997 – 2017 рр. світове споживання енергії збільшилось на 4 435 млн. т нафтового еквіваленту (н.е.) та у 2017 році становило близько 13 730 млн. т н.е., або 256 ПВт·год. Найбільший стрибок у попиті на енергію відбувся у державах азійського регіону, з 2 703 до 5 755 млн. т н.е. Для порівняння, країни Європи та Північної Америки упродовж 2017 р. використали 4 346 млн. т н.е., збільшивши споживання енергії на 139 млн. т н.е. проти 1997 року.

У зв'язку із розвитком науки та техніки значення електроенергії у світі зросло, що проявилось у збільшенні її виробництва на 97 % за останні 20 років. Прогнозується, що попит на електроенергію досягне відмітки у 35,5 тис. ТВт на годину в 2040 році, що на 60 % більше показників 2017 року. Також передбачається зменшення попиту на енергоносії за рахунок впровадження заходів із підвищення енергоефективності у два рази в порівнянні із можливим рівнем попиту при збереженні сучасного стану розвитку енергоощадних технологій [63].

1.1 Енергоефективність як орієнтир розвитку електроенергетичної галузі України

В умовах постійного збільшення попиту та зростання ціни на електричну енергію виникає потреба у розробці та впровадженні заходів щодо підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів. Проте, на шляху до подальшого розвитку енергоощадних технологій виникають «бар'єри», подолання яких по-

требує кропіткої інженерної та наукової роботи. Істотно уповільнює цей процес, на думку авторів [68], значний обсяг капіталовкладень та довготривалий термін окупності заходів із енергозбереження; сприйняття інвестицій в енергоефективність як складних та ризикованих; низька поінформованість суспільства щодо енергоощадних технологій; сильний вплив держави на ринок електроенергії, через що споживачі у повній мірі не можуть оцінити заходи із енергозбереження, а ціноутворення та відсутність конкуренції не стимулює інвестування енергетичних компаній в енергозбереження.

Для зменшення впливу держави на сферу електроенергетики прийнято закон «Про ринок електричної енергії» [141], згідно з яким держава переходить від моделі «Єдиного покупця-продавця» електричної енергії, функції якого виконувало ДП «Енергоринок», до лібералізованої моделі. Відносини між його учасниками регулюється вторинними до [141] нормативно-правовими актами, основними серед яких є [126], [131], [132], [133], [136] та [137]. Реформа створює конкурентне середовище, що стимулюватиме енергетичні компанії підвищувати якість та ефективність надання послуг, а споживачам дає можливість обирати постачальника електроенергії.

Серед положень [141] є припинення перехресного субсидіювання між різними категоріями споживачів, яке штучно зменшує тарифи на електроенергію для населення. Ліквідація такої практики стимулюватиме споживачів до використання енергоощадних технологій, встановлення багатозонних приладів обліку електроенергії та більш прискіпливого ставлення до якості надання постачальниками та власниками мереж послуг.

Також чинне законодавство визначає гарантовані стандарти якості електропостачання, розміри та принцип розрахунку компенсацій, порядок їх надання споживачам від постачальників та операторів систем розподілу електричної енергії [135]. До гарантованих стандартів якості надання послуг оператора системи розподілу (ОСР) належать дотримання показника зміни напруги та усунення причин недотримання якості електричної енергії у відповідності до Кодексу систем

розподілу [132] та ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення» [66]. За недотримання показника зміни напруги компенсація надається щомісячно у розмірі 25 % від плати за надання послуг з розподілу за кожний календарний місяць, а компенсація за неусунення причини погіршення якості електричної енергії у визначений термін становить від 100 до 400 грн та надається з періодичністю 90 календарних днів до дня усунення негативного чинника. Крім того, споживач має право вимагати відшкодування збитків, завданих внаслідок недотримання гарантованих значень показників якості електроенергії з вини власника електричних мереж.

Державні програми «Стратегія сталого розвитку «України-2020» [165] та «Енергетична стратегія України на період до 2035 року» [69] визначають основні напрями щодо забезпечення енергетичної безпеки і переходу до енергоефективного та енергоощадного використання енергоресурсів із впровадженням інноваційних технологій, та покращення показників надійності. До задач, поставлених у сфері електроенергетики, відносяться: лібералізація ринку електроенергії, інтеграція енергосистеми України з континентальною європейською енергосистемою ENTSO-E, розвиток відновлюваних джерел електроенергії, модернізація обладнання, зниження втрат електричної енергії та зменшення кількості незапланованих перерв з вини постачальника за індексом середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні в системі (SAIDI). Останній розраховується як відношення сумарної тривалості довгих перерв в електропостачанні в точках комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання за звітний період, до загальної кількості точок комерційного обліку електричної енергії [132]:

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^k t_i \cdot n_i}{n}, \quad (1.1)$$

де *SAIDI* – з англійської System Average Interruption Duration Index – індекс середньої тривалості переривання системи, хв;

n_i – кількість точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було при-

пинене електропостачання у результаті j -ї короткої перерви в електропостачанні, шт.;

k – кількість коротких перерв в електропостачанні протягом звітного періоду;

i – номер короткої перерви в електропостачанні;

n – загальна кількість точок комерційного обліку електричної енергії, шт.

Заплановані показники виконання програми [69] у сфері електроенергетики за роками приведені у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 Підвищення ефективності електропостачання за показниками Енергетичної стратегії України

Рік	2020	2025	2030	2035
Втрати в електромережах	10 %	9 %	8 %	7,5 %
SAIDI (внаслідок незапланованих перерв з вини енергокомпаній)	менше 450 хв	менше 200 хв	менше 175 хв	менше 150 хв

У результаті виконання комплексу заходів із підвищення ефективності електропостачання показники роботи електроенергетичної інфраструктури до 2035 року повинні досягти значень, які вже сьогодні отримують у державах Європейського союзу. Наразі, SAIDI в Україні у шість раз перевищує середній у ЄС [75] (табл. 1.2), а втрати у мережі при передачі електроенергії у 1,5-2 рази більші, ніж у розвинутих країнах [5, 164] (табл. 1.3, рис. 1.1).

Таблиця 1.2 Індекс середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні в системі (SAIDI) в Україні та в країнах ЄС

Показник	рік	Україна		Країни ЄС	
		планові	непланові	планові	непланові
SAIDI, хв	2018	455	696	160	102
	2017	485	728	104	138
	2016	522	690	153	190

Високий рівень втрат електроенергії та відключень свідчить про недостатнє інвестування в інфраструктуру, через що продовжується експлуатація фізично зношеного обладнання електричних мереж, не підвищується пропускна здатність мереж.

Таблиця 1.3 Технологічні та нормативні втрати електроенергії на її транспортування електричними мережами України

Рік	2015	2016	2017	2018
Технологічні втрати, % / млрд кВт·год	11,5 / 16,9	11,7 / 16,6	11,8 / 16,8	11,6 / 16,9
Нормативні втрати, % / млрд кВт·год	14,4 / 21,0	13,3 / 18,8.	13,2 / 18,8	13,1 / 19,4

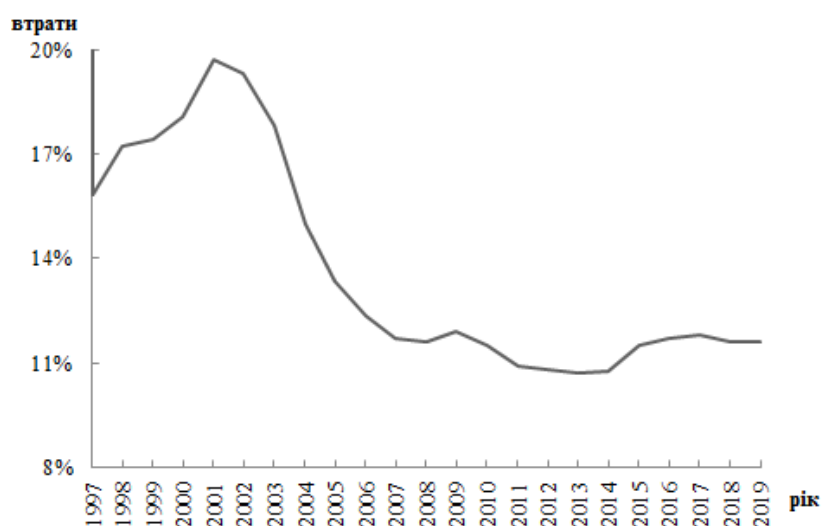


Рисунок 1.1 – Втрати електроенергії у електричних мережах за 1997 – 2014 рр.

Один із напрямків підвищення енергоефективності та надійності функціонування елементів електричної мережі та електроприймачів закладений у вирішенні проблеми електромагнітної сумісності, інтерес до якої в останні десятиліття значно зріс. Причиною цьому є збільшення споживання електричної енергії, зростання кількості чутливих до якості електроенергії пристроїв, а також нелінійного, різкозмінного та несиметричного навантаження, електромагнітний вплив якого здатен викликати зниження надійності та безпеки функціонування електротехнічного обладнання, прискорити процеси старіння матеріалу ізоляції та збільшити втрати електроенергії при її передачі та споживанні.

У якості основних способів забезпечення електромагнітної сумісності систем електропостачання із споживачем та зменшення втрат електроенергії при її передачі розглядають:

- оптимізацію завантаження електричних мереж під час їх проектування,

експлуатації та розвитку, у тому числі впровадження «розумних мереж», накопичувачів та розподіленої генерації;

– переведення електричних мереж на більш високі рівні напруги, впровадження принципу «глибокого вводу»;

– застосування устаткування зі зменшеними технологічними витратами, у тому числі із використанням нових технологій;

– використання пристроїв для симетрування навантаження, управління потоками потужності, фільтрації вищих гармонічних складових та стабілізації напруги.

Значний внесок у дослідження цих питань зроблений українськими та закордонними вченими, серед яких А. Berman [1], M. Laughton [8], M. Bollen [3], M. Masoum [9], М. Асосков [22], Б. М. Бородулін [33], С. М. Бренков [46], О. Г. Гриб [93], А. Ф. Жаркін [188], І. В. Жежеленко [71], Ю. С. Железко [73], П. Ю. Каратєєв [92], Ю. В. Кондратьєв [96], П. Д. Лежнюк [104], Р. Р. Мамошин [110], Г. Г. Півняк [124], Ю. Л. Саєнко [91], В. В. Сероносов [151], А. К. Шидловський [187]. Напрацювання науковців у питаннях енергетики розкривають потенціал енергозбереження у системах електропостачання та пов'язаних із нею електроенергетичних підсистемах.

Враховуючи значення, яке приділяють проблемі електромагнітної сумісності у електроенергетиці, при оцінці ефективності передачі електроенергії разом із значенням технологічних втрат електроенергії необхідним є визначення ступеню погіршення її якості.

Дослідженню енергетичних процесів у мережах, від яких отримують живлення нетягові споживачі, локалізовані вздовж залізничної лінії, присвячені роботи О. Є. Врежесінського [55], С. В. Гришенка [59], О. М. Журавльова [74], Н. М. Малишевої [109], О. Ю. Попова [125], Є. О. Третьякова [171], Т. Е. Фіноченко [180]. Науковий інтерес до електропостачання нетягових споживачів викликаний електромагнітним впливом електрорухомого складу. При цьому потенційний негативний ефект на якість електроенергії від системи тягового електропостачання змінного струму більший ніж від системи постійного струму – за

однакових обсягах споживання електроенергії рівень електромагнітних завад, створених тяговим навантаженням залізниці змінного струму, перевищує генерацію перешкод від дванадцятипульсних випрямлячів тягових підстанцій у системі електропостачання залізниці постійного струму [34]. Крім того, для системи тяги змінного струму характерним є несиметричний відбір потужності з трифазної мережі [7, 98, 156, 166], що додатково погіршує якість електричної енергії у мережі нетягового споживача.

1.2 Ефективність роботи нетягових мереж залізниць

Конструкція та сфера застосування системи нетягового електропостачання залежить від принципів електрифікації залізниць, поширених у різних державах. Так, зокрема, до нетягового навантаження у країнах західної Європи відносять: обладнання залізничної сигналізації, телекерування та комунікації, власні потреби залізничних станцій, підстанції локомотивних та вагонних депо, інше допоміжне обладнання, що належить залізниці але не виконує перевізної роботи. Живлення нетягового навантаження забезпечується від електричних ліній, що виходять з тягових підстанцій, або від мереж місцевої розподільчої компанії [16]. Існують електричні системи, де живлення нетягового обладнання забезпечується від тягової мережі, наприклад, у Швейцарії від тягової мережі напругою 15 кВ та частотою 16,7 Гц через понижуючі трансформатори підключені пристрої сигналізації, пристрої керування та обігріву стрілочних переводів [123]. На підстанціях системи тяги змінного струму Європи, Індії, Китаю застосовують для живлення тягової мережі однофазні трансформатори окремо або об'єднані у неповну зірку, тому для живлення нетягового споживача встановлюють додаткові трифазні трансформатори. На тягових підстанціях систем постійного струму, де встановлені шестипульсні чи дванадцятипульсні випрямлячами, тягові трансформатори трифазні та часто мають додаткову обмотку для живлення нетягового навантаження [15].

В Україні використовують концепцію будівництва тягових підстанцій залізниць, електрифікованих змінним або постійним струмом, де головний понижувальний трансформатор (ГПТ) має трифазне виконання. У минулому такий підхід дозволив приєднувати до шин тягових підстанцій трифазні електричні мережі для

живлення станцій, депо, пристроїв колійної автоматики, інших об'єктів залізничної інфраструктури, електричних приймачів сторонніх (незалізничних) та побутових споживачів, що істотно збільшує сферу застосування системи нетягового електропостачання. Від тягового трансформатора отримують живлення підприємства нафтової, гірничої, паливної, аграрної промисловості, які пов'язані залізничним сполученням, населені пункти, окремі райони у містах. Наразі, АТ «Укрзалізниця» є власником електричних мереж та виконує функції з розподілу електричної енергії, а створене Укрзалізницею підприємство ТОВ «Енерго Збут Транс» здійснює комерційну діяльність із постачання електроенергії побутовим споживачам.

Електроенергетичним комплексом Укрзалізниці за рік переробляється близько 13 000 млн. кВт·год. Передача електроенергії електромережами залізниць стороннім споживачам складає близько 7 800 млн. кВт·год, в тому числі 800 млн·кВт·год споживачам, що отримують живлення безпосередньо від мереж залізниці. Стороннім споживачам реалізується електроенергії на суму від 800 млн. гривень. Дохід від передачі електроенергії місцевими мережами залізниці для споживачів першого та другого класу напруги відповідно складає 50 та 40 млн. гривень за рік [20].

Згідно з даними НКРЕКП та Міністерства енергетики та захисту довкілля за 2018 р. [75, 164] технологічні втрати електроенергії (ТВЕ) при її передачі у мережах залізниць становлять 408 млн кВт·год або 6,7 % відпуску електроенергії у мережу, а тривалості планових та непланових перерв в електропостачанні становлять 283 та 208 хв відповідно. Значення цих показників у два рази менше від середніх значень по країні. Загальна довжина ліній електропостачання нетягових споживачів Укрзалізниці приведена у табл. 1.4 [20].

Повітряні лінії для живлення нетягових споживачів можуть бути змонтовані на опорах контактної мережі, що зменшує ширину зближення її проводів із контактною мережею до 6 м та відповідно збільшує ймовірність виникнення понаднормативних значень показників якості електроенергії. До таких ліній відноситься лінія поздовжнього електропостачання напругою 10 кВ та лінія «два проводи-

рейка» напругою 27,5 кВ.

Таблиця 1.4 Експлуатаційна довжина повітряних та кабельних ліній електропостачання Укрзалізниці

Номінальна напруга ліній, кВ	довжина ліній, км	
	повітряні	кабельні
110	233	1,12
35	119	0,82
27,5 (лінія «два проводи-рейка»)	4 369	відсутні
10	14 277	1931
6	відсутні	786

Також експлуатація ліній нетягового електропостачання напругою 27,5 кВ, супроводжується кондуктивним впливом через гальванічний зв'язок із тяговою мережею. Причиною цього є особливість конструкції, яка відображена у назві лінії – «два проводи-рейка» або ДПР, що вказує на використання рейкової колії замість третього фазного проводу. Лінія ДПР, як і контактна мережа, отримує живлення від розподільчого пристрою підстанції 27,5 кВ (рис. 1.2), що забезпечує живлення нетягових споживачів незалежно від режиму роботи контактної мережі. Таке технічне рішення свого часу дало можливість зменшити капітальні витрати на будівництво лінії під час електрифікації прилеглих до залізниці районів із малопотужними споживачами, але у сучасних умовах, при потребі забезпечити високу якість електричної енергії використання ліній ДПР може виявитись недоцільним, зважаючи на більшу кількість погіршуючих якість електроенергії факторів порівняно із іншими лініями нетягового електропостачання.

Власне, система ДПР є залізничним аналогом системи «два проводи-земля» (ДПЗ). Лінії ДПЗ з номінальним рядом напруги 3, 6, 22 та 35 кВ використовували на початку ХХ ст. для забезпечення електроенергією віддалених сільських господарств або місцевості із низькою густиною електричного навантаження [25, 120, 190]. З часом лінії ДПЗ із міркувань безпеки та електромагнітної сумісності були реконструйовані у трипровідні лінії, і залишились лише на залізницях, де у систе-

мі рейка-земля протікає струм, значення якого на порядок більше за струм навантаження нетягового споживача.

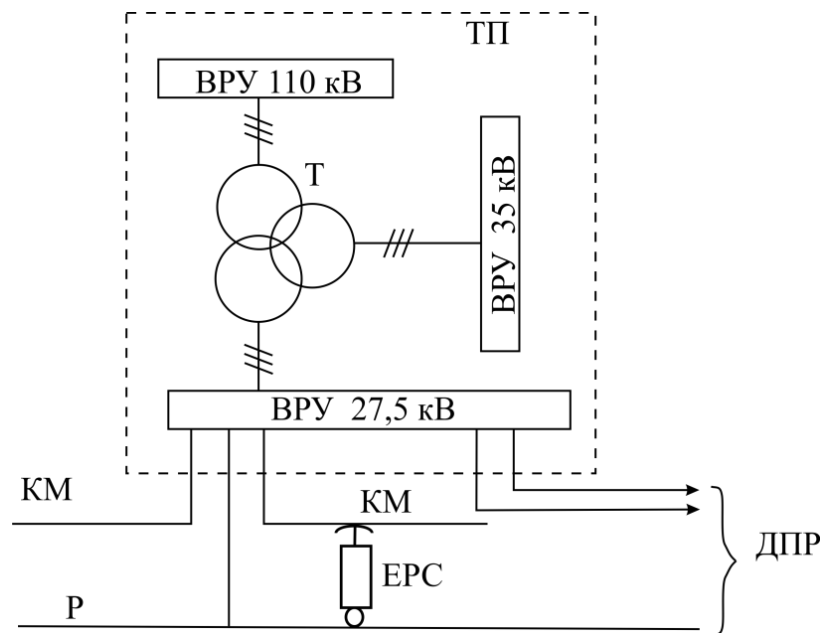


Рисунок 1.2 – Структурна схема тягової підстанції змінного струму: ТП – тягова підстанція; ВРУ – відкрита розподільча установка; Т – головний понижуючий трансформатор; КМ – контактна мережа; Р – рейка; ЕРС – електрорухомий склад; ДПР – лінія «два проводи-рейка»

Вплив системи тягового електропостачання на процес передачі електричної енергії, що описаний у [74, 180], зводиться до питання електромагнітної сумісності та пов'язаними із ними додатковими втратами електричної енергії та проблемою надійності електропостачання.

Індуковані у проводах лінії ДПР додаткові повздовжні електрорушійні сили, які можуть досягати 4 кВ, особливо наприкінці довжини зближення, викликають додаткові втрати електроенергії та падіння напруги. Якщо не брати до уваги падіння напруги від протікання тягового струму під впливом магнітного поля контактної мережі, потенціал рейки відносно землі практично не змінюється. При цьому, трикутник лінійних напруг на прийомному кінці лінії спотворюється, а його центр ваги виявляється зміщеним відносно центра ваги трикутника лінійних напруг на шинах підстанції. Останнє, у поєднанні із неоднорідністю самої лінії, призводить до різкої несиметрії системи лінійних напруг у лінії ДПР.

При проїзді електровозу потенціал у місці приєднання КТП ДПР до рейки збільшується. Найбільше його можливе значення буде у випадку роботи електро-

рухомого складу у режимі пуску. При пускових струмах величина потенціалу ре-йок перевищує значення, що відповідають 1...2 % номінальної напруги лінії ДПР. Величина наведеної напруги на проводах лінії ДПР від електричного поля тягової мережі також не перевищує 2 % від номінальної напруги лінії та має несуттєвий вплив на якість електроенергії [180].

Тяговий струм унаслідок роботи перетворювачів електрорухомого складу та специфіки параметрів системи тягового електропостачання має лише наближену до синусоїди форму, що обумовлює появу вищих гармонік у наведеній напрузі у лінії та збільшує несиметрію та несинусоїдність напруги при протіканні його рейкою.

До вищевикладеного слід додати, що якість напруги на шинах підстанції, від яких отримує живлення тягова мережа та відходять фідери лінії ДПР, може бути значно погіршена через нерівномірне завантаження тягового трансформатора та вплив системи зовнішнього електропостачання. Таким чином, на процес передачі електричної енергії лінією ДПР впливає низка шкідливих факторів, інтегральний вплив яких може призвести до перевищення визначених у стандарті допустимих значень показників якості електричної енергії.

У дослідженнях Фіночеко, Т. Е. [45, 178, 179, 180], Закарюкіна, В. П., та Крюкова, О. В. [77], які присвячені проблемі низької якості електроенергії у лініях ДПР, зафіксовані у кінці зони зближення лінії ДПР із тяговою мережею наступні значення показників якості: відхилення напруги до – 12 %; коефіцієнт несинусоїдності напруги у межах від 8,5 % до 12,7 %, несиметрія напруги – 7,5...10,6 %.

Незадовільна якість живлячої напруги призводить до погіршення умов роботи приймачів електроенергії, а саме збільшує можливість відмови їх роботи, зменшує термін експлуатації, викликає додаткові втрати потужності при її передачі та перетворенні. Відхилення напруги призводить до зменшення обертового моменту, зростання втрат потужності асинхронних двигунів та зменшення коефіцієнту потужності керованих вентильних перетворювачів. Несиметрична напруга викликає струми зворотної послідовності, що гальмують обертання ротора двигуна. Збільшення обертового моменту до потрібного значення пришвидшує старіння

ізоляції, тому робота у мережі із несиметричною напругою потребує використання двигунів із більшою потужністю, ніж вимагають виробничі потреби. Вищі гармоніки мають вплив на ізоляцію та ємнісні елементи, прискорюючи у них іонізаційні процеси, що, як наслідок, призводить до старіння матеріалу діелектрика та до відмови роботи електроприймачів.

Але у відомих наукових роботах не отримала відображення проблема, що також характерна для ліній ДПР. На відміну від звичайних трифазних електричних мереж, система нетягового електропостачання, що живиться від тягових шин підстанції залізниці електрифікованої змінним однофазним струмом, не може забезпечити одночасне двостороннє живлення споживачів, яке дозволяє покращити режим напруги, зменшити втрати електричної енергії, зменшити ймовірність виникнення перерв у системі електропостачання порівняно із одностороннім (консольним) живленням.

Однофазне навантаження, яким є електрорухомий склад залізниць, викликає нерівномірне завантаження фаз тягових обмоток трансформатора, від яких живиться лінія ДПР. З метою зменшення цього впливу на систему зовнішнього електропостачання однойменні фази обмоток високої напруги тягових трансформаторів по-різному приєднують до фаз живлячої мережі. На рис. 1.3 зображена схема живлення ділянки однофазного змінного струму, що живиться від трансформаторів тягових підстанцій із схемою з'єднання обмоток У/Д-11. Виводи a_T і b_T вторинних обмоток живлять контактну підвіску, вивід c_T приєднаний до рейки. Напруга між контактним проводом та рейкою у зоні між ТП1 та ТП2 синфазна до напруги U_A , а у наступній зоні до $-U_B$. Фази $a_T c_T$, та $c_T b_T$ безпосередньо з'єднані із рейкою і контактною мережею лівого та правого плеча живлення, та беруть на себе дві третіх від струмового навантаження своєї міжпідстанційної зони. За цієї схеми підключення фаза $b_T a_T$ у вторинній обмотці, та відповідно, фаза B_T у первинній є найменш завантаженими. Чергування приєднання фази B_T , як приведено на рис. 1.3, дозволяє частково компенсувати несиметрію напруги та струму у системі зовнішнього електропостачання при рівномірному русі поїздів на ділянці.

Приведені векторні діаграми фазних напруг трансформаторів якісно пока-

зують відмінності у конфігурації векторів трансформаторів на ділянці. Таким чином, чергування найменш завантаженої фази порушує одну із умов паралельної роботи трансформаторів – рівність груп з'єднання обмоток. Так, у контурах, що утворюють вторинні обмотки трансформаторів та тягова мережа, електрорушійні сили обмоток взаємокомпенсуються. У випадку з'єднання виводів b_T підстанцій 1 та 2 (пунктирна лінія на рис. 1.3 а) виникне замкнений контур із некомпенсованою електрорушійною силою обмоток трансформаторів, що викликатиме значний вирівнювальний струм.

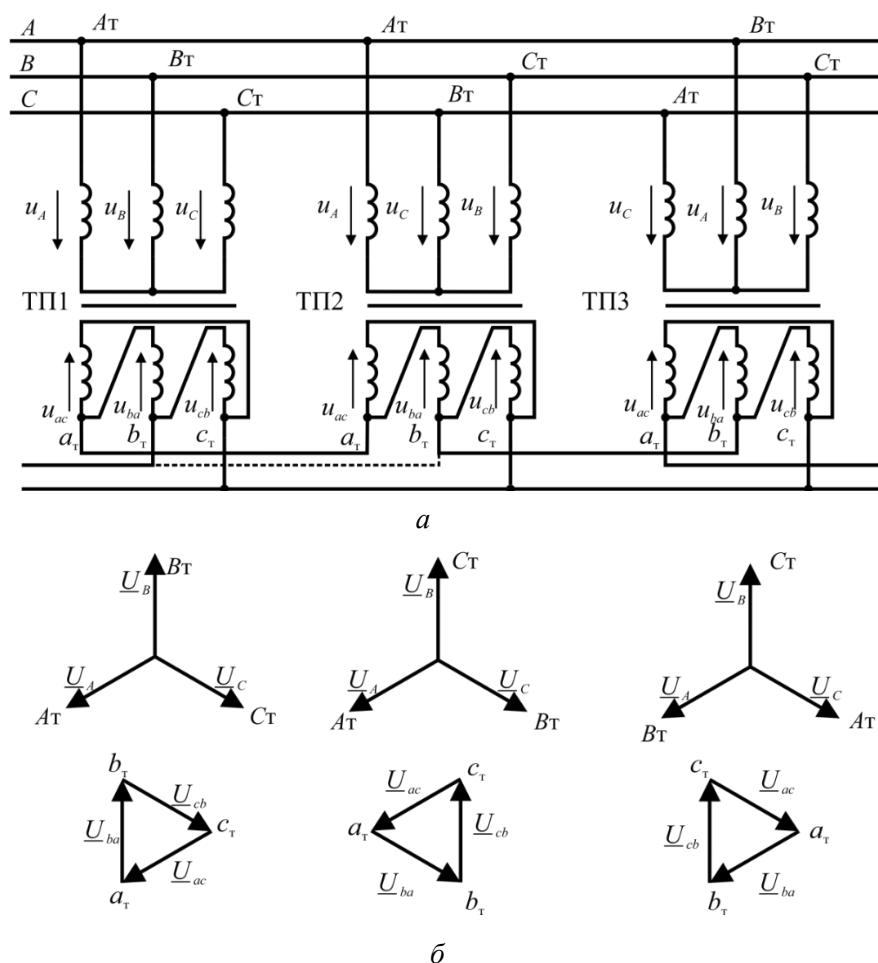


Рисунок 1.3 – Схема живлення ділянки однофазним змінним струмом: а – схема живлення; б – векторні діаграми напруг тягових обмоток; A_T, B_T, C_T – виводи первинної обмотки; a_T, b_T, c_T – виводи тягових обмоток

Лише між двома підстанціями із однаковим приєднанням виводів до системи зовнішнього електропостачання є можливість реалізації двосторонньої схеми живлення споживачів. Така комбінація можлива, проте на практиці зустрічається

не часто. Крім того, у разі збігу фаз трансформаторів суміжних підстанцій, лінії ДПР живляться за консольною схемою, що пов'язано із перетоками потужності між суміжними підстанціями.

Таким чином, для живлення нетягових споживачів на залізницях змінного струму використовують неефективну систему електропостачання, яка гальванічно пов'язана із тяговою мережею та перебуває під її електромагнітним впливом, конструктивно сприяє збільшенню несиметрії напруги при передачі електроенергії та не дозволяє реалізувати двостороннє живлення споживачів. До переліку експлуатаційних недоліків системи ДПР можна віднести відсутність можливості регулювати напругу в мережі нетягового електропостачання окремо від напруги тягової мережі, та неможливість проведення оперативних перемикачів у схемі без переривання електроживлення приєднаних споживачів. Розвиток конкуренції серед електроенергетичних компаній та зростання інтересу до проблеми якості електричної енергії можуть призвести до додаткових збитків на підставі скарг споживачів за неналежне надання послуг із розподілу електроенергії або спонука-ти споживача до приєднання власних мереж до мереж конкуруючих компаній.

Наразі, втрати електроенергії у лінії ДПР за даними філії «Енергозбут» Укрзалізниці у 2019 р. зросли до 5 911 тис. кВт·год проти 2 293 тис. кВт·год у 2017 р., що пов'язано із збільшенням об'єму переданої енергії споживачам, приєднаних до мережі, складовою частиною якої є лінії ДПР з 68 млн. кВт·год у 2017 р. та до 85 млн. кВт·год у 2019 р (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 Технологічні втрати у лінії ДПР, тис. кВт·год

Показник	2017 р.	2018 р.	2019 р.
Нормативні ТВЕ в лініях ДПР	2 774	5 835	6 296
Звітні ТВЕ	2 293	5 480	5 911
Частка ТВЕ відносно енергії на фідері лінії, %	1,2	2,2	2,3
Нетягове електроспоживання на шинах 27,5 кВ	185 452	250 127	258 367
Сумарне енергоспоживання споживачів, що живляться від ліній ДПР	68 331	70 803	85 246

Щорічний обсяг передачі електричної енергії лініями ДПР останні роки тримається на рівні 250 млн. кВт·год. Загальна їх довжина складає 4 369 км, що становить 80 % від довжини залізничних ліній в Україні, електрифікованих змінним струмом. Загалом на один кілометр лінії ДПР припадає близько 6,5 кВт встановленої потужності або близько 59 тис. кВт·год споживання електроенергії на рік.

Довжина залізниць у світі, електрифікованих системою змінного струму 25 кВ з трифазними ГПТ, становить близько 30 000 км, найбільша частка припадає на територію Росії, України, Казахстану та Білорусі.

1.3 Відомі способи підвищення ефективності роботи мережі ліній «два проводи-рейка»

Задача підвищення ефективності передачі електроенергії в лініях ДПР частково вирішується одночасно з проблемою підвищення якості електроенергії на шинах розподільчого пристрою тягової підстанції 27,5 кВ, за рахунок регулювання напруги бустер-трансформаторами, пристроями ємнісної компенсації, або іншим обладнанням [33, 57, 99, 114, 166, 167]. Наприклад, в [57] пропонується включення пристрою поздовжньої компенсації реактивної потужності на тяговій підстанції в рейковий фідер (рис. 1.4, а): у результаті покращується режим напруги в лініях, що живлять пристрої СЦБ, в лініях нетягових споживачів ДПР 27,5 кВ, а також у колах власних потреб тягової підстанції. Автори [79] пропонують використовувати пристрій симетрування тягового навантаження за схемою Штейнметца (рис. 1.4, б), перевагою якого є можливість окремо симетрувати струм правого та лівого плеча живлення тягової мережі.

Запропоновані рішення впливають на стан якості електричної енергії на тягових шинах підстанції, що позитивно позначаються на якості електропостачання нетягових споживачів, але не усувають визначених вище недоліків системи ДПР, зокрема, проблему із забезпеченням двостороннього живлення. Вирішення цієї проблеми теоретично можливе через досягнення повного симетрування тягового навантаження, що потребує комплексної модернізації всіх підстанцій, встановлення нового потужного обладнання та розробки програмного забезпечення для

динамічного управління параметрами симетруючого пристрою. Проте, у цьому контексті питання живлення нетягових споживачів, із потужністю меншої у 5-7 разів проти потужності тягового навантаження, не є основним. Тому доцільніше розглянути способи, направлені виключно на підвищення ефективності передачі електричної енергії лініями ДПР.

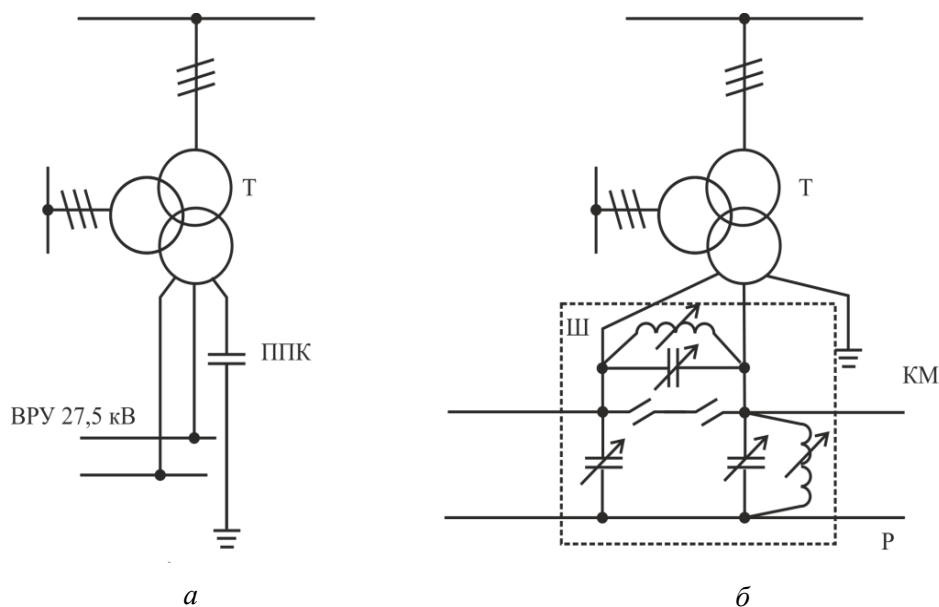


Рисунок 1.4 – Схема включення пристрою поздовжньої компенсації (ППК) (а) та пристрою симетрування навантаження (б): Т – головний понижуючий трансформатор; ВРУ – відкрита розподільча установка; КМ – контактна мережа; Р – рейка; Ш – пристрій симетрування за схемою Штейнметца

Відомий спосіб забезпечення двостороннього живлення ліній електропостачання полягає у переведенні лінії ДПР на живлення від третьої (додаткової) обмотки тягового трансформатора з номінальною напругою 35 кВ та схемою з'єднання фаз у «зірку» [112] (рис. 1.5).

Недоліком цього способу є необхідність проведення реконструкції існуючих ліній ДПР та заміни понижуючих трансформаторів нетягових споживачів, що пов'язано із підвищенням ступеня напруги передачі електроенергії. Крім того, наявність третьої обмотки трансформатора тягової підстанції не є обов'язковою або її номінальна напруга може відрізнятись від напруги третьої обмотки на суміжній підстанції, що в такому разі потребуватиме заміни обладнання підстанції.

Інша пропозиція полягає у відмові від використання рейкової колії та прокладанні третього фазного проводу на опорах контактної мережі (рис. 1.6) [175].

Відповідно ввід до КТП ДПР, підключений до рейок, приєднують на додатковий провід. При реалізації цього способу із нетягової мережі відводиться струм електрорухомого складу, що викликає несиметричне завантаження фаз лінії ДПР та не-синусоїдний спад напруги у системі рейка-земля, вирівнюються параметри лінії, а електромагнітний вплив тягової мережі стає рівнозначним. Індукована електрорушійна сила $\underline{E}_{ка}$, $\underline{E}_{кв}$, $\underline{E}_{ка}$ (рис. 1.7) змінює значення напруги у кожній фазі відносно землі однаково, а система векторів лінійних напруг \underline{U}_{ac} , \underline{U}_{ba} , \underline{U}_{cb} , у такому випадку, залишається симетричною.

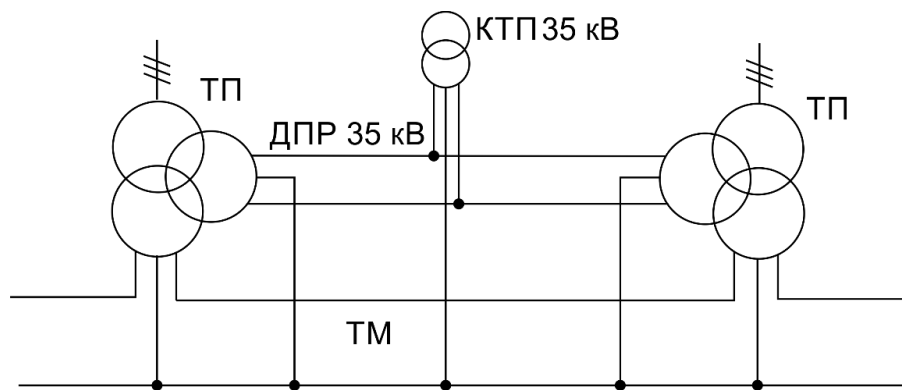


Рисунок 1.5 – Схема живлення нетягових споживачів від ДПР 35 кВ:
 ТП – тягова підстанція; КТП ДПР – комплектна трансформаторна підстанція;
 ТМ – тягова мережа; ДПР – лінія «два проводи-рейка»

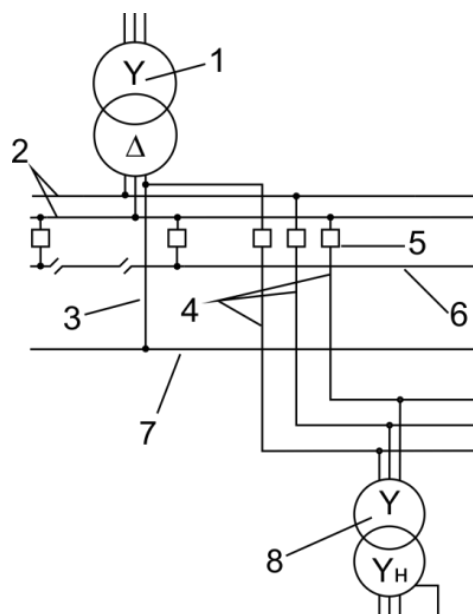


Рисунок 1.6 – Схема підключення ЛЗФ-27,5 кВ до шин тягової підстанції:
 1 – тяговий трансформатор; 2 – шини; 3 – рейковий фідер;
 4 – проводи ЛЗФ-27,5 кВ 5 – вимикач 6 – контактна мережа; 7 – рейка;
 8 – трансформатор КТП.

На рис. 1.7 пунктиром показано систему векторів напруги на шинах підстанції та індуковану струмом електрорушійну силу у фазах трипровідної лінії нетягового електропостачання, суцільною – їх суперпозицію.

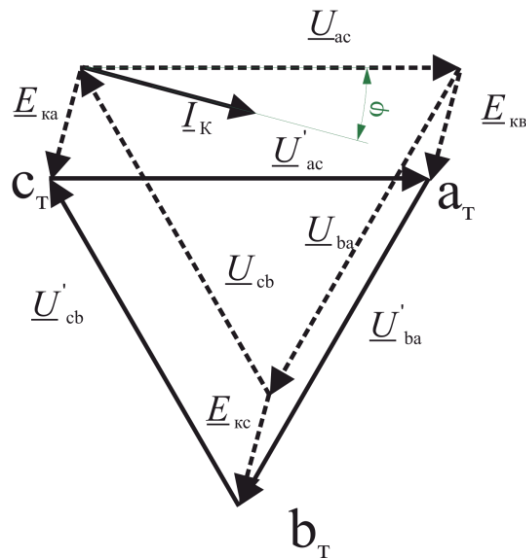


Рисунок 1.7 – Векторна діаграма напруги у лінії ЛЗФ-27,5 кВ

Модернізовану лінію нетягового електропостачання автори називають лінією з заземленою фазою (ЛЗФ), оскільки вона гальванічно зв'язана із рейкою через обмотку трансформатора. Це рішення дозволяє зменшити несиметрію та несинусоїдність напруги у споживачів за зменшення електромагнітного впливу та гальванічного впливу тягової мережі на трифазну лінію.

Інше технічне рішення запропоноване у [153] передбачає від'єднання фази трансформатора КТП-25 кВ від рейки та підключення її до заземлювача з регульованим індуктивним елементом (рис.1.8). Величина індуктивності L_p визначається із виразу

$$L_p = l(L - 2M), \quad (1.2)$$

де L – індуктивність контуру провід-земля одного кілометра лінії ДПР;

M – взаємна індуктивність між контурами, що утворюють фазні проводи одного кілометра лінії ДПР з землею.

l – відстань від тягової підстанції до місця підключення комплектної трансформаторної підстанції до проводів

Суть підходу полягає у тому, що спад напруги від протікання струму наван-

таження у землі, індуктивності та заземлювачі зрівнюють із спадом напруги у проводах. У результаті досягається зниження до допустимого рівня несиметрії струму та напруги у місці приєднання КТП ДПР.

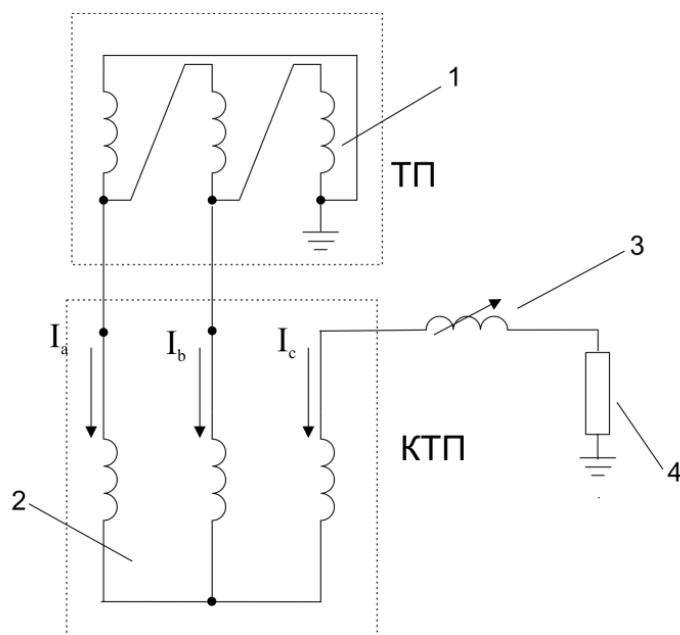


Рисунок 1.8 – Схема електропостачання нетягових споживачів змінного струму із вдосконаленим заземлювачем КТП: 1 – вторинна обмотка тягового трансформатора; 2 – первинна обмотка трансформатора КТП; 3 – регульована індуктивність; 4 – штучний заземлювач

Недоліком цього рішення є те, що залишається спільний контур для протікання струму електрорухомого складу та нетягового навантаження, а отже наслідки від гальванічного впливу зберігаються. Крім того фази лінії нетягового електропостачання у цьому разі продовжують бути рознесеними у просторі, що обумовлює несиметрію напруги від магнітного впливу тягової мережі.

Третій спосіб описано у [176], де у якості рішення проблем використовується додатковий трансформатор, приєднаний до районної обмотки тягового трансформатора підстанції. Вторинна обмотка додаткового трансформатора напругою 27,5 кВ живить трипровідну трифазну лінію, яка замінила лінію ДПР (рис. 1.9).

Такий спосіб дозволяє усунути кондуктивний зв'язок між системою тягового електропостачання і мережею для живлення нетягових споживачів, лінія стає симетричною та зрівнюється електромагнітний вплив тягової мережі на фазні проводи.

Автори [176] не розглядали можливість двостороннього живлення споживачів

чів ДПР, хоча, запропонована ними схема це дозволяє але лише, коли районні обмотки на суміжних підстанціях з'єднанні у «зірку» та навиті в один бік. Наприклад, вважаючи, що вектори напруги районних обмоток суміжних підстанцій зображені на векторних діаграмах, що на рис. 1.10., паралельна робота трансформаторів на трифазне навантаження можлива, коли поєднані виводи їх обмоток так, як показано пунктирними лініями на рис. 1.10.

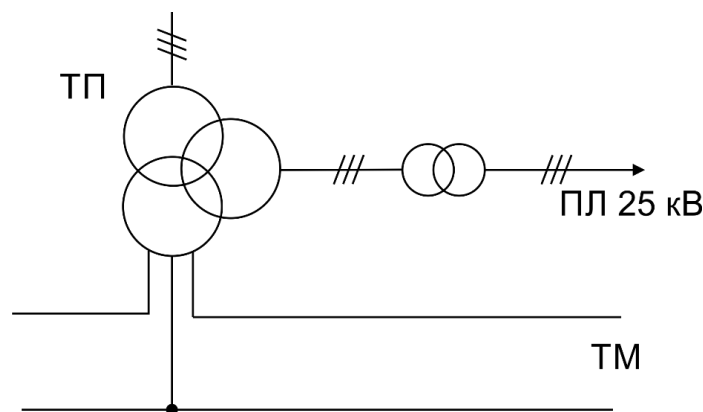


Рисунок 1.9 – Схема електропостачання нетягових споживачів змінного струму через додатковий трансформатор: ТП – тягова підстанція; ТМ – тягова мережа; ПЛ – повітряна лінія системи нетягового електропостачання

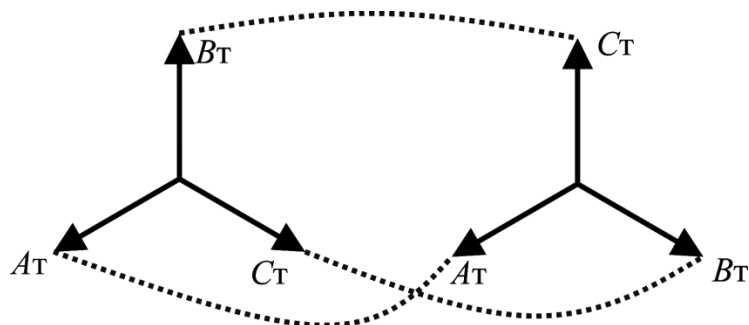


Рисунок 1.10 – Системи векторів напруги районних обмоток з'єднаних у «зірку»: A_T, B_T, C_T – виводи обмоток

Складніше врахувати фазування тягових підстанцій для паралельної роботи трансформаторів через районні обмотки, що з'єднані у «трикутник», оскільки конфігурація векторів їхньої напруги матиме дзеркальну симетрію.

Враховуючи те, що наявність районних обмоток не є обов'язковою, а також можливість експлуатації неоднотипних тягових трансформаторів на суміжних підстанціях, приходимо до висновку, що доцільно зберегти живлення від тягової обмотки із визначеним рівнем напруги 27,5 кВ, яка завжди з'єднана у «трикут-

ник», а для забезпечення двостороннього живлення використовувати фазоповоротний пристрій, приєднаний до шин тягових шин підстанції.

1.4 Висновки до розділу 1

У результаті виконаного огляду інформаційно-аналітичних джерел та наукових публікацій можна зробити наступні висновки.

1. Однією із базових умов існування та розвитку сучасних країн є ефективна робота електроенергетичної промисловості. Для передових держав із сильною економікою характерним є низьке значення технологічних втрат електричної енергії при її передачі. Крім величини втрат, враховуючи актуальність проблеми електромагнітної сумісності у сучасній енергетиці, показником ефективності роботи системи електропостачання також є ступінь погіршення якості електроенергії при її передачі.

2. Споживачі, що живляться від ліній «два проводи-рейка», знаходяться у найгірших умовах серед нетягових споживачів залізниці у аспекті електромагнітної сумісності через гальванічний зв'язок ліній із тяговою мережею. Іншим недоліком ліній ДПР є відсутність технічної можливості забезпечити, у більшості випадків, двостороннє живлення споживачів, яке дозволяє зменшити втрати електричної енергії та ймовірність виникнення перерви електропостачання у разі аварійного чи оперативного відключення підстанції або ділянки лінії ДПР.

3. Відомі дослідження процесу передачі енергії лінією ДПР зводяться до аналізу проблеми несиметрії та несинусоїдності напруги живлення, залишаючи відкритим питання із двостороннім живленням споживачів.

Тому з огляду на вищесказане, визначимо задачі, які необхідно вирішити для зменшення втрат та підвищення якості електричної енергії при її передачі лініями нетягового електропостачання, які гальванічно пов'язані з тяговою мережею:

1. Оцінити ступінь погіршення якості електричної енергії при її передачі лінією «два проводи-рейка».

2. Експериментально дослідити вплив реалізації схеми двостороннього живлення на якість електричної енергії, що передається споживачу лінією «два про-

води-рейка».

3. Розробити математичну модель системи електропостачання нетягових споживачів із можливістю сумісного моделювання електроенергетичних процесів у системі тягового та зовнішнього електропостачання.

4. Розробити спосіб забезпечення двостороннього живлення нетягових споживачів, що отримують живлення від шин 27,5 кВ незалежно від схеми підключення тягових підстанцій до лінії зовнішнього електропостачання.

5. Провести техніко-економічне обґрунтування впровадження запропонованого способу забезпечення двостороннього живлення нетягових споживачів.

Проведений у першому розділі аналіз проблеми ефективності електропостачання нетягових споживачів опубліковано в [37, 39, 84, 88].

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НЕСИМЕТРИЧНИХ ТА НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМІВ У СИСТЕМАХ НЕТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ

Вивчення електромагнітних процесів у електротехнічних системах, проектування та перевірка наукових гіпотез потребують проведення експериментальних та аналітичних досліджень на реальних об'єктах або моделях, що їх заміщують.

Системи зовнішнього та тягового електропостачання, разом із мережами живлення нетягових споживачів утворюють складний енергетичний комплекс із взаємним, багатофакторним електромагнітним впливом. Вивчення такої складної системи потребує застосування математичної моделі, яка дозволить розраховувати струми та напруги у вузлах схеми заміщення системи із необхідною точністю. У разі впровадження нового обладнання важливою задачею є моделювання електричних систем з урахуванням нелінійності параметрів елементів та їх впливу на перехідні процеси у системах електропостачання, що можливо при використанні моделей на основі диференціальних рівнянь стану електричного кола.

Тому виконання поставлених у роботі задач вимагає використання математичної моделі досліджуваної системи, що включає у себе нетягових споживачів, лінії ДПР, тягову мережу, підстанції, електрорухомий склад залізниці та систему зовнішнього електропостачання.

2.1 Обґрунтування підходів до побудови математичної моделі

Поєднання трифазних мереж із системою тягового електропостачання однофазного змінного струму ускладнює традиційні підходи до розрахунку електричних систем в усталених режимах, де трифазну мережу замінює однофазна схема заміщення, а у несиметричних режимах використовується метод симетричних складових.

Зважаючи на складність досліджуваної системи, розрахунки електричних величин доцільно проводити у фазних координатах, що є послідовним представленням багатофазних електричних систем. При використанні цього підходу без-

посередньо задаються параметри кожної фази системи електропостачання та відтворюється реальна схема підключень, що дозволяє враховувати групу трансформатора та чергування підключення фаз тягових підстанцій до системи зовнішнього електропостачання.

Наукові публікації, які підіймають питання математичного моделювання систем електропостачання, часто акцентують увагу на перевагах методу фазних координат, що пояснюється відносно простою його формалізацією для використання у пакетах прикладних програм для моделювання або проектування електричних систем. Наприклад, у роботі [76] розроблена модель використана для імітаційного моделювання системи тягового електропостачання з урахуванням графіку руху поїздів та реалізована у відповідному програмному комплексі Фазонорд. Запропонований авторами [76] підхід базується на символічному методі представлення синусоїдних величин, що значно спрощує розрахунок електричних кіл, але обмежує його застосування виключно в усталеному режимі та потребує застосування джерел струму та методу накладання при моделюванні нелінійного навантаження.

Водночас, використання моделей, побудованих на основі диференціальних рівнянь, дозволяє розв'язувати електричні кола із нелінійними параметрами, які задані у вигляді функцій залежних від електричних величин або часу. У такому разі форма кривої струму залежить від фази напруги живлення, на відміну від моделі із джерелом струму, де форма та фаза струму задається до початку розрахунку і не залежить від значення напруги.

Тому для побудови математичної моделі використано пофазний підхід до представлення електричних кіл, а рівняння балансу напруги у колі представлені у диференціальній формі.

2.2 Задачі та припущення, прийняті для розробки математичної моделі

Метою створення математичної моделі є відтворення електроенергетичних процесів у системі нетягового та зовнішнього електропостачання при дії несиметричного та несинусоїдного тягового навантаження.

Модель повинна передбачати можливість двостороннього живлення споживачів від лінії нетягового електропостачання, а також забезпечувати належну повноту властивостей реальних систем, точність розрахунку та економічність обчислюваних ресурсів; бути придатною для її застосування у програмно-обчислювальному середовищі; повинна враховувати значущі для поставлених задач властивості системи електропостачання.

До останніх у аспекті експлуатації лінії нетягового електропостачання залізниць відноситься несиметрія параметрів системи, індуктивний та кондуктивний вплив електрорухомого складу, наявність вищих гармонічних складових у тяговому струмі.

При побудові математичної моделі зроблені наступні припущення:

1. Власні параметри трифазних трипровідних ліній електропостачання симетричні, що на практиці досягається транспозицією проводів. Еквівалентна глибина протікання зворотного струму у землі прийнята за 1000 м, активний питомий опір землі – 0,05 Ом/км.

2. Активний опір та індуктивність розсіяння фаз трансформатора лінійні та симетричні, кількість витків у фазах обмоток однакова.

3. Основний магнітний потік замикається виключно через магнітопровід трансформатора, що зв'язано із прийнятою на залізницях схемою з'єднання обмоток тягового трансформатора «зірка-трикутник», яка практично компенсує гармоніки магнітного потоку нульової послідовності.

4. Магнітним впливом струму нетягового навантаження на режим напруги у контактній мережі знехтувано через на порядок менше його значення у порівнянні із струмом тягового навантаження. Струм у контактній мережі змінного струму становить 100...300 А проти 10...30 А у фазі лінії нетягового електропостачання.

5. Електричні параметри нетягового споживача лінійні та симетричні, що дозволяє досліджувати електромагнітний вплив на несиметрію та спотворення форми кривої напруги виключно від дії тягового навантаження та мережі електропостачання.

2.3 Декомпозиція складних систем електропостачання нетягових споживачів та ідентифікація їх параметрів

З метою можливості подальшої алгоритмізації процесу створення математичної моделі системи електропостачання ділянки залізниці змінного струму використано підхід, суть якого полягає у декомпозиції загальної системи на типові уніфіковані блоки-підсистеми, які математично описує система диференціальних рівнянь.

На рис. 2.1 зображено структурну схему ділянки живлення залізниці змінного струму, де СЗЕ – система зовнішнього електропостачання, С – електроенергетична система, Л – лінія електропередачі системи зовнішнього електропостачання, СТЕ – система тягового електропостачання, ТМ – тягова мережа, ДПР – лінія «два проводи-рейка», ЕРС – електрорухомий склад, ТП – тягова підстанція.

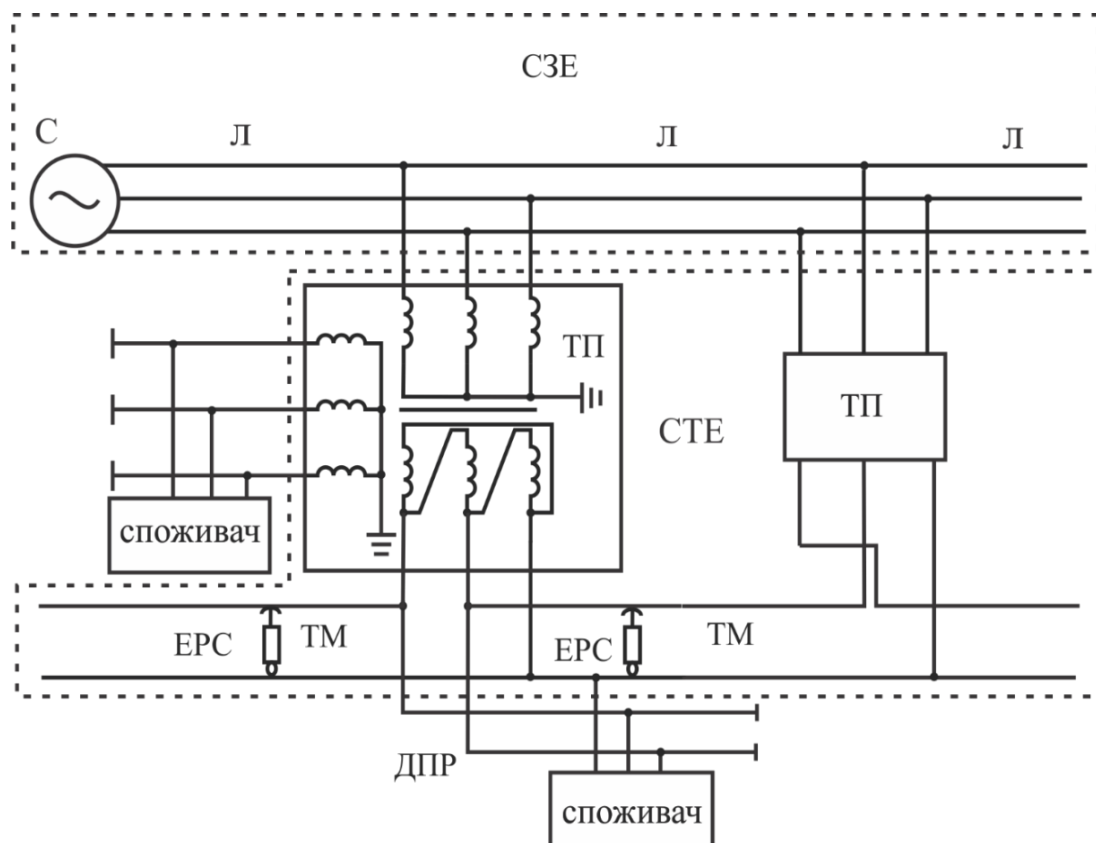


Рисунок 2.1 – Структурна схема живлення ділянки залізниці змінного струму

Виділимо у схемі живлення ділянки залізниці п'ять підсистем, що утворюють наступні уніфіковані блоки:

- 1) електроенергетична система;

- 2) трифазна лінія електропередачі;
- 3) тяговий трансформатор;
- 4) тягова мережа та електрорухомий склад;
- 5) лінія живлення нетягового навантаження та кінцевий споживач.

Проаналізуємо підсистеми, для кожної складемо рівняння балансу напруг для незалежних контурів та рівняння балансу струмів для всіх вузлів, які мають підсистеми.

2.3.1 Електроенергетична система

Перша підсистема представляє собою джерело трифазної напруги. До основних параметрів блоку, схема заміщення якого показана на рис. 2.2, відноситься активний опір, індуктивність та напруга електроенергетичної системи, від якої живиться досліджувана ділянка. Три джерела напруги з'єднані у спільну нейтральну точку, заземлену через активно-індуктивний опір, заміщують трифазне джерело напруги. Передбачається, що фазні проводи блоку електроенергетичної системи замикаються на землю через еквівалентну чотирипроменеву зірку провідностей лінії електропередачі. Для складання рівнянь стану скористаємось законами Кірхгофа, в якості змінних стану використано напруги на ємнісних елементах.

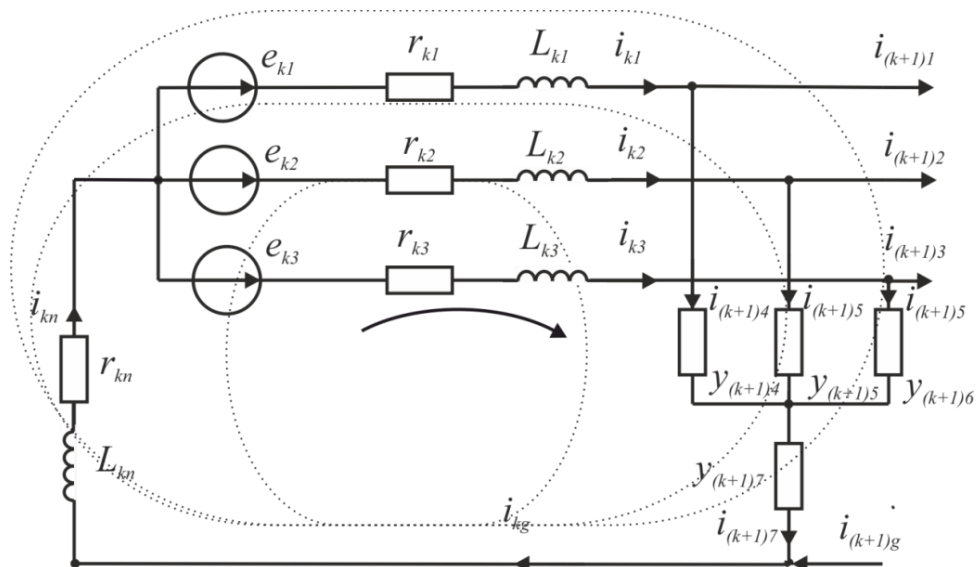


Рисунок 2.2 – Схема заміщення електроенергетичної системи

Група рівнянь для підсистеми із джерелом напруги у загальній формі має вигляд:

$$e_{k1} = i_{k1}r_{k1} + i'_{k1}L_{k1} + u_{c(k+1)4} + u_{c(k+1)7} + i_{kn}r_{kn} + i'_{kn}L_{kn}; \quad (2.1)$$

$$e_{k2} = i_{k2}r_{k2} + i'_{k2}L_{k2} + u_{c(k+1)5} + u_{c(k+1)7} + i_{kn}r_{kn} + i'_{kn}L_{kn}; \quad (2.2)$$

$$e_{k3} = i_{k3}r_{k3} + i'_{k3}L_{k3} + u_{c(k+1)6} + u_{c(k+1)7} + i_{kn}r_{kn} + i'_{kn}L_{kn}; \quad (2.3)$$

$$-i_{kn} + i_{k1} + i_{k2} + i_{k3} = 0; \quad (2.4)$$

$$i_{k1} - i_{(k+1)4} - i_{(k+1)1} = 0; \quad (2.5)$$

$$i_{k2} - i_{(k+1)4} - i_{(k+1)2} = 0; \quad (2.6)$$

$$i_{k3} - i_{(k+1)5} - i_{(k+1)3} = 0; \quad (2.7)$$

$$i_{(k+1)4} + i_{(k+1)5} + i_{(k+1)6} - i_{(k+1)7} = 0; \quad (2.8)$$

$$i_{(k+1)7} - i_{kg} - i_{(k+1)g} = 0; \quad (2.9)$$

$$i_{kn} - i_{kg} = 0; \quad (2.10)$$

$$u'_{c(k+1)4} = i_{(k+1)4} / y_{(k+1)4} = i_{(k+1)4} / C_1; \quad (2.11)$$

$$u'_{c(k+1)5} = i_{(k+1)5} / y_{(k+1)5} = i_{(k+1)5} / C_1; \quad (2.12)$$

$$u'_{c(k+1)6} = i_{(k+1)6} / y_{(k+1)6} = i_{(k+1)6} / C_1; \quad (2.13)$$

$$u'_{c(k+1)7} = i_{(k+1)7} / y_{(k+1)7} = i_{(k+1)7} / C_N, \quad (2.14)$$

де e_{kj} – фазна електрорушійна сила електроенергетичної системи, В;

i_{kj} – струм блоку, А;

i'_{kj} – похідна від струму i_{kj} , А/с;

r_{kj} – активний опір, Ом;

L_{kj} – коефіцієнт самоіндукції, Гн;

y_{kj} – провідність чотирипроменевої зірки лінії, 1/Ом;

u_{ckj} – напруга на ємності чотирипроменевої зірки, В;

C_1, C_N – ємності чотирипроменевої зірки, Ф;

k – порядковий номер підсистеми у повній моделі дослідної ділянки;

j – номер вітки у схемі заміщення.

У позначенні індексів струмів та елементів електричного кола, що відно-

сяться до землі або заземлення нейтральних точок, використано літери латинського алфавіту g та n , що відповідно позначають «землю» та «нейтраль». У наступних системах рівнянь, що описують блоки системи електропостачання, позначення електричних величин та параметрів схеми заміщення зберігаються.

Рівняння (2.1) – (2.3) записані для трьох незалежних контурів, що на рис. 2.2, рівняння (2.4) – (2.10) записані для вузлів схеми заміщення, рівняння (2.11) – (2.14) є рівняннями змінних стану. Аналогічно записані системи рівнянь для наступних підсистем.

2.3.2 Трифазна лінія електропередачі

Лінія електропередачі представлена у вигляді П-подібної схеми заміщення (рис. 2.3). До основних електричних параметрів блоку відноситься активний опір, власна індуктивність та взаємна індуктивність проводів, опір землі вздовж траси лінії та провідності чотирипроменевої зірки на початку та у кінці лінії. У зв'язку із транспозицією параметри лінії прийнято симетричними.

До системи рівнянь для трифазної лінії електропередачі входить три контурних рівняння, десять вузлових рівнянь та чотири рівняння змінних стану.

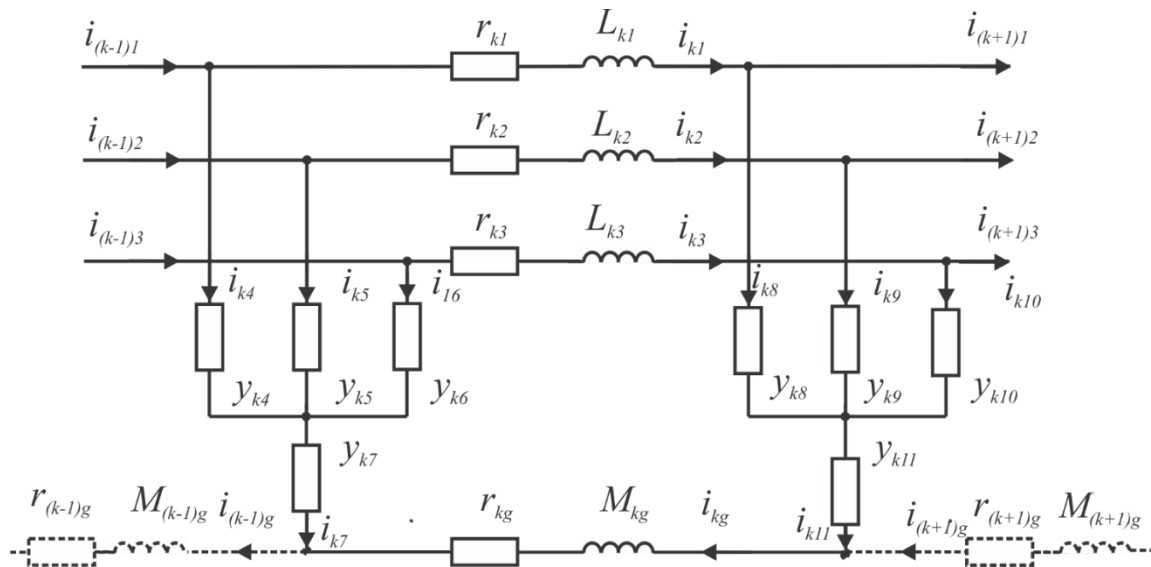


Рисунок 2.3 – Схема заміщення трифазної лінії електропередачі

$$-u_{k4} - u_{k7} + i_{k1}r_{k1} + i'_{k1}L_{k1} + u_{k8} + u_{k11} + i_{kg}r_{kg} + i'_{kg}M_{kg} = 0; \quad (2.15)$$

$$-u_{k5} - u_{k7} + i_{k2}r_{k2} + i'_{k2}L_{k2} + u_{k9} + u_{k11} + i_{kg}r_{kg} + i'_{kg}M_{kg} = 0; \quad (2.16)$$

$$-u_{k6} - u_{k7} + i_{k3}r_{k3} + i'_{k3}L_{k3} + u_{k10} + u_{k11} + i_{kg}r_{kg} + i'_{kg}M_{kg} = 0; \quad (2.17)$$

$$-i_{k1} - i_{k4} + i_{(k-1)1} = 0; \quad (2.18)$$

$$-i_{k2} - i_{k5} + i_{(k+1)2} = 0; \quad (2.19)$$

$$-i_{k3} - i_{k6} + i_{(k+1)3} = 0; \quad (2.20)$$

$$-i_{k7} + i_{k4} + i_{k5} + i_{k6} = 0; \quad (2.21)$$

$$i_{k7} - i_{(k-1)g} + i_{kg} = 0; \quad (2.22)$$

$$i_{k1} - i_{k8} - i_{(k+1)1} = 0; \quad (2.23)$$

$$i_{k2} - i_{k9} - i_{(k+1)2} = 0; \quad (2.24)$$

$$i_{k3} - i_{k10} - i_{(k+1)3} = 0; \quad (2.25)$$

$$i_{k8} + i_{k9} + i_{k10} - i_{k11} = 0; \quad (2.26)$$

$$i_{k11} - i_{kg} + i_{(k+1)g} = 0, \quad (2.27)$$

$$u'_{ck4} = i_{k4} / y_{k4} = i_{k4} / C_1; \quad (2.28)$$

$$u'_{ck5} = i_{k5} / y_{k5} = i_{k5} / C_1, \quad (2.29)$$

$$u'_{ck6} = i_{k6} / y_{k6} = i_{k6} / C_1; \quad (2.30)$$

$$u'_{ck7} = i_{k7} / y_{k7} = i_{ck} / C_N, \quad (2.31)$$

$$u'_{ck8} = i_{k8} / y_{k8} = i_{k8} / C_1; \quad (2.32)$$

$$u'_{k9} = i_{k9} / y_{k9} = i_{k9} / C_1; \quad (2.33)$$

$$u'_{ck10} = i_{k10} / y_{k10} = i_{k10} / C_1; \quad (2.34)$$

$$u'_{ck11} = i_{k11} / y_{k11} = i_{ck11} / C_N, \quad (2.35)$$

де M_{kg} – коефіцієнт взаємоіндукції лінії, Гн.

Магнітний зв'язок між лінійними проводами враховується через включення коефіцієнта взаємоіндукції у вітку із струмом, що протікає у землі. Чотирипроменева зірка, через яку струм у фазах лінії замикається на землю, утворена шляхом еквівалентних перетворень трикутника міжфазних провідностей та провідності струму нульової послідовності лінії. Такий підхід дозволяє спростити математичний опис блоку, зменшуючи кількість невідомих та контурів у підсистемі. Під час розрахунків електричних величин у лініях електропередачі напругою менше за 220 кВ активною

складовою ємнісної провідності лінії, зазвичай, нехтують. Користуючись тим, що переважна більшість підстанцій в Україні отримує живлення від мереж із напругою 35-154 кВ, поздовжні та поперечні провідності трифазної лінії прийняті ємнісними.

Оскільки підхід до перетворення провідностей лінії у чотирипроменеву зірку обмежено висвітлений у навчальних посібниках та науковій літературі, додатково пояснимо його, використавши теорію лінійних електричних кіл.

На рис. 2.4 зображено зірку, у променях якої ємнісні елементи C_1 та C_N . Елемент C_1 – фазна ємність, яка визначає ємнісний опір прямої та зворотної послідовності трифазної лінії та розраховується за формулою

$$C_1 = C_0 + 3C_M, \quad (2.36)$$

де C_0 – ємність фази відносно землі або ємність нульової послідовності;

C_M – взаємна ємність між фазами лінії.

Остання складова у (2.36) отримана шляхом еквівалентного перетворення трикутника міжфазних ємностей у зірку (рис. 2.5, а та б).

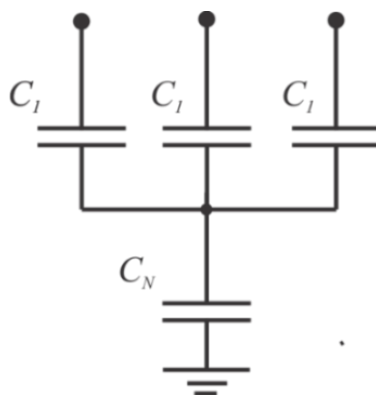


Рисунок 2.4 – Чотирипроменева зірка ємнісних провідностей трифазної лінії

Якщо об'єднати ємності нульової послідовності у еквівалентний елемент, то його значення повинно дорівнювати потроєному значенню C_0 (рис. 2.5, в). Схеми, де струми нульової послідовності протікають у променях зірки через ємність C_1 , не відповідають дійсній фізичній сутності процесів у лінії. Компенсувати дію спаду напруги від струмів нульової послідовності можливо шляхом включення послідовно з $3C_0$ потроєного значення ємності C_1 із від'ємним знаком (рис. 2.5, в).

Таким чином ємність нейтралі C_N визначається за формулою

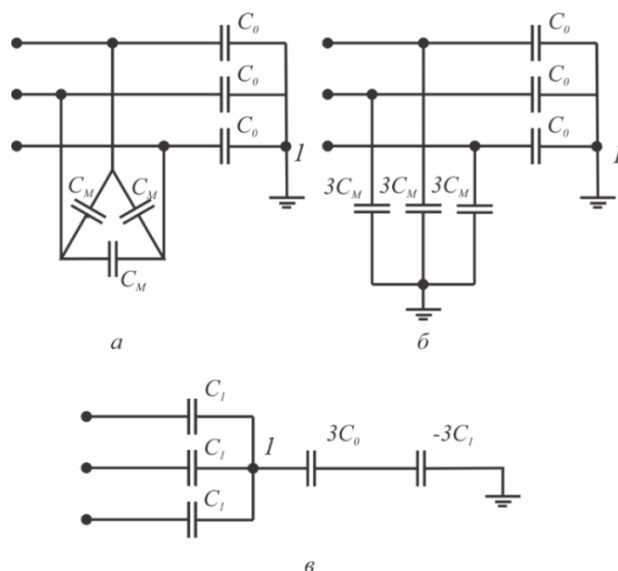


Рисунок 2.5 – Перетворення ємностей трифазної лінії у чотирипроменеву зірку

$$C_N = \frac{1}{\frac{1}{3} \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_1} \right)} = \frac{3C_0C_1}{C_1 - C_0}. \quad (2.37)$$

Виразивши C_M з (2.36), формула (2.37) отримує вигляд

$$C_N = \frac{C_0C_1}{C_M}. \quad (2.38)$$

Значення C_0 та C_1 на кілометр довжини визначаються за формулами

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_a}{\ln \left(2 \frac{h_{\text{сер}} D_{\text{сер}}}{R h'_{\text{сер}}} \right)}, \quad (2.39)$$

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_a}{\ln \left(2 \frac{h_{\text{сер}}}{R} \left(\frac{h'_{\text{сер}}}{D_{\text{сер}}} \right)^2 \right)}, \quad (2.40)$$

де ϵ_a – абсолютна діелектрична проникність середовища, Ф/м;

R – радіус фазного проводу лінії, м;

$h_{\text{сер}}$ – середньгеометрична відстань між землею та фазним проводом, м;

$h'_{\text{сер}}$ – середньгеометрична відстань між фазним проводом та дзеркальним відображенням іншого фазного проводу, м;

$D_{\text{сер}}$ – середньгеометрична відстань між фазними проводами, м;

Питомий коефіцієнт самоіндукції фазного проводу L та взаємоіндукції M , з врахуванням припущень про глибину протікання зворотного струму, розраховується наступним чином [32]:

$$L = \left(0.1451g \frac{D_{\text{сер}}}{R} + 0,016 \right) / 2\pi f, \quad (2.41)$$

$$M = 0.1451g \frac{1000}{2\pi f D_{\text{сер}}}, \quad (2.42)$$

де $f = 50$ Гц – основна частота струму мережі.

Параметри лінії розраховані для проводу АС150/24 трифазної одноланцюгової лінії, змонтовані на опорах типу 1П110-1 [161, 162] приведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Питомі значення параметрів схеми заміщення лінії на 1 км довжини

Активний опір проводу, Ом/км	Коефіцієнт самоіндукції, Гн/км	Коефіцієнт взаємоіндукції, Гн/км	Фазна ємність, Ф/км	Ємність нейтралі, Ф/км	Активний опір землі, Ом/км
0,198	$1,422 \cdot 10^{-3}$	$1,051 \cdot 10^{-3}$	$8,157 \cdot 10^{-9}$	$0,262 \cdot 10^{-9}$	0,05

2.3.3 Тяговий трансформатор

Використання моделі, яка дозволяє оцінювати вплив від зміни конструктивних параметрів обладнання на електромагнітні процеси, має істотне практичне значення. Тому використано модель трансформатора, яка враховує активний та індуктивний опір обмоток, розміри елементів магнітної системи, кількість витків у обмотках, насичення магнітної системи та дозволяє розраховувати струми у обмотках та основний магнітний потік у магнітопроводі. Схеми заміщення обмоток та магнітопроводу представлені на рис. 2.6-2.9.

Рівняння для первинної обмотки трансформатора мають вигляд:

$$-u_{(k-1)8} - u_{(k-1)11} + i_{k1}r_{k1} + \phi_{k1}' w_{k1} + i_{k1}'L_{k1} + i_{k4}r_{k4} + i_{k4}'L_{k4} = 0; \quad (2.43)$$

$$-u_{(k-1)9} - u_{(k-1)11} + i_{k2}r_{k2} + i_{k2}'L_{k2} + \phi_{k2}' w_{k2} + i_{k4}r_{k4} + i_{k4}'L_{k4} = 0; \quad (2.44)$$

$$-u_{(k-1)10} - u_{(k-1)11} + i_{k3}r_{k3} + i_{k3}'L_{k3} + \phi_{k3}' w_{k3} + i_{k4}r_{k4} + i_{k4}'L_{k4} = 0; \quad (2.45)$$

$$i_{k1} + i_{k2} + i_{k3} - i_{k4} = 0; \quad (2.46)$$

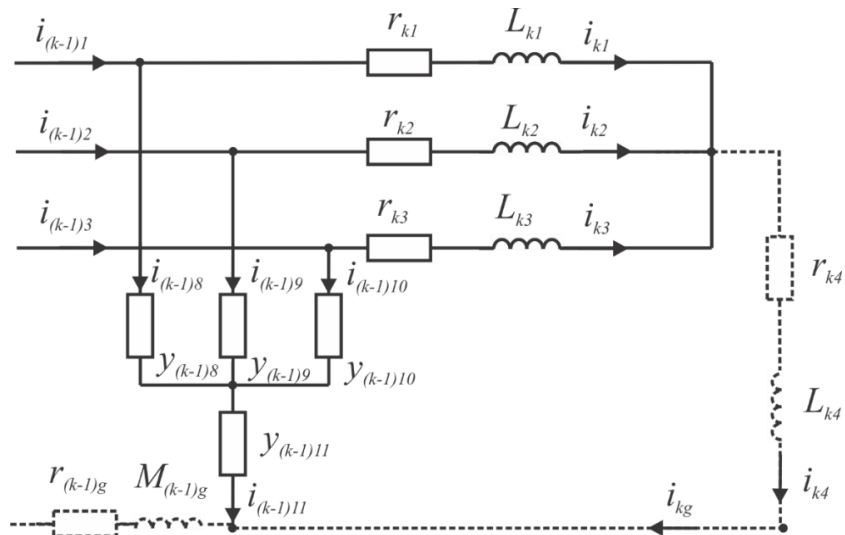


Рисунок 2.6 – Схема заміщення обмотки високої напруги (первинної обмотки) тягового трансформатора

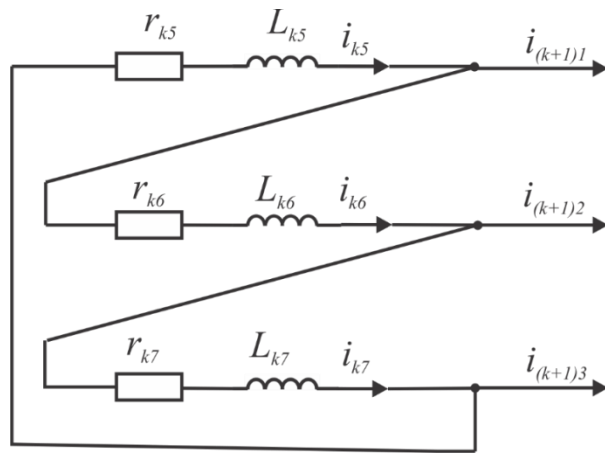


Рисунок 2.7 – Схема заміщення тягової обмотки тягового трансформатора

$$-i_{kg} + i_{k4} = 0; \quad (2.47)$$

$$i_{(k-1)11} + i_{kg} + i_{(k-1)g} = 0; \quad (2.48)$$

$$-i_{k1} - i_{(k-1)8} + i_{(k-1)1} = 0; \quad (2.49)$$

$$-i_{k2} - i_{(k-1)9} + i_{(k+1)2} = 0; \quad (2.50)$$

$$-i_{k3} - i_{(k-1)10} + i_{(k+1)3} = 0; \quad (2.51)$$

$$i_{(k-1)8} + i_{(k-1)9} + i_{(k-1)10} - i_{(k-1)11} = 0; \quad (2.52)$$

$$u'_{ck8} = i_{k8} / y_{k8} = i_{k8} / C_1; \quad (2.53)$$

$$u'_{k9} = i_{k9} / y_{k9} = i_{k9} / C_1; \quad (2.54)$$

$$u'_{ck10} = i_{k10} / y_{k10} = i_{k10} / C_1; \quad (2.55)$$

$$u'_{ck11} = i_{k11} / y_{k11} = i_{ck11} / C_N. \quad (2.56)$$

Рівняння для тягової обмотки трансформатора мають вигляд:

$$i_{k5}r_{k5} + i_{k5}'L_{k5} + i_{k6}r_{k6} + i_{k6}'L_{k6} + i_{k7}r_{k7} + i_{k7}'L_{k8} + w_{k2}\phi_1' + w_{k2}\phi_2' + w_{k2}\phi_3' = 0; \quad (2.57)$$

$$i_{k5} - i_{k6} - i_{(k+1)1} = 0; \quad (2.58)$$

$$i_{k6} - i_{k7} - i_{(k+1)2} = 0; \quad (2.59)$$

$$i_{k7} - i_{k5} - i_{(k+1)3} = 0. \quad (2.60)$$

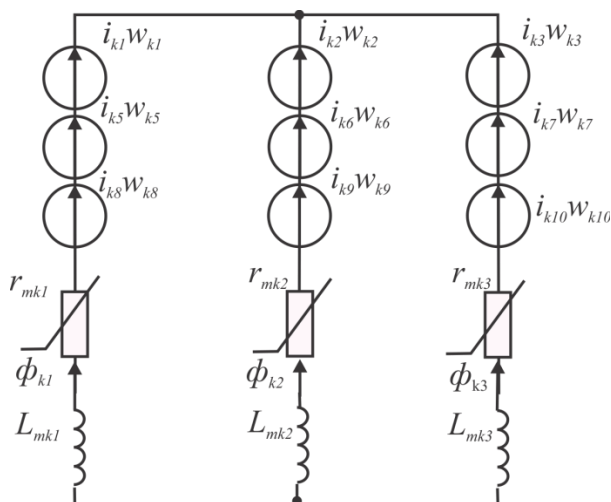


Рисунок 2.8 – Схема заміщення магнітної системи тягового трансформатора

Рівняння для магнітопроводу трансформатора мають вигляд:

$$i_{k1}w_{k1} + i_{k5}w_{k5} + i_{k8}w_{k8} - (i_{k2}w_{k2} + i_{k6}w_{k6} + i_{k9}w_{k9}) = \phi_{k1}r_{km1} + \phi_{k1}'L_{km1} - (\phi_{k2}r_{km2} + \phi_{k2}'L_{km2}); \quad (2.61)$$

$$i_{k2}w_{k2} + i_{k6}w_{k6} + i_{k9}w_{k9} - (i_{k3}w_{k3} + i_{k7}w_{k7} + i_{k10}w_{k10}) = \phi_{k2}r_{km2} + \phi_{k2}'L_{km2} - (\phi_{k3}r_{km3} + \phi_{k3}'L_{km3}); \quad (2.62)$$

$$\phi_{k1} + \phi_{k2} + \phi_{k3} = 0; \quad (2.63)$$

$$-\phi_{k1} - \phi_{k2} - \phi_{k3} = 0, \quad (2.64)$$

де ϕ_{kj} – магнітний потік, Вб;

ϕ'_{kj} – похідна від ϕ_{kj} , Вб/с;

r_{mkj} – активний магнітний опір, Гн;

L_{mkj} – магнітна індуктивність (див. вираз (2.84) та (2.85)), $\text{Гн}^{-1} \cdot \text{с}$.

Районну обмотку тягового трансформатора з'єднують за схемою зірки або трикутника, тому приведено дві групи рівнянь, які можуть входити у модель підсистеми (рис. 2.9).

Система рівнянь для обмотки живлення нетягового навантаження при її з'єднанні у «трикутник»:

$$i_{k8}r_{k8} + i_{k8}'L_{k8} + i_{k9}r_{k9} + i_{k9}'L_{k9} + i_{k10}r_{k10} + i_{k10}'L_{k10} + w_{k2}\phi_{k1}' + w_{k2}\phi_{k2}' + w_{k2}\phi_{k3}' = 0; \quad (2.65)$$

$$i_{k8} - i_{k9} - i_{(k+1)1} = 0; \quad (2.66)$$

$$i_{k9} - i_{k10} - i_{(k+1)2} = 0; \quad (2.67)$$

$$i_{k10} - i_{k8} - i_{(k+1)3} = 0. \quad (2.68)$$

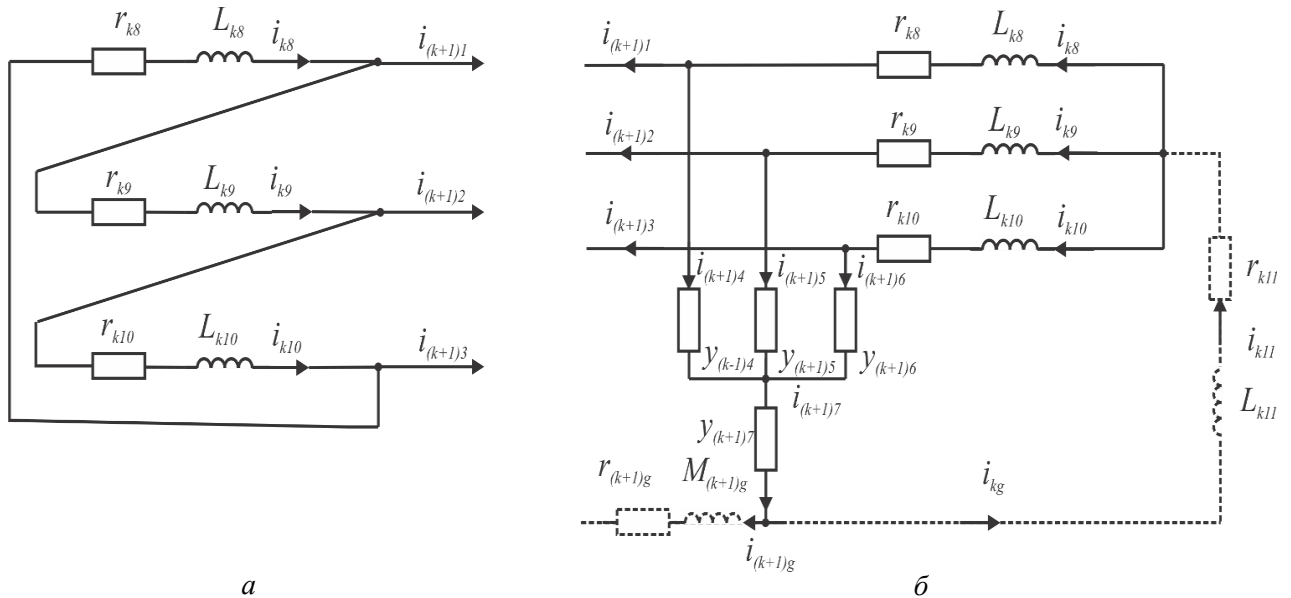


Рисунок 2.9 – Схема районної обмотки тягового трансформатора: для схеми з'єднання «трикутник» (а) та «зірка» (б)

Система рівнянь для обмотки живлення нетягового навантаження при її з'єднанні у «зірку»:

$$u_{(k+1)4} + u_{(k+1)7} + i_{k8}r_{k8} + \phi_{k1}'w_{k1} + i_{k8}'L_{k8} + i_{k11}r_{k11} + i_{k11}'L_{k11} = 0; \quad (2.69)$$

$$u_{(k+1)5} + u_{(k+1)7} + i_{k9}r_{k9} + \phi_{k2}'w_{k2} + i_{k9}'L_{k9} + i_{k11}r_{k11} + i_{k11}'L_{k11} = 0; \quad (2.70)$$

$$u_{(k+1)6} + u_{(k+1)7} + i_{k10}r_{k10} + \phi_{k3}'w_{k3} + i_{k10}'L_{k10} + i_{k11}r_{k11} + i_{k11}'L_{k11} = 0; \quad (2.71)$$

$$i_{k8} + i_{k9} + i_{k10} - i_{kn} = 0; \quad (2.72)$$

$$i_{(k+1)7} - i_{kg} + i_{(k+1)g} = 0; \quad (2.73)$$

$$i_{k8} - i_{(k+1)1} + i_{(k+1)4} = 0; \quad (2.74)$$

$$i_{k9} - i_{(k+1)2} + i_{(k+1)5} = 0; \quad (2.75)$$

$$i_{k10} - i_{(k+1)3} + i_{(k+1)6} = 0; \quad (2.76)$$

$$i_{(k+1)4} + i_{(k+1)5} + i_{(k+1)6} - i_{(k+1)7} = 0; \quad (2.77)$$

$$i_{kg} - i_{k11} = 0; \quad (2.78)$$

$$u'_{c(k+1)4} = i_{(k+1)4} / y_{(k+1)4} = i_{(k+1)4} / C_1; \quad (2.79)$$

$$u'_{c(k+1)5} = i_{(k+1)5} / y_{(k+1)5} = i_{(k+1)5} / C_1; \quad (2.80)$$

$$u'_{c(k+1)6} = i_{(k+1)6} / y_{(k+1)6} = i_{(k+1)6} / C_1; \quad (2.81)$$

$$u'_{c(k+1)7} = i_{(k+1)7} / y_{(k+1)7} = i_{(k+1)7} / C_N, \quad (2.82)$$

Таким чином 36 рівнянь визначає підсистему із тяговим трансформатором у якого районна обмотка з'єднана за схемою «зірка» та 26 рівнянь, коли районна обмотка зібрана у трикутник.

Коефіцієнт пропорційності між магнітним потоком та джерелом цього потоку прийнято інтерпретувати до електричної провідності або опору. Той факт, що магнітний потік у феромагнітному осерді відстає від струму у обмотці на кут α при заміні нелінійного струму його синусоїдним еквівалентом, дає підставу використовувати поняття комплексного магнітного опору \underline{Z}_m .

Таким чином, вираз комплексної магніторушійної сили (МРС) матиме наступний вигляд

$$\underline{F} = \underline{\Phi} \cdot \underline{Z}_m = \underline{\Phi} \cdot R_m + \underline{\Phi} \cdot jX_m, \quad (2.83)$$

де $\underline{\Phi}$, \underline{F} , \underline{Z}_m – відповідно магнітний потік, магніторушійна сила та повний магнітний опір у комплексній формі;

R_m , X_m – активний та індуктивний опір магнітного осердя.

Використовуючи аналогію до символного методу розрахунків електричних кіл з синусоїдним струмом вираз (2.83) можна переписати у вигляді

$$f_{\text{мрс}} = \phi \cdot r_m + \phi' \cdot L_m, \quad (2.84)$$

де $f_{\text{мрс}}$ – магніторушійна сила, складова $\phi \cdot r_m$ – визначає спад магнітної напруги, який перебуває із магнітним потоком у фазі, а $\phi' \cdot L_m$ – спад магнітної напруги, що випереджає магнітний потік на 90 ел. гр.

Навпаки, у фазі із магнітним потоком перебуває індуктивна складова струму холостого ходу, яка є струмом намагнічування, а активна складова цього струму, яка пропорційна до незворотних втрат електроенергії, відноситься до другого доданку рівняння (2.84). Втрати потужності у сталі трансформатора пропорційні до уявної частини виразу комплексного магнітного опору, а отже і до значення «магнітної індуктивності». Поняття «магнітна індуктивність» також використовується у [19], де розглядається аналогічний підхід до розрахунку магнітних кіл.

Магнітна індуктивність визначається за формулою

$$L_m = \rho \cdot \frac{l_c}{S_c} \cdot \frac{1}{2f\pi} = \frac{P_0 d l_c}{2S_c (\pi f B_m)^2}, \quad (2.85)$$

де l_c, S_c – середня лінія та переріз магнітопроводу, м та м² відповідно;

ρ – уявна частина питомого магнітного опору [81, с. 656], (Вт·с)/(Вб·м);

P_0 – питомі активні втрати у сталі, Вт/кг;

d – густина сталі, кг/м³;

B_m – максимальна індукція, Тл;

f – частота магнітного поля, Гц.

Одиниця вимірювання L_m отримаємо із (2.85)

$$\begin{aligned} [L_m] &= \left[\frac{\text{Вт} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{Гц}^2 \cdot \text{Тл}^2} \right] = \left[\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}^2}{\text{Вб}^2} \right] = \\ &= \left[\frac{\text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{с}}{\text{Гн}^2 \cdot \text{А}^2} \right] = \left[\frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{с}}{\text{А}^{-1} \cdot \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А} \cdot \text{Гн}} \right] = \left[\frac{\text{с}}{\text{Гн}} \right]. \end{aligned}$$

Активний магнітний опір r_{mkj} представимо у вигляді функції від напруженості магнітного поля H

$$r_m(|H|) = \frac{l_c}{\mu(|H|) \cdot S_c}, \quad (2.86)$$

де $\mu(|H|)$ – залежність магнітної проникності від абсолютного значення напруженості поля.

Задати функцію магнітної проникності від напруженості магнітного поля можливо шляхом інтерполяції лінійним або кубічними сплайнами, також показав свою ефективність метод, описаний у [122], де застосовано універсальну функцію апроксимації для магнітної проникності. Із використанням характеристики сталі 3404, 0,35 мм [183] та методу лінійної інтерпеляції побудовано функцію від абсолютних значень напруженості магнітного поля сталі, що графічно зображено на рис. 2.10.

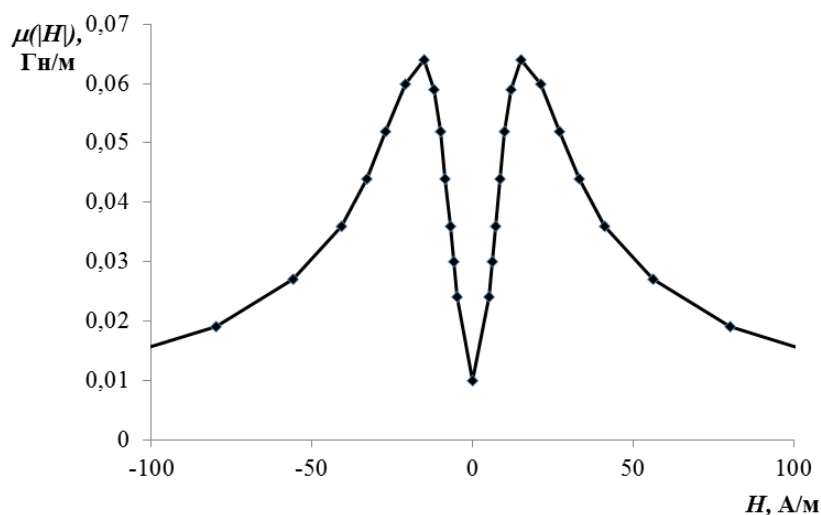


Рисунок 2.10 – Функція магнітної проникності від абсолютного значення напруженості магнітного поля у сталі марки 3404, 0,35 мм

При використанні магнітної проникності, яка б описувала гістерезисний процес, можливо уникнути розділення на складові r_m, L_m . Перемагнічування феромагнетиків з урахуванням гістерезису при моделюванні електричних машин використовують у своїх роботах Зірка С. Е., Мороз Ю. І. та Мороз Є. Ю. [90], але у рамках даного дослідження достатньо використовувати описаний підхід.

Параметри блоку моделі, що імітує роботу тягового трансформатора, визначені для трансформатора типу ТНДТНЖ-25000/150 із каталожними та розрахованими даними за [161], результат приведений у табл. 2.2.

Оскільки необхідні для моделювання параметри схеми заміщення трансформатора не приводять у паспортах та довідниках до обладнання, параметри для

магнітного кола трансформатора розраховані наближено за методикою [168, 191]. Прийняті для розрахунку параметрів трансформатора дані: марка сталі магнітної системи трансформатора – 3404; товщина листа – 0,35 мм; густина – 7650 кг/м³; магнітна індукція – 1,6 Тл; активні питомі втрати у сталі стрижня 1,295 Вт/кг, ярма – 1,251; питомі втрати намагнічування стрижня та ярма відповідно 1,775 ВА/кг та 1,675 ВА/кг; питомі втрати намагнічування у площині стику для стрижня та ярма 22100 ВА/м² 23500 ВА/м²; нормований діаметр стрижня – 0,53 м. Прийняті ізоляційні відстані між обмотками високої напруги – 60 мм, низької та середньої напруги – 50 мм, середньої та високої – 60 мм, низької напруги та стрижнем – 30 мм, обмотками та ярмом – 150 мм.

Таблиця 2.2 Параметри трансформатора ТНДТНЖ-25000/150

Каталожні та розраховані дані	Значення		
	ВН	СН	ВН
Номінальна напруга обмоток, кВ	154	38,5	27,5
Втрати короткого замикання, кВт	140		
Втрати холостого ходу, кВт	42		
Струм холостого ходу, %	0,9		
Номінальна потужність, кВА	25000		
Напруга досліду короткого замикання, %	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН
	17	10,5	6
Активний опір приведений до обмотки ВН, Ом	1,48	0,16	0,25
Індуктивний опір приведений до обмотки ВН, Ом	0,18	0	0,018
Втрати реактивної потужності холостого ходу, квар	225		

Активний переріз стрижня визначено з нормованого діаметру із урахуванням коефіцієнту заповнення активним металом перерізу кола, описаного навколо стрижня (0,89). За значенням активного перерізу та індукції у стрижні розраховано кількість витків у обмотках.

Використавши наближений розрахунок трансформатора, теорія якого викладена у [168], визначені орієнтовні значення довжини стрижня та відстані між

центральною осями суміжних стрижнів магнітної системи відповідно 2120 мм та 1580 мм. Критеріями, що використано для вибору цих величин, були значення активних втрат та потужності намагнічування під час холостого ходу, з якими зіставлено отримані результати. У такому разі, довжини середніх ліній магнітної системи для крайніх віток схеми заміщення становлять 5,28 м та для середньої – 2,12 м. Отримані значення параметрів для підстановки у модель зведено до табл. 2.3.

Таблиця 2.3 Числові параметри схеми заміщення магнітного кола тягового трансформатора

Параметр	Значення
Кількість витків обмотки високої напруги	943
Кількість витків обмотки середньої напруги	316
Кількість витків обмотки низької напруги (тягова обмотка)	391
Магнітна індуктивність крайніх віток схеми заміщення магнітної системи, с/Гн	1,7
Магнітна індуктивність середньої вітки схеми заміщення магнітної системи, с/Гн	0,7

2.3.4 Тягова мережа та електрорухомий склад

Блок імітує електрорухомий склад та тягову мережу, схема заміщення приведена на рис. 2.11. Остання представляє собою контактну підвіску та рейкову колію, шунтовану землею. Для моделювання тягового навантаження використано підхід запропонований у [100], де параметри електрорухомого складу формулюють у вигляді активної та обмінної характеристики, що фактично є функціями активного опору та індуктивності електрорухомого складу від струму електровозу ($r_e(i_e)$, $L_e(i_e)$) або від часу ($r_e(t)$, $L_e(t)$).

Використання характеристики залежної від струму небажане, оскільки зміна конфігурації моделі може суттєво вплинути на миттєве значення струму електровозу, що призведе до виходу за межі визначеної характеристикою області його допустимих значень або часткове її проходження. Тому виникає потреба у перерахунку характеристик для кожної окремої схеми.

Залежні від часу характеристики не мають цього недоліку – їх період залишається постійним і рівним половині періоду зміни струму електровозу. Але використання характеристик, залежних від часу, має іншу проблему, що пов'язана із визначенням місця їх періодів на часовій осі. Для вирішення проблеми достатньо провести орієнтовний розрахунок при лінійних значеннях параметрів тягового навантаження.

Оскільки отриману пару характеристик для електрорухомого складу можливо застосовувати у різних розрахункових схемах, при моделюванні використані параметри, які знаходяться у функціональній залежності від часу, тобто $r_e(t)$ та $L_e(t)$.

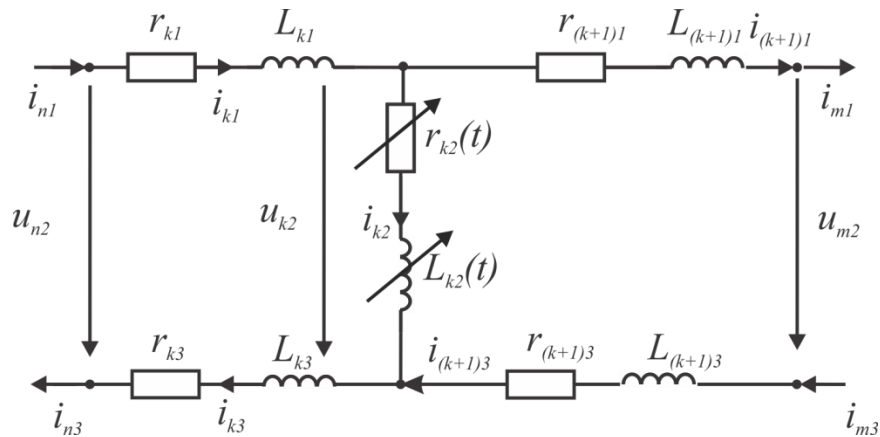


Рисунок 2.11 – Схема заміщення підсистеми тягової мережі та електрорухомого складу

Система рівнянь, що описує задану підсистему у разі консольного живлення, має вигляд

$$\begin{aligned} u_{n2} &= i_{k1}r_{k1} + i'_{k1}L_{k1} + i_{k2}r_{k2}(t) + i'_{k2}L_{k2}(t) + i_{k3}r_{k3} + i'_{k3}L_{k3} = \\ &= i_{k1}r_{k1} + i'_{k1}L_{k1} + u_{k2} + i_{k3}r_{k3} + i'_{k3}L_{k3}; \end{aligned} \quad (2.87)$$

$$i_{k1} - i_{(k+1)1} - i_{k2} = 0; \quad (2.88)$$

$$i_{k2} + i_{(k+1)3} - i_{k3} = 0; \quad (2.89)$$

$$i_{k3} - i_{n3} = 0; \quad (2.90)$$

$$i_{n1} - i_{k1} = 0. \quad (2.91)$$

У випадку реалізації схеми двостороннього живлення до системи додається одне рівняння балансу напруги та два вузлових рівняння:

$$\begin{aligned} u_{m2} &= -i_{(k+1)1}r_{k1} - i'_{(k+1)1}L_{(k+1)1} + i_{k2}r_{k2}(t) + \\ &+ i'_{k2}L_{k2}(t) - i_{(k+1)3}r_{(k+1)3} - i'_{(k+1)3}L_{(k+1)3}. \end{aligned} \quad (2.92)$$

$$-i_{(k+1)3} + i_{m3} = 0; \quad (2.93)$$

$$-i_{m1} + i_{(k+1)1} = 0. \quad (2.94)$$

У рівняннях (2.87), (2.92)-(2.94) n та m – порядкові номери підсистем у повній моделі, u_{n2} – напруга обмотки трансформатора або напруга на попередньому електровозі, u_{m2} – напруга на трансформаторі наступної підстанції або наступному електровозі.

Для побудови активної та обмінної характеристик використано виміряні миттєві значення напруги на струмоприймачеві та струму електровозу змінного струму ВЛ-80, зображені на рис. 2.12. Необхідні характеристики визначають на підставі рівнянь напруги на електровозі у момент часу t_1 та t_2 ,

$$u(t_1) = i(t_1) \cdot r_e(t_1) + L_e(t_1) \cdot i'_e(t_1), \quad (2.95)$$

$$u(t_2) = i(t_2) \cdot r_e(t_2) + L_e(t_2) \cdot i'_e(t_2), \quad (2.96)$$

якщо $i(t_1) = i(t_2)$, то $i'(t_1) > 0$, $i'(t_2) < 0$, що видно з рис. 2.12.

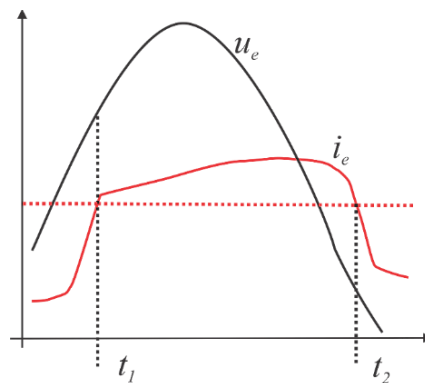


Рисунок 2.12 – Часова діаграма напруги та струму до пояснення розрахунку активної та обмінної характеристики електрорухомого складу

Допускаючи, що $r_e(t_1) = r_e(t_2)$ та $L_e(t_1) = L_e(t_2)$, віднімемо рівняння (2.96) від рівняння (2.95):

$$u(t_1) - u(t_2) = L_e(t_1)[i'_e(t_1) - i'_e(t_2)] = L_e(t_2)[i'_e(t_1) - i'_e(t_2)], \quad (2.97)$$

та визначимо

$$L_e(t_1) = L_e(t_2) = \frac{u(t_1) - u(t_2)}{i'(t_1) - i'(t_2)}. \quad (2.98)$$

Потім з (2.95), підставляючи (2.98), отримаємо

$$r_e(t_1) = \frac{u(t_1) - L_e i'(t_1)}{i(t_1)}. \quad (2.99)$$

Для розрахунку параметрів тягової мережі використано залежності з [112], розрахункові формули приводяться з довідникової літератури [163]. Для одноколійної ділянки опір та індуктивність еквівалентної контактної підвіски та рейкової колії із урахуванням стікання струму у землю визначатиметься:

$$r_{ке} = \frac{r_k r_T + 0,126}{r_k + r_T + 0,504 / (r_k + r_T)}; \quad (2.100)$$

$$L_{ке} = \left[\frac{0,355(r_k^2 + r_T^2) + 0,09}{(r_k^2 + r_T^2) + 0,504} + 0,106 \right] / 2\pi f; \quad (2.101)$$

$$r_{pz} = a_1 r_{pe} - b_1 x_{pe}; \quad (2.102)$$

$$L_{pz} = (a_1 x_{pe} - b_1 r_{pe}) / 2\pi f, \quad (2.103)$$

де $r_{ке}$ – активний опір еквівалентної контактної підвіски;

r_k – активний опір контактного проводу;

r_T – активний опір несучого тросу;

$L_{ке}$ – індуктивність еквівалентної контактної підвіски;

f – основна частота струму;

r_{pz} – активний опір рейкової колії;

r_{pe} – еквівалентний активний опір рейкової колії;

L_{pz} – індуктивність рейкової колії;

x_{pe} – еквівалентна індуктивність рейкової колії;

a_1 та b_1 – відповідно дійсна та уявна складова відношення струму у рейках до струму у контактній мережі, що залежить від довжини ділянки та перехідного опору між колією та землею. Приймавши середню відстань між підстанціями змінного струму, що складає 50 км, та значення перехідного опору на рівні 1 Ом·км для баласту з щебню [163, с. 133], за діаграмою [163, рис. 2.2] отримаємо значення a_1 та b_1 , які дорівнюють 0,6 та 0,005 відповідно.

Параметри r_{pe} та x_{pe} визначаються наступним чином:

$$r_{pe} = 0,5r_{pa}; \quad (2.104)$$

$$x_{pe} = 0,375r_{pa} + 0,0628\ln\left(a_{кр}\sqrt{R_p a_{12}}\right), \quad (2.105)$$

де r_{pa} – активний опір 1 км рейки, Ом/км;

$a_{кр}$ – висота контактної провладу відносно головки рейки, м;

R_p – еквівалентний радіус рейки, м;

a_{12} – відстань між осями рейок, м.

Зазначимо, що у формулах для розрахунку параметрів тягової мережі враховано взаємодукцію між контактною підвіскою та рейковою колією.

Базуючись на отриманих експериментальним шляхом значеннях первинного струму та напруги на струмоприймачеві електровозу ВЛ-80, розраховані активна та обмінна характеристика, що представлені на рис. 2.13.

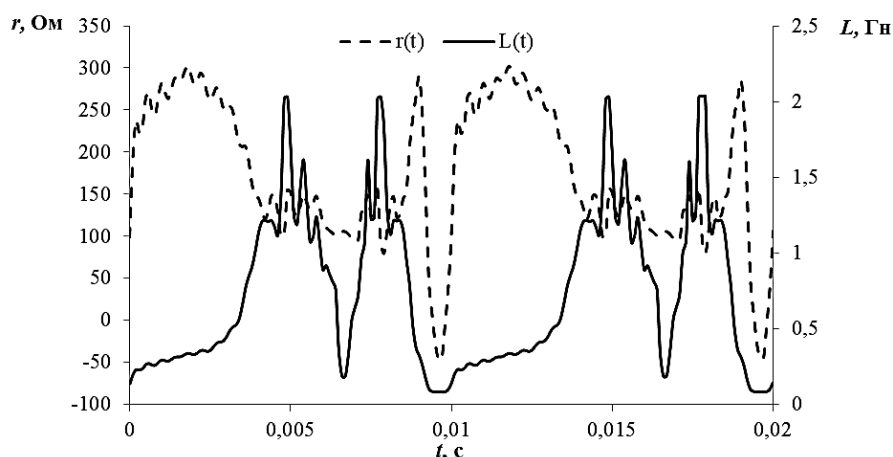


Рисунок 2.13 – Активна та обмінна характеристика електровозу ВЛ 80

Розраховані за формулами (2.100)-(2.105) параметри для схеми заміщення тягової мережі із типом контактної підвіски та рейки відповідно М-120+МФ-100 та Р65 табл. 2.4.

Таблиця 2.4 Питомі значення параметрів тягової мережі

Параметр	Значення
Активний опір контактної підвіски, Ом/км	0,1
Індуктивність контактної підвіски, Гн/км	$9 \cdot 10^{-4}$
Активний опір рейкової колії, Ом/км	0,05
Індуктивність рейкової колії, Гн/км	$8 \cdot 10^{-4}$

2.3.5 Лінія живлення нетягового навантаження та кінцевий споживач

Нетягове навантаження представлено у вигляді еквівалентної трипроменевої зірки та об'єднано із лінією живлення нетягових споживачів у один блок, схема заміщення якого приведена на рис. 2.14.

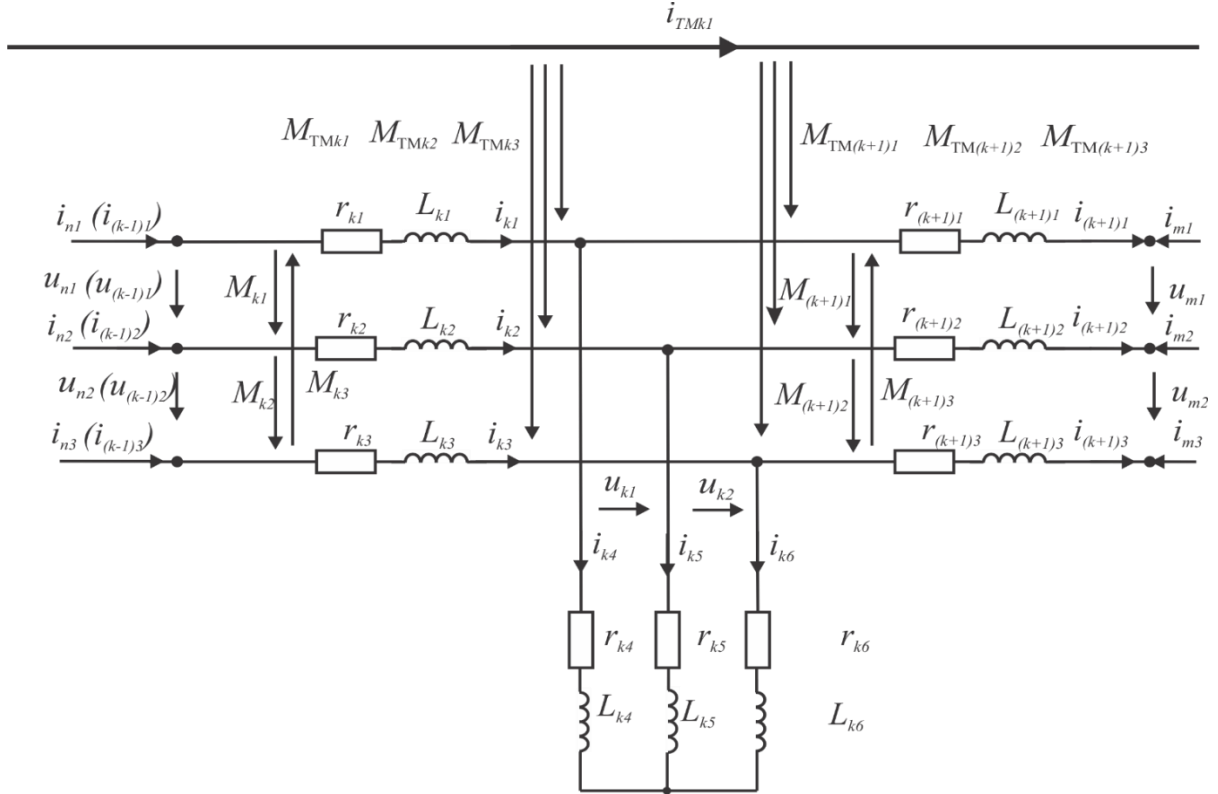


Рисунок 2.14 – Схема заміщення лінії живлення нетягового електропостачання та кінцевого споживача

Система рівнянь, що описує задану підсистему у разі консольного живлення нетягового споживача, має вигляд

$$u_{n1} = i_{k1}r_{k1} + i'_{k1}L_{k1} + i_{k4}r_{k4} + i'_{k4}L_{k4} + i'_{k2}M_{k1} + i'_{k3}M_{k3} - (i_{k5}r_{k5} + i'_{k5}L_{k5} + i_{k2}r_{k2} + i'_{k2}L_{k2} + i'_{k1}M_{k1} + i'_{k3}M_{k2}) + i_{TMk1}(M_{TMk1} - M_{TMk2}); \quad (2.106)$$

$$u_{n2} = i_{k2}r_{k2} + i'_{k2}L_{k2} + i_{k5}r_{k5} + i'_{k5}L_{k5} + i'_{k1}M_{k1} + i'_{k3}M_{k2} - (i_{k6}r_{k6} + i'_{k6}L_{k6} + i_{k3}r_{k3} + i'_{k3}L_{k3} + i'_{k1}M_{k3} + i'_{k2}M_{k2}) + i_{TMk1}(M_{TMk2} - M_{TMk3}); \quad (2.107)$$

$$i_{k1} + i_{k4} - i_{(k+1)1} = 0; \quad (2.108)$$

$$i_{k2} + i_{k5} - i_{(k+1)2} = 0; \quad (2.109)$$

$$i_{k3} + i_{k6} - i_{(k+1)3} = 0; \quad (2.110)$$

$$i_{k4} + i_{k5} + i_{k6} = 0; \quad (2.111)$$

$$i_{(k-1)1} - i_{k1} = 0; \quad (2.112)$$

$$i_{(k-1)2} - i_{k2} = 0; \quad (2.113)$$

$$i_{(k-1)3} - i_{k3} = 0, \quad (2.114)$$

де $M_{TMk1}, M_{TMk2}, M_{TMk3}$ – коефіцієнти взаємоіндукції між фазами лінії та еквівалентним проводом тягової мережі,

i_{TMk1} – струм еквівалентного проводу тягової мережі.

У разі приєднання підсистеми до тягового трансформатору струми та напруги у рівняннях (2.112), (2.113) та (2.114) позначаються індексом n замість $(k-1)$.

Передбачається, що підсистема приєднується до живлячої обмотки трансформатора або до попереднього блоку лінії нетягового електропостачання.

У разі двостороннього живлення рівняння (2.106) – (2.114) доповнюються двома рівняннями балансів напруги у контурах та трьома за балансом струмів:

$$\begin{aligned} u_{m1} = & -(i_{(k+1)1}r_{(k+1)1} + i'_{(k+1)1}L_{(k+1)1}) + u_{k1} - i'_{k2}M_{(k+1)1} - i'_{k3}M_{(k+1)3} + \\ & + i_{(k+1)2}r_{(k+1)2} + i'_{(k+1)2}L_{(k+1)2} + i'_{(k+1)1}M_{(k+1)1} + i'_{(k+1)3}M_{(k+1)2} + \\ & + i_{TM}(-M_{TM(k+1)1} + M_{TM(k+1)2}); \end{aligned} \quad (2.115)$$

$$\begin{aligned} u_{m2} = & -(i_{(k+1)2}r_{(k+1)2} + i'_{(k+1)2}L_{(k+1)2}) + u_{k2} - i'_{k1}M_{k1} - i'_{k3}M_{k2} + \\ & + i_{(k+1)3}r_{(k+1)3} + i'_{(k+1)3}L_{(k+1)3} + i'_{(k+1)1}M_{(k+1)3} + i'_{(k+1)2}M_{(k+1)2} + \\ & + i_{TM}(-M_{TM(k+1)2} + M_{TM(k+1)3}); \end{aligned} \quad (2.116)$$

$$i_{(k-1)1} + i_{m1} = 0; \quad (2.117)$$

$$i_{(k-1)2} + i_{m2} = 0; \quad (2.118)$$

$$i_{(k-1)3} + i_{m3} = 0; \quad (2.119)$$

При використанні блоку лінії живлення нетягового електропостачання та кінцевого споживача для моделювання лінії ДПР рівняння (2.107) та (2.116) мають спільні параметри із рівняннями тягової мережі (2.87) та (2.92) через використання рейки у якості фази лінії. Також вилучається із рівнянь (2.107) та (2.116) складова, що ураховує магнітний вплив тягової мережі, оскільки останній враховується у розрахункових формулах, які використані для визначення параметрів блоку, що описує тягову мережу з електровозом.

Значення параметрів нетягового навантаження можуть бути визначені за величиною еквівалентного струму у лінії ДПР, отриманого при обробці результатів експериментальних вимірювань [82], що становив 30 А на плечі живлення 50 км, середнього значення коефіцієнту потужності, який визначено на рівні 0,9 та лінійної напруги у 27,5 кВ. Таким чином, робота системи нетягового електропостачання моделюється активним опором та індуктивністю нетягового споживача у кожній фазі, що становить близько 476 Ом та 0,73 Гн відповідно. Марка проводу лінії ДПР дослідної ділянки – АС-35/6,2. Розташування проводів на опорі контактної мережі зображено на рис. 2.15, де 1 – еквівалентний провід контактної мережі, 2 та 3 – проводи лінії ДПР, 4 – еквівалентна рейка.

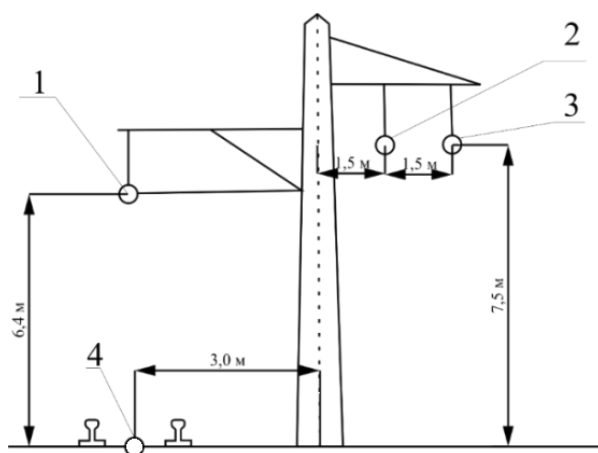


Рисунок 2.15 – Розрахункова схема розташування проводів на опорі контактної мережі

Індуктивність та взаємна індуктивність між проводом визначається за виразом (2.41) та (2.42). Активний опір фази визначається за довідником [161]. Значення параметрів для моделювання лінії ДПР зведено до табл. 2.5.

Таблиця 2.5 Питомі значення параметрів лінії ДПР

Позначення фаз на рис. 2.15	Активний опір, Ом/км	Індуктивність, мГн/км	Взаємна індуктивність, мГн/км	
2	0,81	2,5	M_{23}	1,3
3	0,81	2,5	M_{34}	0,93
4	0,05	0,78	M_{42}	0,95

Коефіцієнти взаємної індукції між проводами лінії та еквівалентним проводом контактної мережі M_{12} та M_{13} дорівнюють 1,1 мГн/км, та 1,0 мГн/км відповідно.

2.4 Побудова математичної моделі системи електропостачання із врахуванням несинусоїдних та несиметричних режимів роботи

Розрахунок диференційних рівнянь засобами комп'ютерної техніки вимагає її приведення до явної форми. Для цього проводиться заміна складових рівнянь балансу струмів і магнітних потоків у вузлах на їх похідні від часу, чим система алгебраїчно-диференційних рівнянь перетворюється у систему з диференційних рівнянь. Реалізація чисельних методів у математичних програмах допускає запис систем диференційних рівнянь у матрично-векторній формі, що дозволяє використовувати метод зворотної матриці для швидкого приведення рівнянь до явного вигляду.

Наприклад, рівняння (2.1) – (2.14) матимуть у матрично-векторній формі наступний вигляд:

$$\begin{pmatrix} L_{k1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L_{k2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i'_{k1} \\ i'_{k2} \\ \dots \\ u'_{c(k+1)7} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{k1} - i_{k1}r_{k1} - i_{kn}r_{kn} - \\ -i'_{kn}L_{kn} - u_{c(k+1)4} - u_{c(k+1)7} \\ e_{k2} - i_{k2}r_{k2} - i_{kn}r_{kn} - \\ -i'_{kn}L_{kn} - u_{c(k+1)5} - u_{c(k+1)7} \\ \dots \\ i_{(k+1)7} / C_N \end{pmatrix}. \quad (2.120)$$

Спрощено математична модель у матрично-векторній формі може бути представлена як

$$\mathbf{AX}' = \mathbf{B}, \quad (2.121)$$

де \mathbf{X}' – вектор невідомих похідних;

\mathbf{A} – матриця коефіцієнтів при невідомих похідних;

\mathbf{B} – вектор вільних членів.

Вираз (2.121) зведений до нормальної форми Коші

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}. \quad (2.122)$$

Системи рівнянь, отримані за схемами зміщення електричних та магнітних кіл, використано як шаблони для конструювання математичної моделі системи електропостачання за допомогою алгоритму, ілюстрованого на блок-схемі (рис. 2.16), основними етапами якого є:

1 – введення даних про кількість та координати розташування підстанцій, споживачів електричної енергії, центрів живлення, відносно яких розраховано параметри електроенергетичної системи; задаються параметри схеми заміщення підсистем;

2 – отримані вхідні дані зводяться до вигляду двовимірного масиву (матриці), де кількість рядків відповідає кількості підсистем;

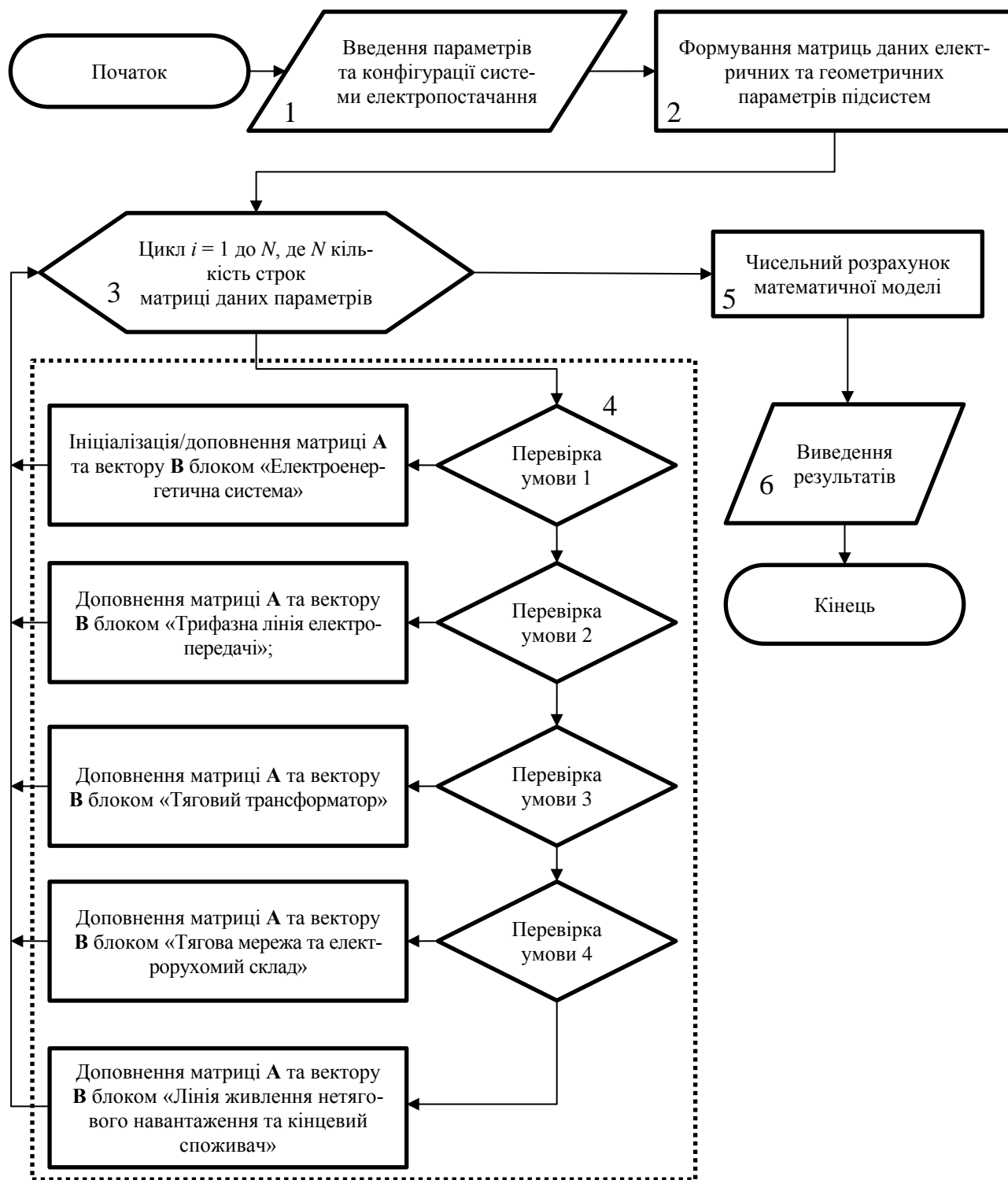


Рисунок 2.16 – Блок-схема алгоритму побудови математичної моделі системи електропостачання

3 – масив передається у цикл із параметром, який проходить по його рядам;
 4 – тіло циклу перевіряє умови, що визначають тип підсистеми, яка знаходиться у поточному рядку масиву. Передбачено, що перший рядок масиву містить інформацію про блок «Електроенергетична система», що, власне, ініціалізує матриця **A** та вектор **B**. З кожною наступною ітерацією, матриця **A** та вектор **B** доповнюється наступними підсистемами;

5 – побудована модель системи електропостачання проходить етап чисельного розрахунку;

6 – вивід результатів.

Покажемо застосування розробленої математичної моделі на прикладі. Розглянемо схему системи електропостачання на рис. 2.17, де Г – джерело трифазної напруги (генератор); ЛЕП – лінія електропередачі, ТП – тягова підстанція, ДПР – лінія «два проводи-рейка» ТМ – тягова мережа, ЕРС – електрорухомий склад.

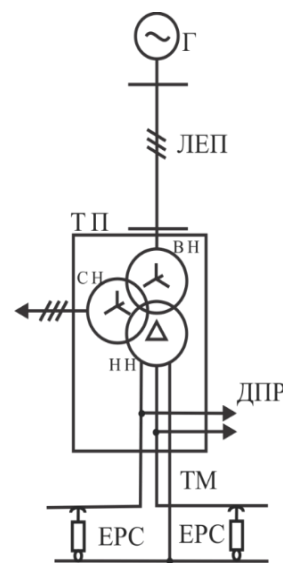


Рисунок 2.17 – Схема живлення ділянки залізниці із однією підстанцією

Кожна підсистема описується матрицею із коефіцієнтів при похідних та вектором вільних членів, при цьому матриці при похідних об'єднуються за діагоналлю, вектори – зверху до низу.

Математична модель систем електропостачання, сформована з субматриць та субвекторів підсистем, матиме наступний вигляд

$$X' = \begin{bmatrix} SA & NC & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & LA & NC & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & TA & NC & NC & NC \\ 0 & 0 & LC & TN1A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & LC & 0 & TN2A & NC \\ 0 & 0 & LC & LC & 0 & TWRA \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} SB \\ LB \\ TB \\ TN1B \\ TN2B \\ TWRB \end{bmatrix}, \quad (2.123)$$

де перший доданок відповідає матриці **A** виразу (2.122), а другий вектору **B** відповідно. У назві субматриць та субвекторів використані наступні позначення:

S – блок електроенергетичної системи;

L – блок трифазної лінії електропередачі;

T – блок тягового трансформатора;

TN1 – перший блок тягової мережі та електрорухомого складу;

TN2 – другий блок тягової мережі та електрорухомого складу;

TWR – блок лінії живлення нетягового навантаження та кінцевого споживача;

A, **B** – вказує на приналежність до матриці **A** або вектору **B** відповідно.

До матриці **A** також входить:

NC – субматриця зв'язку у вузлах;

LC – субматриця зв'язку у контурах;

0 – нульова субматриця.

Процес формування виразу (2.123) проходить два незалежні етапи. Перший – створення матриці **A**, другий – створення вектору **B**. При першій ітерації циклу (рис. 2.16) ініціалізується матриця **A** та субвектор **B**, які повністю складаються із **SA** та **SB**. Під час другої ітерації циклу до матриці **A** приєднується субматриця **LA** так, щоб головні діагоналі **SA** та **LA** співпадали із головною діагоналлю матриці **A**, а до вектору **B** – субвектор **LB**.

Передбачається, що рівняння балансу струмів у спільних вузлах підсистем завжди належать попередньому блоку, тому до **A**, над **LA** та праворуч від **SA**, додається субматриця **NC**, де всі елементи нульові, крім тих, що відповідають коефіцієнтам при невідомих похідних від струмів, що ініціалізовані у **LA**. На цьому етапі модель можна використовувати для розрахунку електроенергетичних процесів у лінії електропередачі, що підключена до джерела напруги.

$$\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} \mathbf{SA} & \mathbf{NC} \\ \mathbf{0} & \mathbf{LA} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{SB} \\ \mathbf{LB} \end{bmatrix}. \quad (2.124)$$

Далі, під час третьої ітерації циклу, до моделі, через приєднання субматриць **TA**, **NC** та субвектор **TB**, додаються рівняння, що описують трансформатор.

$$\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} \mathbf{SA} & \mathbf{NC} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{LA} & \mathbf{NC} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{TA} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{SB} \\ \mathbf{LB} \\ \mathbf{TB} \end{bmatrix}. \quad (2.125)$$

Четверта та п'ята ітерації додають підсистеми «тягова мережа та електрорухомий склад» через **TN1A**, **TN2A** та **NC**, де виникає необхідність включити до **A** субматрицю **LC**, що дозволяє врахувати спільні із поточною підсистемою спади напруги у обмотках трансформатора та завершити формування рівнянь спадів напруг у незалежних контурах поточної підсистеми

$$\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} \mathbf{SA} & \mathbf{NC} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{LA} & \mathbf{NC} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{TA} & \mathbf{NC} & \mathbf{NC} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{LC} & \mathbf{TN1A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{LC} & \mathbf{0} & \mathbf{TN2A} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{SB} \\ \mathbf{LB} \\ \mathbf{TB} \\ \mathbf{TN1B} \\ \mathbf{TN2B} \end{bmatrix}. \quad (2.126)$$

Остання ітерація завершує модель, включаючи до неї **TWRA**, **TWRB** та субматриці зв'язку. Для лінії ДПП передбачено дві **LC** та **NC**, що пов'язує **TWRA** спільними вузлами та спільними спадами напруг із обмоткою трансформатора та рейковою колією.

У разі моделювання системи із декількома підстанціями та джерелами алгоритм продовжить набирати систему зовнішнього електропостачання із приєднаними до неї тяговими підстанціями. Після завершення цього етапу математична модель відтворює систему електропостачання із відключеними від тягової мережі підстанціями, починається приєднання тягової мережі з електрорухомим складом. На останньому етапі до підстанцій приєднується лінії нетягового електропостачання.

Чисельний розрахунок виконується методом диференціювання назад, що призначений для розв'язку жорстких систем диференціальних рівнянь [181] з адаптивним кроком розрахунку значенням $1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-6}$ с.

На рис. 2.18 та 2.19 приведені часові діаграми струмів, які отриманих шляхом чисельного розрахунку розглянутої математичної моделі системи електропостачання. Рис. 2.18 ілюструє перехідний процес, що виникає після включення

трансформатора у режимі холостого ходу, значення струмів у трьох фазах первинної обмотки отримано за нульових початкових умов. Рис. 2.19, *а* отримано аналогічно до рис. 2.18, але при наявності навантаження на тяговій обмотці. Після закінчення перехідного процесу форма струмів у первинній обмотці трансформатора та тягового струму електрорухомого складу зображені на рис. 2.19, *б* та *в* відповідно.

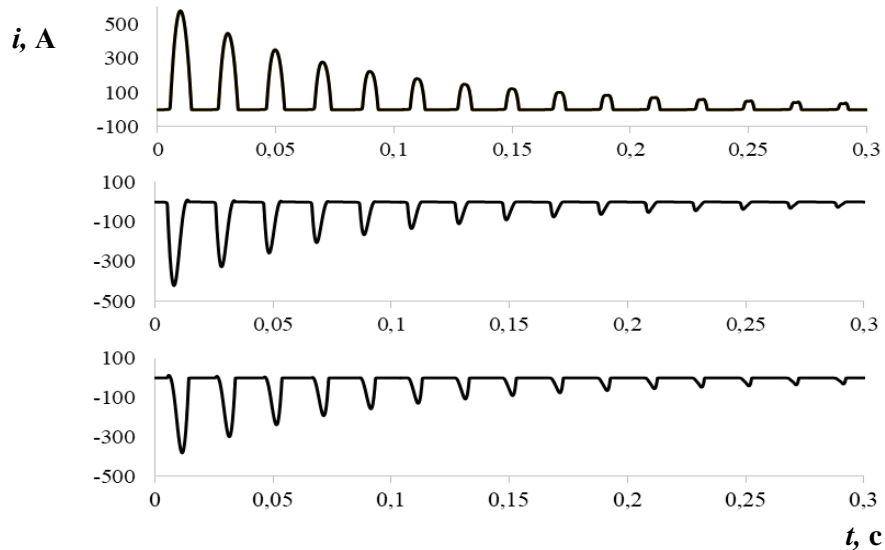


Рисунок 2.18 – Часові діаграми струмів включення трансформатора у режимі холостого ходу

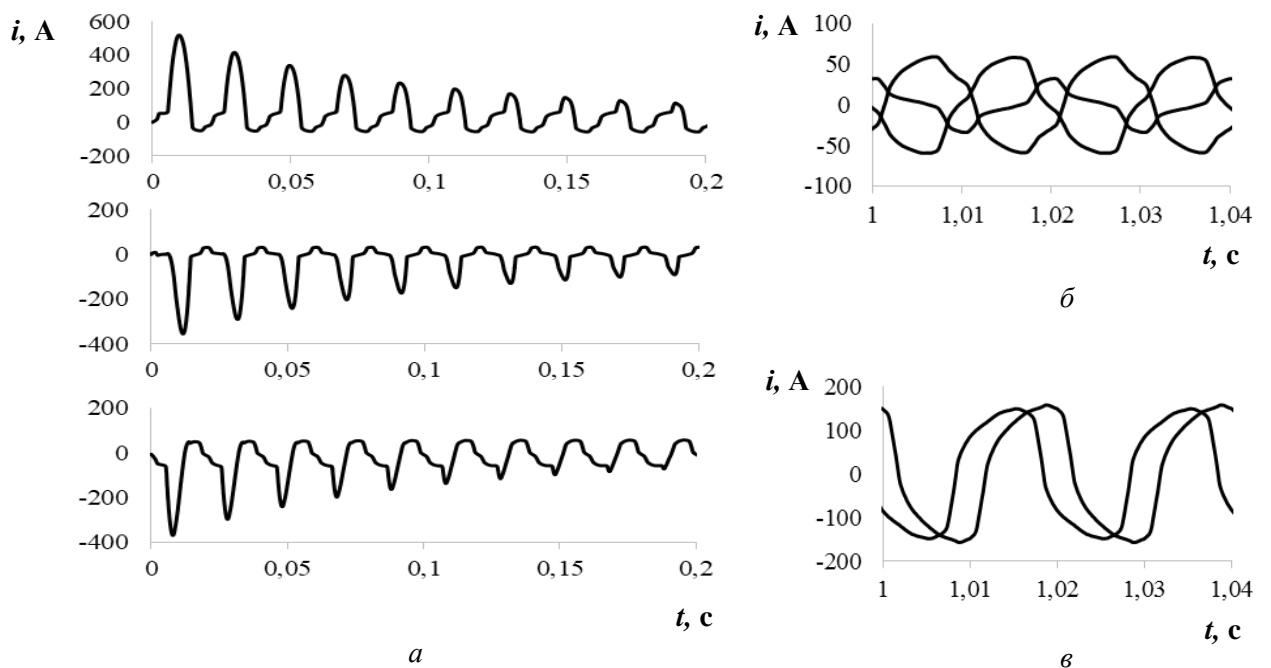


Рисунок 2.19 – Часові діаграми струму у первинній обмотці трансформатора (*а*, *б*) та електрорухомого складу (*в*)

2.5 Висновки до розділу 2

1. Для моделювання складних електричних систем із несиметричним навантаженням та нелінійними параметрами схеми заміщення доцільно використовувати математичну модель у фазних координатах, побудовану на диференційних рівняннях стану електричного кола, що дозволяє розраховувати несинусоїдні електромагнітні процеси та використовувати складні аналітичні вирази для завдання параметрів елементів схем заміщення. Крім того, представлення несиметричних трифазних систем у фазних координатах проти методу симетричних складових простіше підлягає формалізації при складанні алгоритму розрахунку.

2. Розроблена у фазних координатах математична модель базується на системах диференційних рівнянь стану електричного кола, які описують типові складові системи електропостачання, що дозволяє компонувати електричні мережі різної конфігурації, розмірів та призначення, із можливістю врахування нелінійних параметрів електрорухомого складу та насичення магнітопроводу трансформатора тягової підстанції. Використання цього методу дає можливість моделювати будь-яку мережу електропостачання нетягових споживачів сумісно із системою тягового та зовнішнього електропостачання, що забезпечить наукові та інженерні дослідження необхідним масивом даних про режим електропостачання для оцінки енергообмінних процесів між окремими підсистемами.

3. Розроблений алгоритм для побудови моделі системи електропостачання, аналізує топологію заданої системи та з уніфікованих блоків складає повну модель системи електропостачання. Отримана таким чином модель, яка математично представляє собою зведену до явної форми систему диференційних рівнянь, розраховується методом диференціювання назад як жорстка система диференційних рівнянь.

Отримані у другому розділі результати розвитку методів розрахунку електричних мереж опубліковано у [40, 42, 43, 83, 86, 87].

РОЗДІЛ 3
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ
ЕНЕРГІЇ, ЩО ПЕРЕДАЄТЬСЯ ЛІНІЄЮ
«ДВА ПРОВОДИ-РЕЙКА»

До розділу включені результати експериментів з дослідження якості електричної енергії, яка передається лінією ДПР, проведені кафедрою «Інтелектуальні системи електропостачання»¹, що також опубліковані у наукових періодичних виданнях [18, 38, 82, 154].

3.1 Методика проведення вимірювання показників якості

3.1.1 Схеми та засіб вимірювання

Перше дослідження проведене із метою визначення стану якості електричної енергії, яка передається лінією ДПР у мережу споживача, що скаржився на неналежну її якість. Дослідження показників якості виконувались у колі вторинної напруги 0,38 кВ трансформатора КТП лінії ДПР та на шинах підстанції Плетений Ташлик (ЕЧЕ-7) 27,5 кВ Одеської залізниці одночасно, упродовж 24 год. Схему вимірювання представлено на рис. 3.1.

Метою другого експерименту була кількісна оцінка ефекту від переведення лінії ДПР на двостороннє живлення. Вимірювання проведено на Одеській залізниці, де є дві ділянки між тяговими підстанціями, які можливо перевести на двостороннє живлення. Споживач, за нормальної схеми електропостачання, отримує напругу від лінії ДПР, що підключена до шин тягової підстанції Чубівка (ЕЧЕ-25). Резервне живлення споживачів забезпечує підстанція Слобідка (ЕЧЕ-26). Схема вимірювання, реалізована під час другого вимірювання, представлена на рис. 3.2.

Під час експерименту споживач отримував живлення від двох підстанцій одночасно та окремо від кожної підстанції. Кожен режим живлення тривав протягом трьох годин, загальна тривалість експерименту становила 9 годин. Перший режим відповідав нормальній схемі живлення. Відстань між точкою вимірювання

¹ Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. В. Лазаряна

та тяговою підстанцією Чубівка уздовж лінії складала близько 50 км. У наступному режимі реалізовано схему двостороннього живлення споживача. Після переведення споживача на живлення від підстанції Слобідка, відстань до тягової підстанції складала 3 км.

Програми експериментів приведені у додатку Б.

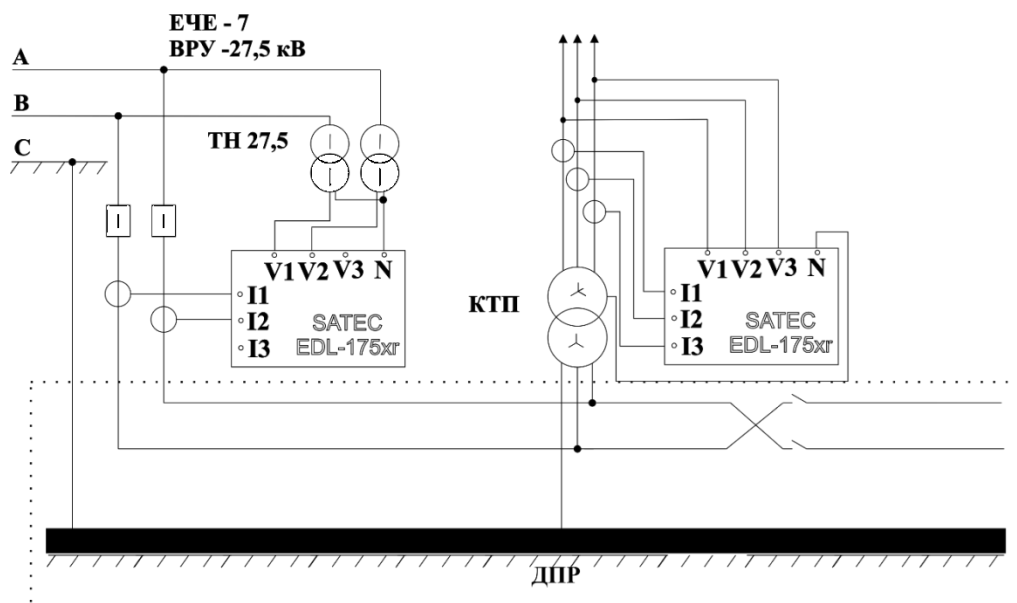


Рисунок 3.1 – Схема вимірювань показників якості електроенергії у мережі споживача та на шинах тягової підстанції Плетений Ташлик

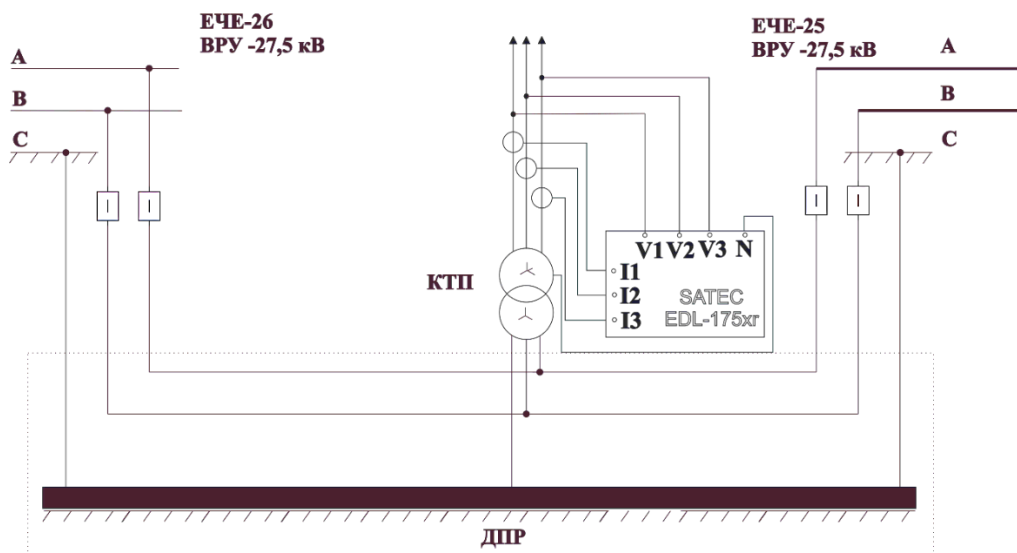


Рисунок 3.2 – Схема проведення вимірювань показників пості якості на ділянці між підстанціями Чубівка – Слобідка

Для вимірювання та реєстрації використовувався портативний аналізатор якості електричної енергії SATEC EDL-175xr (рис. 3.3, а). Основні метрологічні характеристики та функції пристрою приведені у табл. 3.1 та додатку В.

Пристрій, оснащений чотирма вимірювальними каналами призначеними для фіксації значень напруги та трьома – для фіксації значень струму, реалізує схему вимірювань методом трьох ватметрів для трифазних чотирипровідних мереж та двох ватметрів для трипровідних мереж.



Рисунок 3.3 – Портативний аналізатор якості електричної енергії SATEC EDL-175xr

Таблиця 3.1 Характеристики приладу SATEC EDL-175xr

Метрологічні характеристики	
Діапазон вимірювання струмів	30 – 3000 А
Максимальна вимірювальна напруга	660 V
Вимірювані величини	
Діюче значення струму та напруги	Струм нейтралі
Фазні значення активної, реактивної, потужності	Загальна активна, реактивна, потужність
Коефіцієнт потужності для кожної фази	Загальний коефіцієнт потужності
Частота	Несиметрія напруги та струму
Значення гармонік струму та напруги	Реєстрація максимальних значень струму та напруги
Споживана електроенергія для кожної фази	Загальна споживана електроенергія

Вимірювання струму під час експерименту на КТП здійснювалось через гнучкі роз'ємні кліщі типу LEM-Flex, які представляють собою пояс Роговського (рис. 3.3, б). Вимірювана напруга у мережі 0,38 кВ КТП ДПР подавалась на пристрій без пониження. Вимірювання на тягових підстанціях проводяться у вторинних колах двох трансформаторів напруги приєднаних до шин 27,5 кВ та струму фідерів лінії ДПР.

Обробка та аналіз даних виконувався за допомогою програми PAS (Power Analysis Software), розробленої виробником аналізатора. Інтервал реєстрації діючих значень параметрів – 1 с, інтервал осцилографування значень струму та напруги складав 20 с.

3.1.2 Підхід до аналізу показників якості електроенергії

Варіації параметрів режиму систем електропостачання знаходяться у стохастичній залежності від впливаючих на неї факторів. Результатом їх сукупної дії є різні за знаком, амплітудою та тривалістю збурення, що призводять до зміни параметрів системи у часі. Внаслідок цього результати окремих досліджень можуть суттєво відрізнятись один від одного. Для виявлення закономірностей у процесах, які досліджуються, методика проведення експериментальних вимірювань повинна нівелювати випадковість у зміні параметрів режиму. У контексті питання електромагнітної сумісності, вимоги до розрахунку показників якості електроенергії та тривалості вимірювань формалізовані у діючих в Україні міждержавних стандартах.

В Україні з 2014 року діє ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення» [66], гармонізований із європейським стандартом EN 50160:2010. У той же час, із прийняттям [66], не втратив чинність ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [58], на який продовжують посилатись інструкції та правила, прийняті до 2014 року [130, 138, 140], а також чинні з 2017 р. [127]. Кодекс систем розподілу [132, п. 11.4.6] визначає, що параметри якості електричної енергії в точках приєднання споживачів у нормальних умовах експлуатації мають відповідати параметрам, визначеним у [66], тобто згідно з законодавством установлені в стандарті характеристики напруги не є рівнями електромагнітної сумісності електричного обладнання, а є показниками для оцінки якості надання послуг із електропостачання. У такому разі виконання вимог до якості електричної енергії [58] продовжує гарантувати надійну та енергоефективну роботу електротехнічного обладнання.

Зауважимо, що при імплементації міжнародного стандарту у [66] змінено термінологію, яка використовувалась у [58], а саме термін «несиметрія напруги» змінено на «небаланс напруги», «коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги» (далі коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги) – на «сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень» (СКГС) та замість «відхилення напруги» використовується «змінення напруги». Також у тексті даної дисертації «коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності» називається «коефіцієнт зворотної послідовності напруги».

Вимоги [66] та [58] до значення відхилення напруги, коефіцієнта несинусоїдності кривої та коефіцієнта зворотної послідовності напруги приведені у табл. 3.2 та 3.3. Для кожного показника у [58] розрізняється нормально та максимально допустимі значення. Відповідно, електроенергія вважається неякісною за одним із встановлених стандартом показників, якщо під час вимірювання зафіксовано факт перевищення максимального або нормально допустимого значення з імовірністю вище 5 %. У [66] відхилення напруги оцінюють за максимальним та нормальним значенням; СКГС – за максимальним; коефіцієнт зворотної послідовності – за нормальним значенням.

Аналізу розбіжностей, які має ДСТУ EN 50160:2014 у відношенні до ГОСТ 13109-97, присвячені роботи [182, 173, 174]. Загалом їх автори обмежились співставленням нормативних значень відповідних показників якості електроенергії. Проте, менше уваги приділено вимогам до обробки результатів вимірювання. Зокрема, розмір інтервалу усереднення виміряних значень напруги, який у ГОСТ 13109-97 складає 3 або 60 с, у залежності від розрахованого показника, а у ДСТУ EN 50160:2014 – 10 хв, може мати істотний вплив на результат оцінки якості електроенергії у системі.

За обставин, коли дослідження якості електричної енергії, направлене на вставлення факту перевищення рівнів електромагнітної сумісності, не може оминати сторону комерційних відносин між споживачем та власником мережі, аналіз якості електроенергії доцільно проводити за методикою прописаною у [58] та [66] одночасно.

Таблиця 3.2 Порівняльна таблиця значень показників якості електроенергії за ГОСТ 13109-97 та ДСТУ EN 50160:2014

Показник	ГОСТ 13109-97		ДСТУ EN 50160:2014	
	Нормальне	Максимальне	Нормальне	Максимальне
Усталене відхилення напруги	± 5 %	± 10 %	± 10 % до 35 кВ	-15...+10 % до 1 кВ ± 15 % від 1 до 35 кВ
Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги	За табл. 3.3	За табл. 3.3	–	8 %
Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	2,0 %	4,0 %	2,0 %	–

Таблиця 3.3 Значення коефіцієнту несинусоїдності кривої напруги приведені у ГОСТ 13109-97

	Нормально допустимі				Гранично допустимі			
	0,38	6-20	35	110-330	0,38	6-20	35	110-330
Номінальна напруга, кВ								
Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги, %	8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Для розрахунку показників якості використані наступні співвідношення:

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100, \quad (3.1)$$

$$K_U = CKTC = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100, \quad (3.2)$$

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \quad (3.3)$$

де δU – відхилення напруги, В;

K_U – коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги або сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (СКТС);

K_{2U} – коефіцієнт зворотної послідовності напруги;

U – усереднене середньоквадратичне (амплітудне) значення міжфазної напруги, В;

U_H – номінальне значення напруги, В.

$U_{(n)}$ – усереднене середньоквадратичне (амплітудне) значення n -ї гармоніки напруги, В;

$U_{(1)}$ – усереднене середньоквадратичне (амплітудне) значення напруги основної частоти,

$U_{1(1)}, U_{2(1)}$ – відповідно, напруги прямої та зворотної послідовності основної частоти, В.

n – порядок гармоніки напруги.

3.2 Оцінка якості електричної енергії, що передається лінією «два проводи-рейка»

Під час аналізу режимів систем електропостачання виникає потреба у застосуванні методів математичної статистики для виявлення закономірностей у процесах, що досліджуються. Важливим етапом статистичного аналізу є визначення закону розподілу ймовірності випадкової величини, через його використання у задачах планування, забезпечення якості та оцінки ефективності виробництва. Крім того вибір методу аналізу результатів спостережень має враховувати тип закону розподілу. Зокрема ряд методів кореляційного аналізу передбачає нормальний розподіл досліджуваних величин, для інших розподілів або у ситуації, коли розподіл залишається невідомим, ефективнішими є методи непараметричного аналізу [95].

Для визначення кожного показника якості виміряні дані усереднено на часових інтервалах, що регламентовані стандартами. Отримані значення показників якості електроенергії утворюють первину статистичну сукупність, яку далі досліджували методом аналізу інтервального варіаційного ряду.

Визначення кількості часткових інтервалів i для згрупованого статистичного ряду виконано за формулою Стерджеса,

$$i \leq 1 + 3,322 \lg n, \quad (3.4)$$

де $\lg n$ – десятковий логарифм від об'єму вибірки.

Перевірка статичних гіпотез проводилась за критерієм згоди χ^2 Пірсона із розрахунком досягнутого рівня значущості (p), що спостерігається при відповід-

ному значенні статистики χ^2 . Значення p трактується як найнижчий рівень значущості, на якому нульова гіпотеза була б відхилена [13]. У геометричній інтерпретації це означає, що порівнюються площі під кривою щільності розподілу χ^2 , як це показано на рис. 3.4, де a – експериментальні дані не суперечать гіпотезі, коли $\chi^2 < \chi_{кр}^2$, або $p > \alpha$; b – гіпотеза відхиляється, коли $\chi^2 > \chi_{кр}^2$ або $p < \alpha$.

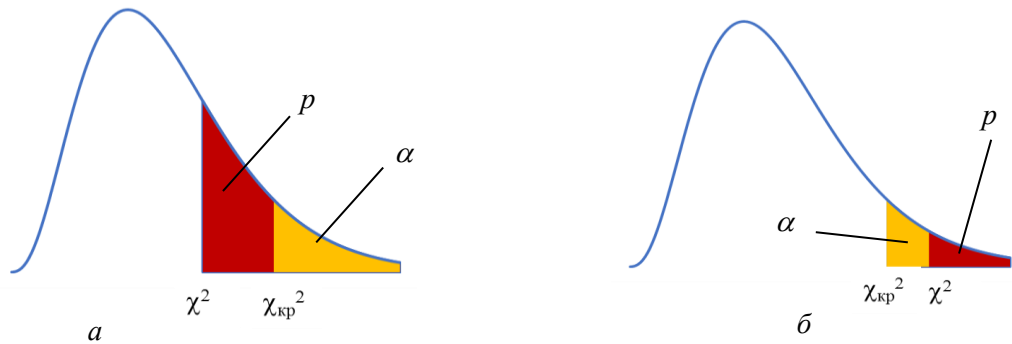


Рисунок 3.4 – Геометрична інтерпретація перевірки статистичних гіпотез за значенням досягнутого рівня значущості

3.2.1 Результати досліджень показників якості електроенергії у місці приєднання споживача до лінії «два проводи-рейка» зі збереженням нормальної схеми живлення

Отримані гістограми відносних частот та емпіричні функції розподілу показників якості на шинах тягової підстанції зображені на рис. 3.5 – 3.12.

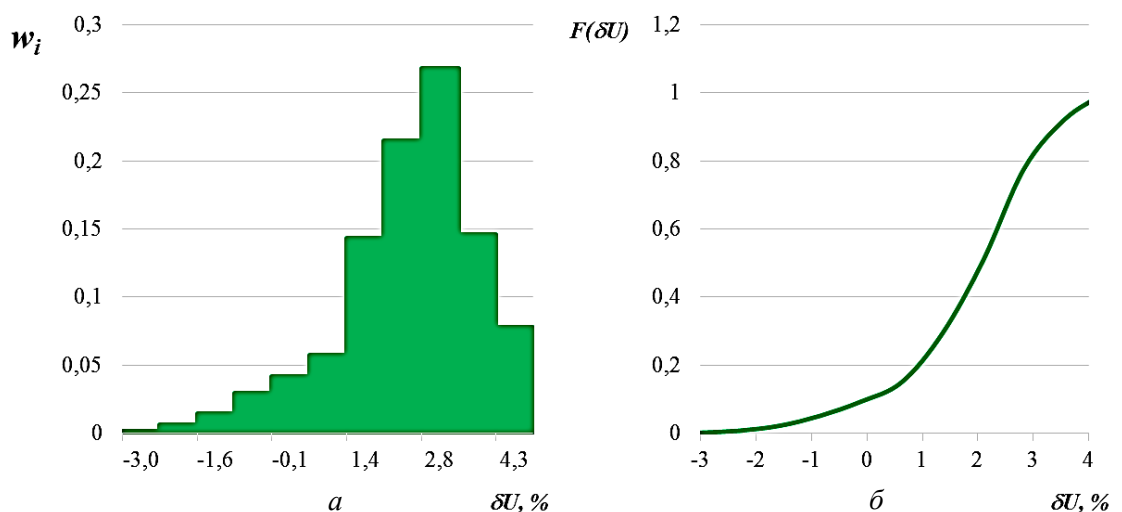


Рисунок 3.5 – Гістограма відносних частот (a) та емпірична функція (b) розподілу відхилення напруги на тягових шинах підстанції Плетений Ташлик за ГОСТ 13109-97

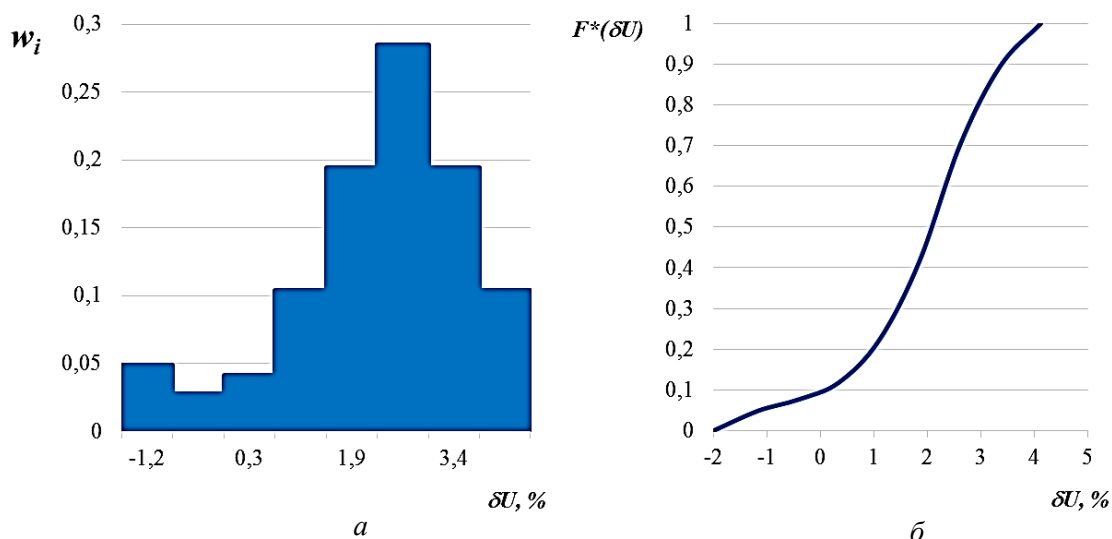


Рисунок 3.6 – Гістограма відносних частот (а) та емпірична функція (б) розподілу відхилення напруги на тягових шинах підстанції за ДСТУ EN 50160:2014

У результаті проведеного аналізу відповідно до вимог стандартів не виявлено порушення якості електроенергії за відхиленням напруги, під час вимірювання усереднені на часових інтервалах показники знаходились у допустимих межах (від -5 % до +5 % від номінального значення).

За отриманими даними для показника відхилення напруги визначено, що значення p менше за рівень значущості α , який становив 0,05 для нормального закону. Тому у разі подальшого статистичного аналізу цього показника необхідно використовувати непараметричні критерії оцінки.

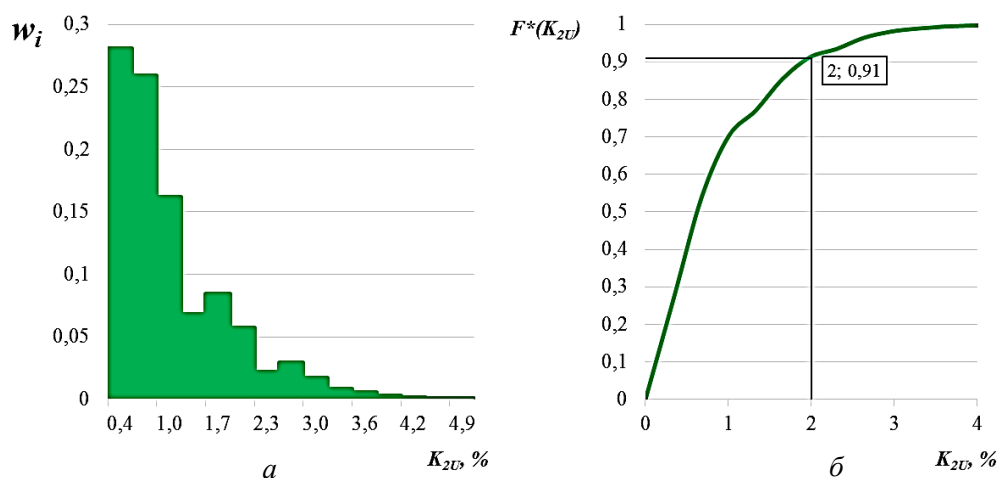


Рисунок 3.7 – Гістограма відносних частот (а) та емпірична функція (б) розподілу значень коефіцієнта зворотної послідовності напруги на тягових шинах підстанції за ГОСТ 13109-97

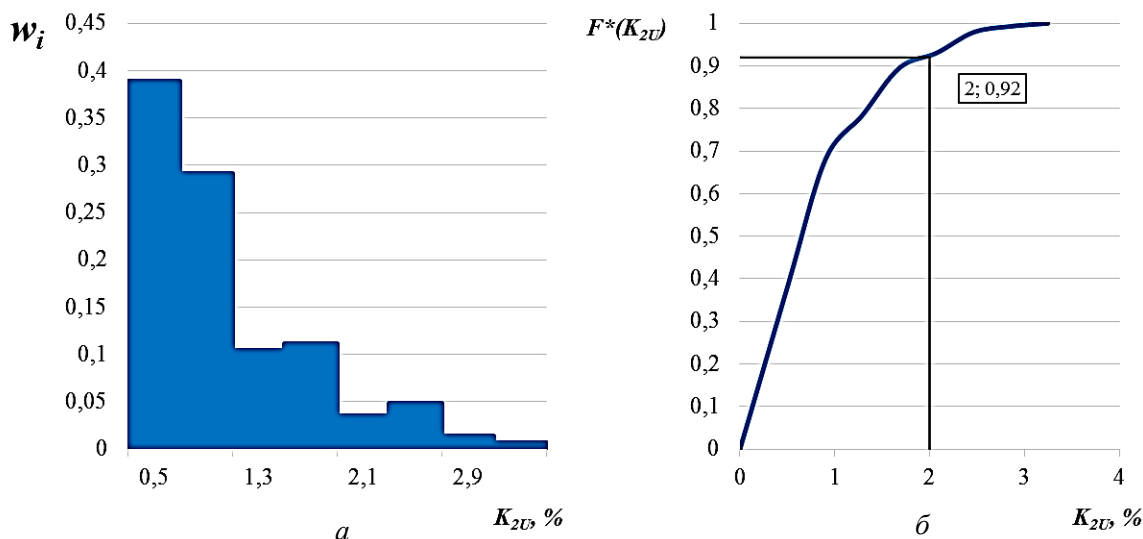


Рисунок 3.8 – Гістограма відносних частот (*a*) та емпірична функція (*б*) розподілу значень коефіцієнта зворотної послідовності напруги на тягових шинах підстанції за ДСТУ EN 50160:2014

Значення p при перевірці гіпотез про гама-розподіл коефіцієнта зворотної послідовності напруги становить 0,19, а при перевірці за логнормальним законом – 0,27.

На підставі дослідження встановлено, що порушено баланс напруги за вимогами [58] та [66], а саме зафіксовано перевищення граничного та нормального значення коефіцієнту зворотної послідовності напруги. Невідповідність вимогам до нормального значення показано на рис. 3.7 та 3.8, де на функції розподілу відмічені точки із абсцисою, що дорівнює нормально допустимому значенню коефіцієнта, та ординатою, яка відповідає імовірності P , з якою випадкова величина X матиме значення від 0 до x . Тобто, якщо $P(X) < 0,95$, то якість напруги не відповідає вимогам.

Максимальне значення показника несиметрії на 0,9 % перевищує граничне за вимогами [58] та дорівнює 4,90 %.

У [58] не визначені вимоги до коефіцієнта несинусоїдності кривої для рівня напруги, який використовується у тяговій мережі. Оскільки напруга 27,5 кВ відноситься до першого класу, то для оцінки несинусоїдності напруги на тягових шинах підстанції та у лінії ДПР використано вимоги до значення показників якості, що приведені для мереж із напругою 35 кВ.

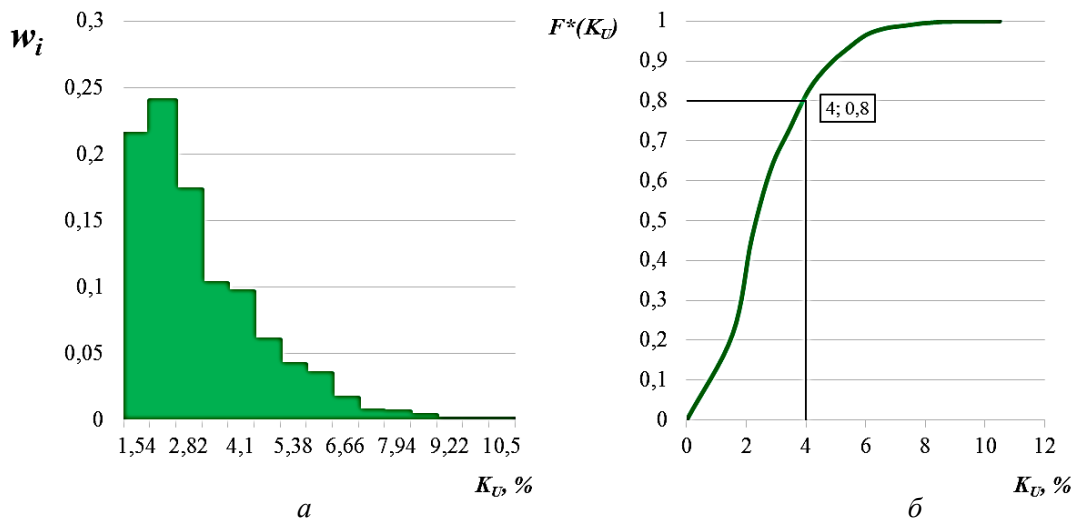


Рисунок 3.9 – Гістограма відносних частот (*a*) та емпірична функція (*б*) розподілу значень коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги між фазами А та В на тягових шинах підстанції за ГОСТ 13109-97

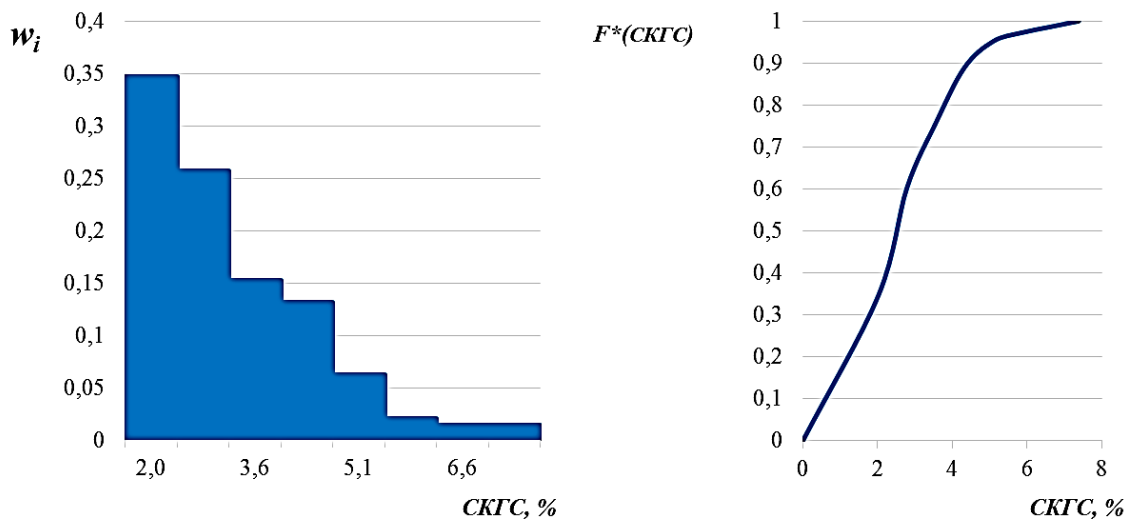


Рисунок 3.10 – Гістограма відносних частот (*a*) та емпірична функція (*б*) розподілу значень сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень напруги між фазами А та В на тягових шинах підстанції за ДСТУ EN 50160:2014

В результаті дослідження встановлено, що перевищено визначене у [58] максимальне значення коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги на 4,5 % та 2,70 % відповідно для напруг між фазами *A-B* та *B-C*. Для напруги між *A* та *B* із імовірністю у 20 % значення показника вийде за нормоване значення за вимогами [58]. Для напруги між фазами *B* та *C* ця імовірність нижча і становить 7 %.

При усередненні експериментальних даних отримані значення *SKGC* не пе-

ревищують 8 %, тому за вимогами [66] спотворення кривої напруги у межах норми.

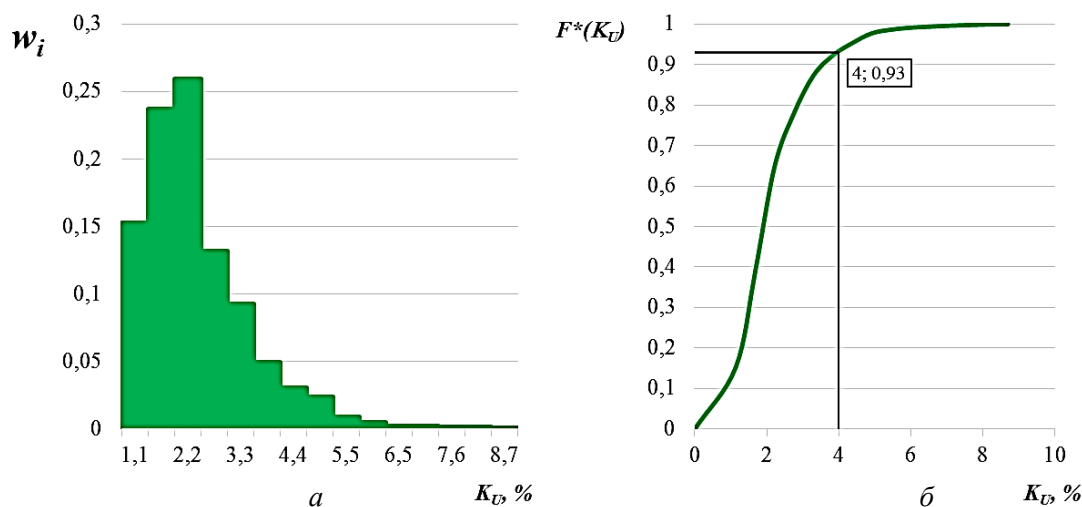


Рисунок 3.11 – Гістограма відносних частот (a) та емпірична функція (\bar{b}) розподілу випадкових значень коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги між фазами В та С на тягових шинах підстанції за ГОСТ 13109-97

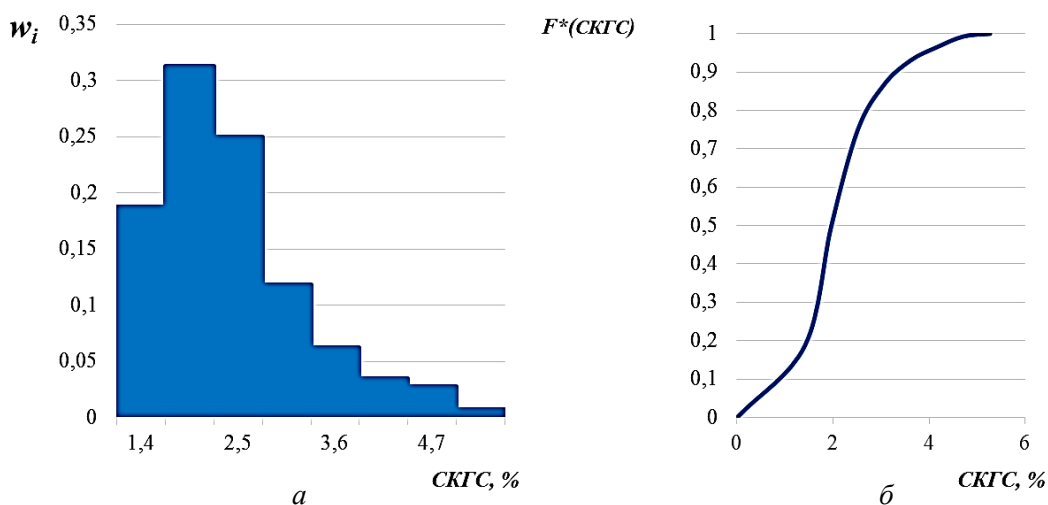


Рисунок 3.12 – Гістограма відносних частот (a) та емпірична функція (\bar{b}) розподілу випадкових значень сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень напруги між фазами В та С на тягових шинах підстанції за ДСТУ EN 50160:2014

При аналізі експериментальних даних за вимогами [58] не виявлено достатніх підстав для прийняття гіпотези про нормальність розподілу коефіцієнтів несинусоїдності кривої напруги, що свідчить про більшу ефективність непараметричних методів для їх аналізу. Для розрахованого відповідно до вимог [66] сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень експериментальні дані не суперечили із гіпо-

тезою про логнормальність закону розподілу. Результати перевірки за значенням p для СКГС напруги між фазами A та B становлять 0,19, для напруги між фазами B та C – 0,15.

Числові характеристики показників якості електроенергії виміряні на тягових шинах підстанції приведені у табл. 3.4, де у чисельнику число отримане із врахуванням вимог [58], а у знаменнику – [66].

Таблиця 3.4 Статистичні характеристики показників якості електроенергії на шинах тягової підстанції 27,5 кВ

Статистичний параметр	Усталене відхилення напруги	Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги / Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень	
			Напруга між фазами $A-B$	Напруга між фазами $B-C$
Середнє, %	1,86 / 1,86	0,83 / 0,83	2,76 / 2,76	2,14 / 2,14
Стандартна помилка середнього, %	0,04 / 0,11	0,01 / 0,05	0,01 / 0,10	0,01 / 0,07
Медіана, %	2,05 / 2,04	0,56 / 0,61	2,30 / 2,47	1,90 / 1,97
Мода, %	2,32 / 2,23	0,3 / 0,4	2,06 / 2,47	2,12 / 1,97
Стандартне відхилення %	1,35 / 1,29	0,77 / 0,63	1,46 / 1,20	1,09 / 0,84
Дисперсія %	1,82 / 1,66	0,59 / 0,40	2,14 / 1,45	1,18 / 0,71
Екссес	0,94 / 0,62	1,93 / 1,48	1,37 / 1,71	3,74 / 1,71
Асиметрія	-0,90 / -0,85	1,41 / 1,33	1,25 / 1,26	1,60 / 1,27
Інтервал групування гістограм, %	0,73 / 0,76	0,32 / 0,39	0,64 / 0,76	0,54 / 0,55
Мінімум, %	-3,78 / -1,92	0,03 / 0,12	0,90 / 1,26	0,60 / 0,86
Максимум, %	4,30 / 4,12	4,90 / 3,25	10,50 / 7,38	8,70 / 5,26
Ширина інтервалу достовірності для оцінки середнього, %	0,14 / 0,42	0,02 / 0,21	0,04 / 0,41	0,03 / 0,28

На рисунках 3.13 – 3.22 показані гістограми відносних частот та функції розподілу показників якості у вторинному колі трансформатора КТП ДПР.

В результаті дослідження встановлено, що відхилення напруги у колі споживача не перевищує визначених у стандартах граничних рівнів та змінюються у діапазоні від -2 до 7 % при інтервалі усереднення 3 с [58] та від -0,6 % до 6,8 % при інтервалі 10 хв [66]. Проте зафіксовано зростання ймовірності виникнення понаднормального значення до 40 % проти 5 %, що регламентовані у [58].

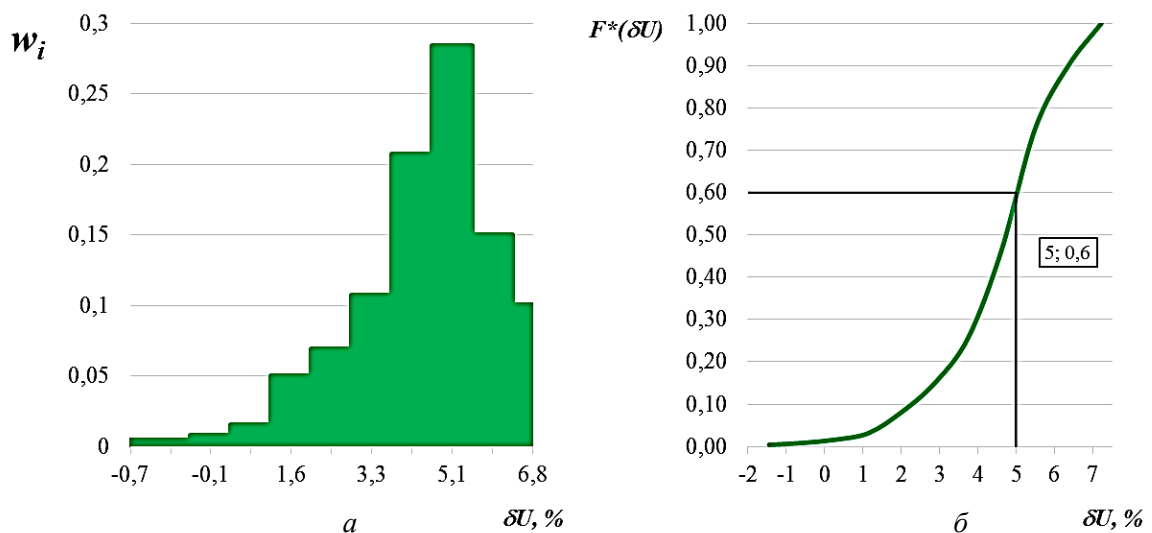


Рисунок 3.13 – Гістограма відносних частот (а) та емпірична функція (б) розподілу відхилень напруги у вторинній обмотці КТП ДПР за ГОСТ 13109-97

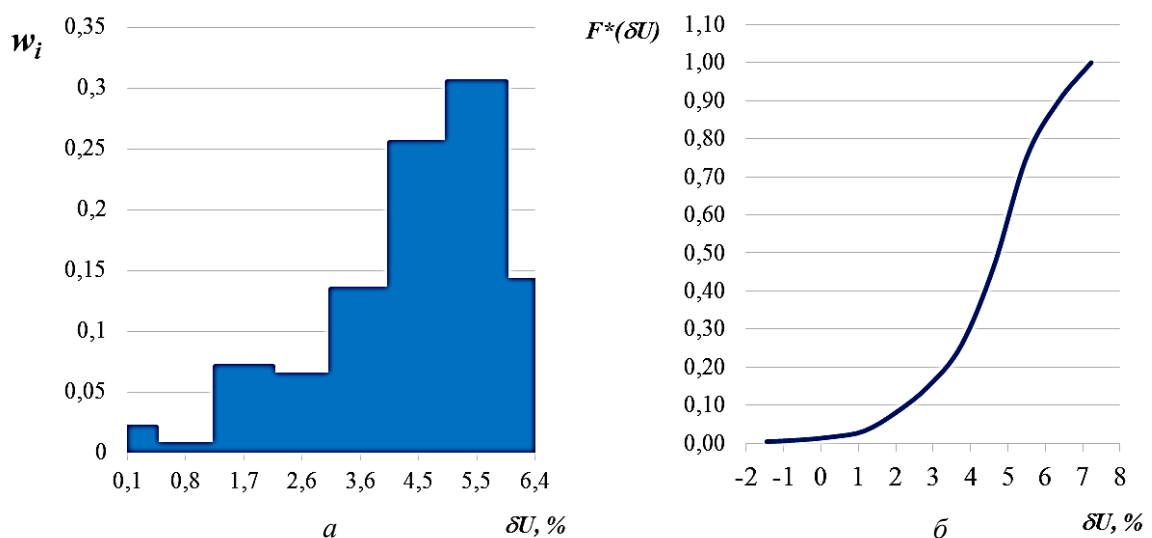


Рисунок 3.14 – Гістограма відносних частот (а) та емпірична функція (б) розподілу відхилень напруги у вторинній обмотці КТП ДПР за ДСТУ EN 50160:2014

Отримане значення p при перевірці гіпотези про нормальність закону розподілу значень відхилення напруги у колі споживача менше за 0,05.

Виявлено невідповідність вимогам щодо балансу напруги у мережі споживача. Перевищення граничного значення коефіцієнту зворотної послідовності становить 2,7 % від визначеного у [58] рівня. Імовірність виникнення понаднормального значення коефіцієнту зворотної послідовності напруги за двома стандартами становить близько 30 % проти 5 % за вимогою [58] та [66] (рис. 3.15, 3.16).

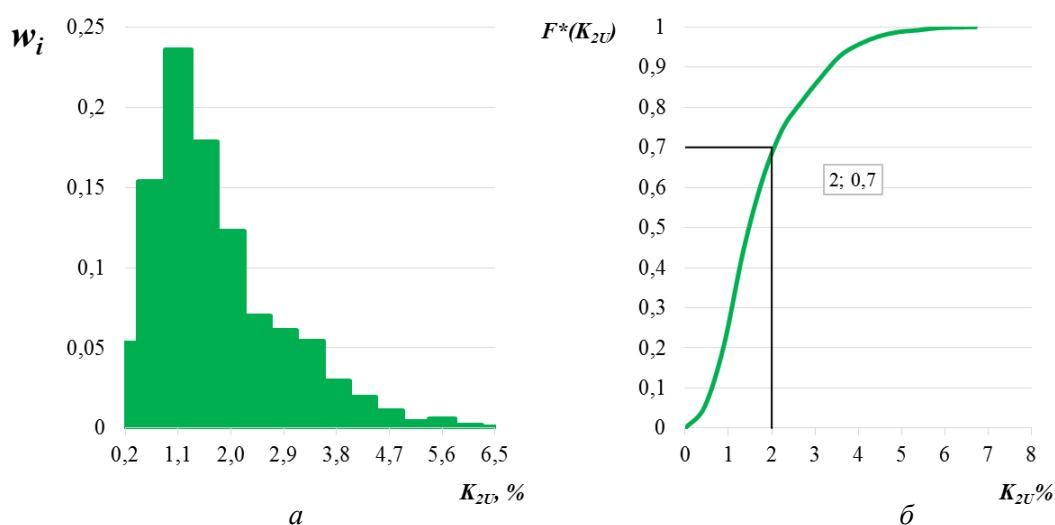


Рисунок 3.15 – Гістограма відносних частот (a) та емпірична функція (b) розподілу значень коефіцієнта зворотної послідовності напруги у вторинній обмотці КТП ДПР за ГОСТ 13109-97

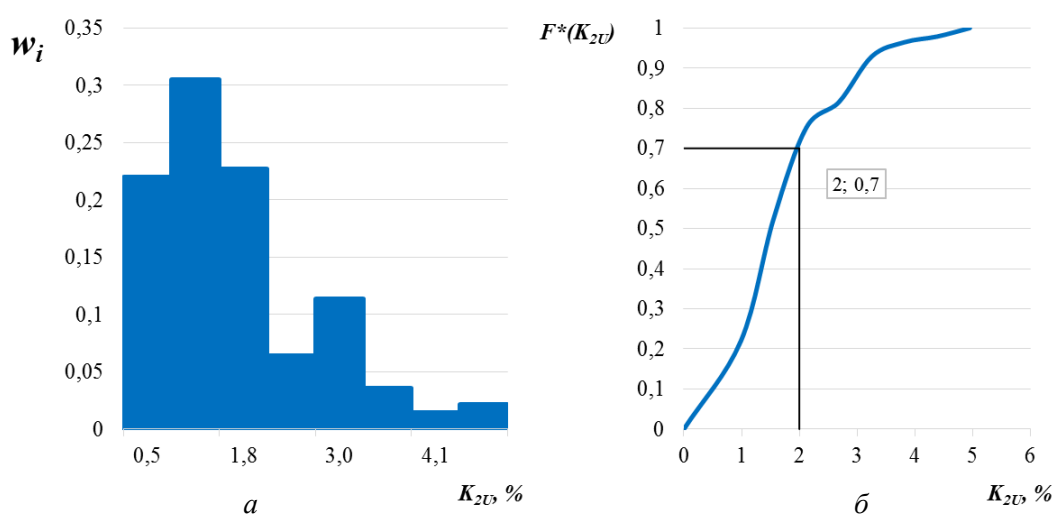


Рисунок 3.16 – Гістограма відносних частот (a) та емпірична функція (b) розподілу значень коефіцієнта зворотної послідовності напруги у вторинній обмотці КТП ДПР за ДСТУ EN 50160:2014

Отриманий рівень значущості p для перевірки гіпотез про тип закону розподілу коефіцієнта зворотної послідовності напруги не перевищує значення α , відповідно для цього показника використаємо непараметричні методи статистичної оцінки.

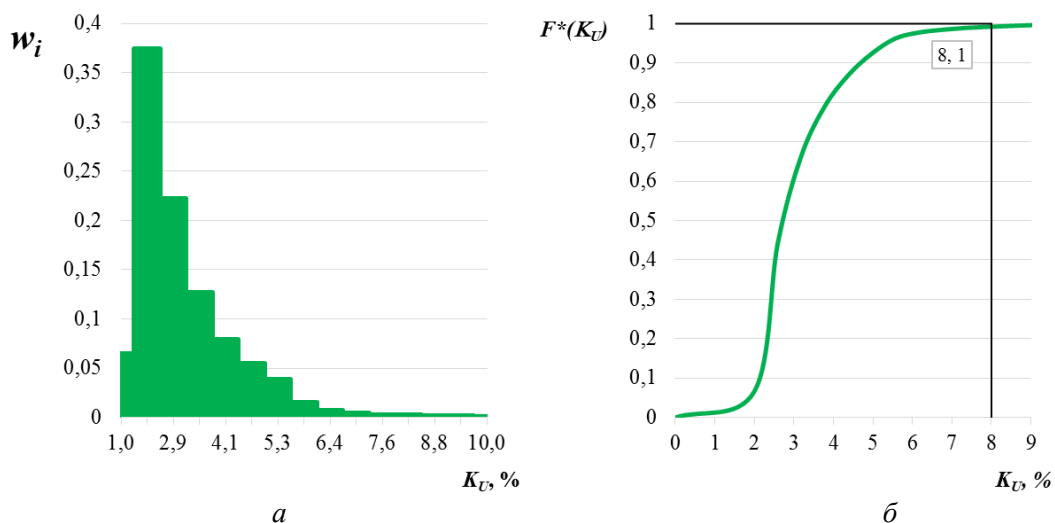


Рисунок 3.17 – Гістограма відносних частот (а) та емпірична функція (б) розподілу значень коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги між фазами А та В у вторинній обмотці КТП ДПР за ГОСТ 13109-97

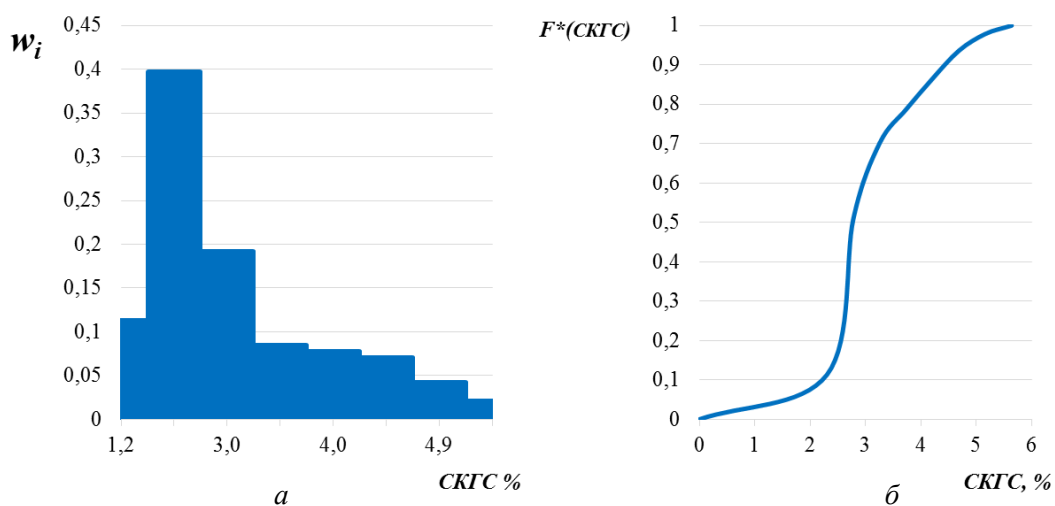


Рисунок 3.18 – Гістограма відносних частот (а) та емпірична функція (б) розподілу значень сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень напруги між фазами А та В у вторинній обмотці КТП ДПР за ДСТУ EN 50160:2014

Під час вимірювань перевищення граничного значення коефіцієнту несину-

соїдності напруги за [58] та *СКГС* за [66] не зафіксовано, а ймовірність виникнення понаднормального значення цих показників становить менше одного відсотка.

У наслідок перевірки гіпотез про тип розподілу коефіцієнтів несинусоїдності напруги та сумарних гармонічних спотворень встановлено, що більшу ефективність для статистичного аналізу цих показників матимуть непараметричні методи.

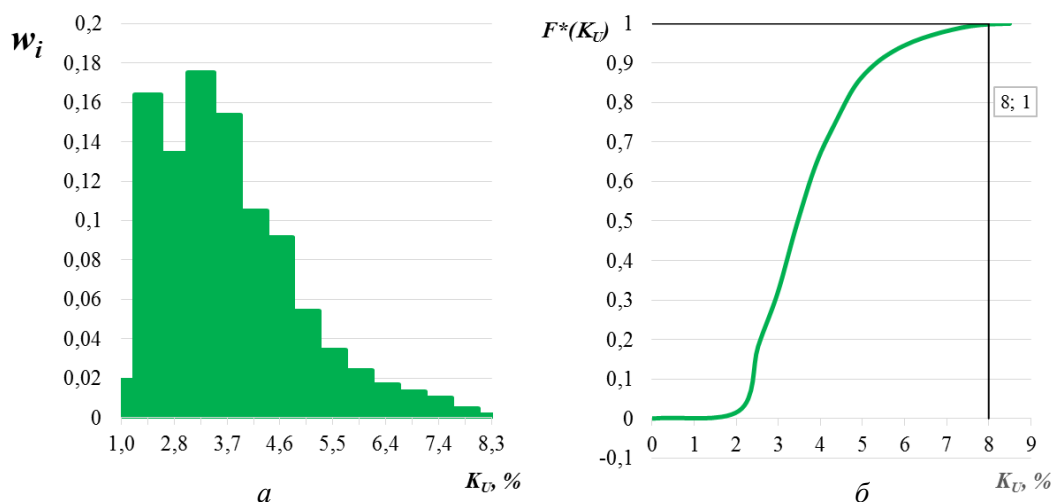


Рисунок 3.19 – Гістограма відносних частот (*a*) та емпірична функція (*б*) розподілу значень коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги між фазами *B* та *C* у вторинній обмотці КТП ДПР за ГОСТ 13109-97

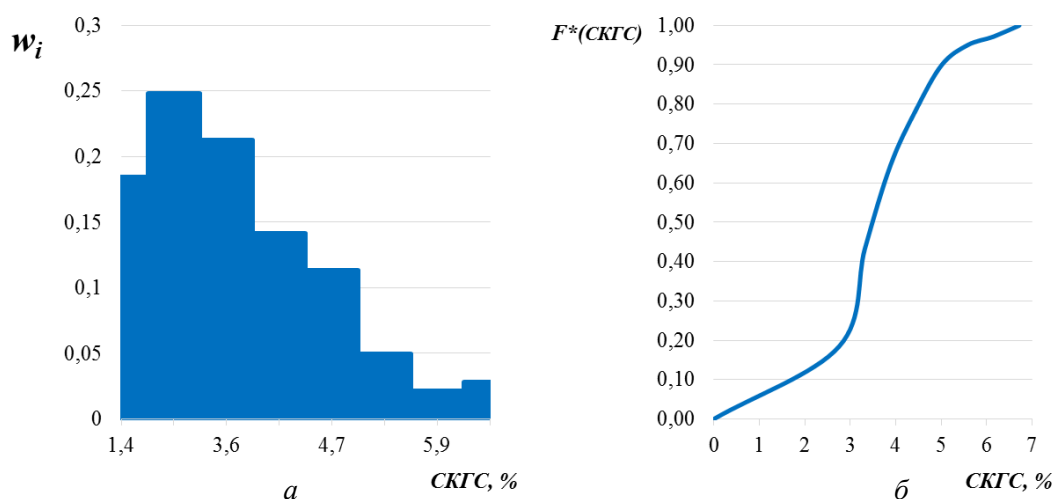


Рисунок 3.20 – Гістограма відносних частот (*a*) та емпірична функція (*б*) розподілу значень сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень напруги між фазами *B* та *C* у вторинній обмотці КТП ДПР за ДСТУ EN 50160:2014

Числові характеристики розподілу випадкових значень, мінімальні та мак-

симальні значення вибірок та інтервал достовірності для середнього вибіркового значення розглянутих показників якості приведені у табл. 3.5

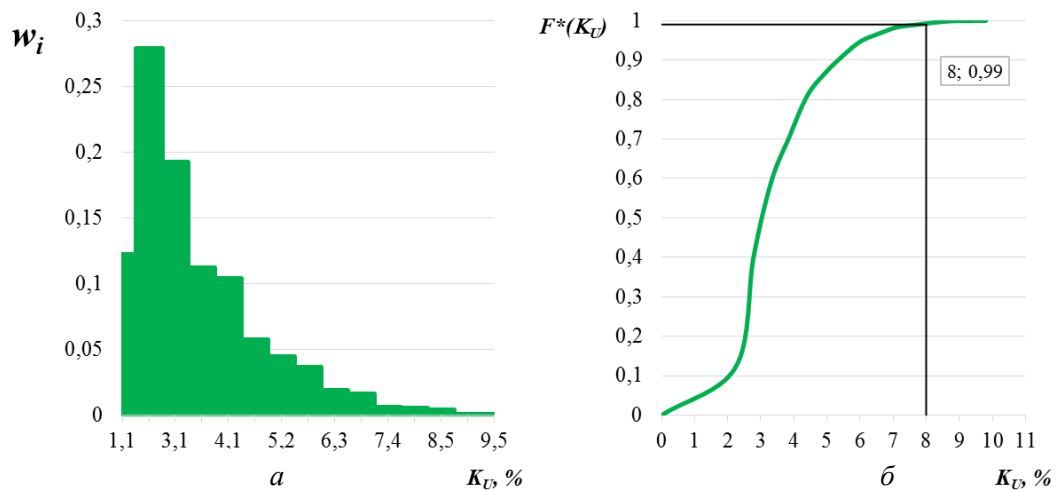


Рисунок 3.21 – Гістограма відносних частот (а) та емпірична функція (б) функція розподілу значень коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги між фазами С та А у вторинній обмотці КТП ДПР за ГОСТ 13109-97

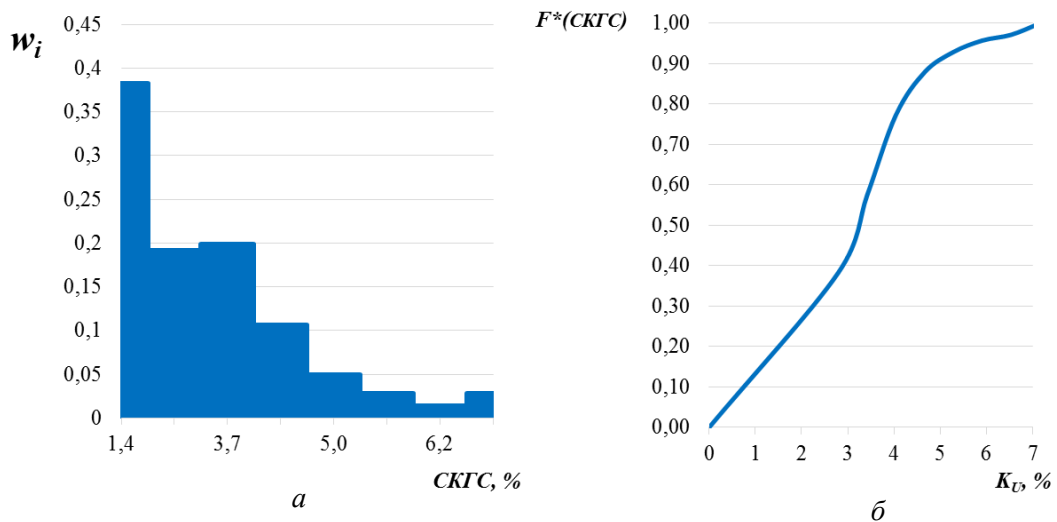


Рисунок 3.22 – Гістограма відносних частот (а) та емпірична функція (б) розподілу випадкових значень сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень напруги С та А у колі споживача за ДСТУ EN 50160:2014

Таким чином при передачі електроенергії від підстанції до споживача максимальне значення відхилення напруги збільшилось на 2...3 %; коефіцієнт зворотної послідовності напруги збільшився на 2 % за [58]. Істотно збільшилась ймовірність виникнення понаднормального значення відхилення та несиметрії напруги на 40 % за [58] та 21 % за [66] відповідно.

Таблиця 3.5 Статистичні характеристики показників якості електроенергії у колі вторинної обмотки трансформатору КТП ДПР

Статистичний параметр	Усталене відхилення напруги	Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги / Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень		
			Напруга між фазами $A-B$	Напруга між фазами $B-C$	Напруга між фазами $C-A$
Середнє, %	4,48 / 4,48	1,75 / 1,74	3,07 / 3,07	3,69 / 3,07	3,44 / 3,43
Стандартна помилка середнього, %	0,04 / 0,13	0,01 / 0,08	0,01 / 0,07	0,01 / 0,08	0,01 / 0,09
Медіана, %	4,75 / 4,73	1,46 / 1,55	2,70 / 2,77	3,50 / 3,49	3,00 / 3,16
Мода, %	5,34 / 5,33	1,19 / 1,70	2,30 / 2,53	3,13 / 3,14	2,38 / 1,26
Стандартне відхилення, %	1,57 / 1,51	1,08 / 0,92	1,18 / 0,87	1,21 / 0,99	1,30 / 1,08
Дисперсія, %	2,45 / 2,27	1,17 / 0,85	1,39 / 0,76	1,47 / 0,98	1,68 / 1,16
Ексцес	1,29 / 0,86	1,23 / 1,09	5,34 / 0,50	0,79 / 0,28	1,68 / 1,41
Асиметрія	-0,97 / -0,91	1,15 / 1,14	1,94 / 1,13	0,98 / 0,85	1,35 / 1,29
Інтервал групування гістограм, %	9,54 / 7,54	6,71 / 4,53	8,90 / 3,81	6,90 / 4,53	8,10 / 4,98
Мінімум, %	-2,31 / 0,66	0,00 / 0,42	1,40 / 1,83	1,60 / 2,19	1,70 / 2,17
Максимум, %	7,23 / 6,88	6,71 / 4,95	10,30 / 5,64	8,50 / 6,72	9,80 / 7,16
Ширина інтервалу достовірності для оцінки середнього, %	0,16 / 0,25	0,04 / 0,15	0,04 / 0,14	0,04 / 0,16	0,04 / 0,18

Значення коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги зменшилось на 1 % за [58]. Ймовірність виникнення понаднормального значення коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги зменшилось від 20 % до 1 %, що обумовлено зміною ступеня напруги та збільшенням нормованого значення для мережі 0,38 кВ у [58].

До табл. 3.6 зведені максимальні значення показників якості та ймовірність появи понаднормальних їх значень, що зафіксовані на шинах тягової підстанції

27,5 кВ та у мережі споживача 0,38 кВ, відповідно до [58] та [66].

Таблиця 3.6 Ступінь погіршення якості електроенергії при її передачі лінією ДПР²

Показник	Шини 27,5 кВ підстанції		Мережа споживача лінії ДПР 0,38 кВ	
	Макс. знач.	Ймовірність перевищення	Макс. знач.	Ймовірність перевищення
	ГОСТ / ДСТУ			
Усталене відхилення напруги	4 % / 4 %	≈0 % / ≈0 %	7 % / 6 %	40 % / ≈0 %
Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	5 % / не нормується	9 % / 8 %	7 % / не нормується	30 % / 30 %
Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги ³	11 % / 7 %	20 % / не нормується	10 % / 7 %	1 % / не нормується

Оскільки найбільшого спотворення при передачі зазнала симетрія векторів напруги, визначимо силу взаємозв'язку між небалансом струму та напруги у колі споживача та отримаємо рівняння, що описує цей зв'язок.

Небаланс струму визначено як відношення середньоквадратичного значення струму зворотної послідовності $I_{2(1)}$ до середньоквадратичного струму прямої послідовності $I_{1(1)}$

$$K_{2I} = \frac{I_{2(1)}}{I_{1(1)}} \cdot 100, \quad (3.5)$$

де K_{2I} – коефіцієнт зворотної послідовності струму

Діаграма розсіювання K_{2U} та K_{2I} представлена на рис. 3.23, де також приведено рівняння регресії для заданого розподілу.

Оскільки гіпотезу про нормальність розподілу коефіцієнта зворотної послідовності напруги у споживача підтвердити не вдалося, для визначення сили взаємозв'язку між показниками небалансу використано метод непараметричного ко-

² Значення показників округлені до десятих.

³ Значення коефіцієнту приведені для найбільш спотвореної напруги.

реляційного аналізу та розраховано коефіцієнт кореляційний Спірмена ρ [95].

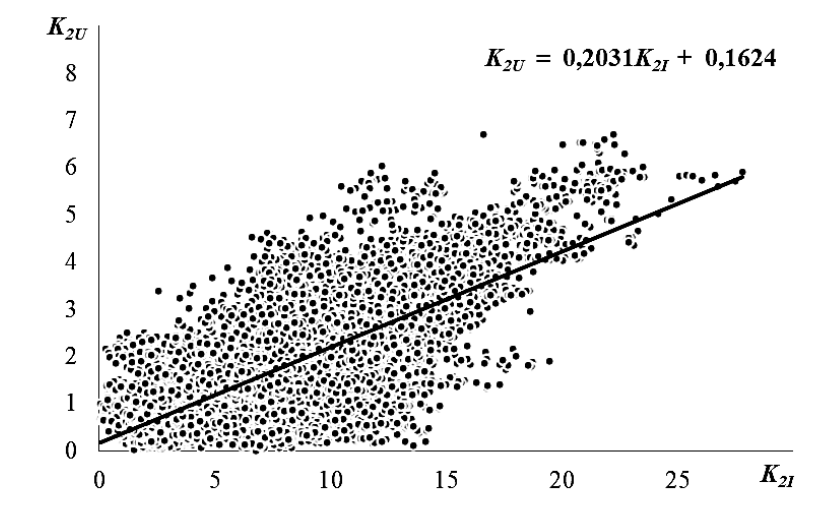


Рисунок 3.23 – Діаграма розсіювання K_{2U} та K_{2I} у мережі споживача ДПР

Перевірка статистичної значущості коефіцієнту Спірмена проведено із використанням t -критерію Стюдента [13, 95]. через гіпотезу про відсутність кореляції між K_{2U} та K_{2I} ($\rho = 0$) Результати розрахунку приведені у табл. 3.7. Оскільки t -розраховане значно більше значення t -критичне, то гіпотеза відкидається, а коефіцієнт має статистичну ρ значимість.

Таблиця 3.7 Перевірка гіпотези про відсутність статистичної значущості кореляції між K_{2U} та K_{2I}

ρ	t -розраховане	t -критичне
0,63	104,15	1,96

При значенні коефіцієнту Спірмена на рівні 0,63 можливо говорити про помітну, але не сильну кореляцію K_{2U} та K_{2I} , що також свідчить про неістотний вплив споживача на погіршення несиметрію напруги.

3.2.2 Результати дослідження показників якості електроенергії в залежності від режиму живлення лінії «два проводи-рейка»

Статистичні функції, розраховані для кожного режиму живлення споживача, представлені на рис. 3.24 – 3.33. Функції щільності імовірності зображені у вигляді полігону відносних частот, де маркерами позначені точки з абсцисами,

рівними серединам інтервалів групування, а ординати – значення відносних частот.

Розраховані усереднені значення відхилення напруги за [58] змінюються у межах від +6 %... +11 % відносно номінального рівня напруги у мережі споживача (380 В), що свідчить про порушення вимог стандарту до нормально допустимих значень, які встановлені [58] на рівні 5 %. Відхилення напруги за вимогами [66] у межах допустимих значень, не перевищує ± 10 %.

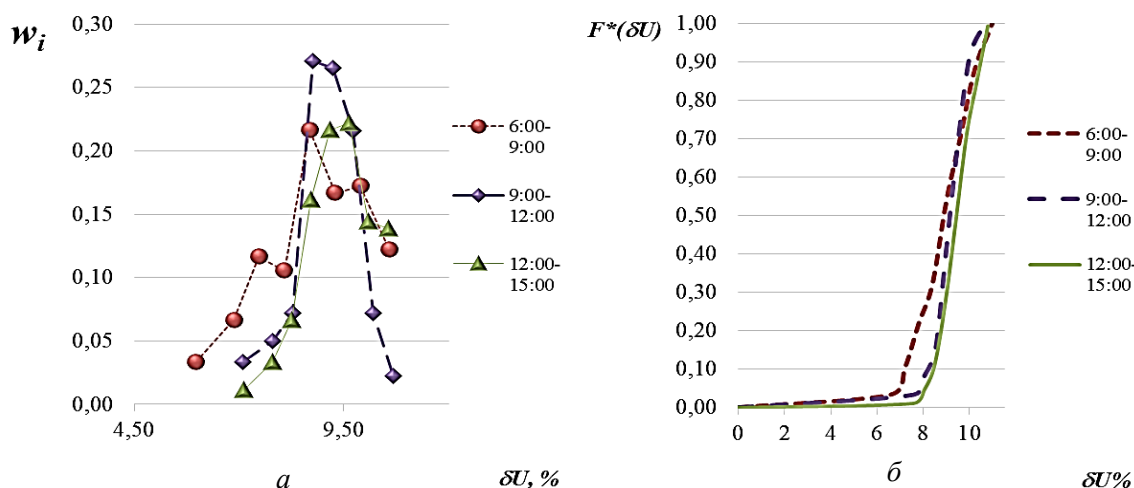


Рисунок 3.24 – Полігон відносних частот (*a*) та функція розподілу (*б*) значень відхилення напруги за ГОСТ 13109-97

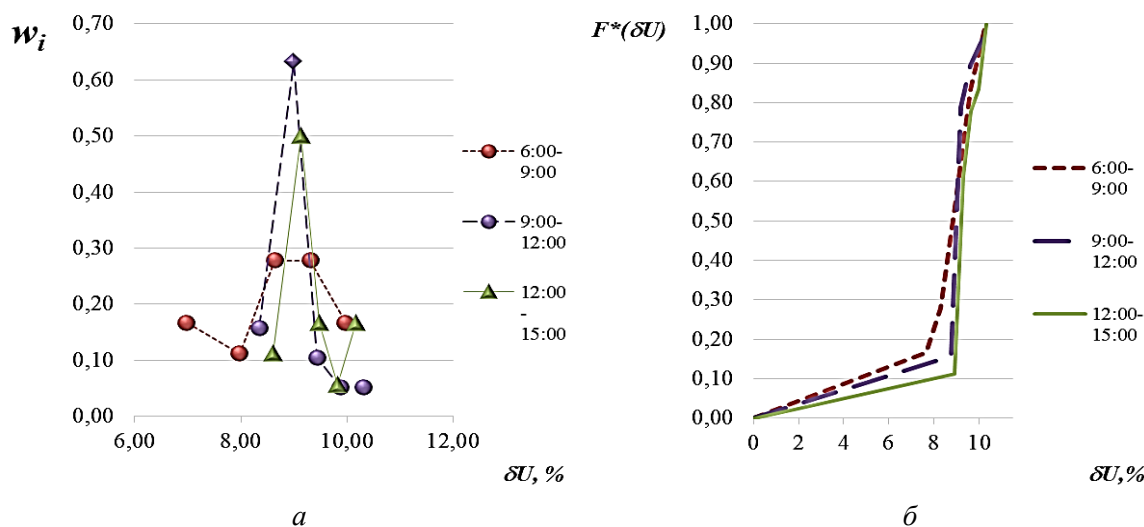


Рисунок 3.25 – Полігон відносних частот (*a*) та функція розподілу (*б*) значень відхилення напруги за ДСТУ EN 50160:2014

Спотворення зазнала симетрія векторів напруги у колі споживача, що ви- значається у перевищенні коефіцієнтом зворотної послідовності напруги норма- льно допустимого значення в усіх режимах роботи. Ймовірність появи неякісної напруги у першому, другому та третьому режимі живлення споживача складає 61 %, 6 %, 20 % за [58] та 61 %, 8 %, 25 % за [66] (рис. 3.25 та 3.26) відповідно.

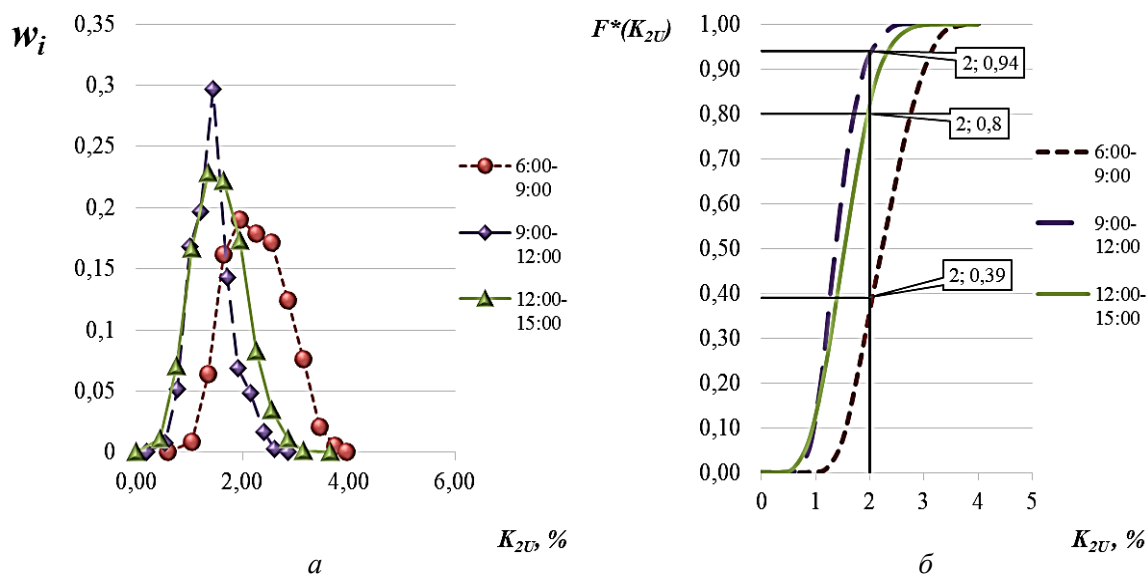


Рисунок 3.26 – Полігон відносних частот (а) та функція розподілу (б) випадкових значень коефіцієнтів зворотної послідовності напруги за ГОСТ 13109-97

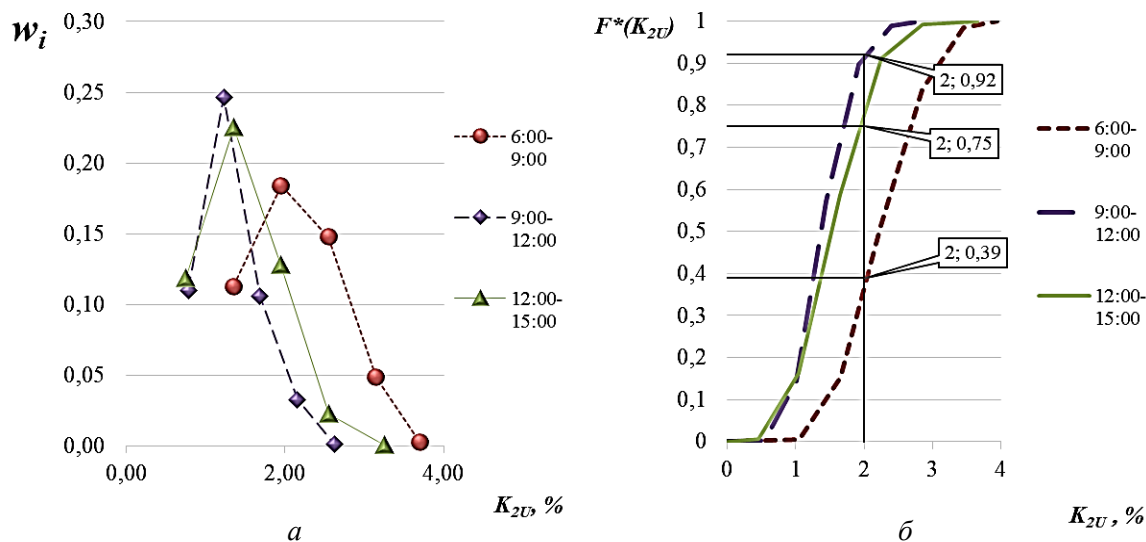


Рисунок 3.27 – Полігон відносних частот (а) та функція розподілу (б) випадкових значень коефіцієнтів зворотної послідовності напруги за ДСТУ EN 50160:2014

За показниками якості, що використані для оцінки форми кривої напруги, порушення вимог [58] та [66] не зафіксовано.

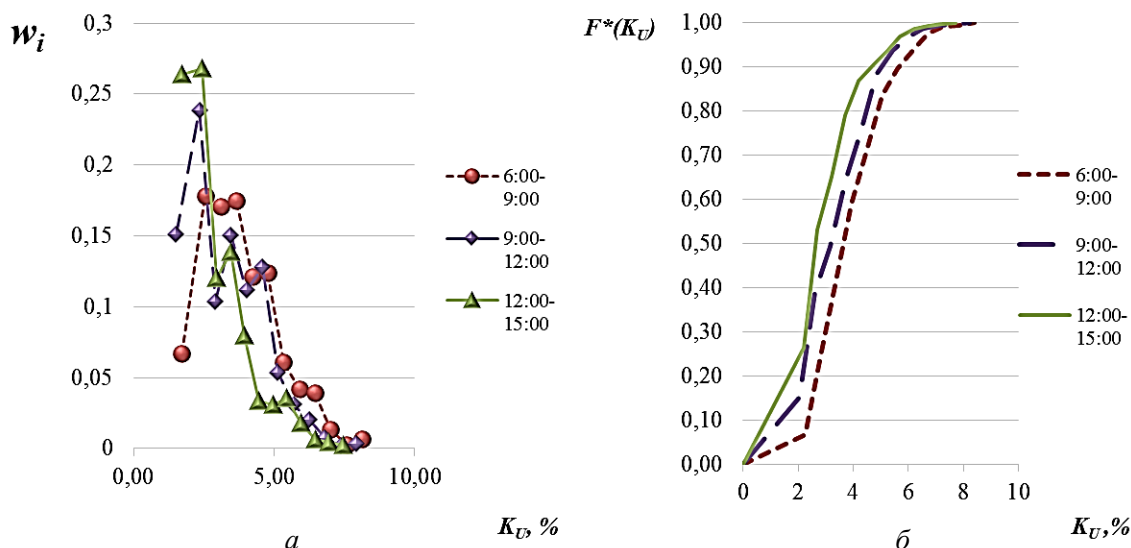


Рисунок 3.28 – Полігон відносних частот (*a*) та функція розподілу (*б*) випадкових значень коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги між фазами *A* та *B* за ГОСТ 13109-97

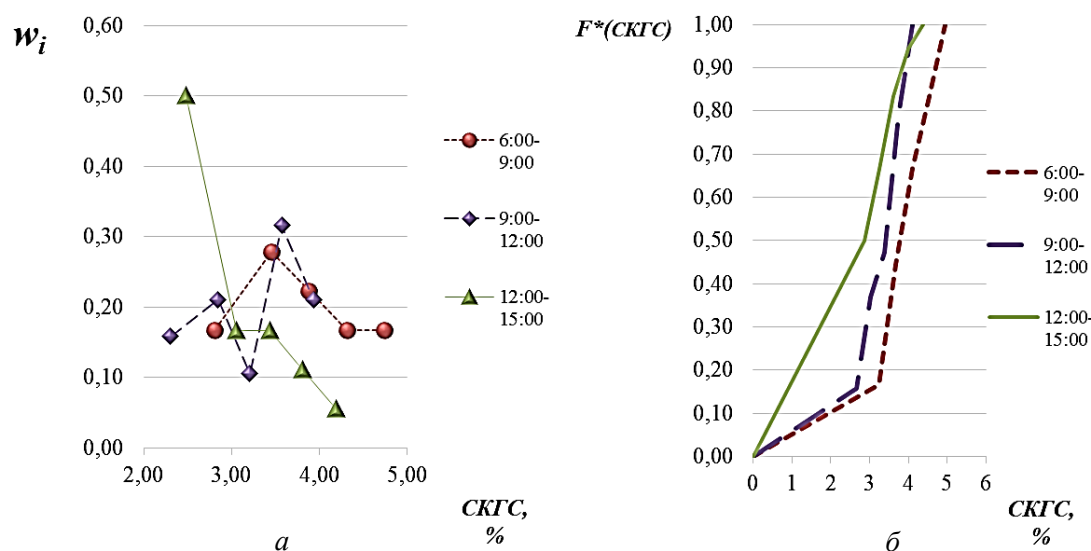


Рисунок 3.29 – Полігон відносних частот (*a*) та функція розподілу (*б*) випадкових значень сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень напруги між фазами *A* та *B* за ДСТУ EN 50160:2014

У результаті перевірки гіпотез про тип закону яким описується розподіл показника якості електроенергії встановлено, що немає підстав для відхилення гіпотези про нормальність розподілу відхилення напруги, розрахованого за вимогами [58] та [66] у режимі живлення від підстанції Чубівка.

Для розподілу показника несиметрії напруги, розрахованого за вимогами [58] та [66] у трьох режимах живлення, не відхилено лише гіпотезу про логнорма-

льний закон розподілу. Також відсутні підстави для відхилення гіпотез про лог-нормальність розподілу коефіцієнта несинусоїдності напруги [58] споживача у трьох режимах живлення.

Для розподілу відхилення напруги у режимі двостороннього живлення та живлення від підстанції Слобідка, а також для отриманих розподілів СКГС [66] встановлено, що у разі їх подальшого аналізу ефективнішими є непараметричні методи статистичної оцінки.

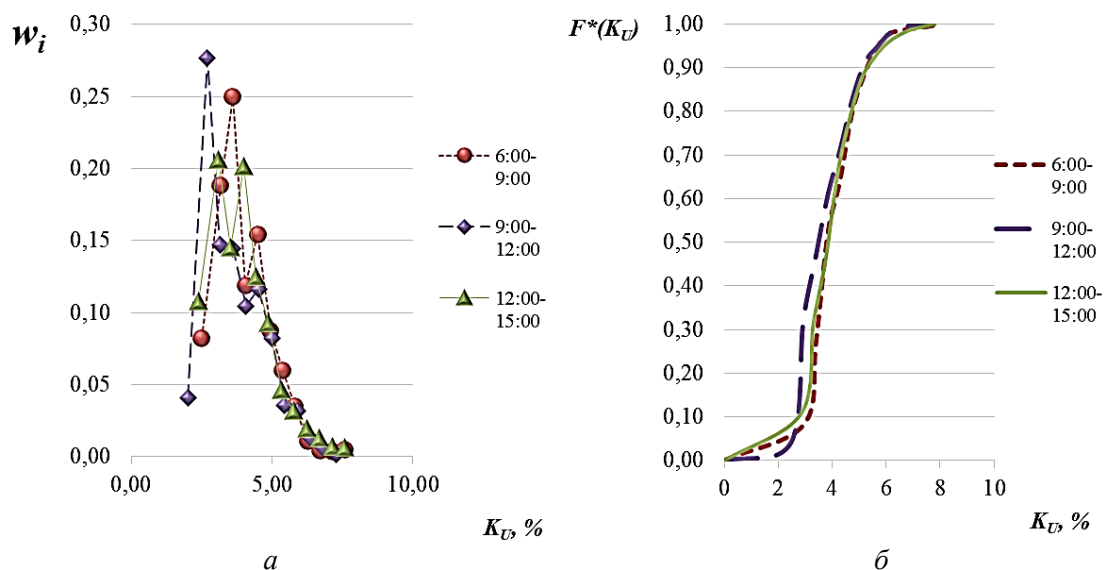


Рисунок 3.30 – Полігон відносних частот (*a*) та функція розподілу (*б*) випадкових значень коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги між фазами *B* та *C* за ГОСТ 13109-97

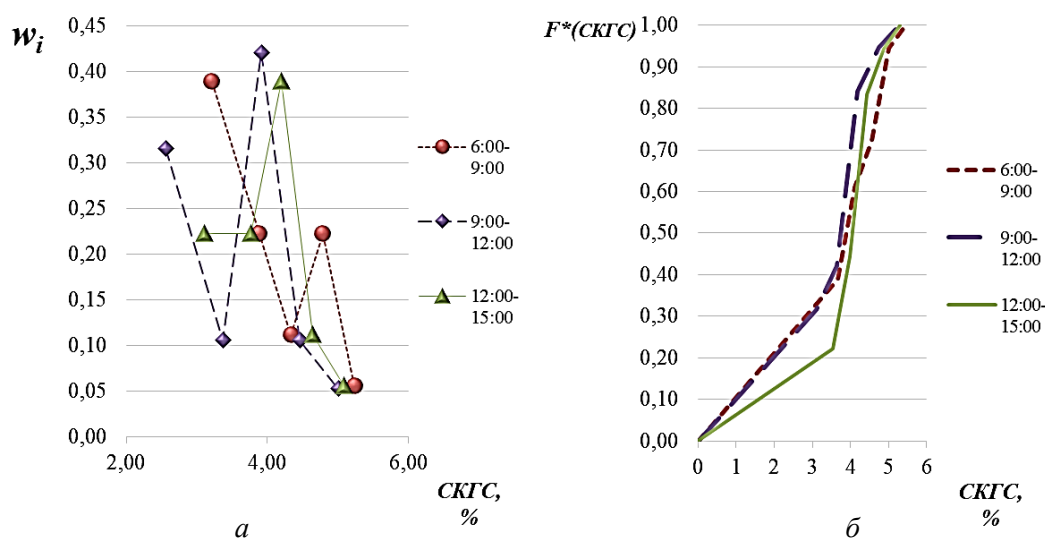


Рисунок 3.31 – Полігон відносних частот (*a*) та функція розподілу (*б*) випадкових значень сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень напруги між фазами *B* та *C* за ДСТУ EN 50160:2014

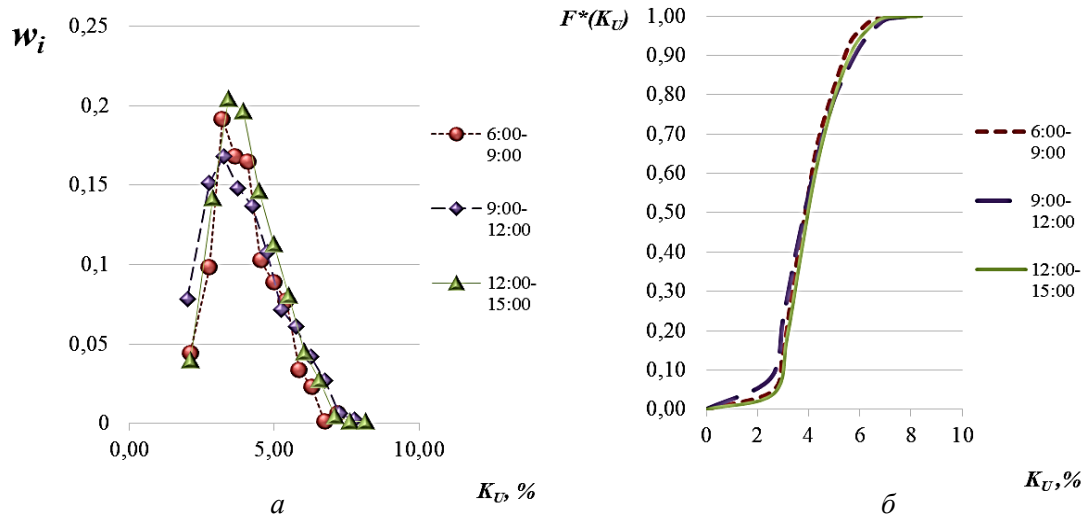


Рисунок 3.32 – Полігон відносних частот (а) та функція розподілу (б) випадкових значень коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги між фазами С та А за ГОСТ 13109-97

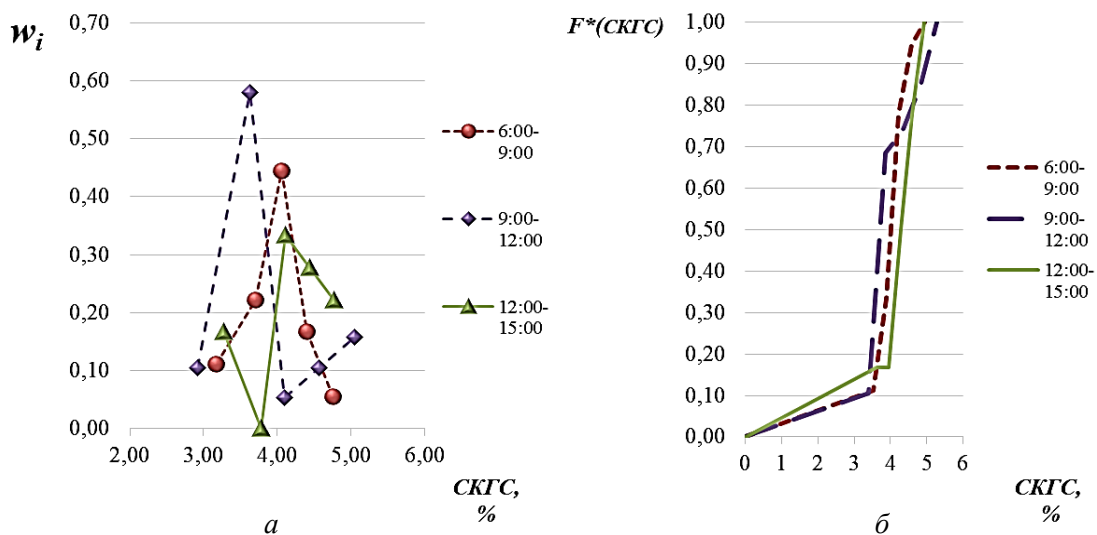


Рисунок 3.33 – Полігон відносних частот (а) та функція розподілу (б) випадкових значень сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень напруги між фазами С та А за ДСТУ EN 50160:2014

Розраховані числові характеристики для режимів живлення споживача зведені у табл. 3.8-3.10, де через риску вказані дані, отримані за вимогами двох стандартів: у чисельнику для [58] та у знаменнику для [66].

Кількісна оцінка ефекту від переведення на двостороннє живлення споживача виведена через порівняння значень мод розподілів показників якості у першому та третьому режимі у відношенні до другого режиму живлення споживача.

Таблиця 3.8 Статистичні характеристики показників якості електроенергії у режимі живлення споживача від підстанції Чубівка

Статистичний параметр	Усталене відхилення напруги	Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги / Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень		
			Напруга між фазами <i>A-B</i>	Напруга між фазами <i>B-C</i>	Напруга між фазами <i>C-A</i>
Середнє, %	8,82 / 8,82	2,25 / 2,25	3,86 / 3,86	4,01 / 4,01	3,99 / 3,99
Стандартна помилка середнього, %	0,08 / 0,24	0,01 / 0,11	0,03 / 0,15	0,02 / 0,15	0,02 / 0,1
Медіана, %	8,81 / 8,95	2,41 / 2,40	3,7 / 3,96	3,80 / 3,8	3,8 / 4,02
Мода, %	8,63 / 9,26	1,95 / 1,92	2,8 / 4,05	3,63 / 3,56	3,31 / 4,3
Стандартне відхилення, %	1,13 / 1,03	0,60 / 0,48	1,26 / 0,65	0,92 / 0,65	1,00 / 0,43
Дисперсія в, %	1,28 / 1,06	0,36 / 0,23	1,59 / 0,43	0,85 / 0,42	0,99 / 0,19
Екссес	-0,72 / -0,81	-0,65 / -0,76	0,16 / -0,9	1,05 / -0,4	-0,17 / 0,56
Асиметрія	-0,32 / -0,42	0,23 / 0,43	0,75 / 0,04	0,96 / 0,74	0,53 / 0,26
Інтервал групування гістограм, %	4,83 / 3,33	3,00 / 1,57	6,70 / 2,15	5,3 / 2,25	5,3 / 1,77
Мінімум, %	6,13 / 6,98	0,05 / 0,73	1,7 / 2,81	2,5 / 3,21	2,1 / 3,17
Максимум, %	10,96 / 10,31	3,94 / 3,78	8,4 / 4,96	7,8 / 5,46	7,4 / 4,94
Ширина інтервалу достовірності для оцінки середнього, %	0,34 / 1,02	0,006 / 0,041	0,1 / 0,66	0,08 / 0,64	0,08 / 0,42

Таблиця 3.9 Статистичні характеристики показників якості електроенергії під час двостороннього живлення споживача

Статистичний параметр	Усталене відхилення напруги	Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги / Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень		
			Напруга між фазами <i>A-B</i>	Напруга між фазами <i>B-C</i>	Напруга між фазами <i>C-A</i>
1	2	3	4	5	6
Середнє, %	9,11 / 9,18	1,39 / 1,41	3,34 / 3,03	3,7 / 3,66	4,07 / 3,70
Стандартна помилка середнього, %	0,05 / 0,12	0,01 / 0,11	0,03 / 0,13	0,02 / 0,17	0,03 / 0,15

Продовження табл. 3.9

1	2	3	4	5	6
Медіана, %	9,1 / 9,09	1,44 / 1,58	3,2 / 3,4	3,5 / 3,78	3,9 / 3,76
Мода, %	8,76 / 8,99	1,46 / 1,23	3,45 / 2,85	2,69 / 3,92	3,20 / 3,65
Стандартне відхилення, %	0,69 / 0,54	0,63 / 0,47	1,25 / 0,57	1,03 / 0,76	1,21 / 0,65
Дисперсія, %	0,47 / 0,29	0,4 / 0,22	1,56 / 0,32	1,06 / 0,57	1,46 / 0,43
Ексцес	0,5 / 1,55	-0,35 / -0,51	0,07 / -1,1	-0,03 / -0,34	-0,39 / -0,65
Асиметрія	-0,31 / 1,07	0,25 / -0,1	0,73 / -0,21	0,79 / 0,4	0,55 / 0,5
Інтервал групування гістограм, %	3,84 / 2,18	3,37 / 1,67	6,7 / 1,81	5,5 / 2,72	6 / 2,37
Мінімум, %	7,08 / 8,34	0,06 / 0,69	1,5 / 2,3	2 / 2,56	2 / 2,91
Максимум, %	10,92 / 10,52	2,75 / 2,45	8,2 / 4,11	7,5 / 5,28	8 / 5,28
Ширина інтервалу достовірності для оцінки середнього, %	0,2 / 0,52	0,01 / 0,03	0,1 / 0,54	0,08 / 0,72	0,1 / 0,62

Таблиця 3.10 Статистичні характеристики показників якості електроенергії у режимі живлення споживача від підстанції Слобідка

Статистичний параметр	Усталене відхилення напруги	Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги / Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень		
			Напруга між фазами А-В	Напруга між фазами В-С	Напруга між фазами С-А
1	2	3	4	5	6
Середнє, %	9,41 / 9,37	1,62 / 1,55	3,05 / 2,77	3,99 / 3,63	4,14 / 3,76
Стандартна помилка середнього, %	0,06 / 0,12	0,01 / 0,1	0,02 / 0,12	0,02 / 0,15	0,02 / 0,11
Медіана, %	9,46 / 9,21	1,60 / 1,63	2,7 / 2,9	3,9 / 4,04	3,9 / 4,26
Мода, %	9,63 / 9,22	1,64 / 1,57	2,58 / 3,23	3,6 / 3,95	3,7 / 4,35
Стандартне відхилення, %	0,75 / 0,53	0,53 / 0,43	1,1 / 0,51	1,01 / 0,62	1,04 / 0,45
Дисперсія в, %	0,56 / 0,28	0,28 / 0,18	1,22 / 0,27	1,02 / 0,38	1,08 / 0,2
Ексцес	-0,15 / -0,52	-0,29 / -0,43	1,43 / 0,94	0,89 / -0,38	-0,16 / -0,1

Продовження табл. 3.10

Асиметрія	-0,35 / 0,58	0,26 / 0,21	1,32 / 1,16	0,96 / 0,29	0,57 / -0,37
Інтервал групування гістограм, %	3,69 / 1,75	3,07 / 1,61	6 / 1,9	5,4 / 2,2	6,3 / 1,66
Мінімум, %	7,1 / 8,6	0,03 / 0,45	1,7 / 2,48	2,4 / 3,11	2,1 / 3,28
Максимум, %	10,79 / 10,35	3,93 / 3,63	7,7 / 4,38	7,8 / 5,3	8,4 / 4,94
Ширина інтервалу достовірності для оцінки середнього, %	0,22 / 0,52	0,004 / 0,04	0,1 / 0,52	0,08 / 0,62	0,08 / 0,44

До табл. 3.11 зведені максимальні значення показників якості та ймовірність появи понаднормованих їх значень, отримані у режимах одностороннього живлення та у режимі двостороннього живлення споживача.

Таблиця 3.11 Оцінка якості електроенергії у трьох режимах живлення споживача від лінії ДПР⁴

Показник	Живлення від підстанції Чубівка		Живлення від підстанцій Чубівка та Слобідка		Живлення від підстанції Слобідка	
	Макс. знач.	Ймовір. перевищ.	Макс. знач.	Ймовір. перевищ.	Макс. знач.	Ймовір. перевищ.
	ГОСТ / ДСТУ					
Усталене відхилення напруги	11 % / 10 %	≈100 % / ≈0 %	11 % / 11 %	≈100 % / ≈0 %	11% / 10 %	≈100 % / ≈0 %
Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	4 % / не нормується	60 % / 60 %	3 % / не нормується	6 % / 8 %	4 % / не нормується	20 % / 25 %
Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги ⁵	8 % / 5 %	≈0 % / не нормується	8 % / 5 %	≈0 % / не нормується	8 % / 5 %	≈0 % / не нормується

Найбільший вплив від реалізації схеми двостороннього живлення зафіксовано на небалансі напруги. Максимальне значення коефіцієнту зворотної послідо-

⁴ Значення показників округлені до десятих.

⁵ Значення коефіцієнту приведені для найбільш спотвореної напруги.

вності напруги під час одночасного живлення від суміжних підстанцій на 1 % менше ніж у режимах одностороннього живлення споживача. Тому додатково дослідимо зв'язок між несиметрією струму та небалансом напруги методами кореляційного та регресивного аналізу, що дозволяють кількісно оцінити несиметрію напруги при реалізації окремої схеми живлення.

Оцінимо ступінь взаємозв'язку між небалансами напруги та струму у колі споживача у трьох режимах живлення. Значення коефіцієнта кореляції Спірмена ρ приведено у табл. 3.12, діаграми розсіювання K_{2U} та K_{2I} представлені на рис. 3.34-3.36.

Таблиця 3.12 Перевірка гіпотези про відсутність статичної значущості кореляції між K_{2U} та K_{2I}

Номер режиму	ρ	t -розраховане	t -критичне
1	0,65	40	1,96
2	0,29	14	1,96
3	0,31	15	1,96

Сильна кореляція виявлена між K_{2U} та K_{2I} тільки під час живлення споживача від підстанції Чубівка, у інших випадках кореляція є слабкою. Оскільки значення K_{2I} під час експерименту змінювалось у одному діапазоні, то можливо припустити, що при односторонньому живленні від підстанції Слобідка та при двосторонньому живленні від двох підстанцій споживач має менший вплив на небаланс напруги у мережі.

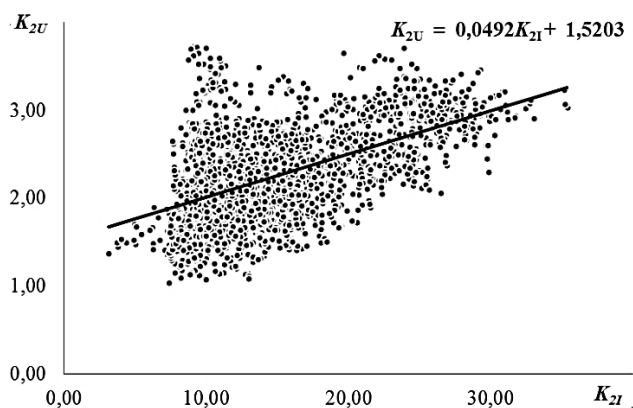


Рисунок 3.34 – Діаграма розсіювання K_{2U} та K_{2I} у режимі живлення від підстанції Чубівка

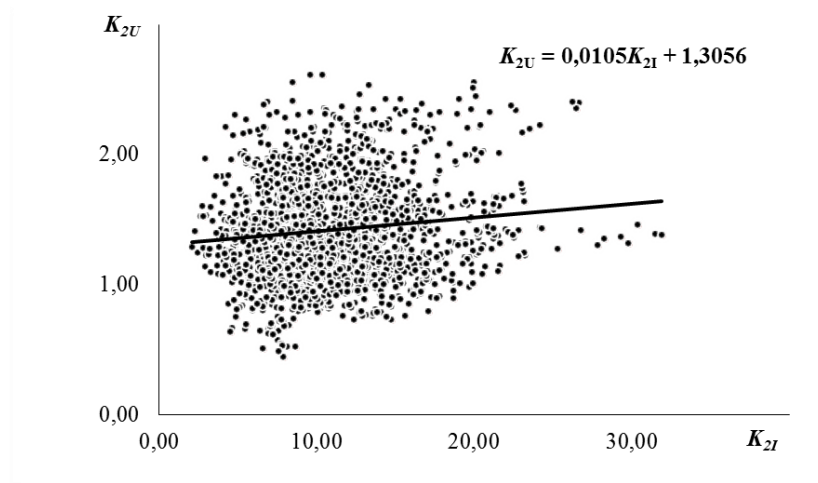


Рисунок 3.35 – Діаграма розсіювання K_{2U} та K_{2I} у режимі двостороннього живлення

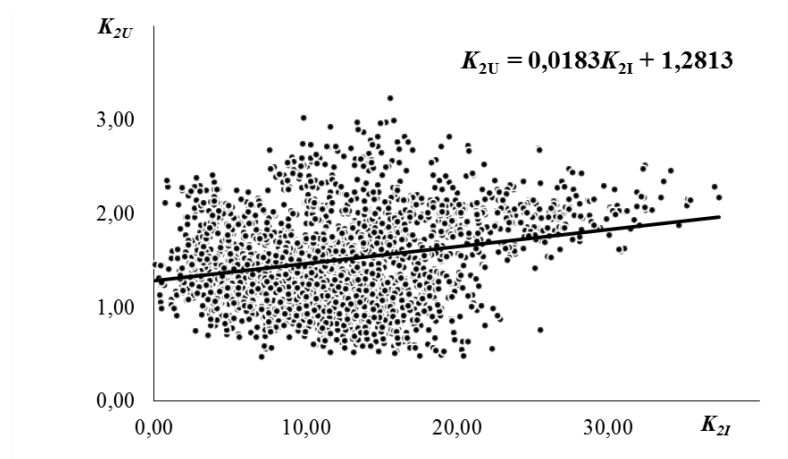


Рисунок 3.36 – Діаграма розсіювання K_{2U} та K_{2I} у режимі живлення від підстанції Слобідка

Оскільки зміна режиму електропостачання найбільше впливає на небаланс напруги у місці приєднання споживача, для статистичного розподілу коефіцієнту несиметрії приведемо підібрані закони розподілу, зображені на рис. 3.37

$$f_1(K_{2U}) = 0,309 \exp\left(-\left[\frac{\ln(K_{2U}) - 0,78}{0,24}\right]^2 / 2\right) / (\sqrt{2\pi} 0,24 K_{2U}); \quad (3.6)$$

$$f_2(K_{2U}) = 0,343 \exp\left(-\left[\frac{\ln(K_{2U}) - 0,56}{0,28}\right]^2 / 2\right) / (\sqrt{2\pi} 0,28 K_{2U}); \quad (3.7)$$

$$f_3(K_{2U}) = 0,386 \exp\left(-\left[\frac{\ln(K_{2U}) - 0,65}{0,30}\right]^2 / 2\right) / (\sqrt{2\pi} 0,30 K_{2U}), \quad (3.8)$$

де $f_1(K_{2U})$, $f_2(K_{2U})$, $f_3(K_{2U})$ – щільність ймовірності значень K_{2U} під час режиму живлення від підстанції Чубівка, Чубівка та Слобідка, Слобідка відповідно.

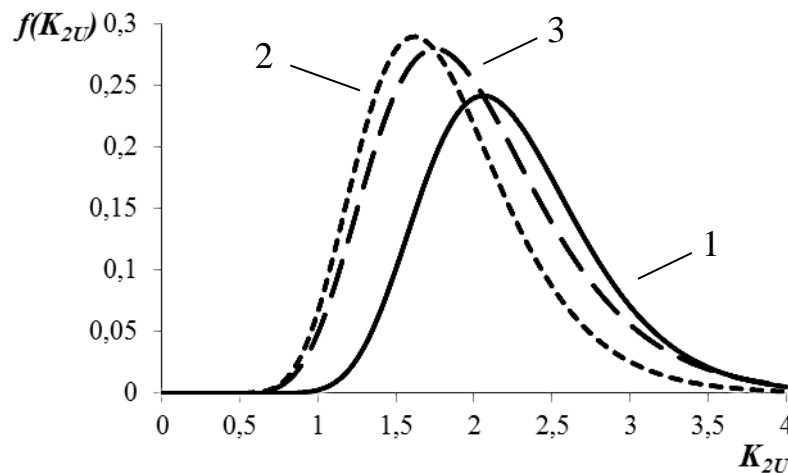


Рисунок 3.37 – Щільність ймовірності значень коефіцієнту зворотної послідовності напруги: 1 – під час живлення від підстанції Чубівка; 2 – під час живлення від підстанцій Чубівка та Слобідка; 3 – під час живлення від підстанції Слобідка;

3.3 Оцінка адекватності методу розрахунку на основі експериментальних даних

Результати вимірювань, отримані під час експерименту на ділянці між підстанціями Чубівка – Слобідка, використані для перевірки адекватності математичної моделі. На моделі реалізовано схему електропостачання споживача від підстанцій Чубівка та Слобідка по лінії ДПР із системою зовнішнього електропостачання від районної підстанції Подільська (рис. 3.38).

Як початкові дані для моделювання були використані результати тягових розрахунків, графік руху на ділянці під час вимірювань, результати вимірювання навантаження, параметри системи тягового і зовнішнього електропостачання, рівні напруги у системі зовнішнього електропостачання.

З використанням моделі виконано розрахунок коефіцієнту зворотної послідовності напруги. Отримані результати розрахунків порівняні з результатами експериментальних досліджень.

Характер зміни та приблизний рівень значень коефіцієнту K_{2U} , отриманих у ході моделювання, із експериментальними даними, що показано на рис. 3.39, співпадають.

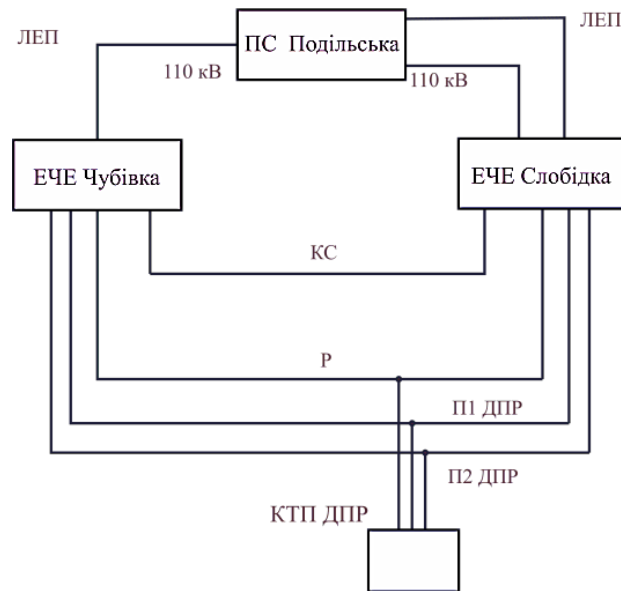


Рисунок 3.38 – Система електропостачання КТП ДПР

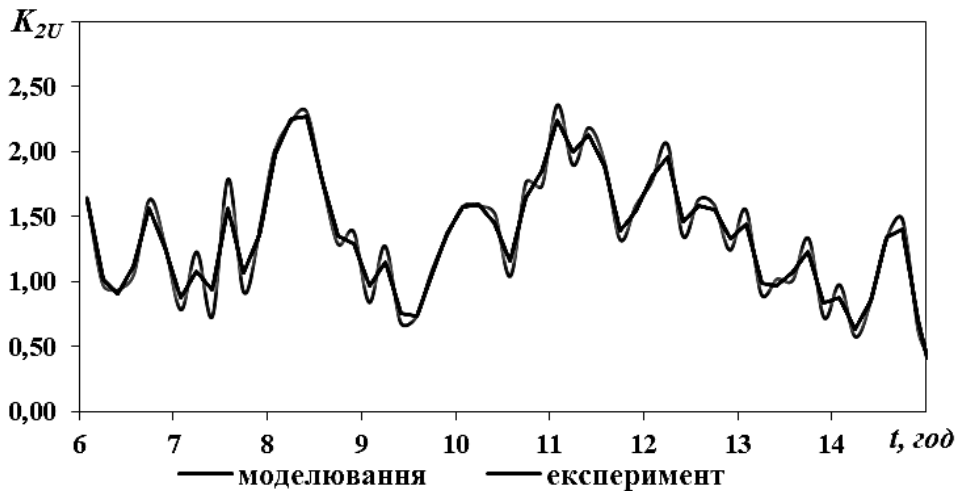


Рисунок 3.39 – Зміна небалансу напруги у колі споживача лінії ДПР

Загальний результат перевірки адекватності представлено у табл. 3.13, де приведені середні значення показників несиметрії та несинусоїдності напруги, отримані під час експерименту та розраховані на моделі. Розходження із експериментальними результатами не перевищує відносної похибки у 4,5 %.

Для оцінки адекватності використано непараметричний критерій незалежних вибірок Смирнова, критичне значення якого розраховане за методикою [31, с. 82] при рівні значущості 5 % становить 0,054. Найбільші абсолютні значення розходжень інтегральних функцій розподілу D_{max} , отриманих емпірично та на моделі, приведені у табл. 3.13. Функції розподілу K_{2U} за експериментальними дани-

ми та результатними моделювання показані на рис. 3.40.

Таблиця 3.13 Порівняння експериментальних даних із результатами моделювання

Режим живлення	Середнє значення K_{2U} , %		$ D_{\max} $
	Експеримент	Моделювання	
Консольне від підстанції Чубівка	2,25	2,18	0,025
Двостороннє від підстанцій Чубівка та слобідка	1,41	1,34	0,022
Консольне від підстанції Слобідка	1,55	1,61	0,025

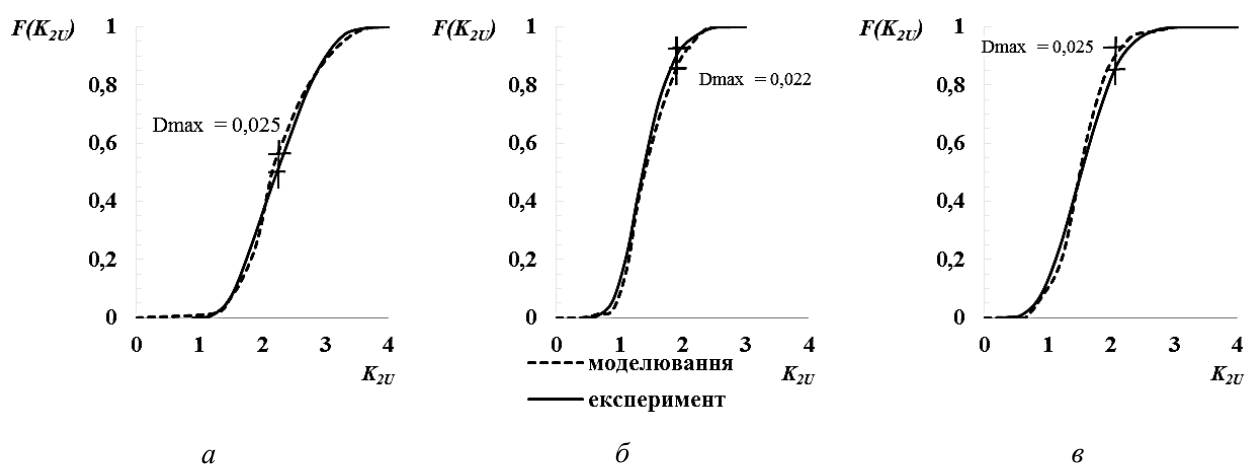


Рисунок 3.40 – Кумулятивні криві ймовірності коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності: *a* – консольне живлення від підстанції Чубівка; *б* – двостороннє живлення від підстанцій Чубівка та Слобідка; *в* – консольне живлення від підстанції Слобідка

Отримане максимальне значення відхилення між функціями ймовірності не перевищує граничного значення. Отже, вибірки є однорідними та підкоряються одному закону розподілу.

Таким чином, вищевикладене дозволяє вважати модель адекватною на підставі прийняття гіпотези про відповідність розподілів цих величин, отриманих шляхом моделюванням та експериментально.

3.4 Висновки до розділу 3

За результатами експериментальних досліджень, отриманих із використанням вимог [58] та [66] до методики розрахунку та значень показників якості елек-

троенергії, можливо зробити наступні висновки.

1. При передачі електричної енергії лінією «два проводи-рейка» встановлено ступінь погіршення її якості. Максимальне значення відхилення напруги, зафіксоване на рівні 4 % на шинах підстанції, у місці приєднання споживача зросло до 6...7 %, значення коефіцієнта зворотної послідовності напруги збільшилось на 2 % і становить 7 %, значення коефіцієнта несинусоїдності на споживачеві проти значення на шинах підстанції зменшилось на 1 %.

Ймовірність перевищення нормально допустимого значення відхилення напруги зростає з 0 % до 40 % у мережі споживача, коефіцієнта зворотної послідовності напруги збільшилась на 21 %, а коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги зменшилась з 20 % до 1 % через збільшення нормованого значення показника при переході до нижчого рівня напруги.

2. Виявлено, що перехід на двостороннє живлення споживача від лінії ДПР найбільше впливає на значення показника несиметрії напруги. Максимальне значення коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності у режимі двостороннього живлення на 1 % менше за значення коефіцієнту у режимах консольного живлення та становить 3 %. Також, під час двостороннього живлення споживача спостерігалось зменшення ймовірності перевищення нормального значення показника несиметрії напруги, що становила близько 6 % проти 60 % під час режиму одностороннього живлення.

3. При десятихвилинному інтервалі усереднення максимальне значення відхилення напруги та коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності менше у середньому на 1..2% проти значення, отриманого за вимогами ГОСТ 13109-97. Найбільший вплив збільшення інтервалу усереднення виявлено на показнику гармонічних спотворень напруги, різниця між значеннями якого становила 3...5 %.

4. Для розподільчих мереж залізниць змінного струму отримано залежності показників несиметрії напруги для схем одностороннього та двостороннього живлення ліній «два проводи-рейка» у вигляді сукупності статистичних законів розподілу та рівнянь регресії, які дозволяють кількісно оцінити несиметрію на-

пруги при реалізації окремої схеми живлення та, зокрема, показують зниження несиметрії при реалізації двосторонньої схеми живлення.

5. Співставлення результатів моделювання та експерименту зійшлися із максимальною відносною похибкою 4,5 %, що дозволяє вважати модель адекватною та використовувати її у подальших дослідженнях.

Результати дослідження, що приведені у третьому розділі, опубліковані у [18, 38, 41, 82, 85].

РОЗДІЛ 4

СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НЕТЯГОВИМ СПОЖИВАЧАМ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ

Конструкція ліній ДПР та її гальванічний зв'язок із тяговою мережею через шини підстанції та рейки обумовлює погіршення якості електроенергії, що передається нетяговим споживачам. Крім того безпосереднє приєднання трифазних ліній до тягових шин суміжних підстанцій із різними конфігураціями систем векторів напруги робить неможливим двостороннє електропостачання нетягових споживачів. У результаті система ліній ДПР поступається у електромагнітній сумісності та у можливості забезпечення двостороннього живлення перед звичайними трипровідними лініями мереж загального призначення.

4.1 Постановка задачі

Оскільки причиною, що унеможлиблює двостороннє живлення споживачів ДПР, є чергування приєднань тягових підстанцій до системи зовнішнього електропостачання, то з метою оцінки ефекту від такого рішення на якість та втрати електроенергії у мережі нетягового електропостачання, необхідно порівняти існуючу систему із варіантом, де тягові підстанції приєднані за однією схемою до живлячої мережі, а лінії ДПР працюють у режимі двостороннього живлення.

Реалізація двостороннього живлення призведе до зменшення опору системи нетягового електропостачання та дозволить зменшити втрати електроенергії при її передачі. Крім того, транзит електроенергії через тягові підстанції між частинами системи зовнішнього електропостачання відбуватиметься по трьом фазам, що створює кращі умови для узгодження взаєморозрахунків між різними операторами систем розподілу.

У той час при однаковій схемі живлення підстанцій первинний струм електрорухомого складу завантажує по черзі одну із двох замість однієї із трьох фаз системи зовнішнього електропостачання, що збільшує несиметрію напруги у мережі. Відсутність симетруючого ефекту тягового навантаження також матиме місце при всіх можливих випадках схем приєднання введів трансформаторів та ва-

ріацій груп з'єднання обмоток трансформатора «зірка-трикутник», якщо схема електропостачання залізниці струмом допускає паралельну роботу трансформаторів на три фази.

Тому, забезпечення двостороннього живлення нетягових споживачів від шин 27,5 кВ із симетруванням тягового навантаження можливе у разі перетворення системи напруг тягових шин однієї підстанції до конфігурації системи напруг на шинах суміжної підстанції, через спеціальний фазоповоротний пристрій (ФПП). Проте застосування ФПП лише на одній підстанції порушить симетрію плечей живлення нетягового споживача, що зменшить ефективність такого рішення через протікання вирівнювального струму між шинами підстанції та ФПП. Відповідно кращим варіантом вирішення проблеми є встановлення ФПП на всіх суміжних із навантаженням підстанціях.

Для збільшення якості електроенергії, що передається до КТП ДПР, використано рішення [180], що полягає у реконструкції лінії ДПР у трипровідну лінію.

Враховуючи вищесказане задачу дослідження сформулюємо наступним чином. Необхідно дослідити роботу системи електропостачання залізниці та нетягових споживачів без чергування приєднань підстанцій та системи із фазоповоротним пристроєм, порівняти показники несиметрії, несинусоїдності напруги, коефіцієнти потужності λ , реактивної потужності $tg\phi$ та значення втрат електроенергії у варіантах досліджуваних систем.

4.2 Моделювання системи електропостачання залізниці та нетягових споживачів

Використовуючи розроблений алгоритм побудови математичної моделі (рис. 2.16), реалізований у програмному середовищі Mathcad (Parametric Technology Corporation), отримано системи диференційних рівнянь, що відтворюють електромагнітні процеси у системі електропостачання ділянки залізниці та нетягових споживачів. Системи рівнянь експортувались до програми Matlab (The MathWorks) з метою зменшення тривалості чисельного розрахунку. В Matlab використано вбудовану функцію чисельного розрахунку диференційних рівнянь `ode15s` з адаптивним кроком інтегрування, що реалізує метод диференціювання

назад.

Розрахунки виконано для часового інтервалу 0...60 мс та нульових початкових умов. Розрахунки проводились на персональному комп'ютері з чотириядерним процесором, з тактовою частотою 4 ГГц. Під час розрахунків об'єм використаної оперативної пам'яті становив 8 Гбайт.

На базі отриманих миттєвих значень струму засобами комп'ютерної алгебри Matlab розраховувались напруги у вузлах системи електропостачання. Для гармонійного аналізу виділено останній період зміни струмів та напруг, у якому на підставі лінійної інтерполяції визначили миттєві значення електричних величин із сталим кроком зміни. За отриманими дискретними значеннями із використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є, реалізованого у бібліотеці Stats мови програмування R, проведено розкладання на гармонійні складові електричних величин. Розрахунок потужностей та показників якості виконано у середовищі QlikView (Qliktech), що використовується для обробки значного обсягу числових даних та їх візуалізації.

На рис. 4.1 показаний зв'язок між застосованими для дослідження комп'ютерними програмами та вказані задачі для яких вони були використані. Знімки з екрану монітора під час розрахунків представлені у додатку Г.

Коефіцієнт потужності λ визначається за співвідношенням активної потужності до повної та є узагальненим критерієм ефективності електроенергетичних процесів

$$\lambda = \frac{P}{S}, \quad (4.1)$$

де S – повна потужність; P – активна потужність.

Також до системи показників енергообмінних процесів у електричних колах належать коефіцієнти зсуву k_3 , спотворення k_c та несиметрії k_n трифазного кола [108, 169], які враховуються у коефіцієнті потужності λ за виразом

$$\lambda = k_3 k_c k_n, \quad (4.2)$$

де

$$k_3 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (4.3)$$

$$k_c = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}}, \quad (4.4)$$

$$k_c = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2 + H^2}}. \quad (4.5)$$

У виразах (4.3) – (4.5) S – повна потужність; P – активна потужність; Q – неактивна потужність; T – потужність спотворення; H – потужність несиметрії.

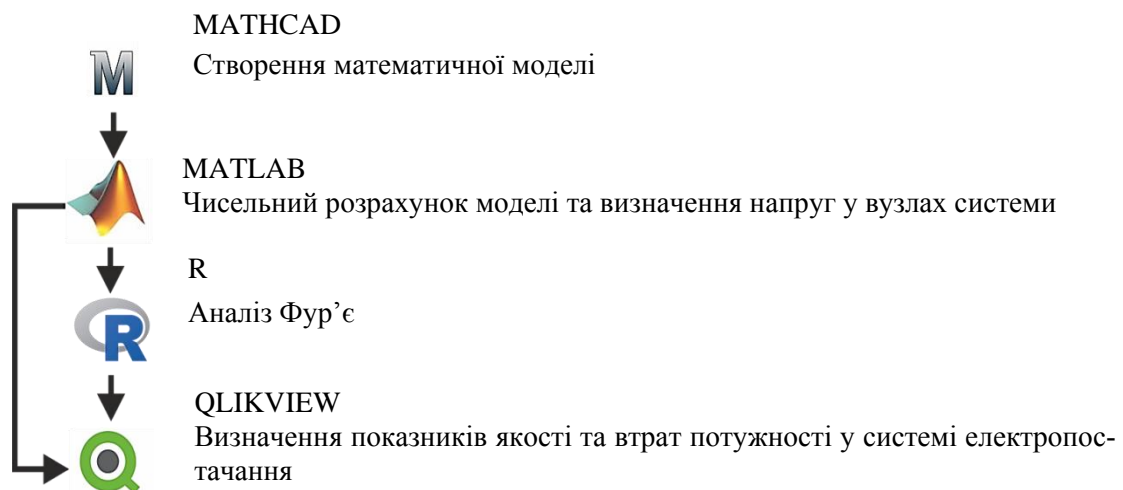


Рисунок 4.1 – Використані у дослідженні комп'ютерні програми

Для розрахунку реактивної потужності використано концепцію Фрізе, яка реалізується простим алгоритмом та забезпечує баланс потужності за виразом

$$S^2 = P^2 + Q_F^2, \quad (4.6)$$

де Q_F – неактивна потужність за Фрізе.

Визначення потужності засновано на аналізі кривих струму та напруги. Струм розкладається на активну та неактивну складові: форма та фаза активної складової струму збігається із формою та фазою напруги, а неактивна складова визначається як різниця значень дійсного та активного струму.

У цьому разі коефіцієнт реактивної потужності $tg\varphi$ визначимо за виразом

$$tg\varphi = \frac{Q_F}{P}. \quad (4.7)$$

Неактивну потужність Фрізе Q_F за дискретними значеннями струму I_n та напруги U_n отримаємо наступним чином

$$Q_F^2 = \left(\frac{\sum_{n=1}^N U_n^2 \sum_{n=1}^N I_n^2}{N} \right)^2 - \left(\frac{\sum_{n=1}^N (U_n I_n)}{N} \right)^2, \quad (4.8)$$

де N – кількість дискретних значень струму та напруги.

Втрати електроенергії у елементах електричної мережі визначимо як суму основних ΔW_P та додаткові ΔW_Q втрат електроенергії, що визначаються за виразами

$$\Delta W_P = \left(\frac{P}{U} \right)^2 \cdot Rt, \quad (4.9)$$

$$\Delta W_Q = \left(\frac{Q_F}{U} \right)^2 \cdot Rt, \quad (4.10)$$

де P , Q_F – транзитна активна та неактивна потужність відповідно;

R – активний опір транзитної ділянки мережі;

t – тривалість передачі електроенергії.

Для моделювання використано вихідні дані системи електропостачання двох ділянок залізниці між підстанціями Помічна (ТП1) – Осикувата (ТП2) – Сугоклея (ТП3) та між підстанціями Фундукліївка (ТП4) – ім. Т. Шевченка (ТП5) – Завадовка (ТП6) – Миронівка – Сухоліси (ТП7) – Фастів (ТП8) (рис. 4.2).

Тривалість моделювання, кількість рівнянь у системах та кількість миттєвих значень струмів для трьох варіантів живлення нетягового споживача приведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 Показники, що характеризують процес чисельного розрахунку моделі

Спосіб живлення споживача	Кількість рівнянь		Тривалість розрахунку моделі, хв	Кількість миттєвих значень струму
	3 підстанції	6 підстанцій		
ДПР	153	323	10...16	7,5 млн...24 млн
двостороннє ДПР	155	333		
двостороннє ФПП	211	401		

Далі приведені проміжні результати моделювання для ділянки залізниці між підстанціями ТП1 – ТП3. Зіставлення та аналіз результатів моделювання приведено для двох ділянок залізниці.

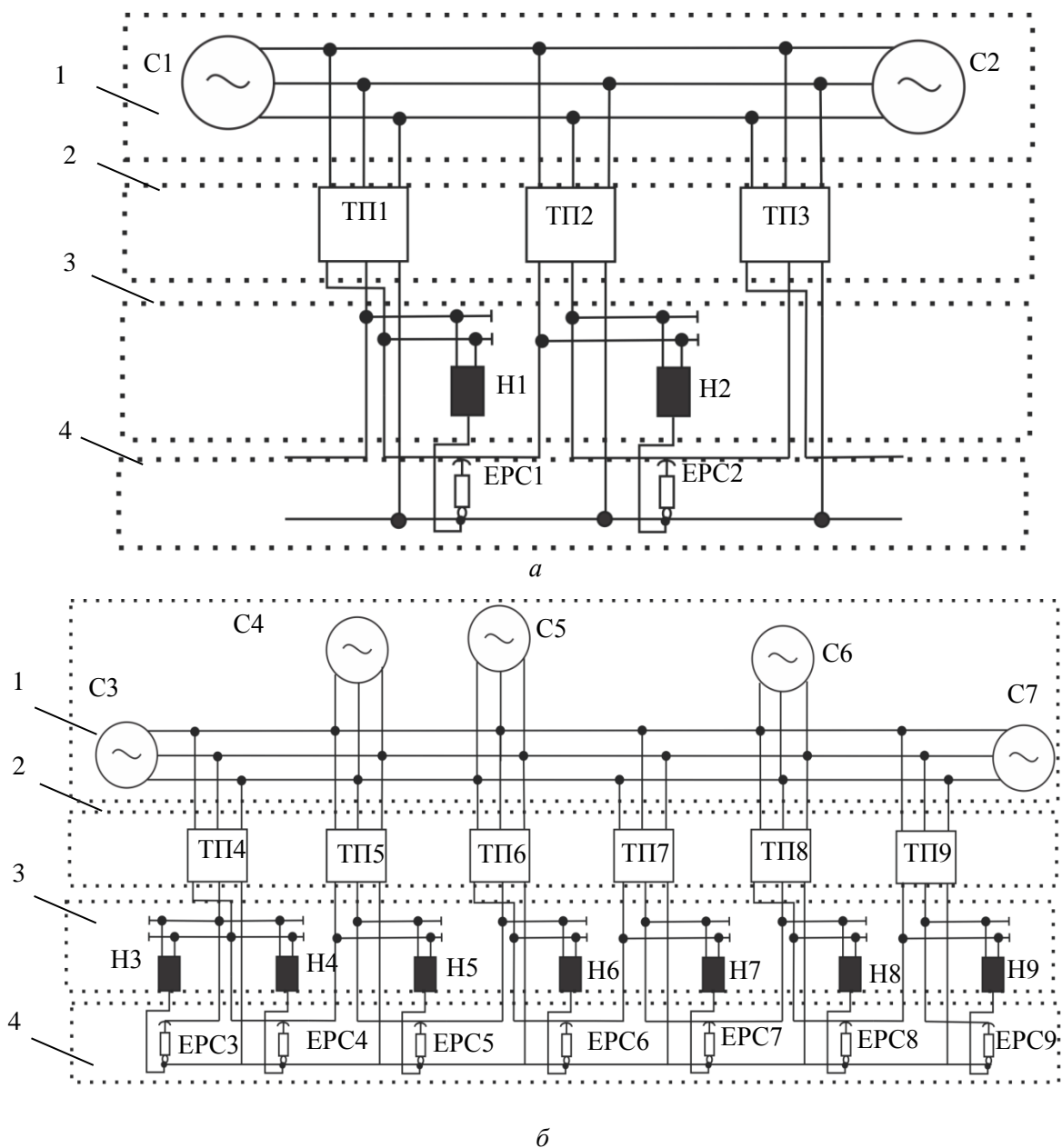


Рисунок 4.2 – Система електропостачання ділянок залізниці Помічна – Осикувата – Сугокля (а) та Фундуклівка – ім. Т. Шевченка – Завадовка – Миронівка – Сухолеси – Фастів (б): С – електроенергетичні системи; 1 – система зовнішнього електропостачання; 2 – тягові підстанції (ТП); 3 – проводи лінії ДПР та еквівалентне нетягове навантаження (Н); 4 – тягова мережа та еквівалентне тягове навантаження (Е)

4.2.1 Система електропостачання при односторонньому живленні нетягових споживачів від ліній «два проводи-рейка»

Прийемо, що на кожній міжпідстанційній зоні знаходиться по п'ять електровозів ВЛ-80. При моделюванні електровози зведені до еквівалентного навантаження, розташованого всередині кожної міжпідстанційної зони.

Нетягове навантаження представлено у вигляді одичного споживача, віднесеного на рівні відстані від тягових підстанцій. Відстань між суміжними підстанціями становить 50 км. Розрахунок параметрів схеми заміщення приведено у другому розділі дисертації.

Отримані при моделюванні системи електропостачання (рис. 4.2) значення струмів електроенергетичної системи, електровозів, нетягового споживача приведені на осцилограмах рис. 4.3 - 4.5.

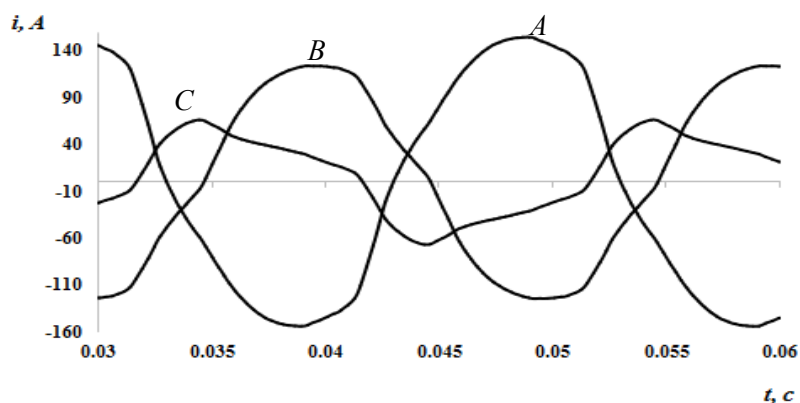


Рисунок 4.3 – Осцилограми сумарних первинних струмів підстанцій приведених до електроенергетичної системи С1 при консольному живленні споживачів ліній ДПР

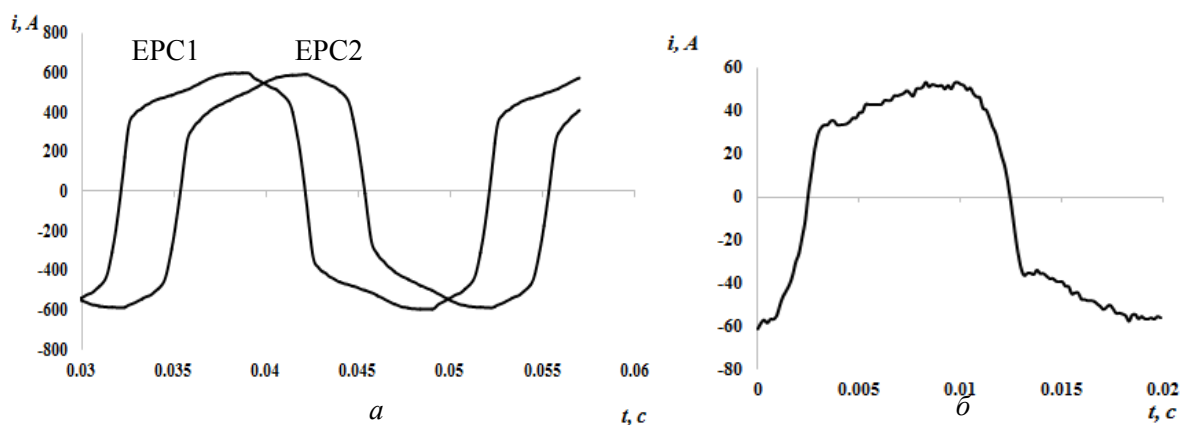


Рисунок 4.4 – Первинні струми еквівалентних електровозів (а) при моделюванні системи із консольним живленням споживачів ліній ДПР та осцилограма струму електровозу ВЛ-80 (б)

Результат дії незбалансованого несинусоїдного струму, що протікає у елементах системи зовнішнього електропостачання, на якість напруги у місці приєднання тягових підстанцій приведено у табл. 4.2. Отримані для схеми електропос-

тачання (рис. 4.2) значення показників якості у місці приєднання нетягових споживачів до лінії ДПР зведені до табл. 4.3. Частки вищих гармонік у напрузі, що живить підстанції та споживачів, представлені на рис. 4.6, 4.7.

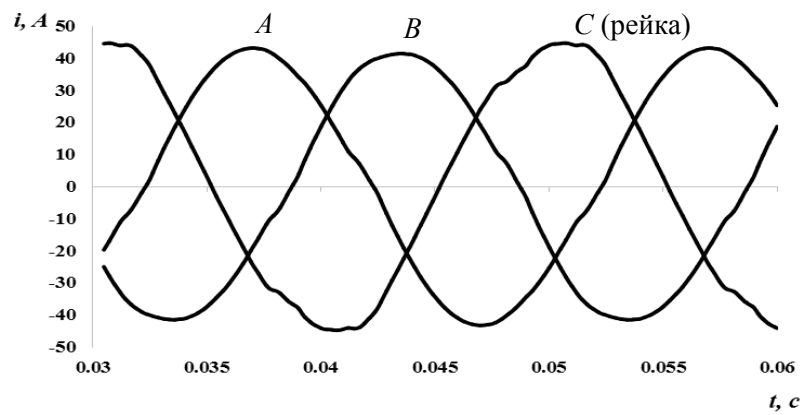


Рисунок 4.5 – Осцилограми струмів нетягового споживача, що отримує живлення за консольною схемою

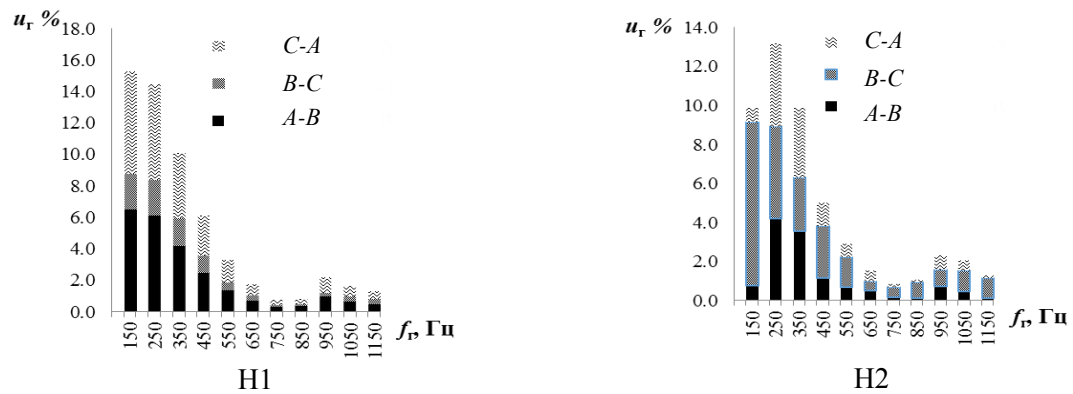


Рисунок 4.6 – Частотний спектр лінійної напруги живлення споживача, що отримує живлення за консольною схемою

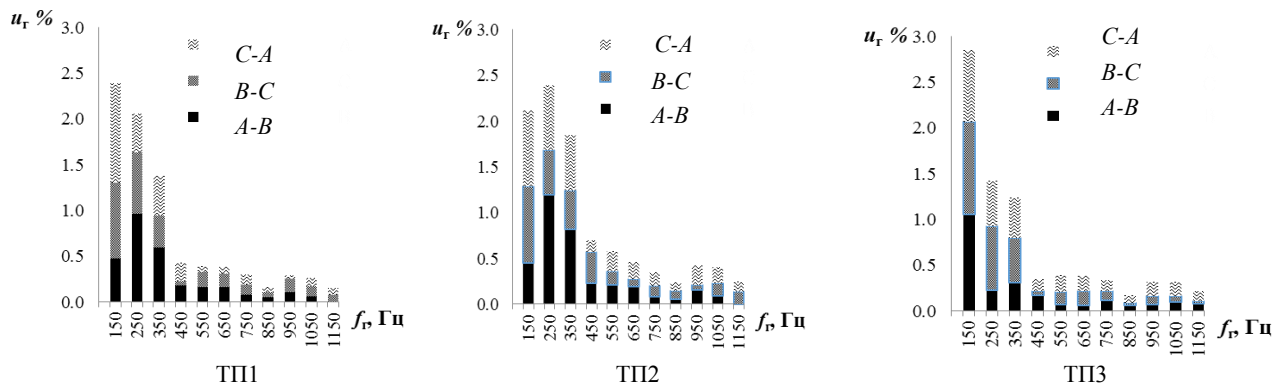


Рисунок 4.7 – Частотний спектр лінійної напруги живлення підстанцій при моделюванні системи із консольним живленням споживача ліній ДПР

У табл. 4.4 приведені значення повної, активної та реактивної потужності джерела, що живить систему електропостачання (вхідна потужність), та споживача (вихідна потужність). Значення втрат активної потужності у заданій системі електропостачання при консольному живленні нетягового споживача від ліній ДПР отримано як різницю між потужністю, яку віддає джерело (електроенергетична система), та потужністю тягового та нетягового навантаження.

Таблиця 4.2 Показники якості у місці приєднання тягових підстанцій до живлячої мережі при консольному живленні нетягових споживачів

Підстанція	$K_{2U}, \%$	$K_{U_{AB}}, \%$	$K_{U_{AC}}, \%$	$K_{U_{CA}}, \%$
ТП1	0,30	1,17	1,36	1,10
ТП2	0,37	1,28	1,17	1,28
ТП3	0,21	1,58	1,16	1,34
середнє	0,29	1,34	1,23	1,24

Таблиця 4.3 Показники якості на приєднанні нетягових споживачів до ліній ДПР із одностороннім живленням

Споживач	$K_{2U}, \%$	$K_{U_{AB}}, \%$	$K_{U_{AC}}, \%$	$K_{U_{CA}}, \%$
Н1	2,27	10,49	3,92	10,49
Н2	1,31	5,92	10,74	5,92
середнє	1,79	8,21	7,33	8,21

Таблиця 4.4 Вхідна та вихідна потужність у системі електропостачання при консольному живленні нетягових споживачів

Потужність	Генерована потужність електроенергетичною системою	Спожита потужність нетяговими споживачами	Спожита потужність тяговими споживачами
$S, \text{кВА}$	30 105	2 205	21 067
$P, \text{кВт}$	20 238	2 190	15 455
$Q_F, \text{квар}$	22 287	263	14 316
$\lambda / \text{tg}\varphi$	0,67 / 1,1	0,9 / 0,12	0,73 / 0,92

4.2.2 Двостороннє живлення нетягових споживачів від ліній «два проводирейка»

У системі, що приведена на рис. 4.8, тягові підстанції приєднані за однією схемою до лінії зовнішнього електропостачання, а лінії ДПР поєднані у єдину мережу.

Осцилограми струмів, отриманих при розрахунку системи електропоста-

чання рис. 4.8, приведено на рис. 4.9 - 4.11. Отримані значення коефіцієнтів несиметрії та несинусоїдності напруги на приєднанні тягової підстанції до системи зовнішнього електропостачання зведено до табл. 4.5

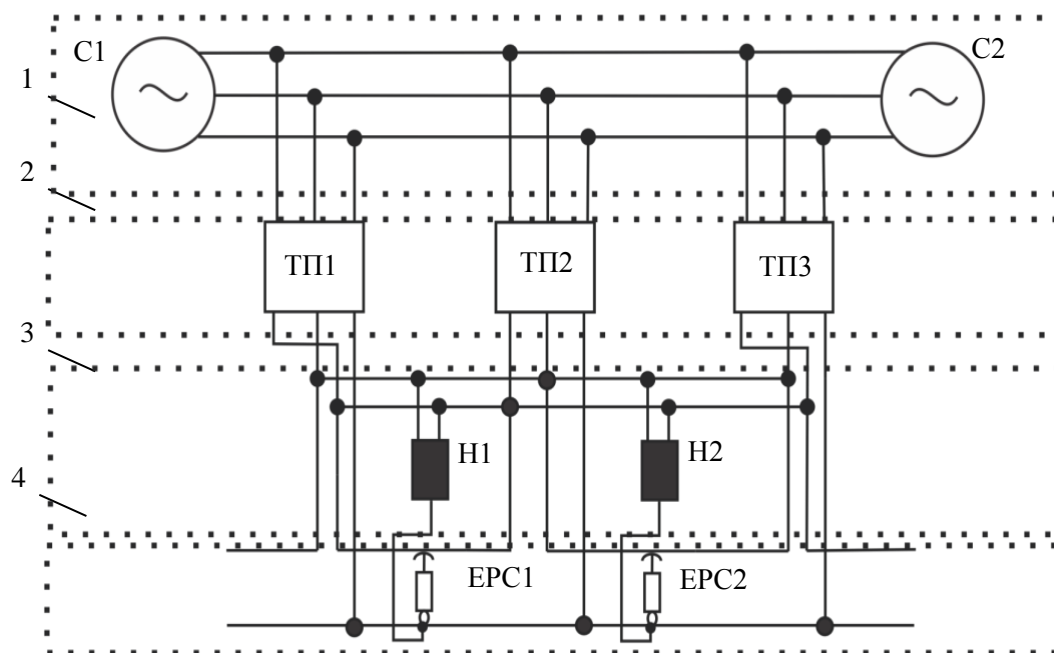


Рисунок 4.8 – Система електропостачання ділянки залізниці Помічна – Осикувата – Сугоклея при двосторонньому живленні нетягового споживача від лінії ДПР:
 С1, С2 – електроенергетичні системи; 1 – система зовнішнього електропостачання; 2 – тягові підстанції (ТП1, ТП2, ТП3); 3 – проводи лінії ДПР та еквівалентне нетягове навантаження (Н1, Н2, Н3); 4 – тягова мережа та еквівалентне тягове навантаження (ЕРС1, ЕРС2)

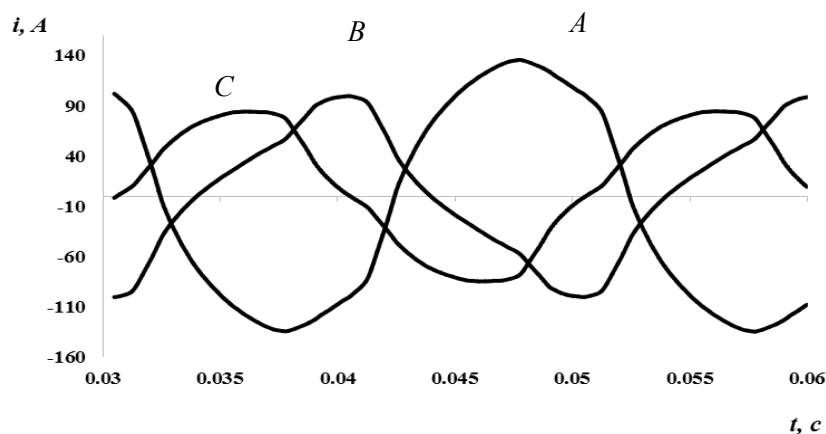


Рисунок 4.9 – Осцилограми сумарних первинних струмів підстанцій приведених до електроенергетичної системи С1 при двосторонньому живленні споживачів ліній ДПР

Частки вищих гармонік у напрузі, що живить підстанції та споживачів,

представлені на рис. 4.12, 4.13. Віддана електроенергетичною системою та спожита споживачами потужність представлена у табл. 4.7

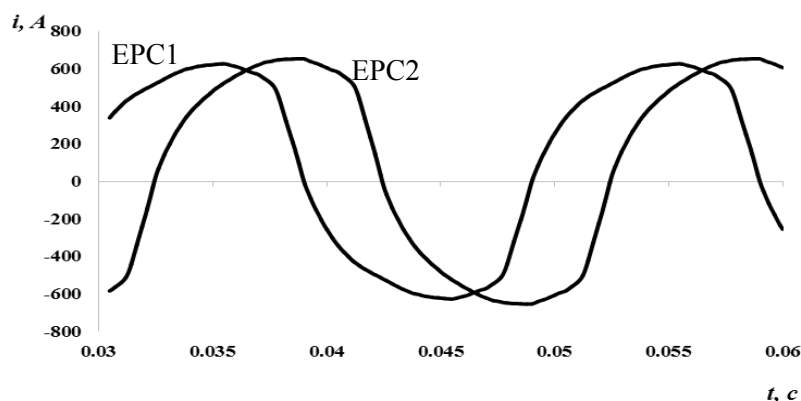


Рисунок 4.10 – Первинні струми електровозів при моделюванні системи електропостачання із двостороннім живленням споживачів ліній ДПР

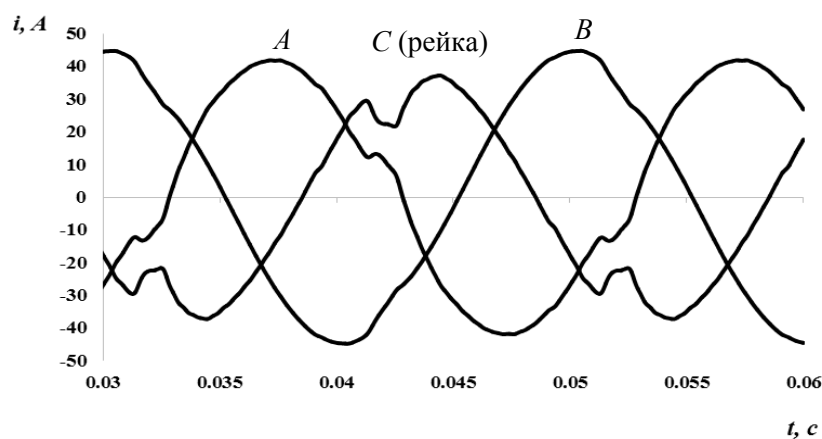


Рисунок 4.11 – Осцилограми струмів нетягового споживача при двосторонньому живленні від лінії ДПР

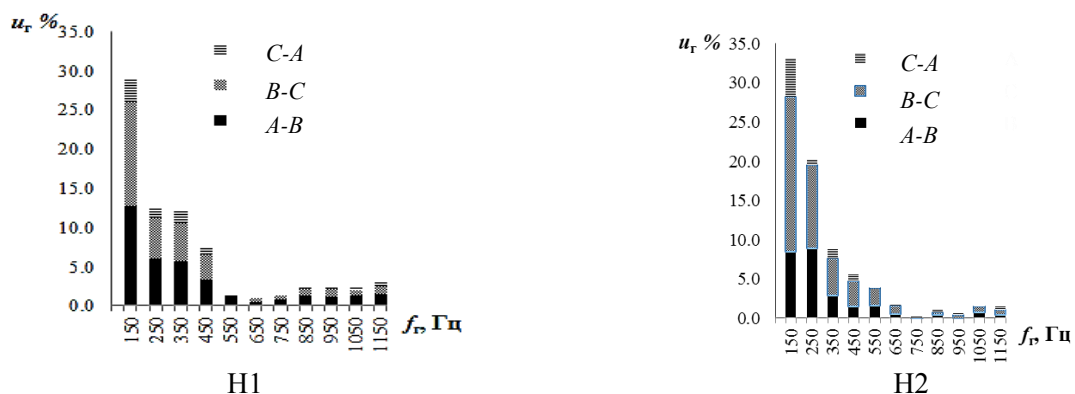


Рисунок 4.12 – Частотний спектр лінійної напруги живлення споживачів при двосторонньому живленні від ліній ДПР

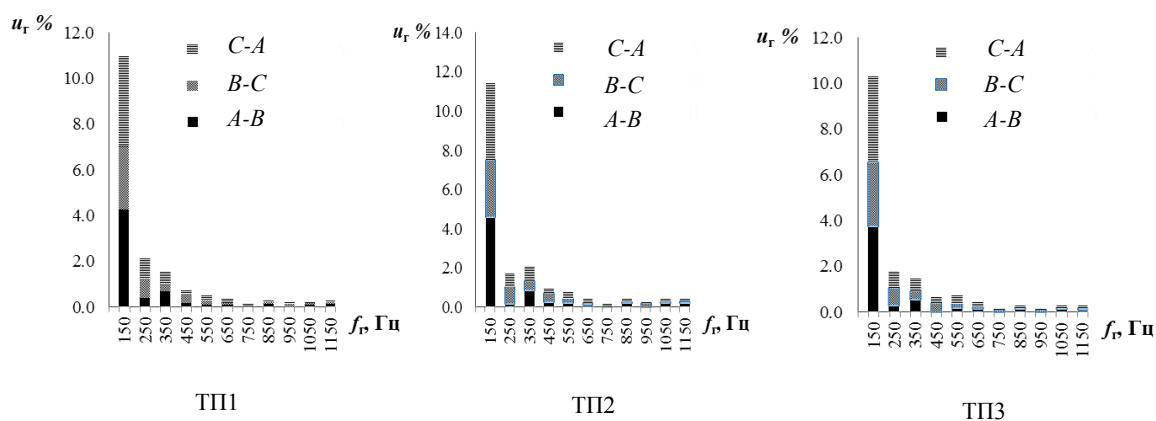


Рисунок 4.13 – Частотний спектр лінійної напруги живлення підстанцій при моделюванні системи із двостороннім живленням споживачів ліній ДПР

Таблиця 4.5 Показники якості на приєднанні тягових підстанцій до живлячої мережі при двосторонньому живленні споживачів ліній ДПР

Підстанція	$K_{2U}, \%$	$K_{U_{AB}}, \%$	$K_{U_{AC}}, \%$	$K_{U_{CA}}, \%$
ТП1	1,53	4,35	2,98	4,11
ТП2	1,36	4,69	3,17	4,09
ТП3	1,21	3,84	2,96	3,89
середнє	1,37	4,30	3,03	4,03

Таблиця 4.6 Показники якості на приєднанні нетягових споживачів до ліній ДПР із двостороннім живленням

Споживач	$K_{2U}, \%$	$K_{U_{AB}}, \%$	$K_{U_{AC}}, \%$	$K_{U_{CA}}, \%$
Н1	3,00	11,56	11,14	11,00
Н2	3,29	5,18	9,33	9,50
середнє	3,15	8,37	10,23	10,23

Таблиця 4.7 Вхідна та вихідна потужність у системі електропостачання при двосторонньому живленні нетягових споживачів ліній ДПР

Потужність	Генерована потужність електроенергетичної системи	Спожита потужність нетяговими споживачами	Спожита потужність тяговими споживачами
$S, \text{кВА}$	30 899	2 353	20 493
$P, \text{кВт}$	20 000	2 337	15 090
$Q_F, \text{квар}$	23 554	279	13 865
$\lambda / \text{tg}\varphi$	0,65 / 1,12	0,9 / 0,12	0,73 / 0,91

4.2.3 Застосування фазоповоротного пристрою

Для забезпечення двостороннього живлення нетягових споживачів від шин підстанцій 27,5 кВ необхідно щоб незалежно від конфігурації системи векторів вхідної напруги ФПП система векторів напруги, отримана на його виході, мала заздалегідь визначену форму.

Проведені в дисертації дослідження показали, що технічно реалізувати це можливо, використавши трифазний трансформатор, конструкція якого повинна передбачати можливість встановлення схеми з'єднання обмоток «зірка-трикутник» першої (У/Д-1) та одинадцятої (У/Д-11) групи.

Аналіз повного циклу підключень тягових підстанцій до системи зовнішнього електропостачання та закономірності перетворення системи векторів напруги трансформаторів, дозволив визначити схеми приєднання вхідних вводів ФПП до шин підстанції, щоб отримати на його виході однакові системи векторів напруги.

На рис. 4.14 показано шість способів приєднання підстанцій до зовнішньої мережі та шість відповідних схем підключення ФПП до тягових шин, що забезпечує однакову конфігурацію векторів напруги для двостороннього живлення споживача від трифазної лінії.

Векторні діаграми, приведені на рис. 4.15, показують яким чином змінюються системи векторів лінійних напруг при чергуванні фаз тягового трансформатора та застосуванні ФПП.

При чергуванні приєднань вводів підстанції до живлячої мережі змінюється послідовність обертання лінійних напруг на первинних обмотках трансформаторів таким чином, що колінеарні вектори у трикутниках напруг високої обмотки суміжних підстанцій знаходяться у протифазі. У результаті цього конфігурації системи векторів напруги суміжних тягових підстанцій мають дзеркальну симетрію. Метод забезпечення двостороннього живлення з використанням ФПП представлено у вигляді таблиці 4.8. У методі враховано схеми з'єднання обмоток тягових трансформаторів, що утворюють першу або одинадцяту групу, та схему

підключення підстанцій до системи зовнішнього електропостачання.

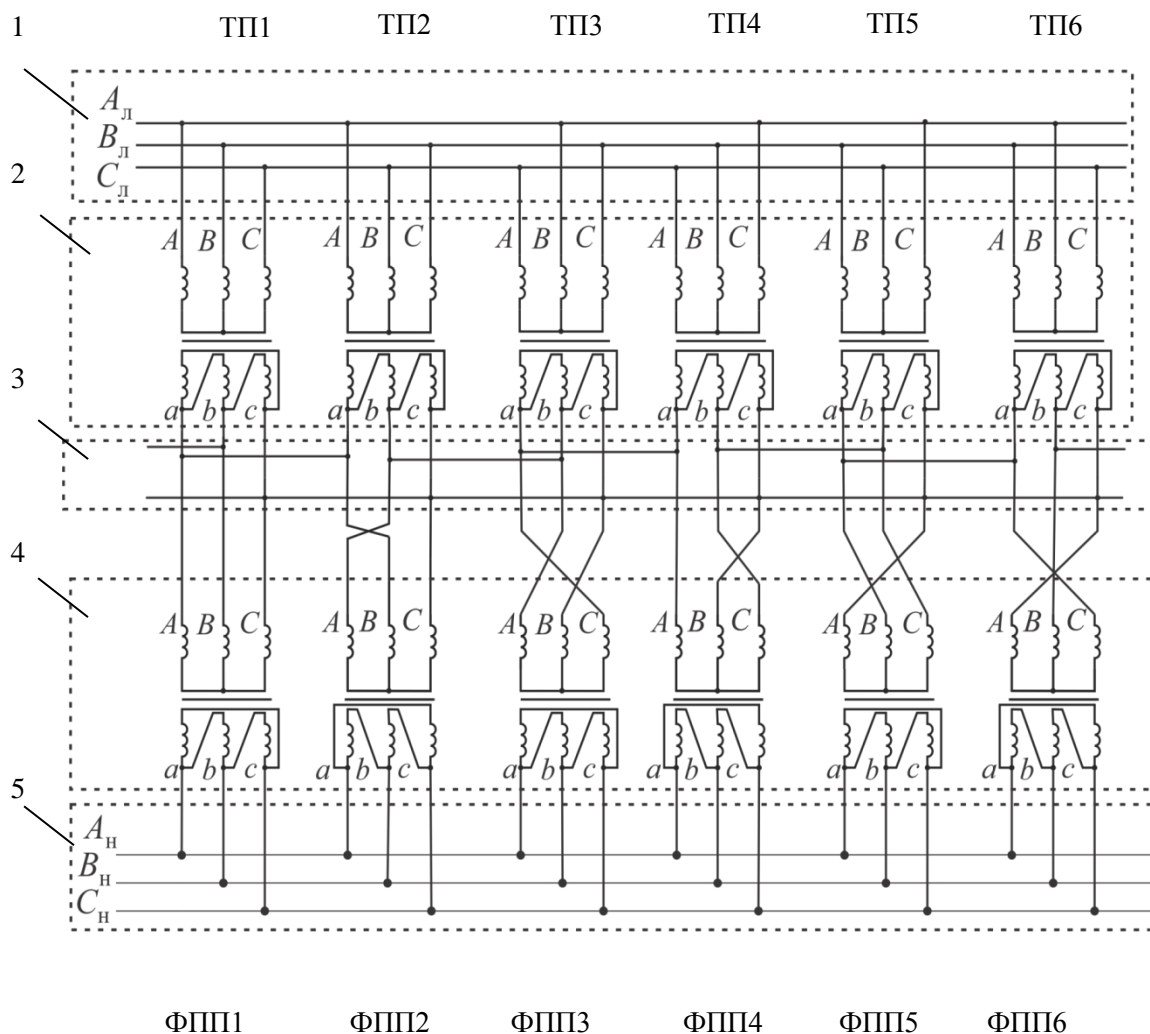


Рисунок 4.14 – Підключення фазоповоротного пристрою до шести тягових підстанцій: 1 – схеми підключення тягових підстанцій (ТП) до мережі загального призначення; 2 – схеми тягових трансформаторів підстанцій; 3 – схеми підключення тягової мережі та фазоповоротних пристроїв до тягової обмотки трансформаторів; 4 – фазоповоротні пристрої; 5 – схеми приєднання трипровідної лінії нетягового електропостачання 27,5 кВ до фазоповоротних пристроїв

Користуючись таблицею 4.8 можна вибрати групу ФПП та схему його приєднання до шин підстанції. Наприклад, коли обмотки тягового трансформатора з'єднані у «зірку» та «трикутник», що утворює одинадцятку векторну групу, а вводи обмотки високої напруги підключені до зовнішньої мережі, як показано на схемі № 2 (табл. 4.8, колонка 2), то ФПП матиме схему з'єднання обмоток У/Д-1, вивід фази *a* тягової обмотки трансформатора повинен бути приєднаний до виводу *B* фазоповоротного пристрою, а виводи трансформатора *b* та *c* – до виводів

ФПП А та С відповідно. Описаний приклад також ілюстровано на рис. 4.14 для схеми підстанції ТП2 та ФПП2.

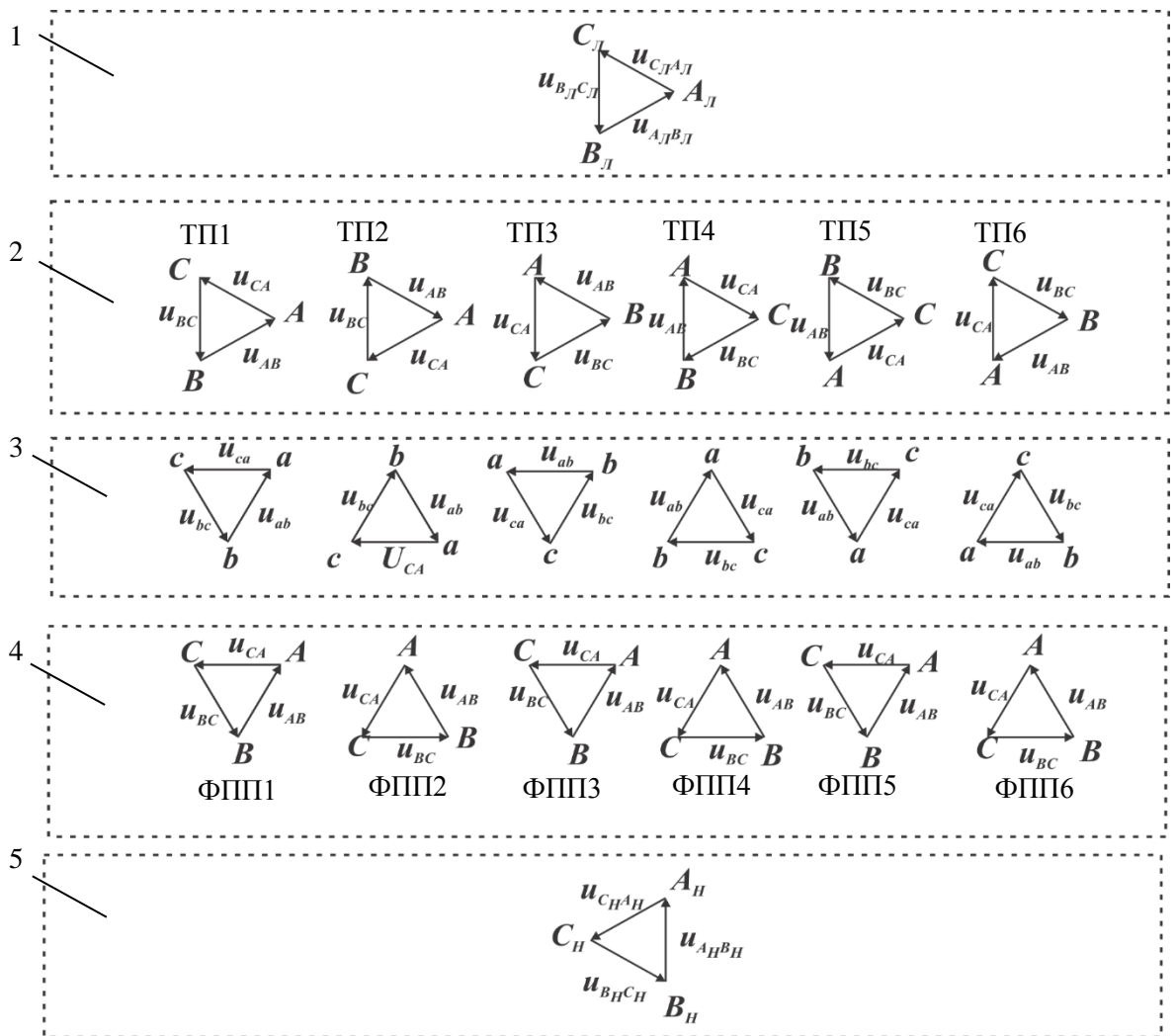


Рисунок 4.15 – Векторні діаграми напруг системи електропостачання із ФПП: 1 – вектори лінійної напруги лінії електропостачання; 2, 3 – вектори напруги на первинних та на вторинних обмотках тягових трансформаторів; 4 – вектори первинної обмотки ФПП; 5 – векторна діаграма напруги у лінії нетягового електропостачання

Для підстанції з тяговим трансформатором першої групи з'єднання обмоток, що підключається до зовнішньої мережі, як показано на схемі №3 (табл. 4.8, колонка 2) використовується ФПП із групою У/Д-11. Вивід *a* вторинної обмотки трансформатора приєднується до виводу *C* первинної обмотки ФПП, вивід *b* приєднується до виводу *A* ФПП, а вивід *c* – до виводу *B* відповідно.

Можна зауважити, що незалежно від векторної групи, для кожної непарної

схеми підключення первинної обмотки трансформатора до системи зовнішнього електропостачання є лише один варіант приєднання ФПП (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 Вибір схеми та групи фазоповоротного пристрою

Номер схеми підключення	Схема підключення первинної обмотки тягового трансформатора до зовнішньої мережі	Група з'єднання обмоток тягового трансформатора	Відповідність виводів тягової обмотки трансформатора до виводів первинної обмотки ФПП (вивід вторинної обмотки тягового трансформатора / вивід первинної обмотки ФПП)			Група з'єднання обмоток ФПП
			a/A	b/B	c/C	
1		11 та 1	a/A	b/B	c/C	11
2		11	a/B	b/A	c/C	1
		1	a/A	b/C	c/B	
3		11 та 1	a/C	b/A	c/B	11
4		11	a/A	b/C	c/B	1
		1	a/C	b/B	c/A	
5		11 та 1	a/B	b/C	c/A	11
6		11	a/C	b/B	c/A	1
		1	a/B	b/A	c/C	

4.2.4 Двостороннє живлення нетягових споживачів від трипровідної лінії із використанням фазоповоротного пристрою

На рис. 4.16 показано розрахункову схему системи електропостачання залізниці з приєднаним до тягових шин підстанцій фазоповоротними пристроями та трипровідною мережею нетягового електропостачання.

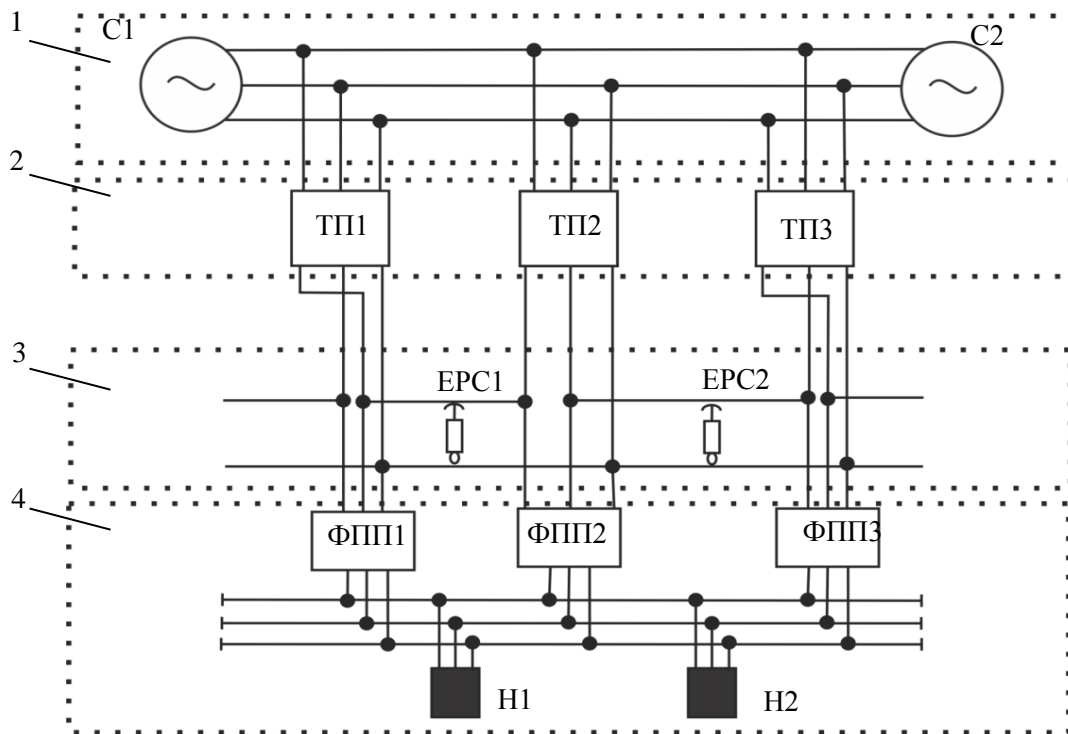


Рисунок 4.16 – Система електропостачання ділянки залізниці Помічна – Осикувата – Сугоклея із живленням нетягового споживача через фазоповоротний пристрій та трипровідну лінію: C1, C2 – електроенергетичні системи; 1 – система зовнішнього електропостачання; 2 – тягові підстанції (ТП1, ТП2, ТП3); 3 – тягова мережа та еквівалентне тягове навантаження (ЕРС1, ЕРС2); 4 – трипровідна лінія, фазоповоротні пристрої (ФПП1, ФПП2, ФПП3) та еквівалентне нетягове навантаження (Н1, Н2, Н3)

Параметри трипровідної лінії нетягового електропостачання прийняті симетричними та рівними параметрам першої фази лінії ДПР, що на рис. 2.15 під № 2 (див. табл. 2.5). Вважається, що лінія змонтована на опорах контактної мережі.

Значення електричних параметрів ФПП прийняті на підставі технічних умов до силових трансформаторів [64, 65]. За якими визначено потужності та струму холостого ходу, потужності та напруги короткого замикання для трансформаторів із напругою високої обмотки 35 кВ та потужністю 2500 кВА.

Значення потужності ФПП вибрано із урахуванням потужності еквівалентного споживача та коефіцієнтом запасу 1,5, що враховує струмове навантаження ФПП у вимушених режимах. Вибрані значення потужності та струму холостого ходу, потужності та напруги короткого замикання для масляного трансформатора

становлять відповідно 5 кВт та 1,2 %, 25 кВт та 10 %. Для розрахунку геометричних розмірів та витків ФПП застосовано методику, описану в [168].

Отримані параметри для підстановки у модель приведено у табл. 4.7.

Таблиця 4.9 Параметри фазоповоротного пристрою

Параметр	Значення
Активний опір первинної обмотки, Ом	1,5
Активний опір вторинної обмотки, Ом	0,5
Індуктивність розсіяння первинної обмотки, Гн	0,048
Індуктивність розсіяння вторинної обмотки, Гн	0,016
Кількість витків первинної обмотки	1071
Кількість витків вторинної обмотки	618
Магнітна індуктивність крайніх стержнів магнітної системи, с/Гн	1,5
Магнітна індуктивність середнього стержня магнітної системи, с/Гн	0,5

Отримані при моделюванні системи електропостачання (рис. 4.16) значення струмів електроенергетичної системи та нетягового споживача приведені на осцилограмах рис. 4.17, 4.18.

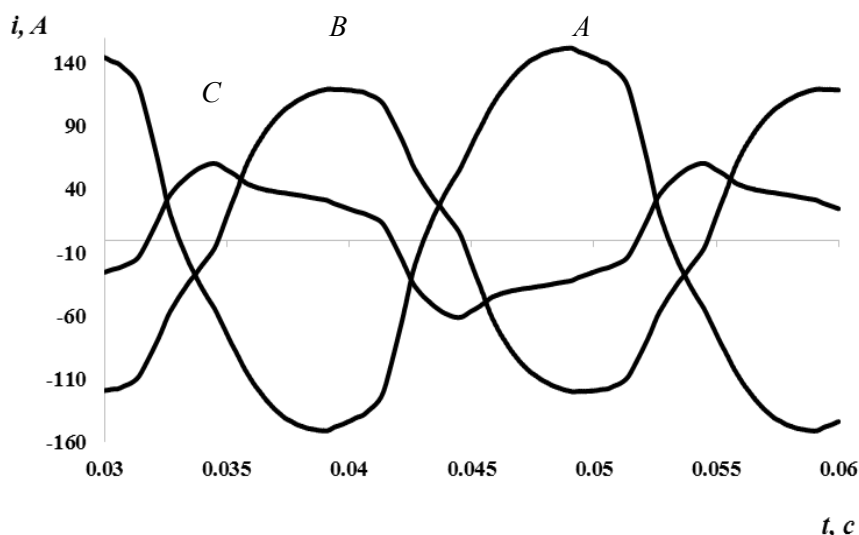


Рисунок 4.17 – Осцилограми сумарних первинних струмів підстанції приведених до електроенергетичної системи С1 при живленні нетягового споживача через фазоповоротний пристрій та трипровідну лінію

Частки вищих гармонік у напрузі, що живить підстанції та споживачів, представлені на рис. 4.19, 4.20.

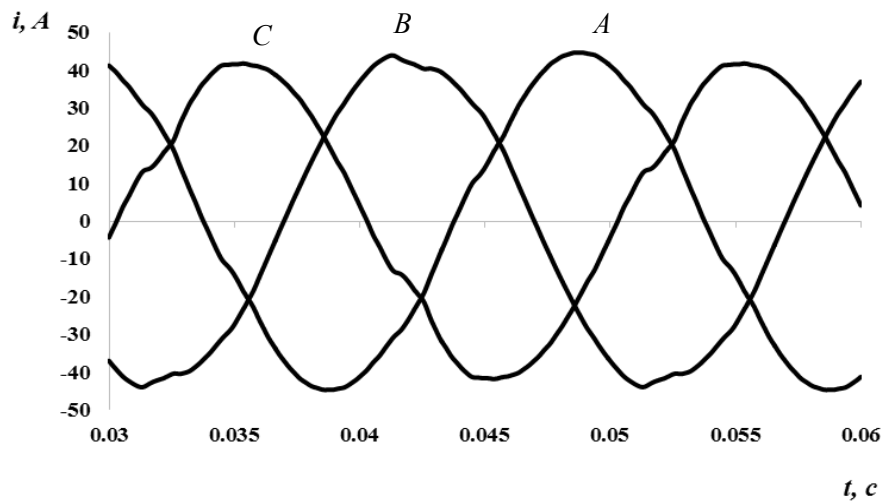


Рисунок 4.18 – Осцилограми струмів нетягового споживача, що отримує живлення від трипровідної лінії та фазоповоротного пристрою

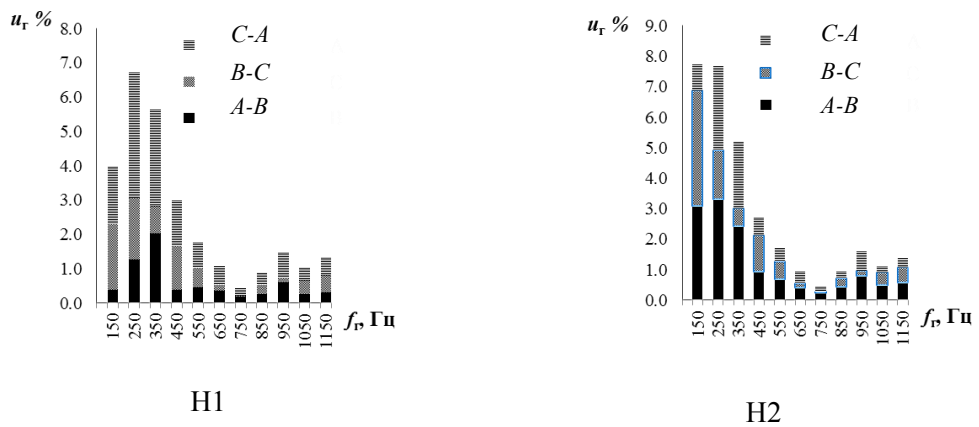


Рисунок 4.19 – Частотний спектр лінійної напруги живлення споживача від трипровідної лінії та фазоповоротного пристрою

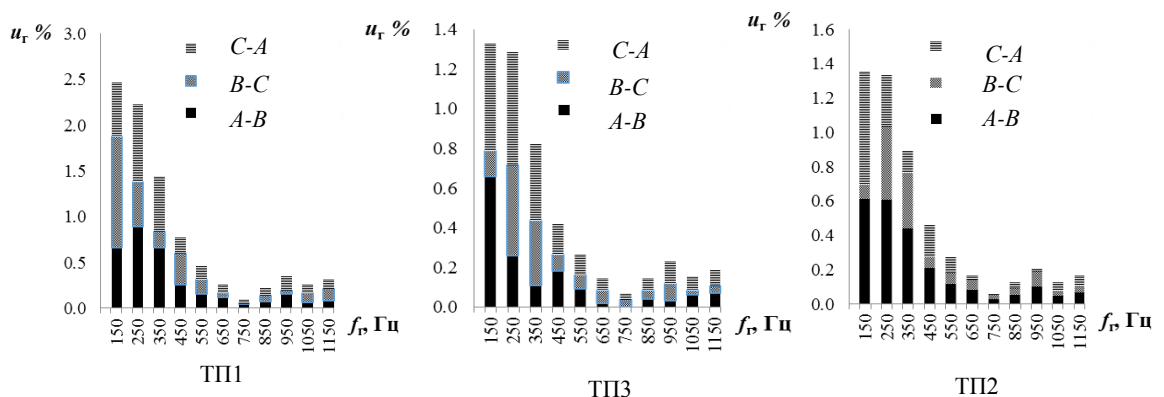


Рисунок 4.20 – Частотний спектр лінійної напруги живлення підстанцій при моделюванні системи із двостороннім живленням від трипровідної лінії та фазоповоротного пристрою

Отримані значення коефіцієнтів несиметрії та несинусоїдності напруги на приєднанні тягової підстанції при моделюванні схеми на рис. 4.16 зведено до

табл. 4.10. Отримані значення показників якості у місці приєднання нетягових споживачів до лінії ДПР зведені до табл. 4.11.

Таблиця 4.10 Показники якості на приєднанні тягової підстанції до системи зовнішнього електропостачання при живленні нетягового споживача від трипровідної лінії з двостороннім живленням через ФШП

Підстанція	$K_{2U}, \%$	$K_{U_{AB}}, \%$	$K_{U_{AC}}, \%$	$K_{U_{CA}}, \%$
ТП1	0,30	1,02	0,58	0,78
ТП2	0,35	1,37	1,40	1,26
ТП3	0,31	0,75	0,61	0,93
середнє	0,32	1,05	0,86	0,99

Таблиця 4.11 Показники якості на приєднанні нетягового споживача до трипровідної лінії з двостороннім живленням через ФШП

Підстанція	$K_{2U}, \%$	$K_{U_{AB}}, \%$	$K_{U_{AC}}, \%$	$K_{U_{CA}}, \%$
Н1	1,55	3,60	4,63	6,15
Н2	1,05	5,53	4,42	3,95
середнє	1,30	4,57	4,53	5,05

Значення потужності, відданої електроенергетичною системою та витраченої споживачами, приведено у табл.4.12.

Таблиця 4.12 Вхідна та вихідна потужність у системі електропостачання при живленні нетягового споживача через фазоповоротний пристрій та трипровідну лінію

Потужність	Генерована потужність електроенергетичної системи	Спожита потужність нетяговими споживачами	Спожита потужність тяговими споживачами
$S, \text{кВА}$	30 190	2 275	21 142
$P, \text{кВт}$	20 299	2 260	15 524
$Q_F, \text{квар}$	22 347	262	14 351
$\lambda / \text{tg}\varphi$	0,67 / 1,1	0,90 / 0,11	0,73 / 0,92

4.2.5 Зіставлення та аналіз результатів моделювання

Використана математична модель системи електропостачання дозволяє одночасно визначати показники несиметрії та несинусоїдності напруги.

При моделюванні схеми, у мережі, що живить три тягові підстанції, середнє значення коефіцієнту несиметрії напруги зворотної послідовності спостерігалось

на рівні 0,29 %, а найбільш спотворена гармоніками напруга зафіксована між фазами *A-B*, де значення коефіцієнту несинусоїдності напруги становить 1,34 %. Якість напруги у місці приєднання споживача до лінії ДПР із одностороннім живленням погіршується, що характеризує значення показників несиметрії та несинусоїдності напруги середні значення яких становлять близько 2 % та 8 % відповідно.

Отримані результати моделювання системи із консольним живленням нетягових споживачів (рис. 4.2) порівнюємо із результатами розрахунку систем із двостороннім живленням (рис. 4.8, 4.16). У табл. 4.13 та 4.14 вказано, у скільки разів значення показників якості електричної енергії у системі із двостороннім живленням через ДПР та ФПП перевищують значення показників з табл. 4.2 та 4.3.

Так у системі із двостороннім живленням нетягових споживачів від лінії ДПР (рис. 4.8) істотно погіршується якість напруги. У системі зовнішнього електропостачання несиметрія напруги зростає у п'ять разів, несинусоїдність лінійних напруг у 2...3 рази. На нетягових споживачах середня несиметрія напруги збільшилась у 1,7 рази, а середній рівень спотворення форми напруги між фазами збільшується у 1,02...1,4 разів.

Зіставлення показників якості електроенергії отриманих на моделях дійсної системи та системи з ФПП показало, що несиметрія напруги у системі зовнішнього електропостачання практично не змінилась, а несинусоїдність міжфазних напруги зменшилась у 1,25 рази. Несиметрія напруги у місці приєднання нетягового споживача зменшилась у 1,3 рази, а коефіцієнт несинусоїдності напруг у 1,6...2 рази.

Таблиця 4.13 Порівняння показників якості електроенергії у місцях приєднання трьох тягових підстанцій до живлячої лінії

Підстанція	K_{2U}		$K_{U_{AB}}$		$K_{U_{AC}}$		$K_{U_{CA}}$	
	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП
ТП1	5,10	1,00	3,72	0,88	2,20	0,43	3,74	0,71
ТП2	3,62	0,93	3,66	1,07	2,71	1,19	3,20	0,99
ТП3	5,89	1,50	2,43	0,47	2,55	0,53	2,91	0,70
середнє	4,66	1,09	3,19	0,78	2,47	0,70	3,25	0,80

Таблиця 4.14 Порівняння показників якості електроенергії у місці приєднання нетягового споживача до живлячої лінії для ділянки з трьома підстанціями

Споживач	K_{2U}		$K_{U_{AB}}$		$K_{U_{AC}}$		$K_{U_{CA}}$	
	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП
H1	1,32	0,68	1,10	0,34	2,84	1,18	1,05	0,59
H2	2,51	0,80	0,87	0,93	0,87	0,41	1,60	0,67
середнє	1,76	0,74	1,02	0,56	1,40	0,62	1,25	0,62

Проведемо оцінку втрат електроенергії у системі електропостачання при різних способах живлення нетягових споживачів. Керуючись даними про середньомісячний транзит електроенергії через тягові підстанції змінного струму, що становить 5-6 млн кВт·год [20], та значенням відносних до генерованої потужності електроенергетичною системою втрат у елементах системи електропостачання, отриманих під час моделювання, розраховано втрати електричної енергії за рік роботи розглянутих систем електропостачання. Отриманий обсяг втрат електроенергії приведено у табл. 4.15.

У аспекті втрат електричної енергії при її передачі нетяговою мережею доцільніше використовувати систему електропостачання із двостороннім живленням споживача через ДПР, що стає можливим у разі однакового приєднання тягових підстанцій до системи зовнішнього електропостачання.

Таблиця 4.15 Втрати електричної енергії у частинах системи електропостачання за рік для ділянки з трьома підстанціями, МВт·год

Спосіб живлення споживача	Загальні	Система зовнішнього електропостачання	Система тягового електропостачання	Система нетягового електропостачання
ДПР	23 936	13 340	10 247	348
двостороннє ДПР	25 083	14 595	10 314	175
двостороннє ФПП	23 800	13 340	10 247	213

Двостороннє живлення від мережі, що включає ФПП та трипровідну лінію 27,5 кВ, зменшує втрати електроенергії до 213 МВт·год/рік проти 348 МВт·год/рік у лініях ДПР. Двостороннє живлення від ліній ДПР, з'єднаних у єдину мережу, зменшує втрати електроенергії до 175 МВт·год за рік.

Втрати електроенергії при передачі лінією ДПР із консольним живленням становлять 2,7 %, при передачі лінією ДПР із двостороннім живленням – 1,3 % та при передачі через ФПП та трипровідну лінію – 1,6 % від нетягового електроспоживання на шинах 27,5 кВ.

Значення показників якості для системи живлення з шістьма підстанціями та консольної схеми живлення нетягових споживачів приведені у таблицях 4.16, 4.17.

Таблиця 4.16 Показники якості у місці приєднання шести тягових підстанцій до живлячої мережі при консольному живленні нетягових споживачів

Підстанція	$K_{2U} \%$	$K_{U_{AB}} \%$	$K_{U_{AC}} \%$	$K_{U_{CA}} \%$
ТП4	0,10	0,94	1,00	0,99
ТП5	0,33	2,18	2,31	2,53
ТП6	0,57	3,20	2,94	3,54
ТП7	0,57	3,20	2,94	3,55
ТП8	0,36	2,19	2,31	2,53
ТП9	0,10	0,95	1,01	1,00
середнє	0,34	2,11	2,09	2,36

Таблиця 4.17 Показники якості на приєднанні нетягових споживачів до ліній ДПР із одностороннім живленням для ділянки з шістьма підстанціями

Споживач	$K_{2U} \%$	$K_{U_{AB}} \%$	$K_{U_{AC}} \%$	$K_{U_{CA}} \%$
Н3	1,49	5,85	11,95	10,51
Н4	1,93	7,82	9,46	9,74
Н5	1,5	5,92	8,5	8,61
Н6	2,85	8,38	6,79	9,55
Н7	1,95	6,42	8,71	9,32
Н8	1,91	8,16	6,25	8,41
Н9	1,73	5,94	12,36	11,00
середнє	1,91	6,93	9,15	9,59

Зіставимо результати моделювання системи електропостачання ділянки на якій розташовані шість тягових підстанцій для трьох варіантів живлення нетягового споживача. У таблицях 4.18, 4.19 приведено відношення показників якості електроенергії, отриманих у режимах із двостороннім живленням від ДПР та ФПП, до показників якості, отриманих при консольному живленні нетягового споживача.

Таблиця 4.18 Порівняння показників якості електроенергії у місцях приєднання шести тягових підстанцій до живлячої лінії

Підстанція	K_{2U}		$K_{U_{AB}}$		$K_{U_{AC}}$		$K_{U_{CA}}$	
	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП
ТП4	8,13	0,40	1,23	0,96	1,75	0,89	1,83	0,92
ТП5	4,61	1,18	1,42	1,00	1,59	0,99	1,52	0,97
ТП6	3,31	1,06	1,29	0,99	1,60	0,99	1,41	0,98
ТП7	3,31	1,07	1,30	0,99	1,59	0,99	1,40	0,98
ТП8	4,46	1,09	1,41	1,00	1,57	0,99	1,55	0,98
ТП9	8,50	0,39	1,26	0,96	1,68	0,90	1,80	0,91
середнє	5,39	0,86	1,32	0,98	1,63	0,96	1,59	0,96

Таблиця 4.19 Порівняння показників якості електроенергії у місці приєднання нетягового споживача до живлячої лінії для ділянки з шістьма підстанціями

Споживач	K_{2U}		$K_{U_{AB}}$		$K_{U_{AC}}$		$K_{U_{CA}}$	
	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП
Н3	1,86	0,97	1,03	1,10	1,10	0,71	1,07	0,54
Н4	1,76	0,46	0,93	0,63	1,06	0,64	0,89	0,57
Н5	3,08	0,77	1,34	1,05	1,08	0,65	1,03	0,60
Н6	1,47	0,71	1,00	0,83	1,39	0,92	0,95	0,62
Н7	2,15	0,63	1,21	1,00	1,05	0,63	0,93	0,57
Н8	1,44	0,49	0,79	0,62	1,65	0,96	1,10	0,68
Н9	1,70	0,86	1,01	1,09	1,00	0,68	1,03	0,52
середнє	1,92	0,70	1,04	0,90	1,19	0,74	1,04	0,59

У системі, де використовується схема двостороннього живлення від ліній ДПР, середнє значення показника несиметрії напруги у лінії зовнішнього електропостачання та ДПР збільшилось у 5 та 2 рази відповідно, а показники несинусоїдності напруги збільшились у 1,3...1,5 рази у лінії зовнішнього електропостачання та у 1,04...1,19 рази у лінії ДПР.

У системі, де використовується схема двостороннього живлення із ФПП середнє значення показників несиметрії та несинусоїдності напруги у системі зовнішнього електропостачання зменшились у 1,16 та 1,02...1,04 рази відповідно, а у місці приєднання нетягового споживача до лінії несиметрія напруги зменшилась у 1,4 рази, несинусоїдність напруги зменшилась у 1,11...1,69 рази.

Втрати електроенергії у системі електропостачання з шістьма тяговими підстанціями приведені у табл. 4.20. Втрати електроенергії відносно нетягового електроспоживання на шинах 27,5 кВ при передачі лінією ДПР із консольним живленням становлять 3 %, при передачі лінією ДПР із двостороннім живленням – 1,5 % та при передачі через ФПП та трипровідну лінію – 2,1 %.

Таблиця 4.20 Втрати електричної енергії у частинах системи електропостачання за рік для ділянки з шістьма підстанціями, МВт·год

Спосіб живлення споживача	Загальні	Система зовнішнього електропостачання	Система тягового електропостачання	Система нетягового електропостачання
ДПР	49 548	27 614	21 211	720
двостороннє ДПР	51 922	30 212	21 350	362
двостороннє ФПП	49 266	27 614	21 211	441

4.3 Висновки до розділу 4

1. Для підвищення ефективності передачі електричної енергії нетяговим споживачам, що отримують живлення від шин тягової підстанції з напругою 27,5 кВ, доцільно реконструювати лінію «два проводи-рейка» у трипровідну трифазну лінію, яка отримуватиме живлення через фазоповоротний пристрій від тягових шин суміжних підстанцій.

2. Фазоповоротний пристрій для двостороннього живлення споживачів від шин тягових підстанцій залізниці змінного струму із різними конфігураціями векторів напруги представляє собою трифазний трансформатор, конструкція якого дозволяє під час експлуатації встановлювати схему з'єднання обмоток «зірка-трикутник» одинадцятої та першої групи. Група з'єднання та схема підключення первинної обмотки фазоповоротного пристрою залежить від способу приєднання тягової підстанції до системи зовнішнього електропостачання.

3. Відмова від чергування фаз у схемах підключення тягових підстанцій до зовнішньої системи електропостачання призведе до зменшення втрат потужності при передачі електричної енергії лінією «два проводи-рейка» до двох разів, але призведе до зростання несиметрії напруги у системі зовнішнього електропос-

чання у п'ять разів та несинусоїдності у 1,3...3 рази.

4. Запропонований спосіб живлення нетягових споживачів дозволяє підвищити якість електропостачання, зменшуючи несиметрію та несинусоїдність напруги у місці приєднання до лінії «два проводи-рейка» споживача у 1,3...1,4 рази та 1,11...2 рази відповідно. За рахунок забезпечення двостороннього живлення із використанням ФПП сукупні втрати електроенергії у трипровідній лінії напругою 27,5 кВ та у фазоповоротних пристроях становлять 1,6...2,1 % проти 2,7...3 % у лініях ДПР до модернізації відносно нетягового електроспоживання на шинах підстанції 27,5 кВ.

Проведені у четвертому розділі дослідження схем живлення нетягових споживачів опубліковані у [4]. Розроблений спосіб забезпечення двостороннього живлення споживачів запатентовано [160].

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДВОСТОРОННЬОГО ЖИВЛЕННЯ НЕТЯГОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЗАЛІЗНИЦІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Запропонований спосіб живлення нетягових споживачів залізниці зменшує втрати потужності у мережі нетягового електропостачання за рахунок об'єднання ліній електропостачання у єдину електричну мережу, та підвищує якість електричної енергії, яка передається кінцевому споживачу. Істотним фактором, що сприяє інвестуванню, є потенційне перепідключення споживачів до мереж іншого власника, у зв'язку із неналежною якістю електроенергії, що передається лініями ДПР. Отриманий у результаті впровадження способу ефект перерозподілу енергетичних потоків у системі електропостачання потребує економічної оцінки, що враховує капітальні витрати на реконструкцію, встановлення нового обладнання, поточні витрати, викликані експлуатацією, а також термін повернення витраченого капіталу.

У цьому розділі виконано оцінку економічної доцільності організації двостороннього живлення з використанням ФПП та реконструкцією лінії ДПР у трипровідну лінію на ділянці між підстанціями Помічна – Осикувата – Сугоклея, та підстанціями Фундукліївка – ім. Т. Шевченко – Завадовка – Миронівка – Сухоліси – Фастів, зображених на рис. 4.2. Детальні розрахунки представлені для ділянки з трьома тяговими підстанціями.

5.1 Методика розрахунку економічної доцільності впровадження двостороннього живлення нетягових споживачів від шин 27,5 кВ тягової підстанції

В залежності від фактору врахування часу при поверненні капіталу, а також для проектів, що мають довгостроковий характер, у сучасній інвестиційній практиці використовують динамічні показники оцінки, передбачене обов'язкове дисконтування витрат і доходів по окремих інтервалах розглянутого періоду.

Чиста поточна вартість (net present value, *NPV*) дозволяє отримати найбільш узагальнену характеристику результату інвестування. Розрахунок цього показни-

ка здійснюється за формулою:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{NCF_t}{(1+R)^t}, \quad (5.1)$$

де NPV - чиста поточна вартість (чистий дисконтований дохід);

NCF_t - чистий грошовий потік у t -му інтервалі нарахування;

R - ставка дисконту;

T - тривалість життєвого циклу проекту.

Чистий грошовий потік на інвестований капітал визначається за формулою:

$$NCF_t = CF_{t+} - CF_{t-}, \quad (5.2)$$

де CF_{t+} – додатній грошовий потік у t -му інтервалі нарахування;

CF_{t-} – від’ємний грошовий потік у t -му інтервалі нарахування.

Приймемо, що додатній грошовий потік включає вартість електроенергії, яка була заощаджена завдяки впровадженню рішення, вартість послуг з електропостачання та розподілу електроенергії та компенсацію за фізичний знос основних фондів (амортизацію), а від’ємний – капітальні відрахування та компенсація за додаткове споживання електроенергії фазоповоротним пристроєм.

5.2 Складові від’ємного грошового потоку

В табл. 5.1 приведено кількість і вартість необхідного обладнання та послуг для реалізації двостороннього живлення з використанням фазоповоротних пристроїв, встановлених на трьох підстанціях (див. рис. 4.16), та реконструкцію двох ліній ДПР у трипровідну лінію, об’єднану у єдину мережу.

Таблиця 5.1 Капітальні витрати на модернізацію системи з трьома підстанціями

Послуга або обладнання	Ціна за одиницю, грн	Кількість	Загальна вартість, грн
1	2	3	
Проекти роботи	1 000 000	1	1 000 000
Фазоповоротний пристрій (ФПП)	600 000	3	1 800 000
Вакуумний вимикач	130 000	3	390 000
Роз’єднувач	26 000	3	78 000

Продовження табл. 5.1

Релейний захист та автоматика	756 000	3	2 268 000
Сталеалюмінієвий провід (1 метр)	14	100 000	1 400 000
Ізоляція	150	6 000	900 000
Монтажні роботи	6 836 000	1	6 836 000
Всього			11 404 000

Додаткове споживання реактивної енергії, пов'язане із потужністю намагнічування трьох ФПП, складає 780 Мвар·год на рік.

Для розрахунку використаємо тариф на електроенергію ТОВ «Енерго Збут Транс», який станом на кінець 2019 р. становить 1,98 грн/кВт·год, та тариф на розподіл електроенергії АТ «Укрзалізниця», який для споживачів першого та другого класу 0,077 грн/кВт·год, та 0,324 грн/кВт·год відповідно [128]. Динаміка зміни тарифів у 2008-2016 рр. використана з [35] для прогнозування зростання тариву за методом лінійної екстраполяції (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 Прогноз зростання тарифів на постачання та розподіл електроенергії, грн/кВт·год

Рік	Тариф на постачання електроенергії	Тариф на розподіл електроенергії для споживачів 1 класу	Тариф на розподіл електроенергії для споживачів 2 класу
2020	1,865	0,054	0,302
2021	2,005	0,195	0,442
2022	2,146	0,335	0,583
2023	2,286	0,475	0,723
2024	2,426	0,616	0,863
2025	2,567	0,756	1,004
2026	2,707	0,897	1,144
2027	2,848	1,037	1,284
2028	2,988	1,177	1,425
2029	3,128	1,318	1,565
2030	3,269	1,458	1,706

Розрахований за [134] економічний еквівалент реактивної потужності для системи на рис. 4.16 приймемо як рівний 0,5 кВт/квар.

Результати розрахунку вартості реактивної енергії приведені у табл. 5.3

5.3 Складові додатного грошового потоку

Під час моделювання встановлено, що впровадження двостороннього живлення споживачів за допомогою ФПП дозволяє зменшити втрати у системі з трьома підстанціями на 135 тис. кВт·год за рік.

Складовою частиною додатного грошового потоку є збережений дохід від розподілу електроенергії – 13 млн. кВт·год за рік. Враховуючи результати прогнозу зростання тарифів на постачання та розподіл електричної енергії, у табл. 5.3 приведено вартість за обсяги спожитої та заощадженої електроенергії за 2020-2030 рр.

Таблиця 5.3 Розрахункова вартість електричної енергії, грн

Інтервал нарахування	Витрати на реактивну електроенергію	Економія від зменшення технологічних витрат активної електроенергії	Дохід від передачі активної електроенергії споживачам
1	735 118	251 753	705 043
2	790 459	270 705	2 530 086
3	845 799	289 657	4 355 130
4	901 140	308 610	6 180 173
5	956 481	327 562	8 005 216
6	1 011 822	346 514	9 830 259
7	1 067 163	365 467	11 655 302
8	1 122 504	384 419	13 480 345
9	1 177 845	403 372	15 305 389
10	1 233 186	422 324	17 130 432
11	1 288 527	441 276	18 955 475

5.4 Чиста поточна вартість впровадження двостороннього живлення нетягового споживача

Вважатимемо, що тривалість інтервалу нарахування t становить один рік, інвестиції нараховані у першому інтервалі. Результати розрахунку грошового потоку та чистої поточної вартості за роками приведено у табл. 5.4, 5.5. Додатний грошовий потік приведено як суму заощаджених коштів, амортизаційних відрахувань та прибутку від розподілу електричної енергії. Останній дорівнює різниці між доходом за надання послуг з розподілу електроенергії та додатковими витра-

тами за компенсацію спожитої реактивної енергії від якої відраховано 18 %, що становить ставку податку на прибуток. У результаті від’ємний грошовий потік дорівнює лише капітальним витратам на кінець року впровадження способу.

Таблиця 5.4 Економічна оцінка модернізації ділянки Помічна – Осикувата – Сугоклея

t	NPV_t , грн	NCF_t , грн	CF_{t+} , грн	CF_{t-} , грн	$\frac{1}{(1+R)^t}$
0	-14 672 000	-14 672 000	–	14 672 000	1,00
1	-14 362 579	368 210	1 103 328	735 118	0,84
2	-13 071 458	1 828 357	2 618 816	790 459	0,71
3	-11 120 008	3 288 504	4 134 304	845 799	0,59
4	-8 752 004	4 748 651	5 649 791	901 140	0,50
5	-6 150 211	6 208 798	7 165 279	956 481	0,42
6	-3 449 651	7 668 945	8 680 767	1 011 822	0,35
7	-748 189	9 129 092	10 196 255	1 067 163	0,30
8	1 885 042	10 589 238	11 711 742	1 122 504	0,25
9	4 402 96	12 049 385	13 227 230	1 177 845	0,21
10	6 775 270	13 509 532	14 742 718	1 233 186	0,18
11	8 984 271	14 969 679	16 258 206	1 288 527	0,15

Таблиця 5.5 Економічна оцінка модернізації ділянки Фундукліївка – ім. Т. Шевченка – Завадовка – Миронівка – Сухоліси – Фастів

t	NPV_t , грн	NCF_t , грн	CF_{t+} , грн	CF_{t-} , грн	$\frac{1}{(1+R)^t}$
0	-31 564 000	-31 564 000	–	31 564 000	1,00
1	-30 123 810	1 713 826	2 448 944	735 118	0,84
2	-26 487 108	5 149 933	5 940 392	790 459	0,71
3	-21 392 016	8 586 040	9 431 840	845 799	0,59
4	-15 396 947	12 022 147	12 923 288	901 140	0,50
5	-8 919 175	15 458 255	16 414 736	956 481	0,42
6	-2 265 670	18 894 362	19 906 184	1 011 822	0,35
7	4 342 315	22 330 469	23 397 632	1 067 163	0,30
8	10 749 703	25 766 576	26 889 080	1 122 504	0,25
9	16 852 095	29 202 683	30 380 528	1 177 845	0,21
10	22 583 544	32 638 790	33 871 976	1 233 186	0,18
11	27 906 937	36 074 897	37 363 424	1 288 527	0,15

Ставка дисконтування прийнята рівною сумі доходності за облігаціями вну-

трішньої державної позики (ОВДП), яка згідно даних [117] складає 15,31, % та відсотку інфляції, середнє значення якого за 2019 р. становить 4 %.

Відрахування на амортизацію визначені лінійним способом, як відношення капітальних витрат на обладнання на їх термін експлуатації. Для 25-річного терміну експлуатації річна сума відрахувань у амортизаційний фонд складає 273 440 грн для системи електропостачання з трьома підстанціями.

Накопичення приведеного до першого інтервалу нарахувань чистого грошового потоку для ділянки Помічна – Осикувата – Сугоклея перевищить обсяг інвестицій упродовж восьмого року експлуатації. На кінець восьмого року чиста поточна вартість стане додатною та дорівнюватиме 1 855 042 грн, що і визначить період окупності запропонованого рішення.

Для ділянки Фундукліївка – ім. Т. Шевченка – Завадовка – Миронівка – Сухоліси – Фастів повернення інвестицій очікується на сьомому році експлуатації.

5.4.1 Висновки до розділу 5

У результаті оцінки економічної ефективності за методикою, яка визначає чисту поточну вартість грошового потоку, отримано, що впровадження двостороннього живлення нетягових споживачів від шин 27,5 кВ тягових підстанцій з використанням фазоповоротного пристрою та реконструкції ліній ДПР у трипровідну лінію окупить себе через 6-7 років. Розрахунок проведено з врахуванням зростання тарифу на постачання та розподіл електроенергії. Ставка дисконтування прийнята на рівні 19,31 % за рік та включає безризикову норму доходності за державними облігаціями та індекс інфляції в Україні за 2019 р., що складають 15,31 % та 4 % відповідно.

Результати оцінки економічної ефективності способу живлення нетягових споживачів опубліковані у [4].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень вирішено наукову задачу підвищення ефективності електропостачання нетягових споживачів, що отримують живлення від шин напругою 27,5 кВ підстанцій залізниць змінного струму.

Висновки, що узагальнюють отримані результати, полягають у наступному:

1. У результаті аналізу даних вимірювання режимних параметрів системи нетягового електропостачання на шинах 27,5 кВ тягової підстанції та у місці приєднання споживача до лінії «два проводи-рейка», зафіксовано зниження якості електричної енергії, що характеризується показниками відхилення та несиметрії напруги. Максимальне значення відхилення напруги у місці приєднання споживача збільшилось з 4 % до 7 %. Максимальне значення коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності з 3 % зросло до 7 %. Ймовірність перевищення нормально допустимого значення відхилення напруги на шинах підстанції зростає з 0 % до 40 % у мережі споживача, а коефіцієнта зворотної послідовності напруги збільшилась з 9 % до 30 %.

2. Аналіз результатів експериментальних вимірювань напруги показав, що у режимі двостороннього живлення покращується якість електричної енергії у місці приєднання споживача до лінії «два проводи-рейка». Найбільший вплив від переходу з консольної на двосторонню схему живлення нетягового споживача виявлено у значенні коефіцієнту несиметрії напруги зворотної послідовності, яке у режимі двостороннього живлення від суміжних тягових підстанцій зменшилось з 4 % до 3 %. Ймовірність виникнення понаднормативного значення коефіцієнту несиметрії напруги живлення споживача лінії «два проводи-рейка» у режимі консольного живлення зменшилась з 60 % до 6 % у режимі двостороннього живлення.

3. Розроблена математична модель сумісної роботи систем зовнішнього, тягового електропостачання залізниць змінного струму та електропостачання нетягових споживачів дозволяє з похибкою не більше 5 % розрахувати показники якості електроенергії з урахуванням нелінійних параметрів тягового трансформатора, електрорухомого складу та різної конфігурації підключення групи підстан-

цій до живлячої мережі. Використаний підхід до побудови математичної моделі систем тягового і зовнішнього електропостачання відрізняється від існуючих врахуванням одночасно несиметричних і несинусоїдних режимів. Це дозволяє отримати оцінку показників якості електроенергії між дослідними системами в установлених та перехідних режимах на основі чисельного розв'язання диференціальних рівнянь стану електричного кола.

У роботі проведено моделювання систем електропостачання реальних ділянок залізниці змінного струму. Кількість диференціальних рівнянь у математичній моделі для розглянутих варіантів систем електропостачання варіювалась від 153 до 401 рівняння, тривалість розрахунку становила 10...16 хв, загальна кількість отриманих миттєвих значень невідомих становила 7,5...24 млн.

4. Запропонований метод підвищення ефективності передачі електричної енергії нетяговим споживачам, що отримують живлення від лінії «два проводи-рейка», дозволяє забезпечити можливість одночасного живлення споживачів від суміжних тягових підстанцій із різними конфігураціями систем векторів лінійної напруги. Для приведення різних типів систем векторів напруги на тягових шинах суміжних підстанцій до однієї форми передбачається використання фазоповоротного пристрою. Живлення споживачів забезпечується від тягових шин підстанції через фазоповоротний пристрій, схема з'єднань обмоток та приєднання до тягових шин підстанції фазоповоротного пристрою залежить від способу приєднання тягового трансформатора до живлячої мережі.

5. При зіставленні результатів моделювання різних варіантів живлення нетягових споживачів від шин тягових підстанцій напругою 27,5 кВ встановлено, що втрати електроенергії при передачі лінією «два проводи-рейка» із консольним живленням становлять 2,7...3 % відносно нетягового електроспоживання на шинах 27,5 кВ тягової підстанції, а при реалізації двостороннього живлення через фазоповоротні пристрої та трипровідну лінію втрати електроенергії зменшуються до 1,6...2,1 %. Також двостороннє живлення нетягових споживачів з використанням фазоповоротного пристрою та трипровідної лінії дозволить зменшити несиметрію та несинусоїдність напруги у місці приєднання споживача до лінії у

1,3...1,4 рази та 1,11...2 рази відповідно.

6. У результаті оцінки економічної ефективності за методикою, яка визначає чисту поточну вартість грошового потоку, отримано, що впровадження двостороннього живлення нетягових споживачів від шин 27,5 кВ тягових підстанцій з використанням фазоповоротного пристрою та реконструкції ліній ДПР у трипровідну лінію окупить себе через 6-7 років при ставці дисконтування 19 % за рік. При розрахунку чистого грошового потоку враховано зростання тарифу на постачання та розподіл електроенергії, а у ставку дисконтування включено безризикову норму доходності за державними облігаціями та індекс інфляції в Україні за 2019 р., що складають 15,31 % та 4 % відповідно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Berman A, Wilsun Xu. Analysis of faulted power systems by phase coordinates. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1998. v. 13, Issue 2, Pp. 587 – 595.
2. Biggar D. R, Hesamzadeh M. R. The economics of electricity markets. Wiley-IEEE Press, 2014. 432 p.
3. Bollen M. H. J., Gu I. Y. H. Signal processing of power quality disturbances. John Wiley & Sons, 2006, 861 p.
4. Bosyi D., Zemskyi D. Increasing Power Supply Efficiency for “Two WireRail” Line Consumers. *Problemy Kolejnictwa*. Issue 188. pp. 93-102. DOI: 10.36137/1881E.
5. Electric power transmission and distribution losses (% of output) //World Bank Open Data. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS> (дата звернення: 01.02.2019).
6. Global Energy Statistical Yearbook 2018 : веб-сайт. URL: <https://yearbook.enerdata.net> (дата звернення 30.11.2018).
7. Kneschke T. A., Control of utility system unbalance caused by single-phase electric traction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-21. 1985. № 6, С. 1559-1570.
8. Laughton M.A. Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase coordinates. Part 1. System representation in phase frame of reference. *Proc. IEEE*. 1968. v. 115. No 8. Pp. 1163-1172.
9. Masoum M., Fuchs E. Power quality in power systems and electrical machines : 2nd edition. Academic Press, 2015. 1140 p.
10. Murthy P. S. R. Power System Analysis. BS Publications, 2007. 336 p.
11. Najm F. N. Circuit simulation. Wiley-IEEE Press, 2010. 352 p.
12. Ogrodzki J. Circuit simulation methods and algorithms. CRC Press, 1994. 496 p.
13. Ramachandran K. M., Tsokos C. P. Mathematical statistics with applications. Academic Press, 2009. 848 p.
14. Shivkumar V. I. Simulating power electronic circuits using python. Springer Publ., 2018. 228 p.

15. Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem) TOM IV Wersja 2.0 URL: https://www.plk-sa.pl/files/public/user_upload/pdf/Akty_prawne_i_przepisy/Standardy_tehniczne/28.09.2018/Szczegolowe_warunki_tehniczne_dla_modernizacji_lub_budowy_linii_kolejow....pdf (дата зверення 01.02.2020).

16. Sustainable and intelligent management of energy for smarter railway systems in Europe: an integrated optimization approach. : D1.1 Railway network key elements and main sub-systems specification. URL: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20150224_151103_79650_MRLWP1DANS01306D1_1Railway_network_key_elements_and_main_subsystems_specification.pdf (дата зверення 01.02.2020).

17. Weron R. Modeling and forecasting electricity loads and prices: a statistical approach : 1st edition. Wiley Publ, 2009. 195 p.

18. 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.

19. Александров Г. Н., Шакиров М. А. Трансформаторы и реакторы. Новые идеи и принципы. Санкт-Петербург : Изд-во Политех. ун-та, 2006. 204 с.

20. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2015 р. Київ, 2016. 148 с.

21. Андреев В. В. Четырехфазная схема электропередачи с трехфазными трансформаторами. *Электричество*. 1952. № 1. С. 15–17.

22. Асосков С. М. Обеспечение электромагнитной совместимости сетей от 6 до 35 кВ как рецепторов в электроэнергетической системе : автореф. дисс. на соискание степени кандидата тех. наук :05.14.02 / Новосибирск, 2011. 23 с.

23. Барковський В. В., Барковська Н. В., Лопатін О. К. Теорія імовірностей та математична статистика. Київ : Центр учбової літератури, 2010. 424 с.

24. Басакер Р., Сааки Т. Конечные графы и сети / пер. с англ. Москва : Наука, 1974. 368 с.

25. Бенар П. П. Электропередача «два провода – земля». *Электричество*.

1933. № 20. С. 13–20.

26. Берман А.П. Расчет несимметричных режимов электрических систем с использованием фазных координат. *Электричество*, 1985. № 12. С. 6-12.

27. Бернас С., Цёк З. Математические модели элементов электроэнергетических систем: пер. с англ. Москва : Энергоиздат, 1982. 312 с.

28. Бессонов Л. А. Электрические цепи со сталью. Москва : Госэнергоиздат, 1948. 344 с

29. Блінов І. В. Теоретичні та практичні засади функціонування конкурентного ринку електроенергії. Київ: Наукова думка, 2015. 250 с.

30. Блінов І. В., Парус Є. В., Іванов Г. А. Дослідження організації конкурентної моделі ринку електроенергії України з урахуванням мережевих обмежень в ОЕС України. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 45. С. 34 – 39.

31. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. Москва : Наука, 1983. 416 с.

32. Бондар І. Л., Бондар О. І., Сиченко В. Г. Електричні системи та мережі нетягових споживачів залізничного транспорту, Дніпропетровськ : Вид-во Маковецький Ю. В., 2009. 184 с.

33. Бородулин Б. М., Герман Л. А., Николаев Г. А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – Москва : Транспорт, 1983. 183с.

34. Босий Д. О. Взаємодія систем тягового з системами зовнішнього електропостачання. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2015. №2 (95), С. 9-15.

35. Босий Д. О. Розвиток наукових основ підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць : дис. ... д-ра техн. наук : 05.220.09 / ДНУЗТ. Дніпро : ДНУЗТ, 2017. 396 с.

36. Босий Д. О., Сиченко В. Г. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму. *Технічна електродинаміка темат. вип.* 2009. Ч. 3. С. 86-89. URL: <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/793> (дата звернення 10.07.2017).

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

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

39. Босий Д. О., Земський Д. Р. Енергоефективні режими електропостачання розгалужених систем з нелінійними та несиметричними навантаженнями. *Енергоефективність 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.

40. 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.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. Бослаф С. Статистика для всех / пер. С англ. П. А. Волкова, И. М. Флямер, М. В. Либерман, А. А. Галицына. Москва : ДМК Пресс, 2015. 586 с.

45. Бочев А. С., Финоченко Т. Э. Модернизация линии продольного электроснабжения два провода- рельсы. *Вестни РГУПС*. №4. 2006. С.117-119.
46. Бренков С. Н. Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения переменного тока регулируемые устройства поперечной компенсации реактивной мощности, адаптированными к режиму тяги : автореф. дисс. на соискание степени кандидата тех. наук : 05.22.07 / ОмГУПС. Омск, 2011. 18 с.
47. Буй Ю. В. Лібералізація ринків електричної і теплової енергії, вугілля та газу, перехід на нову модель їх функціонування. *Причорноморські економічні студії*. 2017. №. 16. С. 56-59.
48. Василянский А. М., Мамошин Р. Р., Якимов Г. Б. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц. *Железные дороги мира*. 2002. № 8. С. 40–46.
49. Васюткин С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Ленинград : Энергия, 1970. 432 с.
50. Веников В. А. Теория подобия и моделирования : учеб. пособие. Москва : Высшая школа, 1976. 479 с.
51. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Москва : Высшая школа, 2000. 480 с.
52. Веприк Ю. Н. Представление силовых трансформаторов в математических моделях установившихся несимметричных режимов электрических систем. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика*, 2012. № 28. С. 3-11.
53. Веприк Ю. Н. Пути повышения эффективности компьютерного моделирования режимов работы электрических систем на основе уравнений в фазных координатах. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2017. № 1. С. 63-66
54. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. Москва : «Радио и связь», 1988. 560 с.
55. Вржесинский А. Е. Электромагнитная совместимость и обеспечение электробезопасности обслуживания системы электроснабжения нетяговых потребителей при питании от воздушных линий напряжением свыше 1000 В, располо-

женных на опорах контактной сети переменного тока : автореф. дисс. на соискание степени кандидата тех. наук: 05.22.07 /МГУПС, Москва, 2013. 25 с.

56. Гамм А. З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. Москва : Наука, 1976. 220 с.

57. Герман Л. А. Продольная емкостная компенсация в системе тягового электроснабжения переменного тока. *Железные дороги мира*. 2007. № 11. С. 53-58.

58. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия и совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.

59. Гришечко С. В. Совершенствование методов контроля показателей качества электрической энергии систем электроснабжения нетяговых потребителей электрифицированных железных дорог : автореф. дисс. на соискание степени кандидата тех. наук: 05.22.07 / ОмГУПС. Омск, 2008. 16 с.

60. Демерчан К. С., Бутирин П. А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. Москва : Высшая школа, 1988. 335 с.

61. Денисюк С. П., Таргонський В. А. Сталий розвиток енергетики України у світових вимірах. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. № 3. С. 7-31.

62. Доманський І. В. Теоретичні основи енергоефективності та ресурсозбереження систем тягового і зовнішнього електропостачання залізниць : дис. ... д-ра. тех. наук : 05.22.09 / ХНУМГ. Харків, 2018. 432 с.

63. Досвід країн Євросоюзу з підвищення енергоефективності, енергоаудиту та енергоменеджменту з енергоощадності в економіці країн. //веб-сайт НЕК «Укренерго» URL: (дата зверення 28.01.2019).

64. ДСТУ 2104-92 (ГОСТ 12965-93). Трансформатори силові масляні загального призначення класів напруги 110 і 150 кВ. Технічні умови. Офіц. вид. ; чинний від 01.07.1993. Київ : Держстандарт України, 1992. 59 с.

65. ДСТУ 2105-92. Трансформатори силові масляні загального призначення напругою до 35 кВ включно. Технічні умови. Офіц. вид. ; чинний від 01.07.1993. Київ : Держстандарт України, 1992. 41 с.

66. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в

електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT). Київ, ДП «УкрДНЦ», 2014, 32 с.

67. Дулан Э., Миллер Дж., Щилдерс У. Равномерные численные методы решения задач с пограничным слоем / пер с англ. Москва : Мир, 1983. 199 с.

68. Енергетична ефективність України. Кращі проектні ідеї: Проект «Професіоналізація та стабілізація енергетичного менеджменту в Україні» /Уклад.: С.П. Денисюк, О.В. Коцар, Ю.В. Чернецька. – К. : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 79 с.

69. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» : схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p> (дата звернення 30.11.2018).

70. Європейські тенденції інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання / С. П. Денисюк та ін.; *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. №. 2. С. 7-19.

71. Жежеленко И. В. Энергоэффективность систем электроснабжения. Интегральная оценка электромагнитных потерь и убытков в масштабах Украины, оптимизация качества электроэнергии в системах электроснабжения : монография. Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», 2017. 244 с.

72. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. Москва : Энергоатомиздат, 2000. 252 с.

73. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. Москва. 2009. 456 с.

74. Журавлев А. Н. Система электроснабжения нетяговых потребителей на электрофицированных железных дорогах переменного тока : автореф. дисс. на соискание степени кандидата тех. наук: 05.22.07 / МГУПС, Москва, 2005. 24 с.

75. Загальноукраїнська інформація та статистична інформація європейських інституцій у сфері електричної енергії //веб-сайт Нацком. енергетики, ком. послуг. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=39939> (дата звернення: 01.06.2019).

76. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Авдиенко И. М. Моделирование сис-

тем тягового електрообладнання, оснащених симетрируючими трансформаторами. Москва : Директ-Медиа, 2017. 166 с.

77. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Качество электроэнергии в линиях электропередачи «два провода – рельс». *Електрифікація транспорту*. 2014. № 7. С.84-91.

78. Закарюкин В. П., Крюков А.В., Шульгин М. С. Параметрическая идентификация силовых трансформаторов тяговых подстанций. *Известия Транссиба*. 2013. №. 1 (13). С. 54-63.

79. Закарюкин В. П, Крюков А. В., Иванова Е. С. Анализ схем симметрирования на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока. *Електрифікація транспорту*. 2013. №6. С. 26-33.

80. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Кобычев Д.С. Математические модели для определения взаимных электромагнитных влияний в системах тягового электрообладнання : монографія. Иркутск : ИрГУПС, 2011. 88 с.

81. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей : учебник для вузов. Изд. 4-е, переработанное. Москва: Энергия, 1975. 752 с.

82. 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.

83. 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.

84. 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.

85. Земський Д. Р. Дослідження якості електричної енергії у лініях поздовжнього електропостачання залізниць змінного струму. *Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств* : матеріали II-ї Міжнародної науково.-практичної конференції, м. Дніпро, 3-4 листопада 2016 р. Дніпро, ДНУЗТ, 2016.

С. 31-32.

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

87. 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.

88. 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.

89. 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.

90. Зирка С.Е., Мороз Ю.И., Мороз Е.Ю. Модель перемагничивания изотропной электротехнической стали в переходном режиме. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 4. С. 8–12.

91. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий : монография / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, и др.; Москва. : Энергоатомиздат, 2007. 294 с.

92. Каратеев П. Ю. Повышение эффективности электропотребления и функционирования электротехнических устройств распределения электроэнергии в электропитающих системах : автореф. дисс. на соискание степени кандидата тех. наук : 05.09.03 / ТулГУ. Тула, 2014. 20 с.

93. Качество электрической энергии. Том 3, Методы и средства повышения качества электрической энергии. / О. Г. Гриб, Е. И. Сокол, А. Ф. Жаркин, и др.; Харьков : ПП «Граф-Ікс», 2014. 292 с.

94. Кириленко О.В., Сегеда М.С., Буткевич О.Ф., Мазур Т.А. Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник. Львів : в-во Національного університету «Львівська політехніка», 2010. 608 с.
95. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
96. Кондратьев Ю. В. Совершенствование условий согласования систем внешнего и тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока : дисс. на соискание степени кандидата тех. наук: 05.22.07 / .ОмГУПС. Омск, 2006, 164 с.
97. Корниенко, В. В., Котельников А. В., Доманский В. Т. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы : Монография. К.: Транспорт Украины, 2004. 196 с.
98. Королев А. А. Разработка методов и средств по симметрированию электрических нагрузок в системе тягового электроснабжения переменного тока : автореф. дисс. на соискание степени кандидата тех. наук: 05.09.03 / МГУПС. Москва, 2013. 24 с.
99. Коршунов В. А. Продольная емкостная компенсация в тяговой сети. *Электричество*. 1965. № 1. С. 23-29
100. Косарев А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. Москва : Интекст, 2004. 272 с.
101. Костін Ю. Д., Телегін В. С. Реформування ринку електроенергії України. *Економічний вісник університету*. 2017. №. 33 (1). С. 101-108.
102. Кулик М. М., Горбулін В. П., Кириленко О. В. Концептуальні підходи до розвитку енергетики України. Київ. 2017 78 с.
103. Курмаєв П. Ю., Стойка С. О., Франченко Л. О. Теоретичні основи функціонування ринку електроенергії в Україні. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2016. №13. С. 137-139.
104. Лежнюк П. Д., Писклярова А. В. Оцінювання втрат електроенергії в низьковольтних електричних мережах засобами нечіткої логіки: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. 131 с.
105. Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. Москва : Энергия, 1981. 392 с.

106. Лейтес Л. В., Пинцов А. М. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. Москва : Энергия, 1974. 192 с.
107. Лосев С.Б., Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. Москва : Энергоатомиздат, 1983. 528 с.
108. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. Москва : Энергия, 1978. 320 с.
109. Малышева Н. Н. Оптимизация состава и параметров компенсирующих устройств в электрических сетях нетяговых железнодорожных потребителей : автореф. дисс. на соискание степени кандидата тех. наук: 05.22.07 / ОмГУПС. Омск, 2011. 19 с.
110. Мамошин Р. Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока. Москва : Транспорт, 1973. 224 с.
111. Марквардт Г. Г., Герман Л. А. Расчет поперечной емкостной компенсации на электрифицированной железной дороге. Электричество. 1976, №1. С. 33-36.
112. Марквардт К. Г. Энергоснабжение электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1982. 528 с.
113. Марквардт К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. М. : Транспорт, 1965. 465 с.
114. Машкин А. Г., Пантелеев В. И. Способ симметрирования нагрузки тяговых трансформаторов. *Промышленная энергетика*. 2006. № 3. С. 30-32.
115. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей. Москва : Энергия, 1972. 232 с.
116. Міщенко Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; послідовне з'єднання елементів. *Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2012. Вип. 42. С. 121-126.
117. Національний Банк України. URL: <http://www.bank.gov.ua/markets/primary-ovdp-chart>.
118. Нерретер В. Расчет электрических цепей на персональном ЭВМ / пер с нем. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 220 с.

119. Огляд аналітичних робіт міжнародних енергетичних організацій щодо стану та сценаріїв розвитку світової енергетичної сфери з прогнозом інвестування в енергоефективність. Укренерго. //веб-сайт НЕК «Укренерго» URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/06/2.-rozvyt_svit_energet_sfery.pdf (дата звернення 28.01.2019).

120. Орешкинський П. С. Передача енергії трьохфазним током по системі «два провода – земля». М.: Изд-во Академії наук СРСР, 1935. 303 с.

121. Паливно-енергетичний комплекс України в контексті глобальних енергетичних перетворень / А. К. Шидловський та ін.; Київ : Вид-во «Українські енциклопедичні знання», 2004. 468 с.

122. Пентегов І. В., Красножон А. В. Універсальна апроксимація кривих намагнічування електротехнічних сталей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. №1. С. 66-70.

123. Питання нетягових потребителів від тягової мережі. *Железні дороги світа*. 2016. 2016. № 6. С. 67-71.

124. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папайка Ю. А. Енергетична ефективність систем електропостачання : монографія. Дніпро : НТУ «ДП», 2018. 148 с.

125. Попов А. Ю. Покращення роботоздатності трьохфазних ліній електропостачання нетягових потребителів при їх розташуванні на опорах контактної мережі змінного струму : автореф. дис. на соискання ступеня кандидата тех. наук: 05.22.07 / ПГУПС. СПб., 2011. 18 с.

126. Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку : Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №308 // База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

127. Правила улаштування електроустановок. Офіц. вид.; чинний від 21.07.2017. Київ, 2017. 617 с.

128. Про внесення змін до постанови НКРЕКП від 11 грудня 2018 року № 1855 Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 10.09.2019 №1922 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v1922874-19?lang=ru>

129. Про засади функціонування ринку електричної енергії України : Закон

України від 24.10.2013 № 663-VII //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/663-18#n101> (дата звернення: 01.02.2019).

130. Про затвердження Інструкції із застосування, монтажу та експлуатації засобів захисту від перенапруг в електроустановках напругою 6-750 кВ : наказ від 23.05.2014 № 374 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0842-14> (дата звернення 11.07.2019).

131. Про затвердження Кодексу комерційного обліку електричної енергії : Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №311 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

132. Про затвердження Кодексу систем розподілу : Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №310 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

133. Про затвердження Кодексу системи передачі : Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №309 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

134. Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії : наказ Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 06.02.2018 № 87 // База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0392-18> (дата звернення: (08.02.2019).

135. Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання : Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 12.06.2018 №375 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0375874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

136. Про затвердження Правил ринку : Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №307 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

137. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії : Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №312 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

138. Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів : наказ від 25.07.2006 № 258 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06> (дата звернення 11.07.2019).

139. Про затвердження форм звітності щодо показників якості електропостачання та інструкцій щодо їх заповнення : Постанова НКРЕКП України від 12.06.2018 року № 374 // База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0374874-18> (дата звернення: (08.02.2019).

140. Про затвердження форми Акта здійснення заходу з державного енергетичного нагляду (контролю) та внесення змін до наказу Мінпаливенерго від 24.12.2004 № 817 : наказ від 15.11.2010 № 473 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1374-10> (дата звернення 11.07.2019).

141. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № № 2019-VIII //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#n148>.

142. Пуйло Г. В. Левин Д. М. Насыпаная Е. П. Математическое моделирование электромагнитных электротехнических сталеЙ. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2011. № 6. С. 29-32.

143. Пустоветов М. Ю. Математическая модель трехфазного трансформатора. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2012. № 4 (321). С. 97-100.

144. Пустоветов М., Солтус К., Синявский И. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 199 с.

145. Ратнер М. П., Могилевский Е. Л. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. М.: Транспорт, 1985. 295 с.

146. Салашенко Т. І. Теоретичне обґрунтування складників механізму лібералізації оптового ринку електроенергії. *Проблеми системного підходу в економіці*. 2018. № 1 (63) С. 51-60.

147. Сапожников А.В. Конструирование трансформаторов. Москва : Госэнергоиздат, 1959. 361 с.

148. Свами М., Тхуласираман К., Графы, сети и алгоритмы / пер. с англ. Москва : Мир, 1984. 455 с

149. Сегеда, М.С. Електричні мережі та системи : підручник, 3-тє вид, доп. та пероб. Львів : Видавництво Львівська політехніка, 2015. 540 с.

150. Сенди К. Современные методы анализа электрических систем / пер. с венгерского. Москва : Энергия, 1971. 360 с.

151. Сероносков В. В. Симметрирующая агрегация компенсирующих устройств и трехфазно-двухфазных преобразователей тяговых подстанций: автореф. дисс. на соискание степени кандидата тех. наук: 05.22.07 / ПГУПС. СПб., 2007. 17 с.

152. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. Москва : Энергоиздат, 2004. 616 с.

153. Система электроснабжения нетяговых потребителей на электрифицированных участках железных дорог : пат. № 47819 Россия. № RU 2005108041/22; заяв. 23.03.2005 опубл. 10.09.2005, Бюл.№ 25. URL: <https://patents.google.com/patent/RU47819U1/ru> (дата обращения 13.03.2019).

154. Сиченко В. Г., Босий Д. О., Кузнецов В. В. Якість електричної енергії в мережах нетягових споживачів електрифікованих залізниць. *Гірнична електро-механіка та автоматика*. 2015. №2 (95), С. 3-9.

155. Сиченко В. Г., Босий Д. О. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2009. Вип. 29. С. 82-87.

156. Сиченко В. Г., Саєнко Ю. Л., Босий Д. О. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія. Дніпропетровськ : Стандарт-Сервіс, 2015. 340 с.

157. Смирнов Н. В., Дубин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и

математической статистики. Москва : Наука, 1969. 512 с.

158. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. Москва : Высшая школа, 2001. 343 с.

159. Солдатов В. А., Баранов А. А. Аналитическая модель трансформаторов «звезда-треугольник» и «звезда-звезда с нулем» в фазных координатах. *Достижения науки и техники АПК*. 2011. № 1. С. 76-78.

160. Спосіб забезпечення двостороннього живлення ліній нетягового електропостачання на залізницях однофазного змінного струму : пат. 141152 Україна. № u 201908882 ; заявл. 22.07.19 ; опубл. 25.03.20, Бюл. № 6.

161. Справочник по проектированию электрических систем / сост. В. В. Ершевич, А. Н. Зеленгер и др.; ред. С. С. Рокотян, И. М. Шапиро. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 352 с.

162. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0,4-750 кВ / ред. Е. Г. Гологорский, А. Н. Кравцов, Б. М. Узелков. Москва: ЭНАС, 2007. 560 с.

163. Справочник по электроснабжению железных дорог /ред. К. Г. Марквардта. Москва : Транспорт, 1980. Т. 1. 256 с.

164. Статистична інформація // веб-сайт М-ва. енерг. та вугіл. Пром. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=35081 (дата звернення: 01.02.2019).

165. Стратегія сталого розвитку «Україна – 2020» : затв. Указом Президента України від 12 січня 2015 р. № 5 /2015 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5/2015> (дата звернення: 01.02.2019).

166. Тамазов А. И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными токовыми нагрузками. Москва : Транспорт, 1965. 235 с.

167. Тимофеев Д. В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками. Москва : Энергия, 1972. 296 с.

168. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 528 с.

169. Тонкаль В. Е., Новосельцев А. В., Денисюк С. П. Баланс энергий в электрических цепях. Киев, 1992. 312 с.

170. Третьяков Е. А. Оптимизация качества и потерь электрической энергии в электрических сетях нетяговых потребителей. *Транспорт Российской Федерации*. 2011. № 3 (34). С. 81-89.

171. Третьяков Е. А. Управление качеством электрической энергии в распределительных сетях железных дорог: монография. Омск, 2013. 196 с.

172. Трунова І. М. Аналіз врахування якості електроенергії у стандартах якості послуг. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2016. № 2(5) С. 38-40 с.

173. Трунова І. М. Лебедева Я. А. Порівняльний аналіз основних нормативних документів щодо якості електричної енергії *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. № 165. С. 19-22.

174. Трунова І. М., Мороз О. М.. Деякі питання щодо застосування ДСТУ EN 50160:2014. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2015. Вип. 15, Т. 2. С. 328-331.

175. Устройство для электроснабжения нетяговых потребителей на электрифицированных участках железных дорог переменного тока : пат. № 42484 Россия. № RU 2004120401/22U; заяв. 12.07.2004; опубл. 10.12.2004. URL: <https://patents.google.com/patent/RU42484U1/ru> (дата обращения 13.03.2019).

176. Устройство для электроснабжения нетяговых потребителей электрифицированных железных дорог : пат. № 46979 Россия. № RU 2005109665/22; заявл. 04.04.2005; опубл. 10.08.2005, Бюл. 22. URL: <https://patents.google.com/patent/RU46979U1/ru> (дата звернення 11.07.2019).

177. Фильштинский А.А. Четырехпроводная электропередача как средство повышения экономичности и надежности высоковольтных сетей. *Электричество*. 1952. № 1. С. 17–22.

178. Финоченко Т. Э. Исследование режимов работы и качества электроэнергии в линиях ДПР. *Вестник РГУПС*. №3 2002 С. 60-62.

179. Финоченко Т. Э. Магнитное влияние тяговых токов на показатели качества электроэнергии системы. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2006. № 3. С. 90-93.

180. Финоченко Т. Э. Повышение качества электроэнергии в линиях "два
164

провода-рельс" в условиях электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока : автореф. дисс. на соискание степени кандидата тех. наук :05.22.07 / РГУПС. Ростов-на-Дону. 2006. 20 с.

181. Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. Москва : Мир, 1999. 685 с.

182. Хачатрян Л. А., Казанський С. В. Про невідповідність чинних стандартів України щодо показників якості електричної. *Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики*. 2017. С. 156-158

183. Холоднокатаные электротехнические стали : справочник / Молотиллов Б. В., Миронов Л. В., Петренко А. Г. и др.; Москва : Металлургия, 1989. 168 с.

184. ЦЕ-0009. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. Київ, 2005. 80 с.

185. Чуа Л. О., Пен-Мин Лин Машинный анализ электронных схем (алгоритмы и вычислительный методы) : перевод с англ. Москва : Энергия, 1980. 639 с.

186. Шалимов М. Г., Маслов Г. П., Магай Г.С. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог Омск, 2002. 49 с.

187. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев : Наукова думка, 1985. 268 с.

188. Шидловський А. К, Новський В. О, Жаркін А. Ф Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. Київ : Інститут електродинаміки НАН України, 2013. 378 с.

189. Щодо підвищення енергоефективності роботи електричних мереж та зменшення втрат в розподільчих мережах 6(10) кВ шляхом переходу на більш високий клас напруги 20 кВ зі зміною конфігурації мережі та концептуальних підходів до автоматизації розподільчої мережі і систем обліку електричної енергії : Протокол наради, від 18.07.2016 р. №45 /4-16. URL: <https://www.slideshare.net/AndriyGerus/pr-narada-pidvyschenenergoefektyvnostirobotyenergomezhh18072016> (дата звернення: 01.02.2019).

190. Эбин Л. Э. Сети с использованием земли в качестве одного из прово-

дов. *Электрические станции*. 1939. № 8. С. 17–23.

191. Электротехнический справочник : в 3-х т. / под общ. ред. В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского и др.; Москва : Энергоатомиздат, 1986. Т. 2. 712 с.

192. Ягуп В. Г., Краснов А. А. Математическое моделирование электропривода электровоза 2ЭЛ5 в режиме тяги. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. № 170. С. 20-31.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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 «ХПИ», 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., Zemsky 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.

ДОДАТОК Б

ПРОГРАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
ДП «ОДЕСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту



С. В. Мямлін

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник Знам'янської дистанції
електропостачання Одеської залізниці



О. І. Критін

Начальник Помічнянської дистанції
електропостачання Одеської залізниці



В. М. Яндович

ПРОГРАМА

експериментальних вимірювань параметрів споживання електроенергії
фідерами суміжних тягових підстанцій змінного струму та лінією ДПР

м. Дніпропетровськ
2014

Мета експерименту

Експериментальним шляхом дослідити режими споживання електроенергії фідерами тягових підстанцій змінного струму, що паралельно живлять міжпідстанційну зону між суміжними тяговими підстанціями.

Оцінити розподіл електроенергії між суміжними підстанціями, які паралельно живлять тягову мережу.

Перевірити відповідність основних показників якості електроенергії в лінії ДПР.

Дослідити можливість протікання вирівнювальних струмів між шинами суміжних тягових підстанцій.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації по дослідній ділянці.

Етап 2. Організація експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Етап 4. Обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій

Умови проведення експерименту

1. Погодні умови

Суха, ясна погода. Температура навколишнього середовища $-10 \dots +40^{\circ}\text{C}$.

2. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1.	Портативний аналізатор якості електричної енергії	3
2.	Датчики змінного струму LEM-Flex	3
9.	Портативний комп'ютер (ноутбук, нетбук)	3
10.	Цифровий мультиметр	1

* до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

Етап 1. Отримання необхідної інформації по виділеній ділянці

№ п/п	Найменування	Причетні
1.	Схема зовнішнього електропостачання тягової підстанції	ЕЧЕ
2.	Однолінійна схема тягової підстанції	ЕЧЕ
3.	Плановий графік руху поїздів, виконані графіки руху ділянкою	ЕЧЦ
4.	Режими споживання електроенергії за даними АСКОЕ	ЕЕЛ
5.	Регістрограми напруги і струму за даними систем моніторингу та захисту Регіна	РРД

Етап 2. Організація експерименту

Вимірювання проводиться на 2-х тягових підстанціях ЕЧЕ-6, ЕЧЕ-7 Одеської залізниці та безпосередньо у споживача, який живиться від лінії ДПР між дослідними тяговими підстанціями.

ЕЧ-3 та ЕЧ-8 Одеської залізниці відповідно з програмою готують місця проведення вимірів на дослідних тягових підстанціях. Вимірювання на тягових підстанціях проводяться у вторинних колах трансформаторів напруги ТН-27,5 кВ та трансформаторів струму відповідних фідерів контактної мережі.

Схема приєднання засобів вимірювальної техніки наведені на рис. 1.

Підключення вимірювальних приладів у вторинні кола трансформаторів напруги і струму за необхідності узгодити з відповідною службою енергопередаючої компанії.

Підключення в кола вторинної напруги виконується контактним з'єднанням за допомогою «крокодилів».

Підключення до струмових кіл виконується гнучкими роз'ємними кліщами типу LEM-Flex.

Для живлення аналізаторів, портативних комп'ютерів під час вимірювань необхідний доступ до мережі 220 В власних потреб тягової підстанції.

Підключення вимірювальних пристроїв виконуються з дотриманням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

ДНУЗТ надає необхідні засоби вимірювальної техніки та з'єднувальні проводи. Для вимірювань у разі необхідності залучаються прилади сторонніх організацій.

Монтаж та підключення вимірювальних приладів здійснюється кваліфікованим працівником РРД під контролем представника ДНУЗТ.

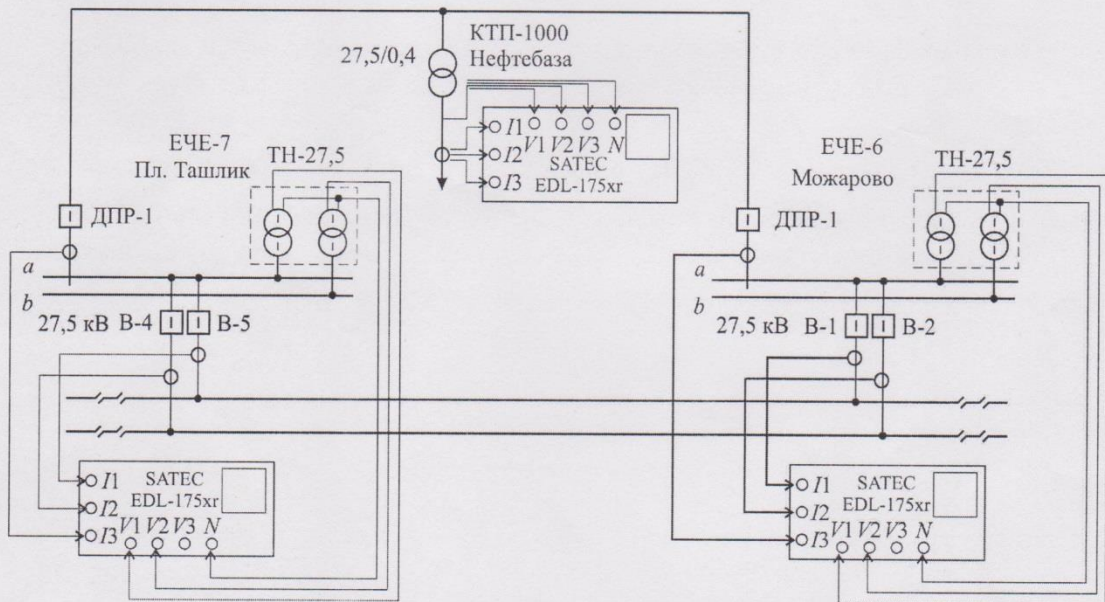


Рис 1. Схема проведення вимірювань на тяговій підстанції

Для проведення вимірювань на ЕЧЕ-6, ЕЧЕ-7 не вимагається оперативних перемикання у схемі живлення пристроїв електропостачання. Схема живлення на протязі експерименту повинна відповідати нормально встановленій.

Дату та час проведення експерименту визначає Помічянська дистанція електропостачання Одеської залізниці. Дистанція призначає відповідальних за проведення експерименту та проводить інструктажі причетним.

Програми та розпорядчі документи щодо підготовки та узгодження з причетними схем живлення контактної мережі, сторонніх та залізничних споживачів з урахуванням забезпечення руху поїздів та електропостачання пристроїв СЦБ, зв'язку та інших здійснює дистанція електропостачання у встановленому порядку.

Загальне керівництво проведенням вимірювань здійснює представник ДНУЗТ.

Етап 3. Проведення експерименту

Вимірювання на ЕЧЕ-6, ЕЧЕ-7 Одеської залізниці необхідно провести для нормального режиму роботи протягом однієї доби (24 год).

Вимірювання у споживача, що живиться від лінії ДПР провести протягом можливого періоду часу.

Інтервал проведення вимірів – 1 с. на всьому протязі експерименту.

Етап 4. Обробка отриманих результатів

Проводиться обробка даних, зафіксованих регістраторами та аналізаторами на тягових підстанціях.

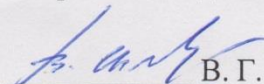
Оброблені дані аналізуються, визначаються показники якості електроенергії на приєднанні фідерів контактної мережі 27,5 кВ тягової підстанції, в лінії ДПР-27,5 кВ. Виконується обчислення співвідношення спожитої електроенергії між дослідними фідерами підстанцій та оцінка наявності вирівнювальних струмів.

Результати вимірювань зіставляються з даними системи комерційного обліку.

Відповідальні за проведення експерименту – дистанція електропостачання, ДНУЗТ.

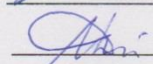
Експеримент проводять – представники ДНУЗТ, представники дистанції електропостачання, фахівець ремонтно-ревізійної дільниці, обслуговуючий персонал тягової підстанції.

Розроблено: д.т.н., с.н.с.



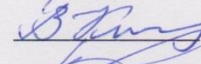
В. Г. Сиченко

к.т.н., докторант



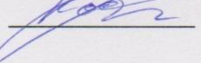
Д. О. Босий

к.т.н., доцент



В. В. Кузнецов

асистент




Є. М. Косарев

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

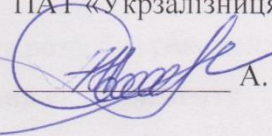
Проректор з науково-педагогічної,
економічної роботи, перспективного
та інноваційного розвитку Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту




А. В. Радкевич

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби електропостачання
Регіональної філії «Одеська залізниця»
ПАТ «Укрзалізниця»

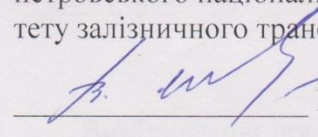

А. Г. Сажин

ПРОГРАМА

**експериментальних вимірювань параметрів передачі та якості електро-
енергії лінією ДПР-27,5 кВ в режимі паралельної та роздільної роботи
на ділянці Слобідка – Балта – Чубівка**

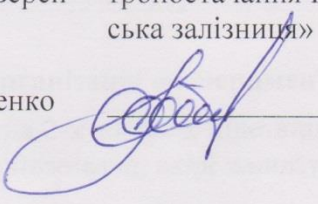
УЗГОДЖЕНО:

Завідуючий кафедри «Інтелектуальні
системи електропостачання» Дніпро-
петровського національного універси-
тету залізничного транспорту


В. Г. Сиченко

УЗГОДЖЕНО:

Начальник Подільської дистанції елек-
тропостачання Регіональної філії «Оде-
ська залізниця» ПАТ «Укрзалізниця»


М. М. Гнатюк

м. Дніпро
2018

Мета експерименту

Експериментальним шляхом дослідити якість електроенергії у кінцевого споживача, що живиться від лінії ДПР-27,5 кВ, в залежності від режиму живлення лінії: для двосторонньої схеми та для консольної.

Перевірити відповідність показників якості та оцінити втрати електричної енергії на онові результатів вимірювань.

Виявити можливість протікання вирівнювальних струмів між шинами 27,5 кВ суміжних тягових підстанцій та визначити їх вплив на якість електроенергії.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації

Етап 2. Організація експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Етап 4. Обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій

Умови проведення експерименту

1. Погодні умови

Суха, ясна погода. Температура навколишнього середовища $-10 \dots +40^{\circ}\text{C}$.

2. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1.	Портативний аналізатор якості електричної енергії	3
2.	Датчики змінного струму LEM-Flex	3
3.	Портативний комп'ютер (ноутбук, нетбук)	3
4.	Цифровий мультиметр	1

* до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

Етап 1. Отримання необхідної інформації по виділеній ділянці

№ п/п	Найменування	Причетні
1.	Схема зовнішнього електропостачання тягових підстанцій	ЕЧЕ
2.	Однолінійні схеми тягових підстанцій	ЕЧЕ
3.	Документація на тягові трансформатори підстанцій	ЕЧЕ
4.	Схема живлення та секціонування контактної мережі	ЕЧЦ
5.	Плановий графік руху поїздів, виконані графіки руху ділянкою	ЕЧЦ

Етап 2. Організація експерименту

Вимірювання проводиться на 2-х тягових підстанціях ЕЧЕ-6, ЕЧЕ-7 Одеської залізниці та безпосередньо у споживача, який живиться від лінії ДПР між дослідними тяговими підстанціями.

ЕЧ-6 Одеської залізниці відповідно з програмою готують місця проведення вимірів на дослідних тягових підстанціях. Вимірювання на тягових підстанціях проводяться у вторинних колах трансформаторів напруги ТН-27,5 кВ та трансформаторів струму фідера ДПР-27,5 кВ.

Схема приєднання засобів вимірювальної техніки наведена на рис. 1.

Підключення вимірювальних приладів у вторинні кола трансформаторів напруги і струму за необхідності узгодити з відповідною службою енергопередаючої компанії.

Підключення у вторинні кола трансформаторів напруги виконується контактним з'єднанням.

Підключення до струмових кіл виконується безконтактно гнучкими роз'ємними кліщами типу LEM-Flex. Для збільшення точності вимірювань можливе виникнення потреби у послідовному включенні провідника з 6-ма повітряними витками діаметром 2,5-3 см.

Для живлення аналізаторів, портативних комп'ютерів під час вимірювань необхідний доступ до мережі 220 В власних потреб тягової підстанції.

Підключення вимірювальних пристроїв у споживача виконується в кола 0,4 кВ.

Підключення вимірювальних пристроїв виконуються з дотриманням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

ДНУЗТ надає необхідні засоби вимірювальної техніки та з'єднувальні проводи. Для вимірювань у разі необхідності залучаються прилади сторонніх організацій.

Монтаж та підключення вимірювальних приладів здійснюється кваліфікованим працівником РРД під контролем представника ДНУЗТ.

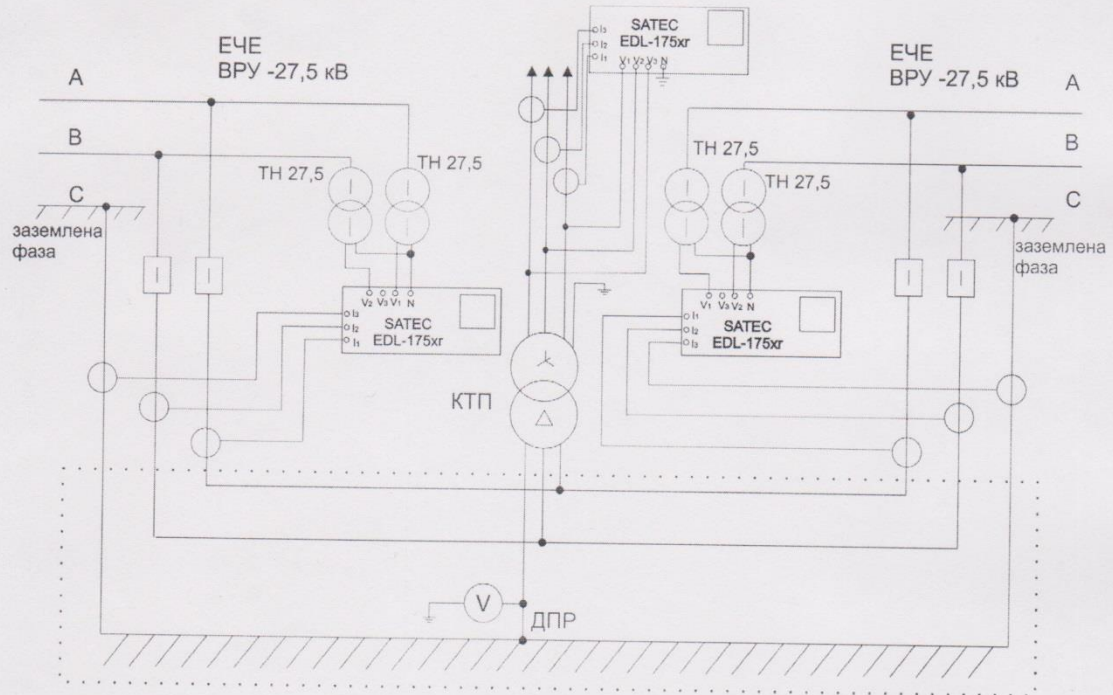


Рис 1. Схема проведення вимірювань

Для проведення вимірювань на ЕЧЕ-6, ЕЧЕ-7 потребується виконання оперативних перемикачів у схемі живлення лінії ДПР, які полягають у включенні / відключенні фідерного вимикача ДПР-27,5 кВ однієї з підстанцій.

Дату та час проведення експерименту визначає Подільська дистанція електропостачання. Дистанція призначає відповідальних за проведення експерименту та проводить інструктажі причетним.

Робочу програму та розпорядчі документи щодо підготовки та узгодження з причетними схем живлення контактної мережі, сторонніх та залізничних споживачів з урахуванням забезпечення руху поїздів та електропостачання пристроїв СЦБ, зв'язку та інших здійснює дистанція електропостачання у встановленому порядку.

Загальне керівництво проведенням вимірювань здійснює представник ДНУЗТ.

Етап 3. Проведення експерименту

Третій етап експерименту передбачає проведення вимірювань за двосторонньою та односторонньою схемою живлення лінії ДПР впродовж 48 годин (по 24 години на кожен схему живлення). Вимірювання на тягових підстанціях та у споживача (КТГП-0,4 кВ), приєднаного до лінії ДПР проводяться одночасно.

Інтервал реєстрації параметрів встановлюється згідно вимог однаковим на всьому протязі експерименту.

Етап 4. Обробка отриманих результатів

Проводиться обробка даних, зафіксованих аналізаторами на тягових підстанціях та у споживача.

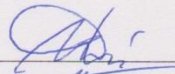
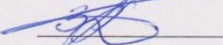
Оброблені дані аналізуються, визначаються показники якості електроенергії на тягових підстанціях та оцінюються втрати електроенергії.

Результати вимірювань зіставляються з даними системи комерційного обліку.

Відповідальні за проведення експерименту – дистанція електропостачання ЕЧ, ДНУЗТ.

Експеримент проводять – представники ДНУЗТ, представник дистанції електропостачання, фахівець ремонтно-ревізійної дільниці, обслуговуючий персонал тягової підстанції.

Розроблено: д.т.н., доцент
аспірант

 Д. О. Босий
 Д. Р. Земський

ДОДАТОК В

СВІДОЦТВО ПРО ПОВІРКУ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ



Національний науковий центр „Інститут метрології”
(ННЦ „Інститут метрології”)
61002, Харків, вул. Миросицька, 42

Свідоцтво про уповноваження № ПК 008-2009 від 22.05.2009

СВІДОЦТВО

про перевірку робочого засобу вимірювальної техніки

№ 6520

Чинне до «10» вересня 2020 р.

Назва та умовне позначення: Прилад для вимірювання показників якості та обліку електричної енергії EDL175XR Зав. № 723096

Виробник: SATEC LTD

Власник: Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна

Повірений із застосуванням: Калібратор Fluke 5520A, Імітатор вимірювач параметрів електричної енергії ІВПЕЕ-3ф-1

Умови проведення перевірки: 21 °C; 52 %; 753 мм рт.ст

На підставі результатів перевірки (протокол №2 від 10.09.2012 р.) **Прилад для вимірювання показників якості та обліку електричної енергії EDL175XR № 723096** визнано придатним до застосування згідно з:

«Прибор для измерения показателей качества и учета электрической энергии EDL175XR. Паспорт».

Заступник генерального директора
з науково-метрологічної роботи



Державний повірник

підпис

О. В. Прокопов
ініціали, прізвище

підпис

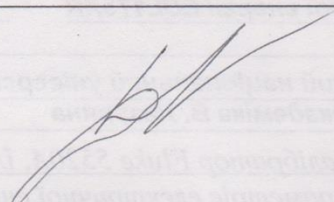
В.О. Денисенко
ініціали, прізвище

" 11 " 09 2012 р.

Результати повірки:

Назва метрологічної характеристики	Одержане значення метрологічної характеристики
Відносна похибка вимірювання напруги, провалу напруги та перенапруги, %	$\pm 0,1$
Абсолютна похибка вимірювання сили струму, А	$\pm(0,005 \cdot X + 2 \text{ омр})$
Відносна похибка вимірювання активної, реактивної, повної потужності та енергії, %	$\pm(0,01 \cdot X + 1 \text{ омр})$
Абсолютна похибка вимірювання кута фазового зсуву, град	$\pm 0,03$
Відносна похибка вимірювання коефіцієнтів несиметрії напруг по зворотній та нульовій послідовностям, %	$\pm 0,15$
Відносна похибка вимірювання коефіцієнта спотворення синусоїдності, %	$\pm 2,5$
Відносна похибка вимірювання n-ої гармонічної складової напруги, %	$\pm 0,1$
Абсолютна похибка вимірювання тривалості провалу та тимчасової перенапруги, мс	± 20
Абсолютна похибка вимірювання частоти, Гц	$\pm 0,01$
Примітка: X – виміряне значення; омр – одиниця молодшого розряду	

Державний повірник:



В.О. Денисенко



ДОДАТОК Г

ВИКОРИСТАНІ ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ

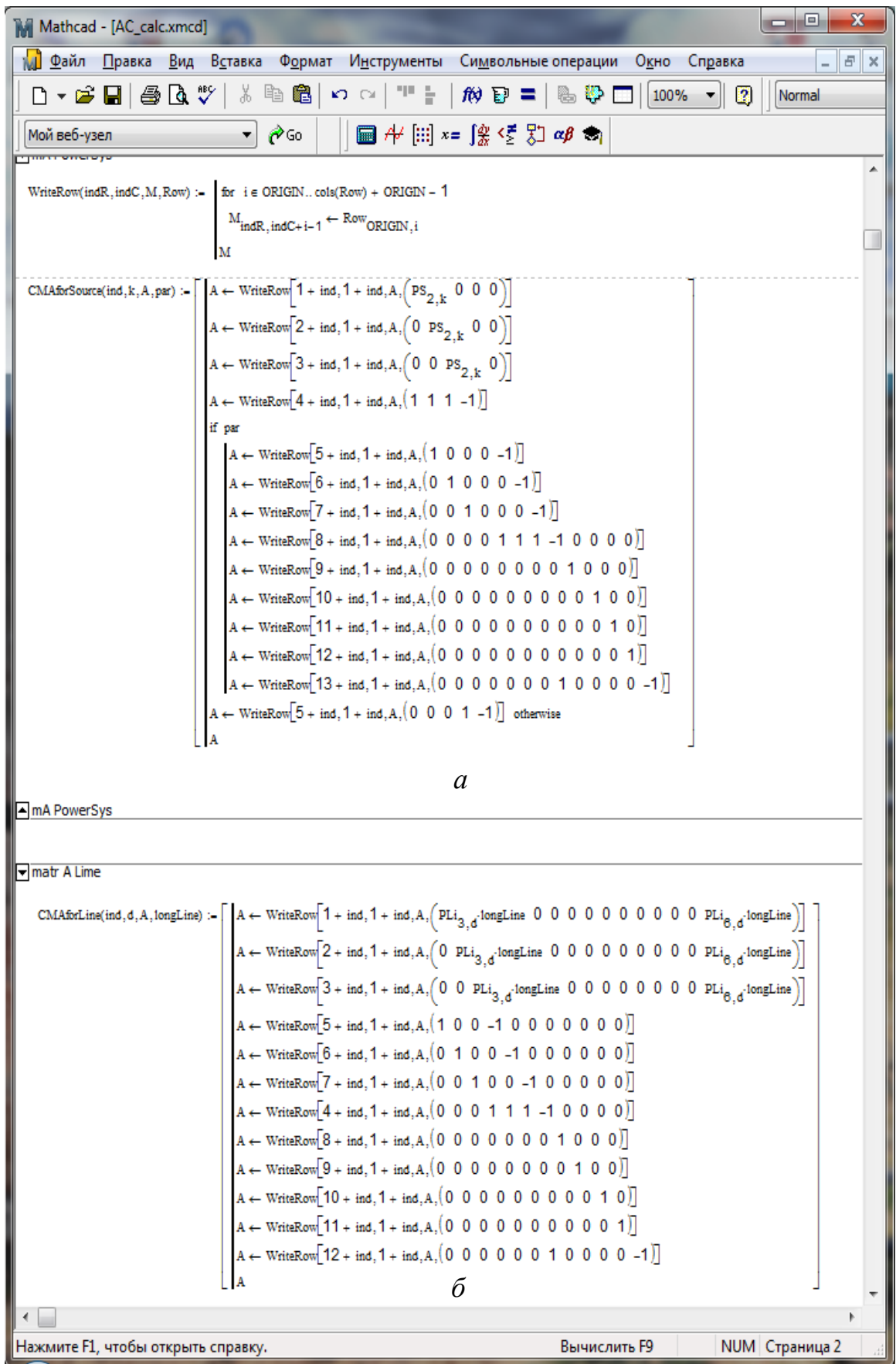


Рисунок Г.1 – Функція-шаблон матриці коефіцієнтів при невідомих для блоку електроенергетична система (а) та трифазної лінії електропередачі (б)

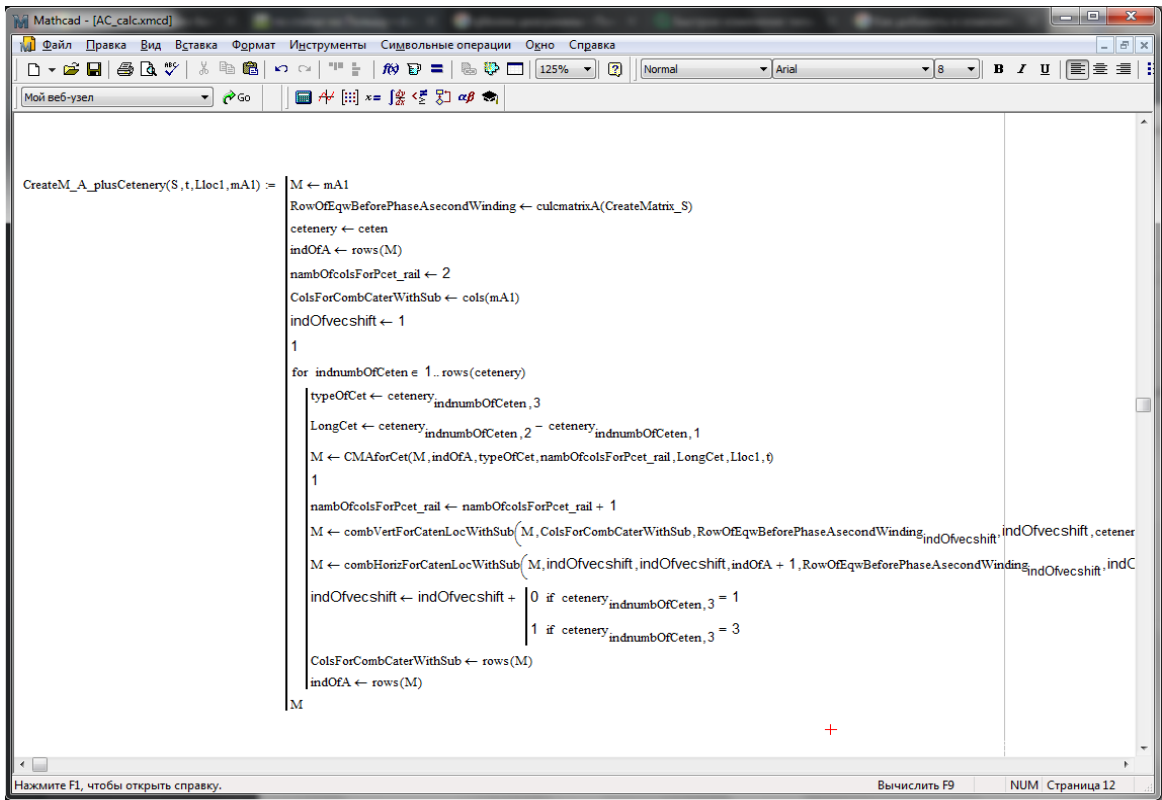

```

Mathcad - [AC_calc.xmcd]
Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка
Мой веб-узел
CreateM_A(in) :=
ind_line ← 2
ind_subst ← 2
ind_source ← 2
ind ← 0
brek ← 0
A1 ← 1
offsetneer ← 0
1
1
if (in1,2 = "Source") (inrows(in),2 = "Source") (1 = rows(source_vec(s)))
    ind_cik ← 2
    for ind_grov e 1...rows(in)
        if inind_grov,2 = "Source"
            brek ← ind_grov
            mat1 ← submatrix(in, 1, brek, 1, 3)
            mat2 ← submatrix(in, brek + 1, rows(in), 1, 3)
            mat1 ← reverse(mat1)
            tolem ← 1
            1
            in ← stack(mat1, mat2)
    1
    1
in ← reverse(in) if (in1,2 = "Source") (inrows(in),2 = "Source")
ind_elem ← rows(in)
for i e 1..ind_elem
    if ini,2 = "Subst"
        A1 ← CMAforSubst(ind, ind_subst, A1, offsetneer)
        ind_subst ← ind_subst + 1
        ind ← ind + 11
        A1 ← MakeConnection(i, ind, in, A1, ind_elem) if i > 1
        namei ← ("ia_sub" "ib_sub" "ic_sub" "in" "iab_sub" "ibc_sub" "ica_sub" "fa" "fb" "fc" "igsou")
    if (ini,2 = "Line")
        longLine ← ini,3
        A1 ← CMAforLine(ind, ind_line, A1, longLine)
        ind_line ← ind_line + 1
        ind ← ind + 12
        A1 ← MakeConnection(i, ind, in, A1, ind_elem) if i > 1
        namei ← ("ia_L" "ib_L" "ic_L" "iCa_L" "iCb_L" "iCc_L" "uCa_L" "uCb_L" "uCc_L" "uC_L" "iglin")
    if ini,2 = "Source"
        A1 ← CMAforSource(ind, ind_source, A1, 0) if i = ind_elem
        A1 ← CMAforSource(ind, ind_source, A1, 1) if i ≠ ind_elem
        1
        ind_source ← ind_source + 1
        ind ← ind + 5 if i = ind_elem
        ind ← ind + 13 if i ≠ ind_elem
        A1 ← MakeConnection(i, ind, in, A1, ind_elem) if i > 1
        namei ← ("ia_S" "ib_S" "ic_S" "in_S" "iCa_S" "iCb_S" "iCc_S" "iC_S" "uCa_S" "uCb_S" "uCc_S" "uC_S" "igsou") if i = ind_elem
        namei ← ("ia S" "ib S" "ic S" "in S" "igsou") if i ≠ ind_elem

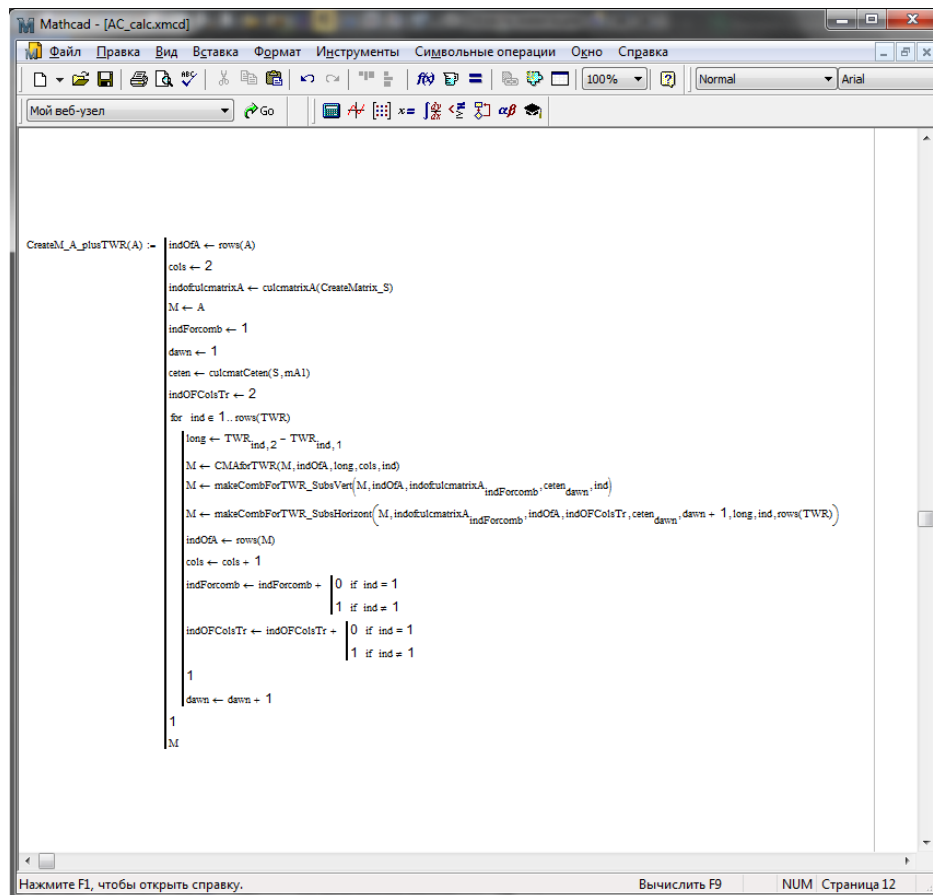
```

Нажмите F1, чтобы открыть справку. Вычислить F9 NUM Страница 7

Рисунок Г.2 – Функція побудови матриці коефіцієнтів при невідомих, що включає до моделі блоки електроенергетичної системи, трифазної лінії та тягового трансформатора



a



б

Рисунок Г.3 – Функція побудови матриці коефіцієнтів при невідомих, що включає до моделі блок тягової мережі та електрорухомого складу (а) та лінії живлення нетягових споживачів (б)

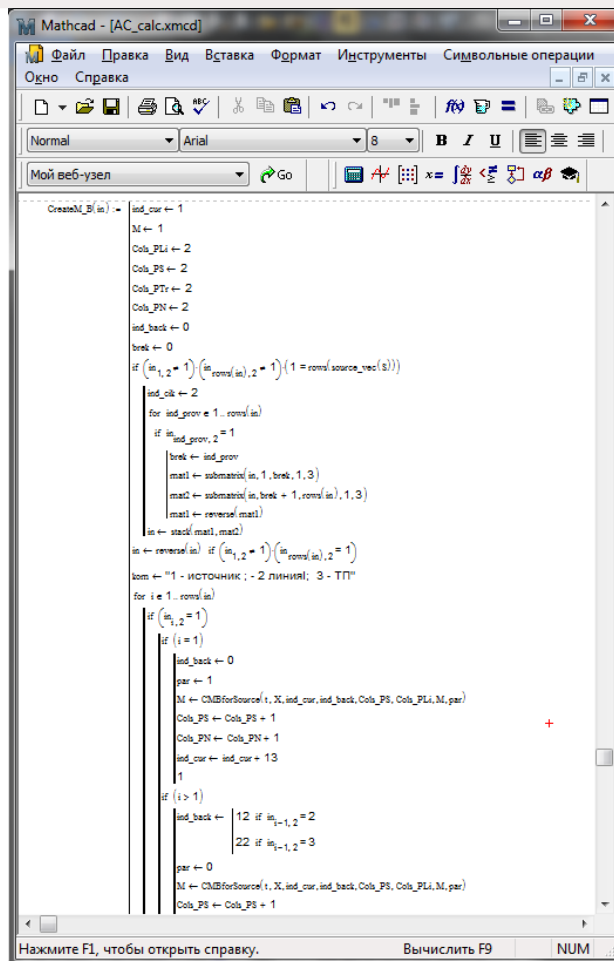
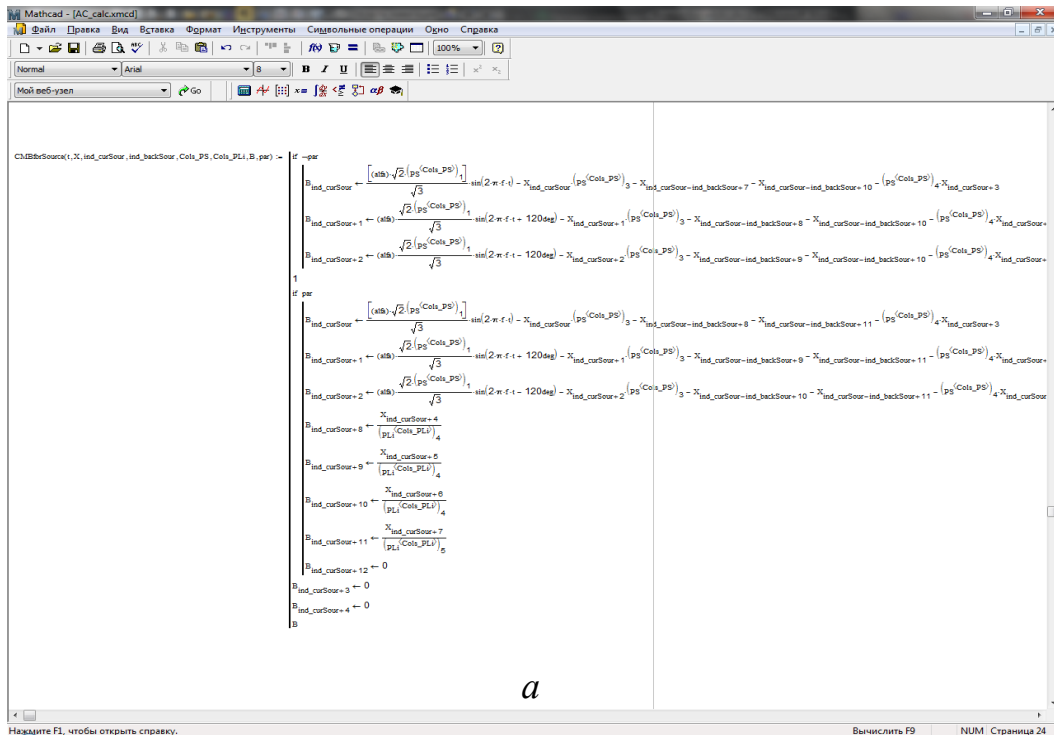


Рисунок Г.4 – Функція-шаблон для вектору вільних членів блоку електроенергетична система (а) та функція побудови вектору вільних членів, що включає до моделі блоки електроенергетичної системи, трифазної лінії та тягового трансформатора (б)

Розрахунки виконані у Matlab

Сценарій розрахунку у Matlab:

```
X0=zeros(size(matrixA_TWR,1),1);
opts = odeset('RelTol',1e-5,'AbsTol',1e-5);
tic, [t,i]=ode15s(@t(i) Model_PubNet_TractSys_TWR(t,i,-
0.011,matrixA_TWR ,Es1,Es2,ph1,ph2 ), [0,0.06],X0); toc
p=floor(size(t,1)/2);
g=size(t,1); tic,
for indOfrows_i=p:1:g
X_ = i(indOfrows_i,1:size(i,2));
Diff_t(indOfrows_i-p+1,1)=t(indOfrows_i);
Diff_i(indOfrows_i-p+1,:)=
Model_PubNet_TractSys_TWR(t(indOfrows_i),X_,-
0.011,matrixA_TWR ,Es1,Es2,ph1,ph2 );end
toc
tic,vSubDelta=TransPhaseVoltagege(i,
Diff_i,p,g,0.018063296,391,0.2541, [30,53,76], 3);toc
tic,
VoltOfSoulder1=[vSubDelta(:,3),-vSubDelta(:,1)];
VoltOfSoulder2=[-vSubDelta(:,4),vSubDelta(:,6)];
VoltOfSoulder3=[vSubDelta(:,9),-vSubDelta(:,7)];
toc
tic,vLoud=PhaseVoltegesLoud(i, Diff_i,p,g, 0.169, 476, [114
117 122 127] ); toc
vEs1 =
[(Es1*sqrt(2)*sqrt(3)*sin(100*pi*Diff_t+(0+ph1)*pi/180)/3),...
Es1*sqrt(2)*sqrt(3)*sin(100*pi*Diff_t+(120+ph1)*pi/180)/3,
Es1*sqrt(2)*sqrt(3)*sin(100*pi*Diff_t+(240+ph1)*pi/180)/3];
vEs2 =
[(Es2*sqrt(2)*sqrt(3)*sin(100*pi*Diff_t+(0+ph2)*pi/180)/3),
Es2*sqrt(2)*sqrt(3)*sin(100*pi*Diff_t+(120+ph2)*pi/180)/3,
strL='B:\modTWR';
Link=strcat(strL, '.xlsx');
LinkLine = strcat(strL, 'CurrLine.xlsx');
xlswrite (Link , t(p:length(t),1), 'Sub1', 'A2' ) % time
xlswrite (Link , t(p:length(t),1), 'Sub2', 'A2' ) % time
xlswrite (Link , t(p:length(t),1), 'Sub3', 'A2' ) % time
xlswrite (Link , i(p:length(t),21:32) , 'Sub1', 'B2' )
plot( t(p:length(t),1), i(p:length(t),21:32))
xlswrite (Link , [i(p:length(t),44) i(p:length(t),46)
i(p:length(t),45) i(p:length(t),47:55)] , 'Sub2', 'B2' )
xlswrite (Link , [i(p:length(t),69) i(p:length(t),67)
i(p:length(t),68) i(p:length(t),70:78) ],
'Sub3', 'B2' )
xlswrite (Link , [VoltOfSoulder1 ,vSubDelta(:,1:3)] , 'Sub1', 'N2'
)
xlswrite (Link , [VoltOfSoulder2 , vSubDelta(:,4:6)] , 'Sub2', 'N2'
)
xlswrite (Link , [ VoltOfSoulder3 , vSubDelta(:,7:9) ], 'Sub3', 'N2'
)
xlswrite (Link , [t(p:length(t),1) vLoud(:,1:3)
i(p:length(t),114:116) ] , 'TWR1', 'A2' )
xlswrite (Link , [t(p:length(t),1) vLoud(:,4:6)
i(p:length(t),119:121) ] , 'TWR2', 'A2' )
xlswrite (Link , [t(p:length(t),1) vLoud(:,7:9)
i(p:length(t),124:126) ] , 'TWR3', 'A2' )
xlswrite (Link , [t(p:length(t),1) vLoud(:,10:12)
i(p:length(t),129:131) ] , 'TWR4', 'A2' )
xlswrite (LinkLine , { 'time' 'i0' 'i0,5' 'i26' 'i76' 'i101,5' 'i102'
'Ec_0' 'Ec_102' }
'LA', 'A1' );
xlswrite (LinkLine , { 'time' 'i0' 'i0,5' 'i26' 'i76' 'i101,5' 'i102'
'Ec_0' 'Ec_102' }
'LB', 'A1' );
xlswrite (LinkLine , { 'time' 'i0' 'i0,5' 'i26' 'i76' 'i101,5' 'i102'
'Ec_0' 'Ec_102' }
'LC', 'A1' );
```

```
tic,xlswrite (LinkLine , [t(p:length(t),1) i(p:length(t),1)
i(p:length(t),14) i(p:length(t),37) i(p:length(t),60)
i(p:length(t),83) i(p:length(t),95) vEs1(:,1),vEs2(:,1)] ,
'LA', 'A2' )
xlswrite (LinkLine , [t(p:length(t),1) i(p:length(t),2)
i(p:length(t),15) i(p:length(t),38) i(p:length(t),61)
i(p:length(t),84) i(p:length(t),96) , vEs1(:,2),vEs2(:,2)]
'LB', 'A2' )
xlswrite (LinkLine , [t(p:length(t),1) i(p:length(t),3)
i(p:length(t),16) i(p:length(t),39) i(p:length(t),62)
i(p:length(t),85) i(p:length(t),97) ,vEs1(:,3),vEs2(:,3)] , 'LC', 'A2'
); toc
LocoVol= CulcLocoVolt( Diff_i,Diff_t, [100, 103, 108, 112],i, -
0.011, p, g );
xlswrite (Link , [LocoVol,
i(p:g,100),i(p:g,103),i(p:g,108),i(p:g,112)], ...
'Loco', 'A2' );
xlswrite (Link , ...
{ 'time' 'V_A' 'V_B' 'V_C' 'V_N' 'I in ground' 'I_A' 'I_B' 'I_C' 'i_N'
'I_ac' 'I_ba' 'I_ca' 'V_left' 'V_right' 'Vax' 'Vby' 'Vcz' } ,
'Sub1', 'A1' );
xlswrite (Link , { 'time' 'V_A' 'V_B' 'V_C' 'V_N' 'I in ground' 'I_A'
'I_B' 'I_C' 'i_N' 'I_ac' 'I_ba' 'I_ca' 'V_left' 'V_right' 'Vax' 'Vby'
'Vcz' } ,
'Sub2', 'A1' );
xlswrite (Link , { 'time' 'V_A' 'V_B' 'V_C' 'V_N' 'I in ground' 'I_A'
'I_B' 'I_C' 'i_N' 'I_ac' 'I_ba' 'I_ca' 'V_left' 'V_right' 'Vax' 'Vby'
'Vcz' } ,
'Sub3', 'A1' );
xlswrite (Link , { 'time' 'V_a' 'V_b' 'V_c' 'I_a' 'I_b' 'I_c(rail)' } ,
'TWR1', 'A1' );
xlswrite (Link , { 'time' 'V_a' 'V_b' 'V_c' 'I_a' 'I_b' 'I_c(rail)' } ,
'TWR2', 'A1' );
xlswrite (Link , { 'time' 'V_a' 'V_b' 'V_c' 'I_a' 'I_b' 'I_c(rail)' } ,
'TWR3', 'A1' );
xlswrite (Link , { 'time' 'V_a' 'V_b' 'V_c' 'I_a' 'I_b' 'I_c(rail)' } ,
'TWR4', 'A1' );
xlswrite (Link , { 'time' 'Loco1' 'Loco2' 'Loco3' 'Loco4' 'Locoi1'
'Locoi2' 'Locoi3' 'Locoi4' } , 'Loco', 'A1' );
```

Аналіз Фур'є виконаний мовою програмування R

Сценарій розрахунку написаний мовою програмування R:

```
library(tidyverse)
library(openxlsx)
xl_out<-createWorkbook()
for (ShN in
c("Sub1","Sub2","Sub3","TWR1","TWR2","TWR3","TWR4","Lo
co")){
data<-tbl_df(read.xlsx("modTWR.xlsx", sheet=ShN))
data<-filter(data,time<data$time[1]+0.02)
data_out<-tibble(seq(0,4000,by=50))
names(data_out)[1]="Freq"
if (substr(ShN,1,3)=="Sub" ) { vcols<-c(2:18) }
else { if ((substr(ShN,1,3)=="Loc" ))
{vcols<-c(2:9)}
else { vcols<-c(2:7) } }
for (i in vcols){
vec<-pull(data,names(data)[i])
f_data<-Mod(fft(vec))*2/length(vec)
data_out<-add_column(data_out,f_data[1:81])
names(data_out)[length(data_out)]=names(data[length(data_
out)])}
addWorksheet(xl_out, ShN)
writeData(xl_out, sheet=ShN, x=data_out)
```

```

print(ShN)}
saveWorkbook(xl_out, "modTWR_fResult.xlsx", overwrite =
TRUE)
rm(xl_out)
rm(data)
rm(data_out)
rm(f_data)
rm(vec)
rm(i)
rm(ShN)
rm(vcols)
xl_out<-createWorkbook()
for (ShN in c("LA","LB","LC")){
data<-tbl_df(read.xlsx("modTWRCurrLine.xlsx", sheet=ShN))
data<-filter(data,time<data$time[1]+0.02)
data_out<-tibble(seq(0,4000,by=50))
names(data_out)[1]="Freq"
vcols<-c(2:8)
for (i in vcols){
vec<-pull(data,names(data)[i])
f_data<-Mod(fft(vec))*2/length(vec)
data_out<-add_column(data_out,f_data[1:81])
names(data_out)[length(data_out)]=names(data[length(data_
out)])}
addWorksheet(xl_out, ShN)
writeData(xl_out, sheet=ShN, x=data_out)
print(ShN)}
saveWorkbook(xl_out, "modTWRCurrLine_fResult.xlsx",
overwrite = TRUE)
rm(xl_out)
rm(data)
rm(data_out)
rm(f_data)
rm(vec)
rm(i)
rm(ShN)
rm(vcols)

```

Розрахунок виконаний у середовищі Qlikview

Сценарій розрахунку у середовищі

Qlikview:

```

For Each vSubName in 'Sub1', 'Sub2', 'Sub3'
SubInfo:
LOAD
'$ (vSubName)' as SubKey,
time, V_A, V_B, V_C, V_N, [I in ground], I_A, I_B, I_C, i_N, I_ac,
I_ba, I_ca, V_left, V_right FROM
[.\modFFP.xlsx]
(ooxml, embedded labels, table is $(vSubName));
Next vSubName
For Each vTWRName in 'TWR1', 'TWR2', 'TWR3', 'TWR4'
TWRInfo:
LOAD
'$ (vTWRName)' as TWRKey,
time as twr.time,
V_a, V_b, V_c, I_a, I_b, [I_c(rail)]
FROM
[.\modFFP.xlsx]
(ooxml, embedded labels, table is $(vTWRName));
Next vTWRName
For Each vSubResName in 'Sub1', 'Sub2', 'Sub3'
SubResInfo:
LOAD
'$ (vSubResName)' as SubResKey,
Freq,

```

```

V_A as V_Af,
V_B as V_Bf,
V_C as V_Cf,
V_N as V_Nf,
[I.in.graund] as [I.in.graundf],
I_A as I_Af ,
I_B as I_Bf,
I_C as I_Cf,
i_N as i_Nf,
I_ac as I_acf,
I_ba as I_baf,
I_ca as I_caf,
V_left as V_leftf,
V_right as V_rightf
FROM
[.\modFFP_fResult.xlsx]
(ooxml, embedded labels, table is $(vSubResName));
Next vSubResName
SubHigherHarm:
Load
SubResKey
,Sqrt(Sum(V_Af*V_Af)) as V_Af_h
,Sqrt(Sum(V_Bf*V_Bf)) as V_Bf_h
,Sqrt(Sum(V_Cf*V_Cf)) as V_Cf_h
,Sqrt(Sum(V_Nf*V_Nf)) as V_Nf_h
,Sqrt(Sum([I.in.graundf]*[I.in.graundf])) as I.in.graundf_h
,Sqrt(Sum(I_Af*I_Af)) as I_Af_h
,Sqrt(Sum(I_Bf*I_Bf)) as I_Bf_h
,Sqrt(Sum(I_Cf*I_Cf)) as I_Cf_h
,Sqrt(Sum(i_Nf*i_Nf)) as i_Nf_h
,Sqrt(Sum(I_acf*I_acf)) as I_acf_h
,Sqrt(Sum(I_baf*I_baf)) as I_baf_h
,Sqrt(Sum(I_caf*I_caf)) as I_caf_h
,Sqrt(Sum(V_leftf*V_leftf)) as V_leftf_h
,Sqrt(Sum(V_rightf*V_rightf)) as V_rightf_h
Resident SubResInfo
Where Freq>=100 And Freq<=2100
Group By SubResKey;
Left Join(SubHigherHarm)
Load
SubResKey
,V_Af as V_Af_Main
,V_Bf as V_Bf_Main
,V_Cf as V_Cf_Main
,V_Nf as V_Nf_Main
,I.in.graundf as I.in.graundf_Main
,I_Af as I_Af_Main
,I_Bf as I_Bf_Main
,I_Cf as I_Cf_Main
,i_Nf as i_Nf_Main
,I_acf as I_acf_Main
,I_baf as I_baf_Main
,I_caf as I_caf_Main
,V_leftf as V_leftf_Main
,V_rightf as V_rightf_Main
Resident SubResInfo
Where Freq=50;
Left Join(SubHigherHarm)
Load
SubResKey
,V_Af_h/V_Af_Main*100 as V_Af_thd
,V_Bf_h/V_Bf_Main*100 as V_Bf_thd
,V_Cf_h/V_Cf_Main*100 as V_Cf_thd
,V_Nf_h/V_Nf_Main*100 as V_Nf_thd
,I.in.graundf_h / I.in.graundf_Main *100 as I.in.graundf_thd
,I_Af_h / I_Af_Main*100 as I_Af_thd
,I_Bf_h / I_Bf_Main*100 as I_Bf_thd
,I_Cf_h / I_Cf_Main *100 as I_Cf_thd
,i_Nf_h / i_Nf_Main*100 as i_Nf_thd

```

```

,l_acf_h / l_acf_Main*100 as l_acf_thd
,l_baf_h / l_baf_Main *100 as l_baf_thd
,l_caf_h / l_caf_Main *100 as l_caf_thd
,V_leftf_h / V_leftf_Main*100 as V_leftf_thd
,V_rightf_h / V_rightf_Main *100 as V_rightf_thd
Resident SubHigherHarm;
For Each vTWRResName in 'TWR1', 'TWR2', 'TWR3', 'TWR4'
TWRResInfo:
LOAD
'$ (vTWRResName)' as TWRResKey,
Freq as twr.Freq,
V_a as V_atf,
V_b as V_btf,
V_c as V_ctf,
I_a as I_atf,
I_b as I_btf,
[I_c(rail)] as [I_c(rail)tf]
FROM
[.\modFFP_fResult.xlsx]
(ooxml, embedded labels, table is $(vTWRResName));
Next vTWRResName
TWRHigherHarm:
Load
TWRResKey
,Sqrt(Sum(V_atf*V_atf)) as V_atf_h
,Sqrt(Sum(V_btf*V_btf)) as V_btf_h
,Sqrt(Sum(V_ctf*V_ctf)) as V_ctf_h
,Sqrt(Sum(I_atf*I_atf)) as I_atf_h
,Sqrt(Sum(I_btf*I_btf)) as I_btf_h
,Sqrt(Sum([I_c(rail)tf]*[I_c(rail)tf])) as I_c.rail.tf_h
Resident TWRResInfo
Where twr.Freq>=100 And twr.Freq<=2100
Group By TWRResKey;
/// Гармоник 50 Гц по ДПР
Left Join(TWRHigherHarm)
Load
TWRResKey
,V_atf as V_atf_Main
,V_btf as V_btf_Main
,V_ctf as V_ctf_Main
,I_atf as I_atf_Main
,I_btf as I_btf_Main
,[I_c(rail)tf] as I_c.rail.tf_Main
Resident TWRResInfo
Where twr.Freq=50;
Left Join(TWRHigherHarm)
Load
TWRResKey
,V_atf_h / V_atf_Main*100 as V_atf_thd
,V_btf_h / V_btf_Main*100 as V_btf_thd
,V_ctf_h / V_ctf_Main*100 as V_ctf_thd
,I_atf_h / I_atf_Main*100 as I_atf_thd
,I_btf_h / I_btf_Main as I_btf_thd
,I_c.rail.tf_h / I_c.rail.tf_Main*100 as I_c.rail.tf_thd
Resident TWRHigherHarm;
/// Количество строк
t_NRows:
Load
Count(time) as No_of_rec
Resident SubInfo
Where SubKey='Sub1';
Let N=Peek('No_of_rec',0,'t_NRows');
// Таблица ТП
PowerQuality:
Load
SubKey,
Sqrt(Sum(V_A*V_A)/ $(N)) as VA,
Sqrt(Sum(V_B*V_B)/ $(N)) as VB,
Sqrt(Sum(V_C*V_C)/ $(N)) as VC,

```

```

Sqrt(Sum(I_A*I_A)/ $(N)) as IA,
Sqrt(Sum(I_B*I_B)/ $(N)) as IB,
Sqrt(Sum(I_C*I_C)/ $(N)) as IC,
Sqrt(Sum(V_A*V_A)/ $(N))*Sqrt(Sum(I_A*I_A)/ $(N)) as SA,
Sqrt(Sum(V_B*V_B)/ $(N))*Sqrt(Sum(I_B*I_B)/ $(N)) as SB,
Sqrt(Sum(V_C*V_C)/ $(N))*Sqrt(Sum(I_C*I_C)/ $(N)) as SC,
Avg(V_A*I_A) as PA,
Avg(V_B*I_B) as PB,
Avg(V_C*I_C) as PC,
acos(Avg(V_A*I_A) / (Sqrt(Sum(V_A*V_A)/
$(N))*Sqrt(Sum(I_A*I_A)/ $(N))))*180/pi() as phiA,
acos(Avg(V_B*I_B) / (Sqrt(Sum(V_B*V_B)/
$(N))*Sqrt(Sum(I_B*I_B)/ $(N))))*180/pi() as phiB,
acos(Avg(V_C*I_C) / (Sqrt(Sum(V_C*V_C)/
$(N))*Sqrt(Sum(I_C*I_C)/ $(N))))*180/pi() as phiC
Resident SubInfo
Group by SubKey;
PowerQualityTWR:
NoConcatenate
Load
TWRKey,
Sqrt(Sum(V_a*V_a)/ $(N)) as Va,
Sqrt(Sum(V_b*V_b)/ $(N)) as Vb,
Sqrt(Sum(V_c*V_c)/ $(N)) as Vc,
Sqrt(Sum(I_a*I_a)/ $(N)) as Ia,
Sqrt(Sum(I_b*I_b)/ $(N)) as Ib,
Sqrt(Sum([I_c(rail)]*[I_c(rail)])/ $(N)) as Irail,
Sqrt(Sum(V_a*V_a)/ $(N))*Sqrt(Sum(I_a*I_a)/ $(N)) as Sa,
Sqrt(Sum(V_b*V_b)/ $(N))*Sqrt(Sum(I_b*I_b)/ $(N)) as Sb,
Sqrt(Sum(V_c*V_c)/ $(N))*Sqrt(Sum([I_c(rail)]*[I_c(rail)])/
$(N)) as Srail,
Avg(V_a*I_a) as Pa,
Avg(V_b*I_b) as Pb,
Avg(V_c*[I_c(rail)]) as Prail,
acos(Avg(V_a*I_a) / (Sqrt(Sum(V_a*V_a)/
$(N))*Sqrt(Sum(I_a*I_a)/ $(N))))*180/pi() as phia,
acos(Avg(V_b*I_b) / (Sqrt(Sum(V_b*V_b)/
$(N))*Sqrt(Sum(I_b*I_b)/ $(N))))*180/pi() as phib,
acos(Avg(V_c*[I_c(rail)]) / (Sqrt(Sum(V_c*V_c)/
$(N))*Sqrt(Sum([I_c(rail)]*[I_c(rail)])/ $(N))))*180/pi() as phirail
Resident TWRInfo
Group by TWRKey;
MAIN_H:
Load
SubResKey
,V_Af as V_Af_MainK
,V_Bf as V_Bf_MainK
,V_Cf as V_Cf_MainK
,V_Nf as V_Nf_MainK
,I.in.groundf as I.in.groundf_MainK
,I_Af as I_Af_MainK
,I_Bf as I_Bf_MainK
,I_Cf as I_Cf_MainK
,I_Nf as I_Nf_MainK
,I_acf as I_acf_MainK
,I_baf as I_baf_MainK
,I_caf as I_caf_MainK
,V_leftf as V_leftf_MainK
,V_rightf as V_rightf_MainK
Resident SubResInfo
Where Freq=50;
PH_PHSUB:
LOAD
SubResKey,
(sqrt((sqr(V_Af_MainK)+sqr(V_Bf_MainK)+V_Af_MainK*V_Bf_
MainK))) as VAB
,

```

```

(sqrt(sqrt(V_Bf_MainK)+sqrt(V_Cf_MainK)+V_Bf_MainK*V_Cf_MainK))as VBC
,(sqrt(sqrt(V_Cf_MainK)+sqrt(V_Af_MainK)+V_Cf_MainK*V_Af_MainK)) as VCA
Resident MAIN_H;
CulcSubK2U:
LOAD
SubResKey,
sqrt(1/12*(sqrt(sqrt(3)*VAB-sqrt(4*sqrt(VBC)-sqrt((sqrt(VBC)-sqrt(VCA))/VAB+VAB)))+(sqrt(VBC)-sqrt(VCA))/VAB))
sqrt(1/12*(sqrt(sqrt(3)*VAB+sqrt(4*sqrt(VBC)-sqrt((sqrt(VBC)-sqrt(VCA))/VAB+VAB)))+sqrt((sqrt(VBC)-sqrt(VCA))/VAB))*100
as k2sub
Resident PH_PHSub;
CulcK2I:
LOAD
SubResKey,
sqrt(1/12*(sqrt(sqrt(3)*I_Af_MainK-sqrt(4*sqrt(I_Bf_MainK)-sqrt((sqrt(I_Bf_MainK)-sqrt(I_Cf_MainK))/I_Af_MainK+I_Af_MainK)))+(sqrt(I_Bf_MainK)-sqrt(I_Cf_MainK))/I_Af_MainK))
sqrt(1/12*(sqrt(sqrt(3)*I_Af_MainK+sqrt(4*sqrt(I_Bf_MainK)-sqrt((sqrt(I_Bf_MainK)-sqrt(I_Cf_MainK))/I_Af_MainK+I_Af_MainK)))+sqrt((sqrt(I_Bf_MainK)-sqrt(I_Cf_MainK))/I_Af_MainK)))*100
as k2Isub
Resident MAIN_H;
MAINTWR_H:
Load
TWRResKey
,V_atf as V_atf_MainK
,V_btf as V_btf_MainK
,V_ctf as V_ctf_MainK
,I_atf as I_atf_MainK
,I_btf as I_btf_MainK
,I_c(rail)tf as I_c.rail.tf_MainK
Resident TWRResInfo
Where twr.Freq=50;
PH_PHTWR:
LOAD
TWRResKey,

(sqrt((sqrt(V_atf_MainK)+sqrt(V_btf_MainK)+V_atf_MainK*V_btf_MainK))) as VabTWR
,
(sqrt(sqrt(V_btf_MainK)+sqrt(V_ctf_MainK)+V_btf_MainK*V_ctf_MainK))as VbcTWR
,(sqrt(sqrt(V_ctf_MainK)+sqrt(V_atf_MainK)+V_ctf_MainK*V_atf_MainK)) as VcaTWR
Resident
MAINTWR_H;
CulcTWRK2U:
LOAD
TWRResKey,
sqrt(1/12*(sqrt(sqrt(3)*VabTWR-sqrt(4*sqrt(VbcTWR)-sqrt((sqrt(VbcTWR)-sqrt(VcaTWR))/VabTWR+VabTWR)))+(sqrt(VbcTWR)-sqrt(VcaTWR))/VabTWR))
sqrt(1/12*(sqrt(sqrt(3)*VabTWR+sqrt(4*sqrt(VbcTWR)-sqrt((sqrt(VbcTWR)-sqrt(VcaTWR))/VabTWR+VabTWR)))+sqrt((sqrt(VbcTWR)-sqrt(VcaTWR))/VabTWR))*100
as k2twr
Resident PH_PHTWR;
For Each vLineName in 'LA', 'LB', 'LC'
LineInf:
Load
'$(vLineName)' as LineKey,
time

```

```

,Ec_0 as E0
,Ec_102 as E270
,[i0] as I0
,[i102] as I270
FROM
[.\modFFPCurrLine.xlsx]
(ooxml, embedded labels, table is $(vLineName));
Next vLineName
PowerCulc:
LOAD
LineKey,
sqrt(sum(E0*E0)/$(N)) as UrmsE0
,sqrt(sum(E270*E270)/$(N)) as UrmsE0270
,sqrt(sum(I0*I0)/$(N)) as IrmsE0
,sqrt(sum(I270*I270)/$(N)) as IrmsE270,sqrt(sum(E0*E0)/$(N))
* sqrt(sum(I0*I0)/$(N)) as Srms0
,sqrt(sum(E270*E270)/$(N)) * sqrt(sum(I270*I270)/$(N)) as
Srms270,avg(E0*I0)as P0
,avg(E270*I270)as P270,acos(Avg(E0*I0) / (Sqrt(Sum(E0*E0)/$(N))*Sqrt(Sum(I0*I0)/ $(N))))*180/pi() as phi0
,acos(Avg(E270*I270) / (Sqrt(Sum(E270*E270)/$(N))*Sqrt(Sum(I270*I270)/ $(N))))*180/pi() as phi270
Resident LineInf Group by LineKey;
tablLoco:
LOAD time,
Loco1,
Loco2,
Locoi1,
Locoi2,
FROM
[.\modFFP.xlsx]
(ooxml, embedded labels, table is Loco);
CulclPowerLoco:
LOAD
sqrt(sum(Loco1*Locoi1)/$(N)) *
sqrt(sum(Locoi1*Locoi1)/$(N)) as Sloco1
,sqrt(sum(Loco2*Locoi2)/$(N)) *
sqrt(sum(Locoi2*Locoi2)/$(N)) as Sloco2
,avg(Loco1*Locoi1)as Ploco1
,avg(Loco2*Locoi2)as Ploco2
,acos(Avg(Loco1*Locoi1) / (Sqrt(Sum(Loco1*Locoi1)/$(N))*Sqrt(Sum(Locoi1*Locoi1)/ $(N))))*180/pi() as philoco1
,acos(Avg(Loco2*Locoi2) / (Sqrt(Sum(Loco2*Locoi2)/$(N))*Sqrt(Sum(Locoi2*Locoi2)/ $(N))))*180/pi() as philoco2
Resident tablLoco;
PowerRes:
load
(Ploco1+Ploco2) as ActivLOCO
,(Sloco1+Sloco2+)as PowerLOCO
,sqrt(sqrt(Sloco1+Sloco2)- sqrt(Ploco1+Ploco2+Ploco3+Ploco4))
as ReactivLOCO
Resident CulclPowerLoco;
Join (PowerRes)
LOAD
(sum(Sa)+sum(Sb)+sum(Srail)) as PowerTWR
,(sum(Pa)+sum(Pb)+sum(Prail)) as ActiveTWR
, sqrt(sqrt(sum(Sa)+sum(Sb)+sum(Srail))-sqrt(sum(Pa)+sum(Pb)+sum(Prail))) as ReactiveTWR
Resident PowerQualityTWR;
Join (PowerRes)
LOAD
sum(Srms0)+sum(Srms270) as PowerSource
,sum(P0)+sum(P270) as ActiveSource
, sqrt(sqrt(sum(Srms0)+sum(Srms270))-sqrt(sum(P0)+sum(P270))) as ReactiveSource
Resident PowerCulc;

```

ДОДАТОК Д

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ:

В.о. начальника служби
електропостачання регіональної філії
«Одеська залізниця»
АТ «Укрзалізниця»



О.О. Лісовський
2020 р.

АКТ

впровадження результатів дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора філософії за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)
аспіранта **Земського Дениса Романовича**
на тему «**Підвищення ефективності передачі електроенергії для нетягових
споживачів електрифікованих залізниць змінного струму**»

Цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційного дослідження
Земського Д. Р., що присвячені підвищенню ефективності передачі
електроенергії лініями «два проводу-рейка» (ДПР) прийняті до використання
службою електропостачання Регіональної філії Одеська залізниця АТ
«Укрзалізниця».

Виконані дослідження присвячені актуальній проблемі експлуатації
мережі ліній ДПР для нетягового електропостачання, яка полягає у низькій
якості електроенергії та обмеженій їх пропускній здатності на окремих
ділянках.

З практичної точки зору найбільшої уваги в дисертації заслуговують
наступні результати:

1. Аналіз стану якості електроенергії у режимах одностороннього та
двостороннього живлення споживача, що живиться від лінії ДПР на ділянці
Чубівка – Слобідка Одеської залізниці.

2. Запропонований метод забезпечення двостороннього живлення мережі
ліній ДПР від шин 27,5 кВ тягових підстанцій залізниць змінного струму з
використанням фазоповоротного пристрою.

В якості обмеження до застосування запропонованого в дисертації методу
забезпечення двостороннього живлення слід вказати на те, що його
використання можливе лише на ділянках де відсутні умови для виникнення
вирівнювальних струмів між суміжними тяговими підстанціями.

Загалом представлені в дисертації результати можуть бути використані з метою підвищення якості надання послуг із розподілу електроенергії та зменшення технологічних втрат електроенергії у мережах нетягового електропостачання 27,5 кВ.

Заступник начальника
Служби електропостачання



Ю.М. Масник

Головний інженер
Служби електропостачання



Ю. В. Теплюк