

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

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**ГУБСЬКИЙ ПЕТРО ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

**УДК 621.331. 621.316**

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ  
ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ  
ШВИДКІСНОМУ РУСІ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Галузь знань: 27 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ П. В. Губський

Науковий керівник: Кузнецов Валерій Геннадійович, доктор технічних наук,  
професор

Дніпро – 2019

## АНОТАЦІЯ

*Губський П. В.* Підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання постійного струму при швидкісному русі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 «Електротранспорт» (27 – Транспорт). – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання – підвищенню енергетичної ефективності систем тягового електропостачання постійного струму шляхом розробки наукових принципів побудови систем розподіленого живлення, які максимально вписуються в існуючу інфраструктуру для забезпечення швидкісного руху поїздів, що має істотне значення для електричного транспорту.

У роботі на основі експериментальних досліджень режимів напруги та потужності в системі тягового електропостачання постійного струму встановлено, що класичні системи централізованого живлення не дозволяють повною мірою забезпечити необхідні умови для впровадження швидкісного руху на існуючих лініях. Рівні напруги як на шинах тягового навантаження, так і в тяговій мережі мають значний діапазон коливань. За наявності значного резерву встановленої агрегатної потужності на тягових підстанціях України відсутні засоби регулювання режимів напруги в тяговій мережі. Існуючі закордонні та українські розробки з підвищення енергетичної ефективності систем тягового електропостачання постійного струму потребують значних капітальних витрат і не враховують особливостей організації швидкісного руху. Тому необхідна розробка енергоощадної технології розподіленого живлення з максимальним використанням існуючої інфраструктури й урахуванням особливостей навантаження від швидкісного руху поїздів.

Вперше розроблена концепція побудови енергоефективних систем розподіленого живлення. Зокрема, запропоновано здійснювати перехід від системи централізованого живлення до розподіленої системи зі збереженням існуючої інфраструктури живлення тягової мережі: розташування тягових підстанцій на місці існуючих, а одноагрегатних підстанцій – на постах секціонування. При цьому набув подальшого розвитку метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання на базі функцій опору в частині розрахунку потужності тягових підстанцій, необхідної для забезпечення режиму сталого споживання потужності при русі електрорухомого складу із заданим рівнем втрат напруги. Встановлено доцільність застосування двох перетворювальних агрегатів загальною потужністю 10 МВт, а для одноагрегатної підстанції – 5 МВт.

Створено математичну модель зміни струму й напруги в тяговій мережі з використанням нелінійного рекурентного аналізу, що дозволяє оцінити якість процесів електроспоживання та області стійкої роботи системи тягового електропостачання. Структура моделі дозволяє виявити високочастотні складові процесу. Набув подальшого розвитку метод забезпечення стійкості роботи систем тягового електропостачання постійного струму в частині використання нелінійного регулятора напруги. Доведено, що регулятор з нелінійним законом управління має кращу робастність, а зона стабілізації напруги в тяговій мережі в разі застосування нелінійного регулятора в 3-4 рази ширша, порівняно з використанням лінійного регулятора.

На основі сенсорного методу та методу Френеля запропоновано принципи побудови системи розподіленого вимірювання напруги в тяговій мережі, яка необхідна для ефективного функціонування інтелектуальної системи розподіленого живлення.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропонована система, порівняно з централізованою, має менші втрати електроенергії (на 4,3%), більші коефіцієнти завантаження трансформаторів

(50-60%), чутливості релейного захисту (15-20%). Окрім того, система дозволяє забезпечити необхідний рівень питомої потужності в тяговій мережі в межах 2,00–2,15 МВт/км, що дало змогу обмежити мінімальне значення напруги на струмоприймачі електрорухомого складу на рівні 2 900 В.

Техніко-економічні розрахунки показали, що запропонована енергоефективна система електропостачання тяги поїздів постійного струму з розподіленим живленням, яка максимально вписується в існуючу інфраструктуру, дозволяє ефективно використовувати капітальні вкладення та має мінімальні річні експлуатаційні витрати. Реалізація системи розподіленого живлення дозволяє щорічно економити на дослідній ділянці 2,879 млн грн за рахунок зменшення вартості втрат електричної енергії в системі електропостачання.

Основні результати дослідження були використані в держбюджетних науково-дослідних роботах «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту» (№ ДР 0115U002311) та «Енергоефективна технологія розподіленої передачі електроенергії транспортним засобам» (№ ДР 0118U006261).

Розроблена концепція підвищення енергетичної ефективності систем тягового електропостачання постійного струму за рахунок переходу до систем розподіленого живлення взяті до використання в компанії «ДАК-Енергетика», службі електропостачання регіональної філії «Львівська залізниця», проектно-вишукувальному інституті «Дніпрогіпротранс». Результати роботи впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та використовуються при підготовці бакалаврів і магістрів зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Ключові слова:** режим напруги та потужності, система тягового електропостачання, постійний струм, розподілене живлення, втрати потужності, стійкість.

## ABSTRACT

*Hubskeyi P.V.* Increasing of the DC traction power supply system efficiency at high-speed traffic. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.22.09 – electric transport (27 – transport). – Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2019 .

The thesis is devoted to the solving of the actual scientific and applied task of increasing the energy efficiency of DC power traction systems by developing scientific principles for the construction of distributed power systems that fit into the existing infrastructure to provide high-speed traffic, which is essential for electric transport.

In work on the basis of experimental research of voltage and power modes in the system of DC traction power supply was proved that classical systems of centralized power supply do not allow to provide the necessary conditions for the introduction of high-speed traffic on existing lines. Voltage values both on the buses of the traction load, and in the traction lines, have a significant range of oscillations. If there is a significant reserve of installed aggregate power at traction substations in Ukraine, there are no means of voltage modes regulation in the traction lines. Existing foreign and Ukrainian developments the energy efficiency increasing for DC traction power supply systems require significant capital investments and do not take into account the peculiarities of the organization of high-speed traffic. Therefore, it is necessary to develop energy-saving technology of distributed power with the maximum use of existing infrastructure, taking into account the features of the load of high-speed trains.

For the first time were developed the scientific principles of energy-efficient systems of distributed traction. Firstly, it was proposed to make a shift from the centralized power supply system to the distributed one, with the preservation of the existing supply infrastructure of the traction network - the location of traction substations in place of existing, and one unit substations on the sectioning points.

Secondly, was developed method of calculating of the instantaneous traction power supply schemes on the basis of the resistance functions by calculating of the traction substation's power necessary to provide a mode of steady-state consumption during movement of the electric rolling stock with a given level of voltage losses. Also was proposed to use two rectifier units with a total capacity of 10 MW and 5 MW for one aggregate substation.

Furthermore, was developed the mathematical model for simulation of the current and voltage in the traction network using nonlinear recurrent analysis, which allows to estimate the quality of the processes of electric power consumption and the area of sustainable operation of the traction power supply system. The structure of the model allows to identify the hidden components of the process. Also, was developed the method of ensuring the stability of the DC traction power supply system in the part of using a nonlinear voltage regulator. The author proved that regulator with nonlinear control laws has the best robustness and the area of voltage stability in the power network providing application of non-linear regulator is 3-4 times wider comparing with linear regulator.

Based on the sensory and Frenel methods were proposed the principles of construction of a distributed voltage measurement system in the traction network that is necessary for the efficient functioning of the intelligent distributed supply system.

The practical significance of the obtained results is the fact that the proposed system has, in comparison with the centralized system, lesser energy losses, a higher power factor, higher load factors for transformers, and higher coefficients of sensitivity for relay protection. In addition, the system allows to provide the required level of specific power in the traction network within the limits of 2,00–2,15 MW/km, which allows to limit the minimum value of the voltage on the current collector of the rolling stock at a level of 2900 V.

The feasibility study shows that the proposed energy-efficient power supply system for the DC traction with distributed power supply, which as much as possible fits into the existing infrastructure, allows effective use of the capital investments and

has a minimum annual operating costs. Implementation of the distributed power system allows to save annually on the test area 2,879 million UAH by reducing the cost of electricity losses in the power supply system.

The main results of the research were used in state budget funded research works "Scientific bases of efficient use of regeneration energy in the system of electric transport" (№ DR 0115U002311) and "Energy-efficient technology of distributed transmission of electric power to vehicles" (№ DR 0118U006261) .

Developed scientific principles of increasing of the energy efficiency of DC traction power supply system by transition to a distributed power systems approved for use in the company DAK-Energo, Power Supply Department in the Regional Branch "Lvivskaya Railway". The results of the work are implemented in the educational process of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan and are used in the preparation of bachelors and masters in the specialty "Power engineering, electrical engineering and electromechanics".

**Keywords:** voltage and power modes, traction power supply system, DC, distributed power, power losses, stability.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### У виданнях, що індексуються в Scopus:

1. V. Sychenko, V. Kuznetsov, Ye. Kosarev, P. Hubskeyi, V. Belozyorov, M. Pulin, V. Zaytsev, «Development of an approach to ensure stability of the traction direct current system», *Easten-European journal of enterprise technologies*, vol. 95, pp. 47-56, 2018.

### У закордонних виданнях:

2. Hubskeyi P. V. «Reserves for improving the energy efficiency of traction power systems», *Problemy Kolejnictwa*, iss. 178, pp. 7-11, 2018.

### У фахових виданнях:

3. В. Г. Кузнецов, О. И. Саблин, П. В. Губский, Е. Г. Колыхаев, «Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена», *Гірнична електромеханіка та автоматика. наук.-техн. збірник*, № 95, с. 81-89, 2015.
4. В. Г. Сиченко, Є. М. Косарєв, П. В. Губський, В. В. Замаруєв, В. В. Івахно, Б. О. Стисло, «Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму», *Електрифікація транспорту*, №11, с. 61-70, 2016.
5. О. І. Саблін, Д. О. Босий, В. Г. Кузнецов, М. О. Баб'як, Є. М. Косарєв, П. В. Губський, «Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2(125), с. 73-79, 2016.
6. В. Г. Сиченко, Є. М. Косарєв, П. В. Губський, А. В. Рогоза, «Оцінка додаткових втрат потужності у системах електропостачання швидкісного руху», *Електрифікація транспорту*, №12, с. 59-63, 2016.
7. В. Г. Сиченко, Є. М. Косарєв, О. А. Данилов, П. В. Губський, В. А. Зубенко, М. М. Пулін, «Особливості функціонування релейного захисту в



- розподілених системах тягового електропостачання», *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*, № 9 (1285), с. 70-75, 2018.
8. P.Hubskiy, V. Kuznetsov, A. Drubetskiy, A. Afanasov, M. Pulin, «Studying of the power modes in the traction line for ensuring the high-speed traffic», *Technology audit and production reserves*, 1 (43), pp. 42-51, 2018.
9. П. В. Губський, «Енергетичні канали живлення розподілених систем тягового електропостачання», *Електрифікація транспорту*, №15, с. 23-30, 2018.

#### **Додаткові праці:**

#### **Тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій:**

10. Саблін, О. І., Кузнецов, В. Г., Губський, П. В., «Експериментальне дослідження ефективності застосування рекуперації електроенергії в умовах Дніпропетровського метрополітену», на *75 Міжнар. науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*, Дніпропетровськ, 2015, с.122-123.
11. Губський П. В., «Методи підвищення енергетичної ефективності систем тягового електропостачання», на *VI Міжнар. науково-практ. конф. «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості»* Воловець, 2015, с. 46-47.
12. Губський П. В., Бусурулов А. І., «Удосконалення керування потужністю в тяговій мережі постійного струму при швидкісному русі», на *Міжнар. науково-практ. конф. «ТРАНСЕЛЕКТРО-2015»*, 2015, с. 25-26.
13. Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г., Губський П. В., «Оптимізація керування потужністю в тяговій мережі постійного струму при швидкісному русі», на *Міжнар. науково-практ. конф. «Оптимальне керування електроустановками – 2015»*, Вінниця, 2015, с. 50.
14. Sychenko Victor, Kuznetsov Valeriy, Hubskiy Petro, «Power control in the traction DC current lines for high-speed movement», на *IV Międzynarodowa*

*Konferencja „NAJNOWSZE TECHNOLOGIE W TRANSPORCIE SZYNOWYM”*, Warszawa, 2015, pp. 127

15. Кузнецов В. Г., Саблін О. І., Губський П. В., «Вплив режимів системи зовнішнього електропостачання на ефективність рекуперації електроенергії поїздів» на *Міжнар. науково-практ. конф «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті»*, Розлуч, 2016, с. 40-41.
16. Кузнецов В. Г., Саблін О. І., Губський П. В., Колыхаев Е. Г., «Модели элементов системы электротранспорта в задачах оптимизации режимов», на *Міжнар. науково-практ. конф «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті»*, Розлуч, 2016, с. 41-42.
17. Фесик М. О., Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г., Губський П. В., «Сучасна методологія керування потужністю тягової мережі постійного струму для швидкісного руху», на *Міжнар. науково-практ. конф «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті»*, Розлуч, 2016, с. 81-82.
18. Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г., Кордін О. П., Косарев Є. М., Губський П. В., «Підвищення енергетичної ефективності керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму», на *I Міжнар. науково-практ. конф «Енергооптимальні технології перевізного процесу»*, Моршин, 2016, с. 123
19. Kuznetsov V. G., Sychenko V. G., Bialon A., Hubskeyi P., «Energy efficient distributed technology of power transmission to vehicles», на *II Міжнар. науково-практ. конф «Енергооптимальні технології перевізного процесу»* Дніпропетровськ, 2018, с. 127-128.
20. Hubskeyi Petro, «Reserves for improving the energy efficiency of traction power systems», на *VI Miedzynarodowa Konferencja «Najowsze Technologie W Transporcie Szynowym»*, Warszawa, 2017, p. 43.
21. Belozyorov V., Hubskeyi P. V., Pulin M. M., Sychenko V. G., Zaytsev V. G., Kuznetsov V. G., «The model for studying of the dynamic processes in DC

traction lines», на Міжнар. науково-практ. конф «Енергооптимальні технології, логістика та безпека на транспорті». Львів, 2018, с. 17-19.

## Зміст

<b>Зміст .....</b>	<b>12</b>
<b>Вступ .....</b>	<b>17</b>
<b>Розділ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>	<b>26</b>
1.1. Аналіз показників функціонування системи електропостачання постійного струму .....	26
1.2. Показники ефективності системи електропостачання постійного струму .....	29
1.3. Існуючі заходи підвищення енергетичної ефективності в системі тягового електропостачання постійного струму .....	35
1.4. Дослідження режимів потужності в системі тягового електропостачання постійного струму .....	39
1.5. Вимоги до режимів потужності в системі тягового електропостачання постійного струму для швидкісного руху .....	45
Висновки до розділу .....	53
<b>Розділ 2. НАУКОВІ СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ РОЗРОБКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛЕНОГО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ШВИДКІСНОГО РУХУ .....</b>	<b>55</b>
2.1. Задачі синтезу оптимальної системи тягового електропостачання .....	55
2.2. Аналіз існуючих схемотехнічних рішень пунктів живлення в системах розподіленого типу .....	58
2.3. Енергетичні канали розподіленої системи тягового електропостачання .....	67
2.4. Синтез системи тягового електропостачання розподіленого типу підвищеної ефективності .....	77
Висновки до розділу 2 .....	85

**Розділ 3. ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
ПРОПОНОВАНОЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ..... 87**

3.1. Режими напруги та потужності.....	87
3.2. Аналіз енергетичних показників у пропонуваній системі .....	98
3.2.1. Коефіцієнт завантаження тягових підстанцій.....	98
3.2.2. Навантажувальна здатність проводів контактної мережі.....	99
3.2.3. Дослідження втрат електроенергії в системі розподіленого живлення .....	100
3.2.4. Втрати потужності від вищих гармонік.....	103
3.3. Оцінка стійкості функціонування пропонуваної системи .....	109
Висновки до розділу 3 .....	125

**Розділ 4. СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ТА РЕЖИМИ  
РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ... 127**

4.1. Система вимірювань та контролю рівнів напруги для розподіленої системи тягового електропостачання .....	127
4.2. Застосування активного перетворювача .....	135
4.3. Особливості функціонування системи розподіленого живлення у вимушеному режимі .....	142
4.4. Особливості функціонування релейного захисту розподіленої тягової мережі .....	146
4.5. Дослідження процесів рекуперації в розподіленій системі .....	148
Висновки до розділу 4.....	151

**Розділ 5. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛЕНОГО ЖИВЛЕННЯ  
ПІДВИЩЕНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ..... 153**

Висновки до розділу 5.....	159
<b>Висновки.....</b>	<b>160</b>
<b>Список використаних джерел .....</b>	<b>163</b>

<b>Додаток А.....</b>	<b>181</b>
<b>Додаток Б.....</b>	<b>191</b>
<b>Додаток В. Однолінійна схема одноагрегатної тягової підстанції....</b>	<b>204</b>
<b>Додаток Г .....</b>	<b>205</b>

**Перелік умовних скорочень**

АВН – активний випрямляч напруги

БП – базовий перетворювач

БРЖ – блок розподіленого живлення

ВВП – внутрішній валовий продукт

ВДМ – верхня довірча межа

ВДП – вольтододатковий пристрій

ВСМ (ВШМ) – високошвидкісна магістраль

ВПС – вставка постійного струму

ВРП – внутрішній регіональний продукт

ГДЗ – гранично-допустиме значення

ГТПП – головна тягова перетворювальна підстанція

ЕЕ – електроенергія

ЕК – енергетичні канали

ІСЕ – інтелектуальні системи електропостачання

ЕРС – електрорухомий склад

ЛЕП – лінія електропередачі

КМ – контактна мережа

МОС – меандр обмеженого спектра

МПЗ – міжпідстанційна зона

НДМ – нижня довірча межа

ОАТП – одноагрегатна тягова підстанція

ПА – перетворювальний агрегат

ПЛПЧ – проміжна ланка підвищеної частоти

ПЛ – поздовжня лінія

ПП – підсилювальний пункт

ПЕР – паливно-енергетичні ресурси

РЖ – розподілене живлення

РМ – рейкова мережа

СРЖ – система розподіленого живлення

СЦЖ – система централізованого живлення

СЗЕ – система зовнішнього електропостачання

СТЕ – система тягового електропостачання

СОТ – Світова організація торгівлі

ТП – тягова підстанція

ТМ – тягова мережа

ЦЖ – централізоване живлення



## Вступ

**Актуальність теми.** Зараз у світі та в Україні скорочуються запаси паливно-енергетичних ресурсів. Недостатня кількість органічного пального та постійно зростаючі тарифи на нього спонукають до збільшення енергетичної ефективності на етапах генерації, передачі та споживання палива в усіх галузях.

Однією з базових умов для сталого багатства та процвітання країн Європи та України зокрема є ефективний транспорт. Він є основою зайнятості, економічного зростання й світового експорту, надає громадянам, суспільству й економіці необхідні ресурси й засоби забезпечення мобільності, у той час як технологічний прогрес у галузі транспорту стимулює й прискорює процес здобуття знань, інновацій та європейської інтеграції. Усе це визначає розвиток транспорту як важливий напрямок стратегії Європейського Союзу з формування найбільшої економіки у світі, що спирається на знання.

Але водночас зростаючий попит на мобільність є серйозною проблемою. Підвищення розмірів руху ставить низку завдань із убезпечення життя й здоров'я людей. Транспортна діяльність позначається також на екологічному стані довкілля: викиди CO<sub>2</sub> негативно впливають на зміну клімату. Проблема транспорту вимагає радикальних рішень, у яких важливу роль будуть відігравати наукові дослідження. Недавнє розширення ЄС підвищило загальну чисельність його населення на 27 %, у той час як територія збільшилася на 34 %. Населення та виробники товарів повинні мати доступ до транспортних послуг, щоб забезпечити економічний розвиток і вільне переміщення ресурсів. Конкурентні переваги нашої транспортної галузі повинні бути забезпечені й посилені. Окрім того, транспорт є важливим чинником у багатьох міжнародних угодах і стратегіях у ключових галузях, включаючи торгівлю, конкуренцію, зайнятість, безпеку, а також Паризької Угоди та інших угод т. д.

Залізничний транспорт повинен постійно знаходити резерви для зниження вартості процесу транспортування, щоб конкурувати з іншими транспортними

засобами. Підтримка екологічно чистих, енергозберігаючих технологій у сфері залізничного транспорту – це, з одного боку, європейська тенденція, а з іншого – вектор розвитку економіки України.

Незважаючи на те що залізничний транспорт на сьогодні має більшу енергетичну ефективність порівняно з іншими видами транспорту, здебільшого завдяки зниженому опору руху й керованому графіку, для того щоб залишитися конкурентоспроможними в економічному плані з мінімальним негативним впливом на навколишнє середовище, залізниці надалі повинні підвищувати цей показник. Виділяють три основні причини, які спонукали залізничний сектор запроваджувати енергоощадні технології:

1. Зростання цін на енергоносії. Європейські залізничні мережі щорічно витрачають мільярди євро на енергоносії, і витрати на електроенергію значно збільшилися за останні кілька років (більше ніж 10 % на рік).

2. Енергетична безпека й незалежність. Енергетична безпека стає все важливішою. Усе більше й більше країн хочуть бути незалежними від закордонних постачальників енергетичних ресурсів. Особливо це питання актуальне для України. У цьому сенсі підвищення енергетичної ефективності залізниць зміцнює енергетичну безпеку й незалежність держави.

3. Захист від зміну клімату. Протидія зміні клімату стала одним із стратегічних завдань для залізниць у Європейському Союзі. Для залізничних споживачів неможливо одночасно перейти на поновлювані джерела енергії. Тому підвищення енергетичної ефективності є надзвичайно важливим для зменшення викидів CO<sub>2</sub>.

Підвищення ефективності передачі електричної енергії в системах тягового електропостачання є важливою ланкою в загальній проблемі збільшення енергетичної ефективності залізничного транспорту. На сьогодні системи тягового електропостачання еволюціонують у напрямку інтелектуалізації та створення Smart-grid систем.

Електрифікація залізниць у Радянському Союзі відбулася в другій половині 20-го століття. Силове обладнання було розраховане на тогочасні розміри руху. Зараз реалії, на жаль, змінилися і обладнання систем тягового електропостачання працює не в раціональних режимах. Окрім того, основне силове обладнання систем тягового електропостачання постійного струму залізниць перебуває на етапі інтенсивного зносу. З іншого боку, зростають навантаження на систему тягового електропостачання постійного струму, що викликані впровадженням швидкісного руху.

На сьогодні одним з найперспективніших засобів підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання постійного струму є застосування систем розподіленого живлення (СРЖ). Підвищення ефективності в цих системах досягається за рахунок зменшення перерізу дротів контактної мережі, зменшення втрат енергії, підтримки необхідного рівня напруги в контактній мережі й збільшення коефіцієнта використання потужності основного енергетичного устаткування при зниженні його встановленої потужності. Існуючі дослідження з впровадження систем розподіленого живлення для потреб тяги поїздів не враховували особливості живлення швидкісних поїздів, орієнтувалися на заходи, що потребують значних капітальних вкладень. На нашу думку, у сучасних умовах на залізницях України потрібно впроваджувати такі енергоощадні заходи, які не потребують значних інвестицій і вписуються в існуючу інфраструктуру тягового електропостачання. Тому тема роботи, яка пов'язана з підвищенням енергетичної ефективності систем тягового електропостачання постійного струму при організації швидкісного руху, є актуальною.

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

1. Стратегії сталого розвитку "Україна - 2020", схваленої указом Президента України від 12 січня 2015 року № 5/2015, – у частині зниження

енергоємності валового внутрішнього продукту (на 20 відсотків до кінця 2020 року), переходу до використання енергоефективних технологій та обладнання.

2. Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р, – у частині впровадження системи енергетичного менеджменту, зниження втрат енергії під час її передачі та розподілу; зниження енергоємності ВВП; забезпечення енергетичної незалежності України.

3. Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, схваленої Постановою Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. N 1390 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 1106 від 26.10.2011, № 1146 від 09.11.2011, № 970 від 24.10.2012), – у частині зменшення обсягу питомих витрат енергоресурсів на тягу поїздів.

Ці дослідження безпосередньо пов’язані з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за такими науково-дослідними темами:

- «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту» (№ ДР 0115U002311),
- «Енергоефективна технологія розподіленої передачі електроенергії транспортним засобам» (№ ДР 0118U006261).

Результати дисертаційної роботи отримано внаслідок виконання вказаних досліджень, у яких дисертант був виконавцем і співавтором звітів з науково-дослідних робіт.

#### **Мета й завдання дослідження**

Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання постійного струму шляхом перерозподілу потужності в системі розподіленого живлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

1. Виконати експериментальне дослідження режимів напруги та потужності в системі тягового електропостачання постійного струму.
2. Розробити концепцію побудови енергоефективної системи розподіленого живлення для забезпечення швидкісного руху.
3. Здійснити оцінку енергетичних процесів та енергетичної ефективності в пропонованій системі розподіленого живлення. Оцінити стійкість (за напругою) роботи запропонованої розподіленої системи.
4. Обґрунтувати раціональні місця розташування датчиків у системі розподіленого вимірювання напруги.
5. Виконати техніко-економічне порівняння класичної централізованої системи живлення з пропонованою енергоефективною системою розподіленого живлення.

**Об’єкт дослідження** – процес передачі та розподілу електричної енергії в системах тягового електропостачання постійного струму.

**Предмет дослідження** – системи тягового електропостачання постійного струму при організації швидкісного руху.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі використано: статистичний аналіз – для дослідження режимів напруги та потужності в системі тягового електропостачання постійного струму в режимах тяги та рекуперації; метод імітаційного моделювання – при розробці наукових принципів побудови енергоефективної системи розподіленого живлення для організації швидкісного руху та при моделюванні активного перетворювача; рекурентний аналіз часових рядів – для аналізу стійкості системи тягового електропостачання; методи сенсорних вузлів та Френеля – для визначення місць розташування датчиків у розподіленій системі вимірювань напруги.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше розроблено концепцію побудови енергоефективних систем розподіленого живлення з установленням одноагрегатної підстанції на місці

поста секціонування, на основі чого забезпечуються: організація швидкісного руху, ефективніше використання встановленої потужності.

2. Вперше на основі нелінійного рекурентного аналізу створено модель процесу зміни струму й напруги в тяговій мережі, яка дозволяє виявити приховані складові процесу, оцінити якість процесів електроспоживання та області стійкої роботи системи тягового електропостачання.

3. Набув подальшого розвитку метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання на базі функцій опору в частині розрахунку раціональних відстаней між підстанціями, необхідних для забезпечення режиму сталого споживання потужності під час руху електрорухомого складу із заданим рівнем втрат напруги, що дозволяє забезпечити енергоефективні режими систем тягового електропостачання.

4. Набув подальшого розвитку метод забезпечення стійкості роботи систем тягового електропостачання постійного струму в частині використання нелінійного закону управління, що дає змогу формалізувати умови забезпечення регулятивної спроможності цієї системи.

### **Практичне значення одержаних результатів**

1. Запропонована концепція побудови розподілених систем живлення дозволяють здійснювати перехід від системи централізованого живлення до розподіленої системи зі збереженням існуючої інфраструктури живлення тягової мережі, що дає змогу підвищити енергетичну ефективність передачі електроенергії на тягу поїздів без значних капітальних вкладень.

2. Впровадження системи розподіленого живлення дозволяє забезпечити необхідний рівень потужності в тяговій мережі в межах 2,00 – 2,15 МВт/км, що дає змогу обмежити мінімальне значення напруги на струмоприймачі електрорухомого складу на рівні 2 900 В, зменшити: навантаження на проводи контактної мережі, неактивну потужність та втрати потужності в тяговій мережі, витрати електроенергії на 4-5 % від спожитої електроенергії на тягу поїздів за

умови дотримання нормативних значень напруги та питомої потужності в тяговій мережі.

3. Запропоновані принципи регулювання напруги в розподіленій системі живлення на базі нелінійного регулятора дозволяють застосовувати закони управління з кращою робастністю, що забезпечує необхідний рівень напруги в контактній мережі в усіх режимах при організації швидкісного руху.

4. Використання сенсорного методу та методу Френеля дозволяє обрати відстані між датчиками напруги, радіус покриття антен для забезпечення резервування передачі інформації й стабільної роботи систем розподіленого живлення.

5. Запропоновані нелінійні закони управління активним випрямлячем напруги дозволяють компенсувати просадку вхідної напруги в межах  $\pm 20\%$  та забезпечити стійкість до різного роду збурень в умовах взаємодії системи тягового електропостачання та електрорухомого складу.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджені в ТОВ «ДАК-Енергетика», Регіональна Філія «Львівська залізниця», проектно-вишукувальному інституті «Дніпрогіпротранс» та в навчальний процес Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

### **Особистий внесок здобувача**

Постановка мети та завдань дослідження виконана спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, виконані в дисертаційній роботі, отримані дисертантом самостійно. У працях, які написані в співавторстві, автору належать: [1] – вибір підходів та розробка моделей для забезпечення стійкості систем електропостачання постійного струму на основі нелінійного рекурентного аналізу; [3] – розрахунок потенціалу енергозбереження за рахунок рекуперації; [4] – виконання експерименту та статистична обробка результатів; [5] – статистична обробка результатів експерименту, дослідження ефективності рекуперації; [6] – оцінка додаткових втрат потужності в розподілених системах електропостачання

постійного струму; [7] – дослідження чутливості релейного захисту в розподілених системах тягового електропостачання; [8] – дослідження режимів потужності швидкісного рухомого складу; [10] – статистична обробка результатів експерименту; [12] – принципи керування потужністю за допомогою використання інтелектуального обладнання; [13] – порівняльний аналіз режимів у централізованих та розподілених системах тягового електропостачання; [14] – дослідження ефективності керування потужністю в системах електропостачання в умовах швидкісного руху; [15] – дослідження впливу напруги на вході підстанції на енергетичні характеристики системи тягового електропостачання; [16] – розробка моделей систем тягового електропостачання; [17] – оптимізація режиму функціонування системи тягового електропостачання за заданих обсягів перевізної роботи та в умовах швидкісного руху; [18] – розрахунок енергетичної ефективності в розподілених системах живлення під час керування режимами; [19] – розробка енергооптимальної технології розподіленої передачі потужності; [21] – розробка моделі залежності струму від напруги для задач дослідження стійкості. Праці [2, 9, 11, 20] написані самостійно, без співавторів.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і були схвалені на таких вітчизняних та міжнародних конференціях: 75-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2015; VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», Воловець, 2015; Міжнародна науково-практична конференція «Транселектро–2015», Одеса; Міжнародна науково-практична конференція «Оптимальне керування електроустановками – 2015», Вінниця; IV Międzynarodowa Konferencja «Najnowsze technologie w transporcie szynowym», Warszawa, 2015; Міжнародна науково-практична конференція «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», Розлуч, 2016; I Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології перевізного



процесу», Моршин, 2016; II Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології перевізного процесу», Дніпропетровськ, 2018; VI Międzynarodowa Konferencja «Najnowsze Technologie W Transporcie Szynowym», Warszawa, 2017; Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології, логістика та безпека на транспорті», Львів, 2018.

**Публікації.** Основний зміст дисертації опублікований у 21 наукових працях і матеріалах конференцій: 9 основних праць, з них: 1 – статті у журналах, що індексуються Scopus, 1 – статті в закордонних виданнях, 7 – статей у фахових виданнях; і 12 додаткових, з них: 12 – тези доповідей та матеріали конференцій.

### **Структура й обсяг роботи**

Дисертація складається з анотації українською і англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний текст роботи викладено на 139 сторінках, містить 82 рисунки за текстом і 24 таблиці. Список використаних джерел із 162 найменувань займає 18 сторінок. Додатки займають 33 сторінки. Повний обсяг дисертації становить 209 сторінки.

## **Розділ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **1.1. Аналіз показників функціонування системи електропостачання постійного струму**

Експлуатаційна довжина електрифікованих залізниць України на 01.01.2017 р. становила 9354,8 км, з яких на однофазному змінному струмі 25 кВ 50 Гц електрифіковано 6376,99 км, на постійному струмі 3 кВ – 2977,81 км.

Сучасні тенденції розвитку суспільства ставлять високі вимоги до пристроїв тягового електропостачання, які мають забезпечувати заданий обсяг перевізної роботи протягом року, враховуючи нерівномірність руху та відмінність у вазі поїздів. У зв'язку з підвищенням цін на енергоносії з'явилася необхідність у розробці нової енергетичної політики, модернізації обладнання систем тягового електропостачання та пошуці нетрадиційних систем тягового електропостачання. Енергетична ефективність у сучасних умовах є найважливішим фактором конкурентоспроможності залізниць на внутрішньому та зовнішньому ринках транспортних послуг.

Важливим показником ефективності функціонування для господарства електрифікації та електропостачання є кількість переробленої електроенергії (ЕЕ) мережами залізниць [1], яка з кожним роком має загальну тенденцію до збільшення. Узагальнені дані про кількість переробленої електроенергії за 2007-2017 роки наведено в таблиці 1.1.

За даними таблиці 1.1 прослідковується тенденція зростання споживання електроенергії залізницями, а також сторонніми споживачами, що веде до збільшення необхідного загального обсягу надходження електроенергії. Подальше зростання потреб залізничного транспорту може спричинити дефіцит електроенергії та необхідність пошуку нових джерел енергії та її постачальників. Незаперечним фактом також є тенденція зростання вартості електричної енергії при зменшенні її витрат на тягу поїздів (рис. 1.1), що

ставить завдання пошуку нових шляхів підвищення енергоефективності тягових мереж.

Таблиця 1.1 – Переробка електроенергії мережами залізниць за 2007-2017 роки у мільйонах кіловат-годин

Рік	Загальний обсяг надходження електроенергії (з втратами)	Споживання залізниць	Передача електроенергії стороннім споживачам
2005	10211,95	5931,39	3642,2
2006	11055,5	6219,4	3824,8
2007	11362,8	6324,4	3928,6
2008	12193,0	6225,0	4921,83
2009	11549,6	5381,3	5775,3
2010	12728,5	5739,1	6561,0
2011	13868,0	6167,1	7131,46
2012	14370,9	6156,1	7663,3
2013	14572,2	5821,5	8233,8
2014	13 581, 6	5274	6895,9
2015	13109,3	4803,0	7849,5
2016	13 399,9	4 624,6	8 343,7
2017	14 463,40	4 598,4	9383,1

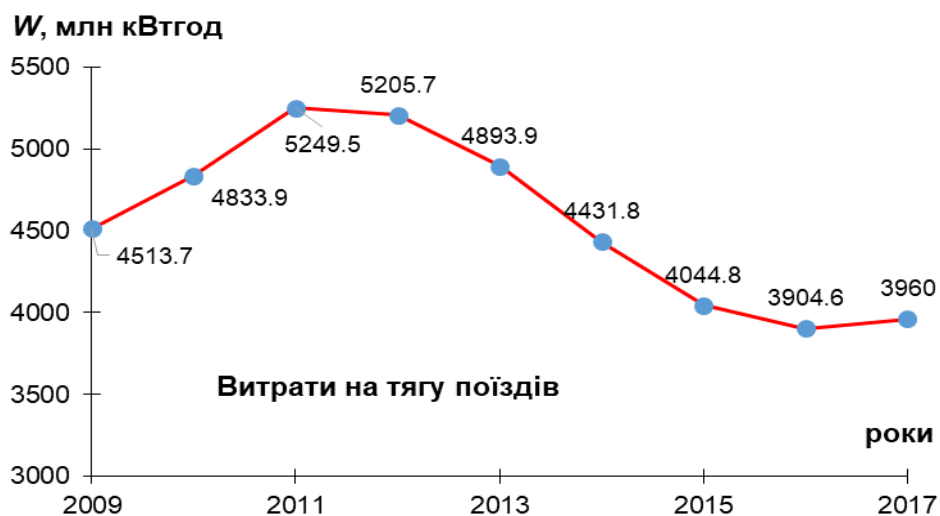


Рисунок 1.1 – Витрати енергії на тягу поїздів

Крім збільшення обсягу споживаної електроенергії за останні роки зростають і умовні втрати в тяговій мережі, які на 2017 рік становили 10,4 % і перевищували план на 0,32 %. Ми маємо констатувати стійку тенденцію зростання: так, порівняно з 2010 р., наприклад, умовні втрати в тяговій мережі постійного струму зросли на 3,5 % при зменшенні обсягів перевізної роботи.

Важливою складовою для характеристики роботи господарства електрифікації та електропостачання є виконання заходів з енергозбереження на залізничному транспорті. Незважаючи на те що «Програма енергозбереження на залізничному транспорті України по Головному управлінню електрифікації та електропостачання» кожен рік виконується повністю, не можна говорити про зростання її ефективності, порівняно з попередніми роками. Як бачимо на гістограмі (рис. 1.2), починаючи з 2007 року різко знизилась ефективність енергозбереження, і до 2017 року кількість зекономленої електроенергії та коштів коливається на одному рівні, що вказує на недостатню ефективність заходів, які прийняті в програмі енергозбереження. Це також обґрунтовує необхідність розробки нових заходів для підсилення систем електропостачання.

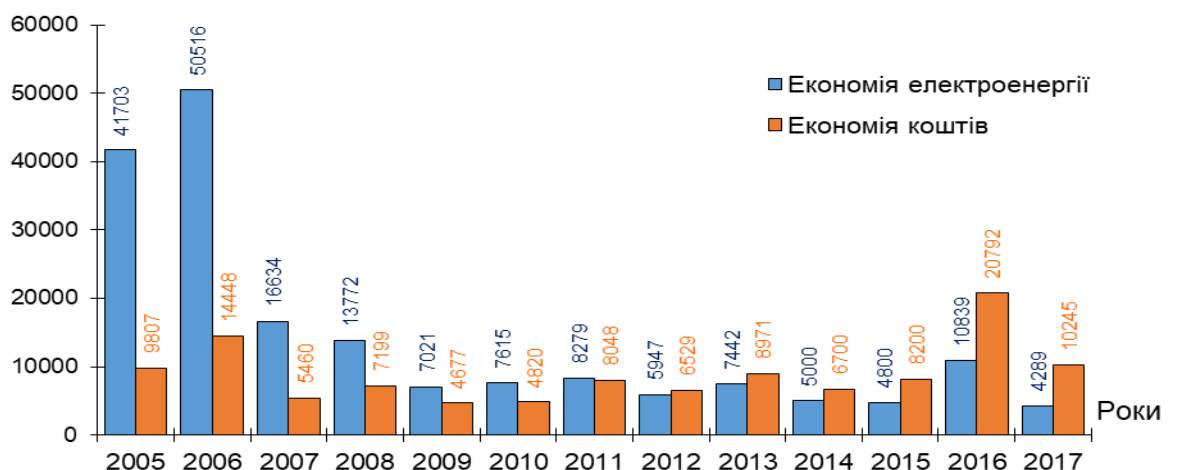


Рисунок. 1.2 – Економія електроенергії та коштів за рахунок виконання Програми енергозбереження

Сучасний стан інфраструктури тягової мережі загалом характеризується процесами старіння та зношення. Велике занепокоєння викликає суцільне

старіння контактної мережі. У період з 1998 по 2017 рік експлуатаційна довжина електрифікованих колій, які перебувають в експлуатації понад 40 років, значно збільшилась і становить 70,8 % від їх загальної довжини. З 2007 року кількість тягових підстанцій, які експлуатуються понад 40 років, є переважаючою на залізницях України й на сьогодні становить 78 %. Тому є необхідність у виконанні ремонтів основного обладнання підстанції та її суттєвій модернізації.

Виходячи з цього можна зробити висновок, що зниження енергоспоживання та підвищення енергетичної ефективності є одним з головних завдань галузі. Сьогоднішні соціально-політичні, економічні, екологічні умови потребують розробки нової енергетичної політики. Для вирішення цієї актуальної проблеми виникає необхідність у переоснащенні господарства електропостачання електрифікованих залізниць, створенні концепції оновлення й технічного розвитку тягового електропостачання, розробці концептуальних рішень щодо удосконалення систем тягового електропостачання.

Виконаний аналіз показує, що заходи, яких вживає господарство електрифікації та електропостачання для підвищення економічної ефективності, є недостатніми й вимагають пошуку нових шляхів подальшого вдосконалення функціонування системи тягового електропостачання. Розпочате впровадження швидкісного та великовагового руху на теренах України тільки посилює критичність проблеми.

## **1.2. Показники ефективності системи електропостачання постійного струму**

Під енергоефективністю розуміють оптимальне використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) за існуючих рівнів технологічного розвитку та вимог охорони навколишнього середовища. Основним показником енергоефективності є питома витрата енергії в розрахунку на одиницю

корисного продукту в усіх сферах діяльності людини (економіці, техніці, побуті). Відносно до національної та регіональної економіки таким показником є енергоемність валового внутрішнього продукту (ВВП) і валового регіонального продукту (ВРП) [2, 3].

Виконані дослідження [4] підтвердили, що існує багато підходів до поняття енергоефективності:

- енергоефективність – необхідний рівень витрат енергетичних ресурсів для досягнення певного рівня благополуччя (наприклад, економічного, соціального, стандартів життя людини, стану навколишнього природного середовища й т. ін.);

- енергоефективність – показник, обернений енергоемності;

- енергоефективність – комплексний набір показників, визначення яких залежить від системи, для якої вони визначаються, а найголовнішим є спостереження за динамікою цих показників і забезпечення їх постійного покращення за рахунок усіх економічно обґрунтованих доступних заходів (вдосконалення сучасних технологій, а також, що дуже важливо, заміни існуючих технологій використання ПЕР на принципово нові).

Вітчизняними науковцями розроблена класифікація показників енергетичної ефективності, в основу якої покладено їх поділ на такі базові класи [4]:

- Фізико-технічні, які характеризують ступінь технічної досконалості технологій споживання, транспортування та зберігання ПЕР.

- Соціально-енергетичні, які характеризують економічно та соціально обґрунтовані рівні витрат ПЕР для досягнення соціально прийнятних стандартів якості життя людини та суспільства.

- Економіко-енергетичні, які характеризують співвідношення між результатами економічної діяльності та відповідними обсягами витрат ПЕР.

Показники енергоефективності можуть бути прямі, тобто такі, які безпосередньо визначають ефективність використання ПЕР, і непрямі, у яких

ефективність використання ПЕР прямо не відображається, але значною мірою залежить від рівня та структури використання ПЕР. Система таких показників дає можливість підрахувати результати реалізації енергоефективного проекту на промисловому підприємстві [2]. Показники ефективності використання ПЕР дають змогу порівняти у просторі та часі рівень ефективності використання цих ресурсів в агрегатах, технологічних процесах, підприємствах, об'єднаннях, організаціях, за видами економічної діяльності, у галузях економіки й промисловості, регіонах і в державі, а також ефективність структури споживання енергоносіїв з погляду економічної доцільності їхнього застосування в різних технологічних процесах і агрегатах з урахуванням енергетичного ефекту та ціни на них тощо.

Вимір і оцінка енергоефективності – це необхідна частина системи управління енергоінфраструктурою підприємства, вони виконують важливі функції і є базовими елементами аналізу її ефективності [5]. Вартісні показники оцінки або вимірювання енергоефективності найбільш зручні й універсальні, але лише за умови незмінності цінової і тарифної політики. Тому в сучасних економічних умовах при визначенні системи показників енергоефективності енергоінфраструктури доцільно основний акцент робити на натуральних вимірниках. Набір показників, який входить до складу системи оцінки енергоефективності, для кожного підприємства необхідно уточнювати, звертаючи увагу на енергоємність продукції, масштаби виробництва, а також особливості технологічних процесів, що допускають застосування альтернативних енергоносіїв.

Енергетична ефективність перевізного процесу залежить від великої кількості його учасників й низки факторів, що впливають на нього. На сьогодні основний потенціал підвищення енергетичної ефективності перевізного процесу пов'язаний з двома господарствами залізничного транспорту - локомотивним і управління рухом [6]. На частку зазначених господарств припадає майже 60-70 % потенційної економії електроенергії на

електрифікованих ділянках, на господарство електропостачання – приблизно 10- 15%. У цьому контексті витрата електроенергії на тягу визначається трьома основними групами факторів, що відповідають вказаним господарствам: енергетичні показники руху поїзда, характеристики системи тягового електропостачання й умови організації руху. Необхідно взяти до уваги, що можливості підвищення енергоефективності залізничної системи далеко не вичерпані, і зараз основним напрямком заходів щодо зниження споживання енергетичних ресурсів є удосконалення конструкцій інфраструктури та рухомого складу, а також методів управління рухом. Для систем тягового електропостачання до таких напрямків належать: мінімальний рівень технологічних втрат, мінімізація небалансу (умовних втрат) і перетоків потужності [7]. Найчастіше системи тягового електропостачання експлуатуються не в номінальних режимах, а електрообладнання та мережі СТЕ виявляються недовантаженими або перевантаженими. Це призводить до збільшення частки втрат у трансформаторах та обладнанні, до зниження коефіцієнта потужності в системах електропостачання.

Підвищення ефективності функціонування СТЕ може досягатися через зниження втрат електричної енергії в системі трансформації, розподілу й перетворення (трансформатори, розподільчі мережі, електрорухомий склад, системи електричного зовнішнього та внутрішнього освітлення й т. ін.), а також через оптимізацію режимів експлуатації обладнання, що споживає цю енергію [8]. Як відомо, ефективний режим електроенергетичної системи – це такий режим (з допустимих), який задовольняє умови надійності технічних засобів, що входять у систему якості електроенергії й при якому забезпечується мінімум сумарної витрати ресурсів. Як правило, поняття ефективного функціонування електроенергетичних систем розглядається в комплексному вигляді для тривалих і короткострокових режимів роботи.



На сьогодні як основні критерії ефективності функціонування електроенергетичних систем тягового електропостачання в [9] пропонується застосовувати такі

- витрата електричної енергії;
- втрати електроенергії в елементах системи електропостачання;
- рівень напруги;
- несиметрія і несинусоїдальність напруги;
- рівень вищих гармонік.

Тут необхідно звернути увагу, згідно з державним стандартом [11], у якому встановлюються основні показники енергоефективності обладнання, наведено понад 40 найменувань цих показників. Їх можна умовно поділити на 2 групи: економічні та технологічні. При цьому до показників безпосередньої оцінки якості енергообмінних процесів в СТЕ можна віднести:

- коефіцієнт корисної дії;
- питому витрату електроенергії;
- коефіцієнт використання обладнання (коефіцієнт завантаження за потужністю);
- втрати енергії;
- номінальні потужність, напругу та струм.

Для підвищення енергоефективності необхідно зменшувати втрати енергії при її перетворенні й передачі, знижувати потужність, необхідну для виконання корисної роботи, і підвищувати коефіцієнт потужності [12]. Слід також зазначити, що з фізичного погляду підвищення енергоефективності полегшує роботу силових електричних кіл і знижує величину втрат потужності. З позиції підвищення енергоефективності експлуатації технічних систем найбільше значення має підвищення коефіцієнта потужності. Низьке ж значення коефіцієнта потужності пояснюється специфікою реалізації технічних систем - їх реалізація здійснюється при потужностях, приведених до валу електродвигуна, істотно менших їх номінальних значень. У реальних технічних

системах при зниженні навантаження на валу двигуна від номінального значення до значення холостого ходу значення коефіцієнта потужності зменшується в 3-4 рази.

Для залізниць зі швидкістю руху до 160 км/год характер електротягового навантаження підпорядковується закону нормального розподілу. Пристрої тягової мережі вибирають виходячи з максимальних значень струмових навантажень під час руху поїздів за графіком. Однак, для швидкісних залізниць і залізниць з інтенсивним рухом та підвищеною пропускнуою здатністю характер електротягового навантаження має інший вигляд. Для таких ліній характерні імпульсні навантаження, при цьому зростають пікові навантаження на тягові підстанції, збільшуються втрати напруги і енергії в пристроях тягового електропостачання, ускладнюються умови струмознімання і підвищується нагрівання проводів контактної мережі [13]. Встановлено, що питома витрата електроенергії збільшується зі зростанням швидкості внаслідок збільшення аеродинамічного опору руху, для горизонтальної ділянки при прискоренні ЕРС  $\alpha=5$  км/год/с і швидкості 250 км/год питома електроспоживання більш ніж в 3 рази перевищує цей показник на швидкості 120 км/год, що становить 50,8 Вт·год/т·км і 16,01 Вт·год/т·км відповідно.

У зв'язку вищенаведеним при оцінці ефективності функціонування СТЕ при впровадженні швидкісного руху необхідно враховувати й такі показники, як:

- коефіцієнт корисної дії;
- коефіцієнт завантаження тягових підстанцій (або, по-іншому, коефіцієнт використання наявної агрегатної потужності);
- коефіцієнт потужності.

Для порівняльного аналізу різних систем тягового електропостачання, або їх схемотехнічних рішень, доцільне також використання питомих показників, наприклад: питома електроспоживання, питома потужність і т.ін. Необхідно також проводити оцінку навантажувальної

здатності проводів контактної мережі та обладнання тягових підстанцій, постів секціонування та пунктів підсилення тягової мережі.

### **1.3. Існуючі заходи підвищення енергетичної ефективності в системі тягового електропостачання постійного струму**

Великий внесок в дослідження та розробку заходів з підвищення енергоефективності в тягових системах зробили: П. Д. Андрієнко, Б. О. Аржанніков, М. П. Бадьор, В. Д. Бардушко, С. В. Власьєвський, Л. А. Герман, Г. К. Гетьман, Ю. П. Гончаров, О. Г. Гриб, В. Т. Доманський, В. П. Закарюкін, М. О. Костін, В. Г. Кузнецов, Р. Р. Мамошин, А. М. Марикін, К. Г. Марквардт, Г. Г. Марквардт, Р. І. Мірошніченко, М. В. Панасенко, Е. С. Почаєвець, В. Г. Сиченко, О. І. Стасюк, В. Т. Черемісін, Akagi H., A. D. Graham, R. Lamedica, A. Mariscotti, A. Rojek, A. Szelag, V. Calderaro, V. Galdi, Zheng Xu та інші.

При організації швидкісного та важковагового руху на лініях постійного струму однією з найважливіших вимог до тягового електропостачання є забезпечення необхідного рівня питомої потужності тягової мережі в межах 1,5 – 2,0 МВт/км водночас з підтриманням напруги на струмоприймачі поїзда не нижче ніж 2,9 кВ. Однак виконання поставлених вимог неможливе без вдосконалення системи електричної тяги, її модернізації та реконструкції.

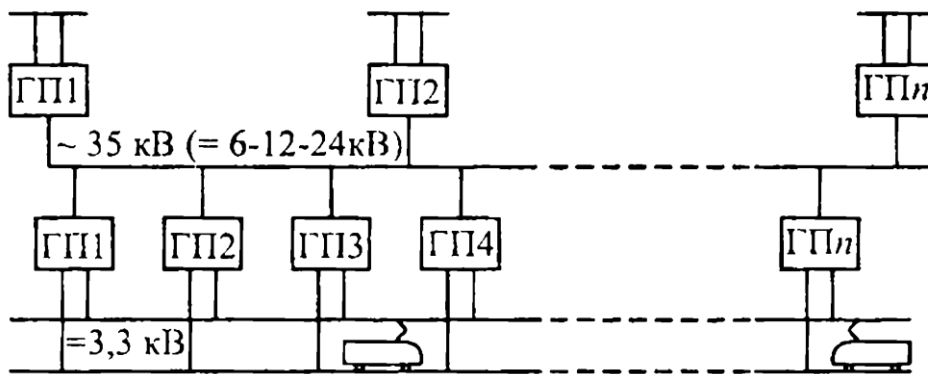
Підвищення техніко-економічних показників існуючих ділянок електричних залізниць постійного струму може бути досягнуто з впровадженням певних технічних та організаційних заходів [14-16]:

- використання пунктів паралельного з'єднання;
- збільшення перерізу проводів контактної мережі;
- будівництво додаткових тягових підстанцій;
- застосування блоків розподіленого живлення;
- повна заміна шестипульсних випрямлячів на випрямлячі з дванадцятьма пульсаціями в кривій випрямленої напруги;

- розробка і випуск випрямлячів з оптимальною шкалою номінальних потужностей;
- розширення сфери рекуперативного гальмування і експлуатаційне освоєння дванадцятипульсних випрямно-інверторних перетворювачів;
- експлуатаційне освоєння ефективних схем згладжувальних фільтрів тягових підстанцій постійного струму;
- встановлення на фідерній зоні вольтододаткових пристроїв ВДП з регулюванням напруги;
- використання перетворювальних трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням.

Основні концепції і принципи підсилення системи тяги постійного струму 3,0 кВ описані ще в 60 – 80 роках минулого сторіччя [17-21]. Сучасне підсилення СТЕ 3,0 кВ не зазнало значних структурних змін: змінювалася лише елементна база, зумовлена розвитком науки, техніки та технологій. У [22-26], виконано порівняльні розрахунки різних систем тягового електропостачання, запропоновано способи підсилення СТЕ постійного струму, побудовані на основі сучасних досягнень, повною мірою висвітлені їх переваги та недоліки, наведені результати досвіду експлуатації.

Але ефект від застосування окремих заходів різний і, як правило, є недостатнім [14]. Для підсилення тягового електропостачання конкретної лінії з метою досягнення необхідних показників питомої потужності для забезпечення руху швидкісних поїздів потрібно впроваджувати цілий комплекс заходів. Тому все частіше пропонується застосування розподілених систем живлення електрифікованих залізниць. Під розподіленою схемою живлення контактної мережі розуміють таку, за якої споживачі на найбільш завантажених зонах отримують живлення не лише від найближчих, але й від низки віддалених пунктів живлення [15]. Участь таких пунктів в живленні суміжних міжпідстанційних зон виходить тим більшою, чим менша потужність встановлених на одній підстанції тягових агрегатів (рис. 1.3).



ГП – головна підстанція, ПП – пункт живлення

Рисунок 1.3 – Структурна схема системи розподіленого живлення

Забезпечення належного режиму потужності та напруги в тяговій мережі при швидкісному русі, підвищення енергоефективності та зниження енергоємності залізничної галузі згідно з [27] можливе також за рахунок впровадження систем електричної тяги з використанням накопичувачів (ESS – energy storage system), розподілених вздовж електрифікованої ділянки та призначених для запасання енергії рекуперації й компенсації піків струму та втрат напруги при поверненні її в контактну мережу [28-32]. Актуальним варіантом підсилення системи 3,0 кВ є установка підсилювальних пунктів (ПП) на міжпідстанційній зоні, які будуть працювати за принципом децентралізованої системи. Перевагою цієї системи є потреба лише в підживленні контактної мережі, що не потребує значної агрегатної потужності та дозволяє значно знизити споживання електричної енергії із системи зовнішнього електропостачання [33-35].

Концепція розподіленого живлення забезпечує високі показники економічності та надійності, дозволяє зняти обмеження пристроїв електропостачання. При такій системі зберігається можливість використання існуючого рухомого складу, а також не потрібні великі витрати на переобладнання контактної мережі (необхідно лише додатково розмістити живлячий провід і, якщо необхідно, підсилити опори).

Для забезпечення розподілу навантаження між рядом підсилюючих пунктів необхідно забезпечити між ними зв'язок за режимом напруги на первинній стороні. Тому всі підсилюючі пункти повинні отримувати живлення від однієї лінії електропередачі, що йде вздовж залізниці. Зазначене й зумовлює основну відмінність від схеми централізованого електропостачання.

Засоби сучасної силової електроніки дозволяють створювати потужні перетворювачі постійно-постійного струму з первинною напругою порядку десятків кіловольт. У цьому випадку розподілена система живлення найбільш ефективна при спорудженні головних перетворювальних підстанцій з потужними керованими випрямлячами і живлячими лініями постійного струму 24 кВ, прокладеними по опорах контактної мережі. При реалізації системи розподіленого живлення з поздовжньою лінією постійного струму на існуючих тягових підстанціях 3,3 кВ встановлюють замість резервних випрямних агрегатів (або додатково) високовольтні керовані випрямлячі. Пункти живлення постійно-постійного струму виконуються за типом перетворювача постійно-постійного струму з проміжним контуром змінного струму. Перетворювальні пункти включають: першу сходинку перетворення постійного струму високої напруги в змінний струм (автономний інвертор); другу сходинку перетворення змінного струму високої напруги в постійний струм напругою 3,3 кВ (випрямний агрегат). На опорах контактної мережі прокладається поздовжня живляча лінія постійного струму (високовольтний фідер). Така лінія може прокладатися для парного й непарного напрямку, що забезпечує її резервування. Як високовольтна лінія може використовуватися один з підсилюючих проводів існуючої контактної мережі.

Перетворювальний пункт у розподіленій системі з живлячою лінією змінного струму являє собою звичайну одноагрегатну тягову підстанцію. Живляча лінія змінного струму може бути прокладена як по опорах контактної мережі [36], так і на окремих опорах вздовж залізниці.

До живлячої лінії на міжпідстанційній зоні залежно від її довжини, профілю колії і реальних струмових навантажень поїздів підключаються в необхідній кількості автоматичні пункти живлення в розріз лінії, причому на кожному пункті поздовжня лінія секціонується вимикачами, які виконують функцію захисту. Зі сторони 3,3 кВ перетворювальні пункти підключаються до контактної мережі загальноприйнятим способом.

Для того щоб при схемі розподіленого живлення з однією відключеною підстанцією можна було забезпечити необхідні розміри руху, потрібно, щоб підстанції розташовувалися значно ближче одна до одної, ніж у схемі централізованого живлення. Відповідно потужність кожної підстанції буде нижчою, а їх кількість більшою. Тому така схема стає доцільною за умови максимальної уніфікації тягових підстанцій, що легко досягається при одноагрегатних підстанціях.

Розглянута система (рис. 1.3) потребує значно меншого перерізу проводів контактної мережі й при цьому зменшуються втрати енергії і напруги. Ці якості є найважливішими перевагами системи розподіленого живлення. Крім того, значно полегшується захист контактної мережі від струмів короткого замикання, знижуються потенціали рейок відносно землі, а відповідно і небезпека руйнування підземних споруд блукаючими струмами. Головним напрямком реконструкції ліній 3,3 кВ у разі застосування розподіленої схеми живлення є можливість передачі енергії від вже існуючих тягових підстанцій (без будівництва нових).

#### **1.4. Дослідження режимів потужності в системі тягового електропостачання постійного струму**

Експериментальні дослідження є основним джерелом інформації для вивчення енергообмінних процесів у системі тягового електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму та для побудови математичних моделей процесів перетворення й споживання електричної енергії, а також конкретних електричних пристроїв [37-40]. Експериментальні дослідження

режимів електроспоживання в СТЕ виконувалися згідно з розробленою на кафедрі “Інтелектуальні системи електропостачання” методикою з використанням розробленого програмно-апаратного комплексу [22]. При дослідженні функціонування СТЕ на сучасному етапі, як зазначалося вище, необхідно досліджувати не тільки режими напруги, а й режими потужності в тяговій мережі.

Дослідженням режимів напруги й оцінка їх впливу на роботу електрорухомого складу і пристроїв електропостачання присвячена значна кількість робіт [14-24]. Від режиму напруги залежать такі параметри, як швидкість руху поїзда, зміни струму й тягового зусилля електровоза, можливість подолання інерційних підйомів, навантаження й робота окремих пристроїв електропостачання [15, 42, 43]. Дотримання нормованого рівня напруги в тяговій мережі електрифікованої ділянки забезпечує рух поїздів з необхідною економічно доцільною швидкістю, встановленою умовами пропускної здатності. Такий режим забезпечує регламентовані витрати енергії на тягу з урахуванням втрат у системі електропостачання, необхідну надійність роботи електрорухомого складу (ЕРС) та пристроїв електропостачання.

Числові характеристики режиму напруги в різних режимах роботи СТЕ, отримані в ході виконання цієї роботи, наведені в таблиці 1.2 [45]. Їх аналіз показує, що на струмоприймачі електровоза напруга також має різкозмінний характер. Максимальні коливання в режимі тяги можуть досягати значення 545 В, а в режимі вибігу – 618 В. Отримані результати зумовлюють необхідність зменшення коливань напруги в тяговій мережі та забезпечення сталості її ймовірнісних характеристик у межах, передбачених нормативними документами для високошвидкісного транспорту [21]. При цьому для забезпечення більш високих енергетичних показників функціонування ЕРС необхідно ставити задачу зменшення діапазону змін напруги на струмоприймачах протягом всього часу руху поїзда по перегону.



Одними з основних параметрів системи тягового електропостачання є кількість та потужність тягових підстанцій і відстань між ними. Повна встановлена потужність тягових підстанцій, наприклад, для дослідних ділянок Придніпровської залізниці перебуває в межах 12...50 МВт, але сучасний стан тягового електропостачання постійного струму характеризується зростаючим дефіцитом необхідної потужності для забезпечення заданого режиму напруги в тяговій мережі при впровадженні швидкісного руху.

Таблиця 1.2 – Числові характеристики режиму напруги

Показник	Шини 3,3 кВ		Струмоприймач ЕРС	ПСК
	ТП 1	ТП 2		
$M(U)$	3399,38	3363,21	2906,11	3207,71
$M_o(U)$	3427,10	3343,39	3013,00	3247,16
$M_e(U)$	3407,11	3411,31	2923,50	3237,16
$D(U)$	2695,26	26836,09	12712,14864	9394,24
$s(U)$	51,92	163,82	112,7482	96,92
$As(U)$	-0,62	-1,71	-0,70	-1,77
$Ex(U)$	0,87	3,94	0,10	3,95
$\min(U)$	3113,52	2550,97	2516,00	2656,44
$\max(U)$	3700,35	3857,84	3134,00	3515,74
$U(0,95)$	3485,24	3530,52	3056,84	3193,28

При цьому, як показують виконані дослідження, коефіцієнт використання режимної потужності та обладнання тягових підстанцій не перевищує 14 %. Це підтверджується експериментальними даними, які були отримані на тягових підстанціях Придніпровської залізниці (табл. 1.3) [45].

Таблиця 1.3 – Результати дослідження завантаження тягових підстанцій

Тягова підстанція	Встановлена потужність $P_B$ , кВт	Середня споживана потужність $P_C$ , кВт	Коефіцієнт завантаження $K_3$ , %
ТП 1 (Верх)	20 800	2 868	13,7
ТП 2 (Ер)	20 800	1 080	5,2
ТП 3 (Варв)	19 800	956	4,8
ТП 4 (Сам)	19 800	422	2,1

Дослідження режимів роботи тягової мережі та споживаної електровозами потужності виконувалися на Придніпровській залізниці (Додаток А):

- на ділянці НД Вузол – П’ятихатки. Довжина ділянки 128 км, контактна мережа М-120+2МФ100+А185. Ділянка отримує живлення від 9 тягових підстанцій. Рух поїздів відбувався в парному та непарному напрямках.

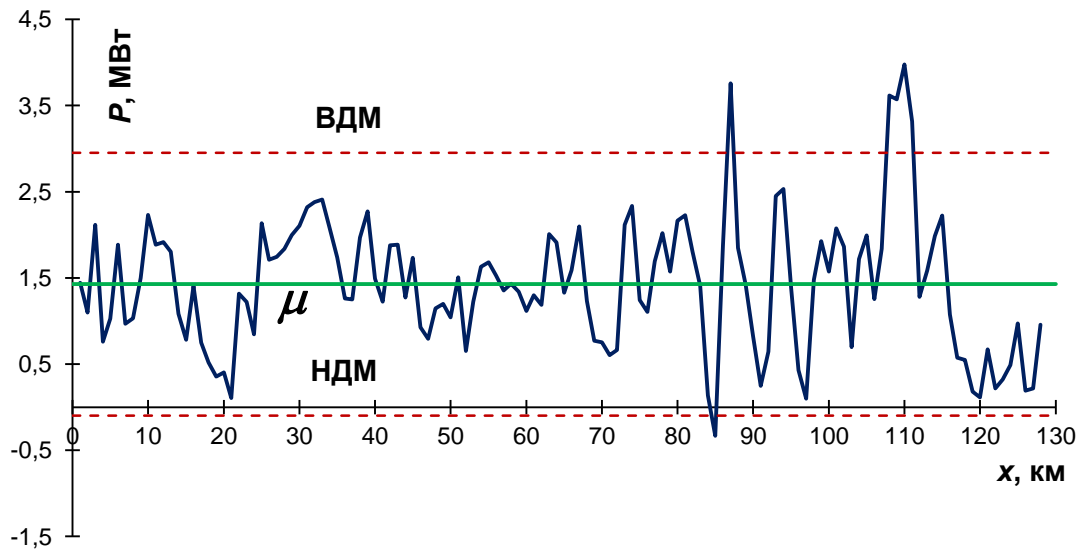
- на ділянці НД Вузол НД Вузол – Демуріно. Довжина ділянки 135 км, контактна мережа на ділянці М-120+2МФ100+А185. Ділянка отримує живлення від 9 тягових підстанцій. Рух поїздів відбувався в парному та непарному напрямках.

- на ділянці Синельникове – Демуріно. Довжина ділянки 96 км, контактна мережа М-120+2МФ100+А185. Ділянка отримує живлення від 6 тягових підстанцій. Рух поїздів відбувався в парному та непарному напрямках.

Узагальнені результати досліджень режимів потужності в тяговій мережі наведені в таблиці 1.4 та на рис. 1.4-1.7.

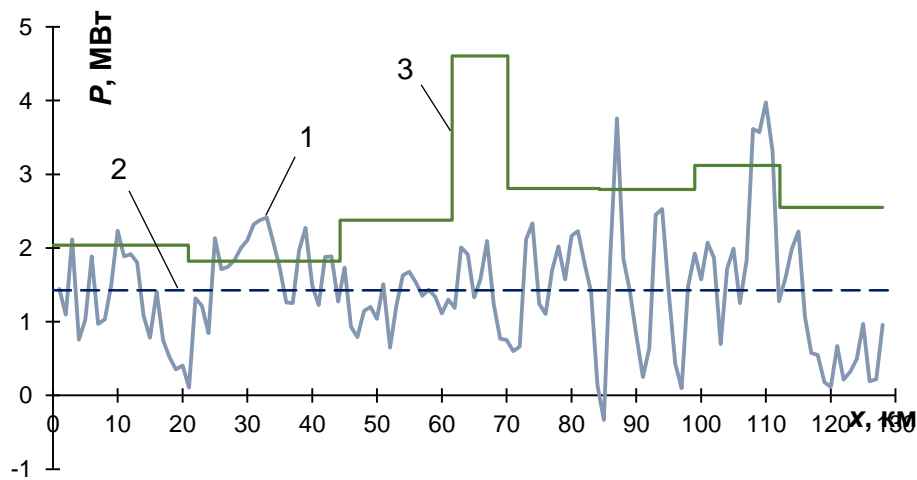
Таблиця 1.4 – Споживання потужності та струму під час руху дослідними ділянками

№	Локомотив	Напрямок руху	Маса поїзда, т	Споживана потужність ЕРС, МВт/км			Струм у режимі тяги, А		Допустимий тривалий струм контактної підвіски М120+2МФ100+А185, А, у разі зносу контактного проводу, %		
				Мінімальна	Середня	Максимальна	Середній	Максимальний	0	15	30
1	ВЛ8	П-НД	4117	-2,52	1,46	5,06	900	1610	2280	2120	1960
2	ВЛ8	НД-П	2887	-2,04	1,5	6,2	934	2000			
3	ВЛ8	П-НД	4441	-3,05	1,08	5,2	913	1750			
4	ВЛ8	НД-П	3372	0,032	1,67	5,98	977	1900			
5	ВЛ8	П-НД	4022	-3,42	1,29	8,7	952	1800			
6	ВЛ8	НД-П	1462	-0,85	1,07	4,55	707	1400			
7	ВЛ8	П-НД	4446	-4,44	0,67	5,28	801	1750			
8	ВЛ8	НД-П	2451	-2,25	1,23	4,4	736	1385			
9	ВЛ8	НД-П	4532	-2,96	1,4	5,34	445	1750			
10	ВЛ8	П-НД	4251	-3,61	0,95	6,12	310	1800			
11	ЧС7	НД-П	550	0,11	2,25	7,18	690	2100			
12	ЧС7	П-НД	495	0,1	1,7	5,87	528	1925			
13	ЧС7	П-НД	550	0,1	1,64	6,07	499	1750			
14	2ВЛ11	С-Д	5957	0,08	2,74	10,37	914	3541			
15	2ВЛ11	Д-С	5957	0,04	2,54	8,29	806	2797			
16	2ВЛ11	НД-Д	5935	0,75	3,17	11,6	1077	3860			
17	2ВЛ11	Д-НД	6004	0,01	2,05	9,64	687	3158			



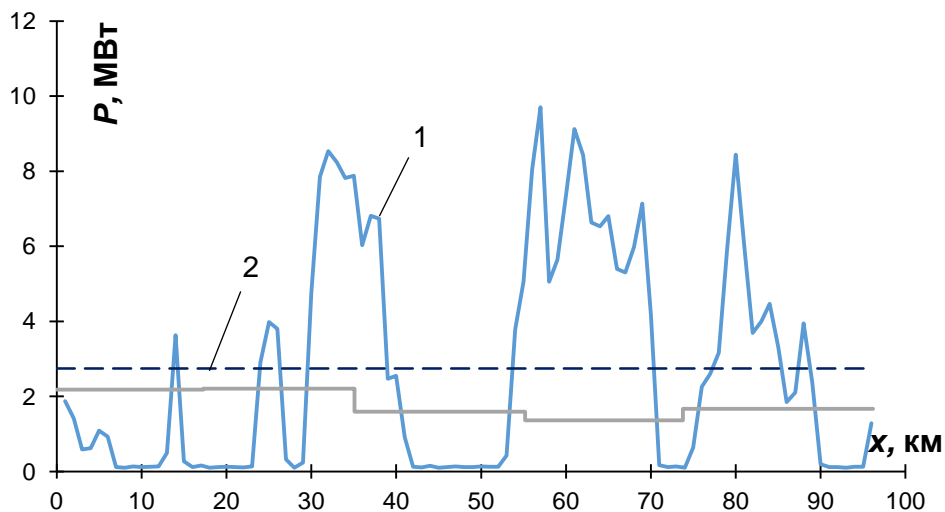
ВДМ – верхня довірча межа; НДМ – нижня довірча межа

Рисунок 1.4 – Середня зміна споживання потужності під час руху ділянкою НД  
Вузол – П'ятихатки



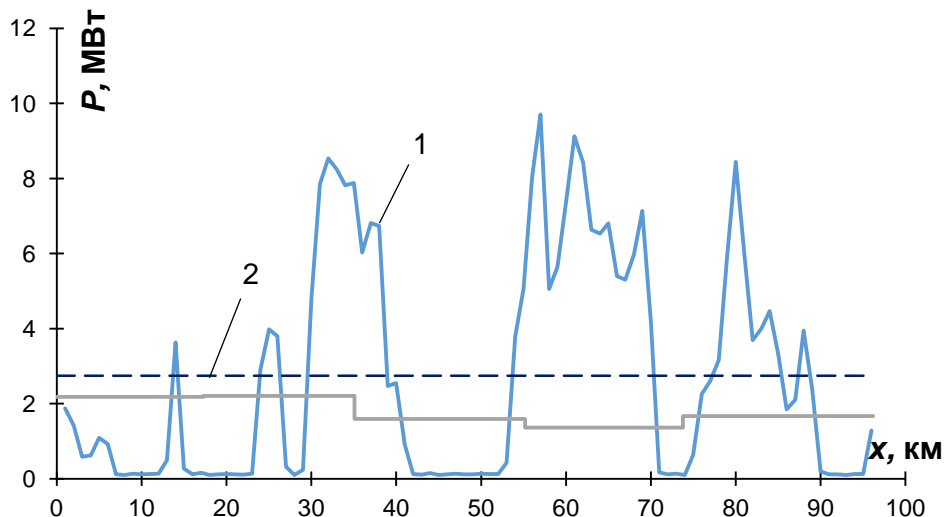
1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС; 3 – потужність на МПЗ, яку можуть забезпечити суміжні ТП

Рисунок 1.5 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою НД Вузол – П'ятихатки в парному напрямку (у роботі перебувають два перетворювачі)



1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС

Рисунок 1.6 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою Синельникове – Демуріно в непарному напрямку



1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС

Рисунок 1.7 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою НД Вузол – Демуріно в парному напрямку

Аналіз отриманих результатів показує, що в тяговій мережі існують зони обмеженого електроспоживання, тобто зони, де споживана потужність ЕРС перевищує можливості СТЕ з передачі необхідного рівня потужності. У свою чергу, це призводить до різкого зниження напруги на струмоприймачах електровозів та зменшення швидкості руху, що є неприйнятним в разі впровадження швидкісного руху. Необхідно вказати, що отримані результати добре кореспондують з даними, отриманими в роботі [46]. При цьому парадоксальним є факт, що встановлена агрегатна потужність тягових підстанцій використовується не повністю. Необхідно також звернути увагу, що на деяких МПЗ споживаний ЕРС струм наближається до критичних значень, що в умовах наявного зносу інфраструктури СТЕ може привести до аварійних ситуацій.

### **1.5. Вимоги до режимів потужності в системі тягового електропостачання постійного струму для швидкісного руху**

У результаті виконаних експериментальних досліджень встановлено, що режими напруги та потужності в системі тягового електропостачання постійного струму не дозволяють повною мірою забезпечити необхідні умови для впровадження швидкісного руху на існуючих лініях. Рівні напруги як на шинах тягового навантаження, так і в тяговій мережі мають значний діапазон коливань, який визначається різними факторами: як впливом змін режимів роботи системи зовнішнього електропостачання, так і режимами роботи тягової мережі. При цьому за наявності значного резерву встановленої агрегатної потужності на тягових підстанціях України відсутні засоби регулювання режимів напруги та потужності в тяговій мережі.

Найбільш часто поліпшення режимів напруги виконується за рахунок тривіальних малозатратних заходів, що недостатньо при збільшенні тягових навантажень, які виникають зі збільшенням швидкостей руху [47, 48]. Однією з обов'язкових умов при цьому є необхідність звуження діапазону змін напруги на струмоприймачах е. р. с. та підвищення ефективності використання енергії.

Для вирішення поставленого завдання в роботах [49, 50] пропонується використання схемотехнічних рішень системи тягового електропостачання на основі розподіленого живлення.

Із досвіду застосування швидкісного руху відомо, що для забезпечення швидкісного руху до 250 км/год можуть застосовуватись різноманітні системи тягового електропостачання як постійного, так і змінного струму без будь-яких обмежень [51, 52]. При розвитку швидкісного руху в Європі траси ліній обиралися тільки виходячи з наявності пасажиропотоку, а не роду струму, тобто при швидкості руху до 200 км/год обмежень за родом струму ніде у світі не приймали, і за кордоном немає прикладів переведення на змінний струм при підготовці раніше електрифікованих ділянок постійного струму до швидкісного руху [51], а географія швидкісних магістралей визначається потребою перевезень із застосуванням на цих лініях різних систем електропостачання (1,5 і 3,0 кВ постійного струму, 15 кВ, 16 2/3 Гц, 25 кВ, 50 Гц змінного струму).

Встановлення максимальних швидкостей руху швидкісних потягів по окремих конкретних ділянках і перегонах існуючих магістралей здійснюється в результаті комплексної оцінки умов допустимих швидкостей руху за станом колії і нормативам взаємодії з нею рухомого складу. Пристрої тягового електропостачання не повинні обмежувати максимальні швидкості руху нижче прийнятого за цими умовами рівня. Усі компоненти системи передачі потужності повинні відповідати встановленим вимогам і підлягають ретельній перевірці й випробуванням [53].

Високошвидкісні залізниці й залізниці з інтенсивним рухом, підвищеною пропускною здатністю, з невеликими інтервалами (3-5 хв) між поїздами і споживаною потужністю 10-12 МВт і більше мають інший характер електротягового навантаження [54]. Для таких ліній характерні імпульсні навантаження: як для проводів електротягової мережі, так і для перетворювачів і комутаційних апаратів тягових підстанцій, постів секціонування, інших лінійних пристроїв. При цьому зростають пікові навантаження на тягові

підстанції, збільшуються втрати напруги й енергії в пристроях тягового електропостачання, ускладнюються умови струмознімання і збільшується нагрівання проводів контактної мережі.

Питома потужність електроспоживання високошвидкісних ліній становить 1-1,3 МВт/км, а для залізничних двоколієних ліній з підвищеною пропускною спроможністю може досягати 1,7-2,5 МВт/км. За нормами Міжнародного союзу залізниць, розробленими в 1996 р., для двоколієної високошвидкісної лінії з максимальною швидкістю 300-350 км/год передбачається максимальна питома потужність споживання електроенергії на тягу 3 МВА/км [54]. Потужність пристроїв тягового електропостачання рекомендується приймати виходячи із зазначеної питомої потужності електроспоживання. Тобто відбувається поступова еволюція вимог до СТЕ – забезпечення не тільки нормованої напруги, а й необхідної енергоємності тягової мережі.

Необхідно взяти до уваги, що вибір технічних рішень при створенні або реконструкції системи тягового електропостачання (СТЕ) для забезпечення швидкісного та високошвидкісного пасажирського руху базується на основних параметрах проекрованої лінії, до яких належать: максимальна допустима й експлуатаційна швидкості руху; тип електрорухомого складу (ЕРС) і його характеристики; принципи організації перевезень і графіки руху поїздів [52]. Від перерахованих параметрів істотно залежить необхідна здатність навантаження окремих пристроїв електропостачання та системи в цілому. Параметри СТЕ і схеми живлення контактної мережі обираються відповідно до прийнятих нормативів за допустимим навантаженням силового обладнання тягових підстанцій, напругою на струмоприймачах ЕРС і температурами нагрівання проводів тягової мережі.

Характеристики й параметри рухомого складу для високошвидкісних магістралей (ВСМ) зумовлені тим, що при збільшенні швидкості квадратично зростає аеродинамічна складова основного опору руху [54]. Так, якщо при

швидкості 120-140 км/год основний питомий опір для звичайних пасажирських поїздів не перевищує 4 кгс/т, то для високошвидкісного ЕРС (250 - 300 км/год) він дорівнює 10-17 кгс/т. Відповідно до цього, для реалізації високих швидкостей руху потрібна істотно більша питома (на тонну маси бруто) потужність тягового обладнання поїзда [55].

Співвідношення встановленої максимальної швидкості на ділянці й потужності поїзда, а також спосіб управління силою тяги на ЕРС (ступінчастий, плавний) дуже впливають на режим споживання струму з контактної мережі. Під час руху звичайного пасажирського поїзда, наприклад з електровозом ЕП1, зміна струму в контактній мережі має імпульсний характер, зумовлений чергуванням режимів тяги і вибігу. Електропоїзд ЕПС250 (проектний аналог поїзда «Сапсан») з плавним регулюванням сили тяги споживає максимальний струм тільки при розгонах, а на інших ділянках реалізує потужність, необхідну для підтримки заданої швидкості залежно від поточного ухилу колії. При швидкості 300-350 км/год внаслідок великого опору руху поїзд ICE3 [57] більшу частину часу споживає максимальний струм практично незалежно від профілю ділянки.

Результати численних тягових і електричних розрахунків показують, що струмові навантаження в системах електропостачання при однакових міжпоїзних інтервалах на ВСМ і на лініях звернення вантажних поїздів підвищеної маси практично співмірні. Необхідна електротягова потужність залежить від багатьох факторів, основними з яких є маса поїзда, швидкість руху, основний опір руху, інтервали між поїздами, частота рушань і розгонів, можливість рекуперативного гальмування, план і профіль колії, характеристики мережі тягового електропостачання [12]. Але при швидкісному (200-250 км/год) і високошвидкісному (300 км/год і вище) русі потужність, реалізовувана тяговими двигунами поїзда, практично дорівнює потужності, що реалізовується електровозами великовагового поїзда [58]. Однак внаслідок більш швидкого темпу зміни навантажень при проходженні поїздів по ВСМ



інтенсивність нагрівання силового устаткування підстанцій і проводів контактної мережі дещо менше, ніж на ділянках великовагового руху. У зв'язку з цим основним чинником, що обмежує здатність навантаження СТЕ ВСМ, є рівень напруги в контактній мережі.

Як зазначалося вище, привід сучасного швидкісного ЕРС реалізує плавне управління силою тяги. Для такого ЕРС задається максимальна тягова характеристика (залежність сили тяги від швидкості), яка в спрощеному вигляді має дві ділянки [57]: розгінну – від нульової швидкості до деякого значення  $V$  при незмінній або лінійно спадній силі тяги; постійної потужності (автоматична характеристика від до при зміні сили тяги обернено пропорційно швидкості). Залежно від поточних умов (ухил профілю, напруга в контактній мережі) і режиму ведення поїзда система управління вибирає потрібну точку в області, обмеженій максимальною тяговою характеристикою. Підвищення швидкості поїзда призводить до значного збільшення сили опору руху. У зв'язку з цим для збільшення швидкості слід збільшувати силу тяги, а збільшення сили тяги призводить до зростання струму, споживаного ЕРС. При розгоні до швидкостей руху понад 200 км/год опір руху, а отже, і струм практично постійні. Величина струму досягає значення 3 кА і більше [57]. Для поїздів, обладнаних перетворювачами, при зменшенні напруги на струмоприймачах ЕРС для реалізації встановленої потужності при заданій швидкості потрібно споживати більший струм, і навпаки: при збільшенні напруги струм зменшується. З цієї причини від системи електропостачання потрібно забезпечити підтримку напруги на струмоприймачі ЕРС близькою до номінальної. Виконати це завдання можливо тільки при достатній енергоємності тягової мережі [57].

У зв'язку зі вступом України в СОТ, зусиллями з інтеграції у європейську спільноту та розвитком транснаціональних залізничних коридорів найближчими роками необхідно виконати зміни в інфраструктурі залізничного транспорту. Але якісні зміни на вітчизняних залізницях і впровадження високошвидкісного руху можливі тільки зі зростанням продуктивності в

економіці й добробуту суспільства [59]. Згідно зі світовим досвідом, вартість будівництва ВШМ становить майже 30 млн доларів на один кілометр[59]. У всіх країнах будівництво подібних інфраструктурних об'єктів під силу тільки державі й фінансується з державного бюджету. На відміну від країн Європи та Азії, де наявний значний пасажиропотік, а розвиток високошвидкісного транспорту має поступальний характер [60], на сьогодні в Україні немає пасажиропотоку 24 тисячі чоловік в добу, щоб потяги ходили хоча б раз на годину. Таким чином, для України оптимальним варіантом необхідно сформувати мережу залізничних перевезень з максимальною швидкістю до 160 км/год, у перспективі до 180 ... 200 км/год [59]. Звідси необхідно розробляти заходи з модернізації існуючих залізничних ліній для застосування на теренах України швидкісних поїздів *Hundai* та *Škoda*.

На рис. 1.8 – 1.11 показані вибіркові дані експериментальних поїздок, які підтверджують наведені вище міркування [61].

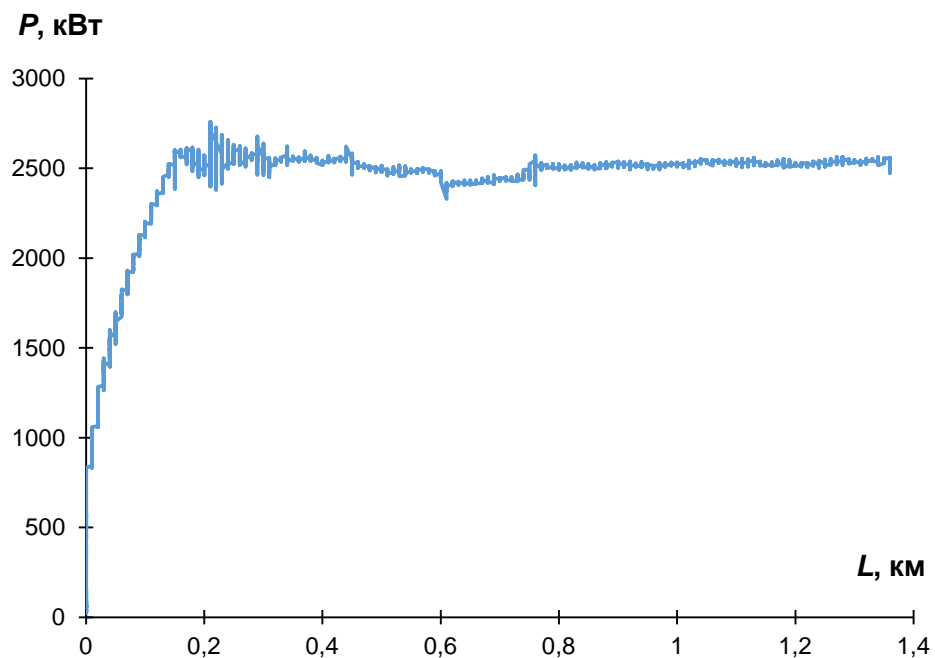


Рисунок 1.8 – Споживана потужність з контактної мережі електровозом *Škoda*

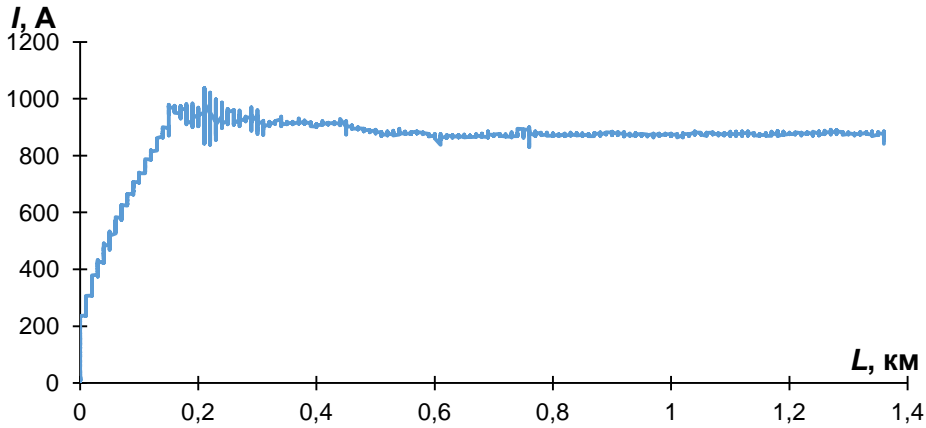


Рисунок 1.9 – Споживаний струм електровозом Škoda

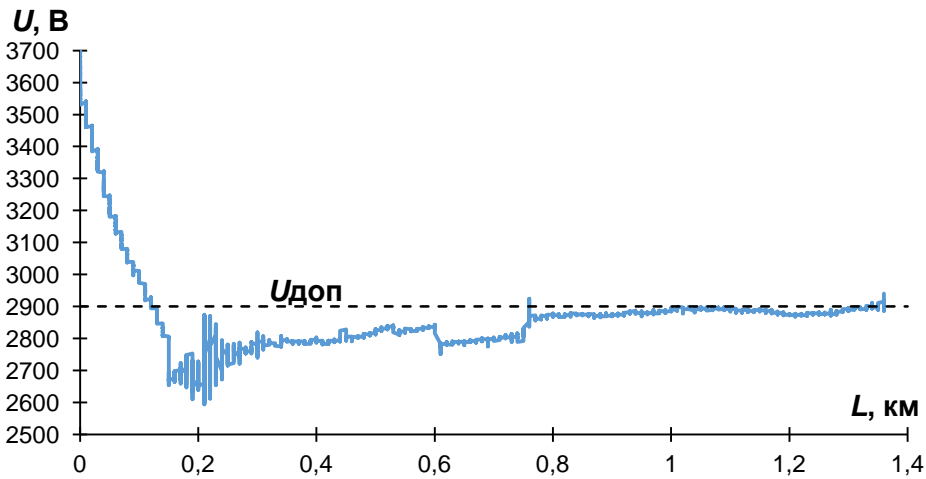


Рисунок 1.10 – Напряга на струмоприймачі електровозу Škoda

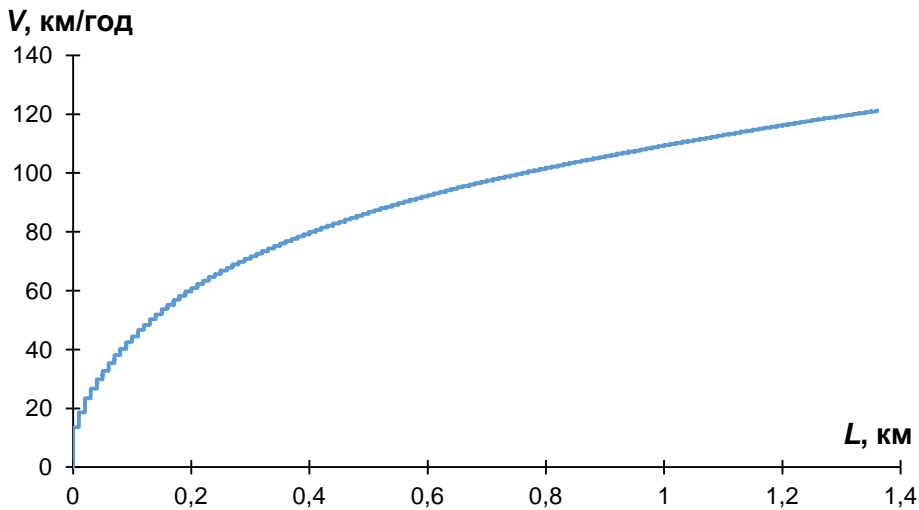


Рисунок 1.11– Швидкість електровоза Škoda

Як випливає з їхнього аналізу, при виході швидкісного електровоза на сталий режим напруга в тяговій мережі зменшується нижче встановленого

нормативного значення. Можна зробити припущення, що в цьому випадку наявна недостатня енергоємність тягової мережі. У таблиці 1.5 виконано аналіз агрегатних потужностей тягових підстанцій на ділянках швидкісного руху та наведено дані розрахунку питомої потужності міжпідстанційних зон. Можна констатувати, що майже половина МПЗ не відповідає встановленим нормативам питомої потужності. На практиці це призводить до необхідності збільшення міжпоїзних інтервалів [46] та ставить завдання модернізації таких зон у СТЕ.

Таблиця 1.5 – Відомості про агрегатні потужності тягових підстанцій

Назва	Встановлена потужність, МВт	Довжина міжпідстанційної зони, км	Відстані до ПСК, км	Розрахункова питома потужність МПЗ, МВт/км
Донецький хід				
П'ятихатки	37,3	20,9	10,2/10,7	1,95
Ерастівка	44,4	23,4	9,8/13,6	1,89
Верховцево	44,4	17,3	7,6/9,7	2,0
Верхньодн.	24,9	22,7	8,6/14,1	1,48
Баглей	18,6	14,7	-	1,27
Сухачівка	18,7	13,1	-	2,14
Горяїново	37,4	16,1	-	2,7
НДВузол	39	6,9	-	4,34
Ігрень	16	11,2	-	2,25
Іларіоново	44,4	21,6	11,1/10,5	2,18
Синельниково	50,0	17,3	8,5/8,8	2,21
Роздори	26,52	17,8	9/8,8	1,59
Письменна	30,28	20,08	10,4/10,4	1,36
Улянівка	30,28	18,6	9/9,6	1,67
Чапліно	31,28	22,4	7,1/6,7/8,6	1,03
Демурино	15,0	22,4	-	-
Покровський хід				
Балівка	12,6	30,9	14,4/16,5	0,61
Новомосковськ	25,2	27	14,9/12,1	0,7
Мінеральна	12,6	24,4	13,0/11,4	1,03
Павлоград-1	37,8	24,2	11,5/12,7	1,04
Богуславський	12,6	21,6	10,6/11,0	0,87
Миколаївка	25,2	29,2	12,3/16,9	0,75
Слов'янка	18,9	17,2	8,3/8,9	1,28
Роз'їзд №5	25,2	23,8	10,1/13,7	-

## Висновки до розділу

Сьогодення тягового електропостачання постійного струму характеризується стрімким старінням основних фондів інфраструктури. Водночас єврозусилля України потребують заходів з впровадження швидкісного руху, що вимагає модернізації існуючих електрифікованих ліній. Швидкісний рух можуть забезпечувати застосовувані в Україні системи тягового електропостачання як постійного, так і змінного струму, але для забезпечення сталої швидкості руху необхідно збільшити енергоємність тягової мережі, насамперед для електрифікованих ділянок постійного струму.

Аналіз наукових публікацій показує, що основні зусилля як українських, так і закордонних вчених спрямовані на забезпечення необхідного режиму напруги в тяговій мережі. Але застосовувані сьогодні на теренах України засоби й заходи не дозволяють вирішити поставлене завдання. Як показують результати експериментальних досліджень та розрахунків, неможливість забезпечення необхідного для швидкісного руху режиму напруги в разі застосування малозатратних засобів підсилення зумовлюється недостатньою енергоємністю тягової мережі.

Саме тому наукова думка еволюціонує до розвитку розподілених систем живлення тягової мережі, які мають кращі техніко-економічні характеристики. Нагальною потребою в умовах зростання цін на енергоносії є забезпечення енергетичної ефективності цих систем та ефективне використання наявної агрегатної потужності в системі тягового електропостачання.

Для створення енергоефективної СТЕ розподіленого типу, яка матиме необхідну енергоємність та відповідатиме вимогам для забезпечення швидкісного руху, необхідно вирішити такі завдання:

- узагальнити підходи та визначити показники оцінки енергоефективності енергообмінних процесів у системі тягового електропостачання постійного струму;
- виконати експериментальні дослідження для встановлення вимог до режиму потужності в тяговій мережі;

- здійснити оцінку енергетичних процесів у розподіленій системі тягового електропостачання;
- розглянути режими функціонування пропонованої системи розподіленого типу;
- провести техніко-економічні розрахунки для пропонованої системи.

Основні положення розділу опубліковані в працях [8, 45, 61].

## **Розділ 2. НАУКОВІ СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ РОЗРОБКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛЕНОГО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ШВИДКІСНОГО РУХУ**

### **2.1. Задачі синтезу оптимальної системи тягового електропостачання**

Сучасний розвиток засобів обчислювальної техніки дозволяє по-новому розв'язувати задачу синтезу систем управління технологічними процесами передачі та споживання електричної енергії. Можливість різностороннього дослідження складних систем живлення з урахуванням нелінійних зв'язків і змінних параметрів при порівняно малій витраті засобів та часу значною мірою знецінила існуючі методи числових розрахунків, які використовують для аналізу й синтезу систем регулювання [62].

Загалом, синтез будь-якої системи – це спрямований розрахунок, який має на меті знаходження раціональної структури системи й встановлення оптимальних параметрів її окремих ланок. Синтез можна трактувати як приклад варіаційної задачі та розглядати таку побудову системи, при якій для конкретних умов роботи забезпечується теоретичний мінімум похибки та виконання технічних вимог до неї. У цьому випадку з багатьох можливих рішень будуть вибрані саме ті, які є оптимальними з позиції існуючих конкретних умов та вимог щодо структури, обладнання, надійності. При цьому важливо забезпечити необхідну точність та допустимі рівні характеристик перехідних процесів.

На сьогодні багато уваги приділяється так званому оптимальному синтезу. У цьому випадку створювана система повинна мати найкращі якості та враховувати обмеження, які накладаються на незалежні змінні, що характеризують стан системи. Як критерій оптимальності зазвичай розглядається деякий функціонал від величин, які характеризують стан системи чи є якісними оцінками яких-небудь властивостей системи [63].

Проблема синтезу систем є багатосторонньою. Крім умов щодо точності та динаміки до неї висуваються найрізноманітніші вимоги: до споживання енергії, габаритів, маси, технологічності, надійності, уніфікованості вузлів та елементів, вартості, легкості обслуговування та налагодження. Досвід проектування технічних систем показує, що часто найбільш вигідним є збереження їх якісних показників у допустимих межах. Це дозволяє створити такі системи, які будуть задовольняти весь комплекс вимог [64]. Крім того, це дає можливість сформулювати обґрунтовані вимоги до окремих елементів та вузлів системи. У процесі розробки СТЕ нової конфігурації доводиться враховувати досить різноманітний комплекс вимог, які пов'язані з різними її характеристиками. З позиції оптимального управління процесами розподілу ЕЕ їх можна об'єднати в деякі основні групи [62, 65]: вимоги, які пов'язані зі статичними та динамічними властивостями системи; вимоги, які пов'язані з надійністю роботи системи регулювання режимів функціонування, її стійкістю до впливу зовнішніх чинників (кліматичних, механічних, хімічних) і здатністю зберігати свої характеристики протягом певного проміжку часу; вимоги, які пов'язані з характером експлуатації системи управління; вимоги, які пов'язані з допустимим споживанням потужності, та ін.

Синтез децентралізованої системи тягового електропостачання є складною задачею, яка вимагає вирішення багатьох питань, пов'язаних із вибором потужності підсилюючих пунктів, елементної бази та схемотехніки, а також із знаходженням оптимального способу розрахунку цієї системи та її елементів [66, 67]. Останнім часом розроблено низку ефективних енерготехнологій, які дозволяють споживачам електроенергії створювати власні генеруючі установки, які можуть конкурувати з централізованим виробництвом ЕЕ [68]. Децентралізація виробництва електроенергії є важливою складовою інноваційно-технологічного забезпечення структурного реформування енергетичної галузі з метою підвищення її ефективності й дозволяє:



- знизити втрати електроенергії під час транспортування через максимальне наближення джерела до споживача;
- зменшити кількість і довжину магістральних ЛЕП;
- зменшити наслідки аварій на центральних електростанціях і головних ЛЕП;
- забезпечити взаємне багатократне резервування електрогенеруючих потужностей;
- знизити вплив на довкілля за рахунок використання засобів альтернативної енергетики.

Але в сучасних умовах функціонування СТЕ не менше значення має й розподілена система живлення ЕРС від джерел централізованого живлення, тобто децентралізація перетворення та споживання ЕЕ (див. рис. 1.3). Для ефективного використання технологій розподіленого живлення необхідно застосовувати методи системного аналізу та моделювання з урахуванням специфічних особливостей систем електропостачання залізниць (різкозмінні, нестационарні тягові навантаження, які рухаються в просторі та часі). Задача структурно-параметричного синтезу системи електропостачання залізниці розподіленого типу містить такі етапи:

1. Визначення мети синтезу та дослідження СРЖ як об'єкта проектування.
2. Розробка методів моделювання цієї системи.
3. Створення методів топологічного синтезу системи, які містять компоновку та раціональне розміщення установок та основних вузлів електрообладнання.
4. Розробка власне самої системи розподіленого живлення, зокрема:
  - вибір кількості пунктів живлення (ПП) і місць їх встановлення;
  - вибір потужності ПП, їх елементної бази та схемотехніки.
5. Розробка схеми зовнішнього електропостачання децентралізованої системи.

6. Визначення найбільш оптимальних параметрів з позиції досягнення сформульованих цілей, а також розробка системи управління для пристроїв розподіленого живлення та отримання числових значень параметрів регуляторів, які забезпечують необхідні динамічні характеристики та досягнення заданих значень показників якості функціонування.

Досягнення мінімуму втрат активної потужності в системі електропостачання зі змішаною конфігурацією та необхідного рівня питомої потужності виконується за рахунок використання алгоритму вибору їх параметрів. Алгоритм вибору параметрів і структури електротехнічного комплексу СРЖ повинен базуватися на виявлених залежностях напруг на струмоприймачі й втрат потужності в елементах розподіленої мережі від параметрів електротехнічних пристроїв. Таким чином, у загальному випадку, СРЖ матиме таку структуру:

- централізоване джерело живлення (головна підстанція);
- тягові підстанції (пункти живлення);
- лінії електропередачі (енергетичні канали).

Нижче розглянемо особливості існуючих схемотехнічних рішень складових систем розподіленого живлення: пунктів підсилення (живлення) тягової мережі та енергетичних каналів передачі енергії.

## **2.2. Аналіз існуючих схемотехнічних рішень пунктів живлення в системах розподіленого типу**

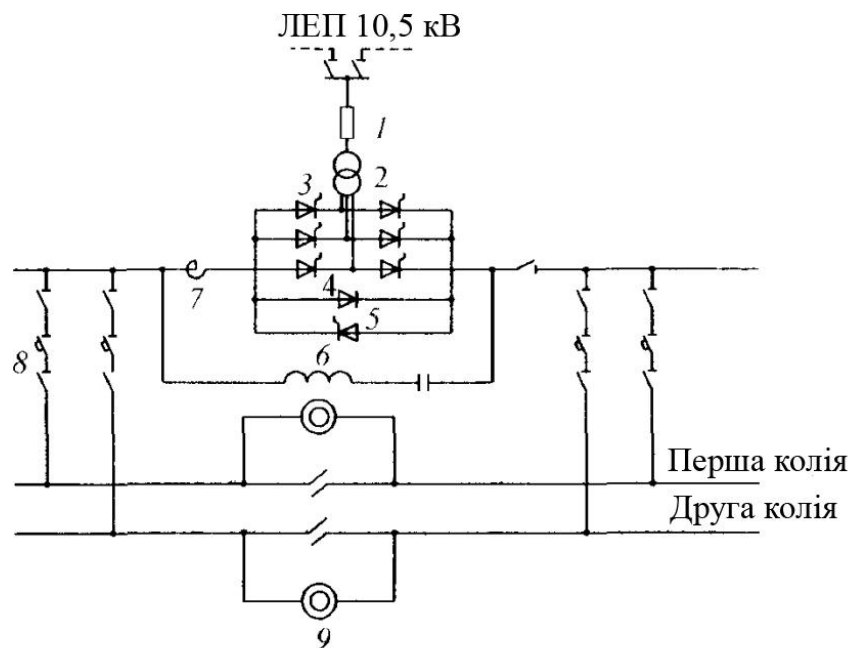
На сьогодні можна виділити два основні напрямки в схемотехнічних рішеннях побудови перетворювачів пунктів живлення тягової мережі:

- перетворювач змінної напруги в постійну (AC/DC);
- перетворювач постійної напруги в постійну (DC/DC).

Для підсилення СТЕ з початку 1960 рр. почалося застосування вольтододаткових пристроїв (ВДП) [69], схема одного з яких наведена на рис.

2.1. Цей пристрій стабілізує напругу контактної мережі шляхом регулювання

рівня вихідної напруги на ПСК залежно від струмів навантаження. Сьогодні такі пристрої випускаються на потужність 1,5 МВт та можуть встановлюватися як на тяговій підстанції, так і на ПСК [70]. Для живлення ВДП використовуються лінії поздовжнього електропостачання 10 кВ, підвішені на опорах контактної мережі. На фідерній зоні може бути встановлено один чи два ВДП. Живлення ВДП здійснюється від найближчої тягової підстанції.



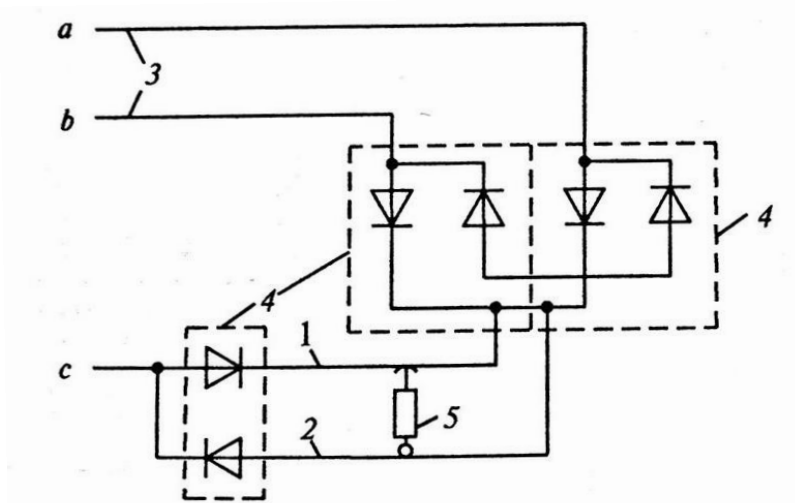
1 – вимикач; 2 – трансформатор; 3 – тиристорний блок; 4 – шунтуючі діоди; 5 – шунтуючі тиристори; 6 – однофазний фільтрувальний пристрій; 7 – реактор; 8 – швидкодіючі вимикачі; 9 – секційні роз'єднувачі

Рисунок 2.1 – Принципова електрична схема ВДП

Для зменшення ваги контактної підвіски, забезпечення зниження струму й втрат напруги в контактній підвісці і, відповідно, підвищення напруги на струмоприймачі електровоза використовують також блок розподіленого живлення (БРЖ) (рис. 2.2) [71].

Схема живлення контактної мережі з блоком БРЖ має трансформатор, вторинна обмотка якого має три фази (а, b, с), контактний провід, тягову рейку, двофазну лінію електропередачі та випрямний блок. Випрямний блок

виконаний з трьох груп по два вентиля в кожній. Перша група встановлюється на тяговій підстанції, а друга і третя – на фідерній зоні разом чи окремо.

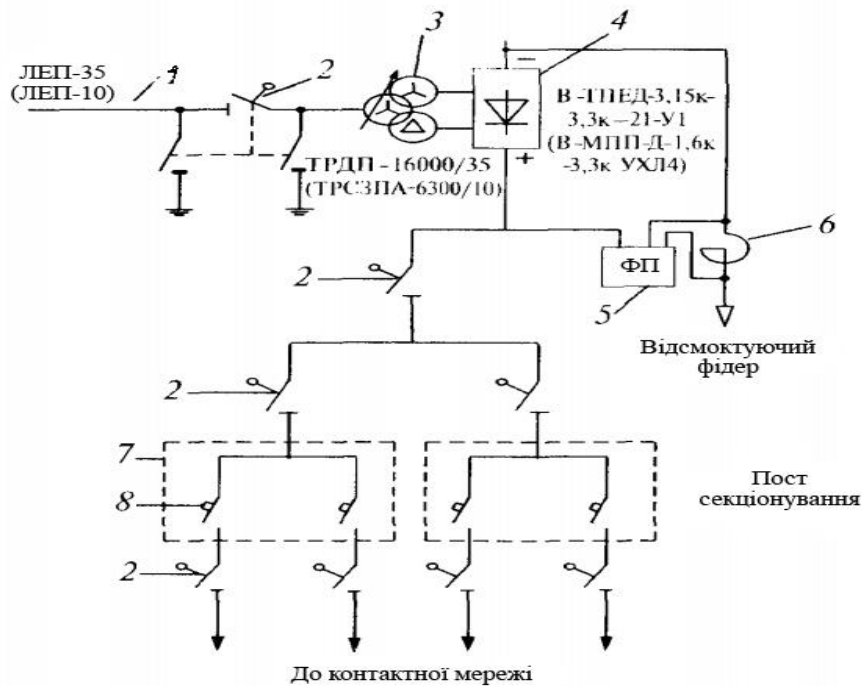


1 – контактний провід, 2 – тягова рейка, 3 – лінія електропередачі, 4 – випрямний блок, 5 – електровоз

Рисунок 2.2 – Принципова схема живлення контактної мережі постійного струму з блоком БРЖ

На сьогодні для підсилення СТЕ пропонується застосування одноагрегатних тягових блоків [71] або одноагрегатних тягових підстанцій [72]. За схемотехнікою ці пристрої фактично тотожні. У розподіленій схемі живлення одноагрегатні тягові підстанції однотипні та максимально спрощені (рис. 2.3). Це дає можливість виконувати повну автоматизацію й включати їх у систему інформаційної технології обслуговування.

Розглянута схема потребує значно меншого перерізу проводів контактної мережі й при цьому зменшуються втрати енергії і напруги. Ці якості є найважливішими перевагами системи розподіленого живлення. Крім того, значно полегшується захист контактної мережі від струмів короткого замикання, знижуються потенціали рейок відносно землі, а відповідно і небезпека руйнування підземних споруд блукаючими струмами.



1 – живляча ЛЕП; 2 – роз’єднувач; 3 – перетворювальний трансформатор; 4 – випрямний блок; 5 – фільтрувальний пристрій; 6 – бетонний реактор; 7 – пост секціонування; 8 – швидкодіючі вимикачі

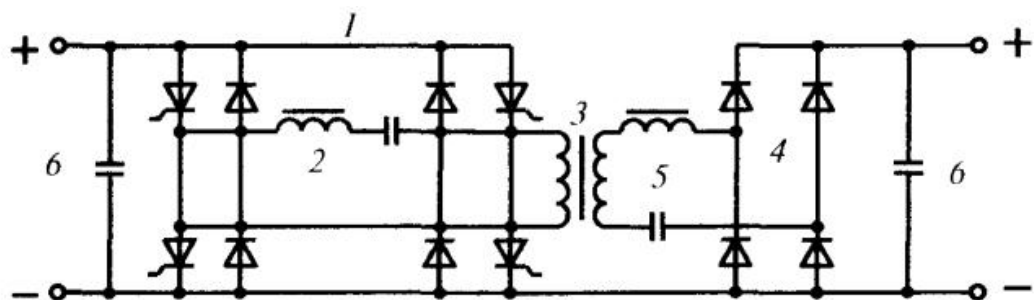
Рисунок 2.3 – Принципова однолінійна схема одноагрегатного тягового блока

Насамкінець, для підсилення тягової мережі пропонується також застосовувати блок перетворення підвищеної напруги БПН-10,5/3,3[73], який отримує живлення або від існуючої лінії поздовжнього електропостачання 10 кВ, або від окремо прокладеної лінії. Для пунктів підсилення з енергетичними каналами постійного струму на сьогодні розроблені перетворювачі рівнів напруги постійного струму (рис. 2.4) [71]. Засоби сучасної силової електроніки дозволяють створювати потужні перетворювачі постійно-постійного струму з первинною напругою до десятків кіловольт. У цьому випадку розподілена система живлення найбільш ефективна при спорудженні головних перетворювальних підстанцій з потужними керованими випрямлячами й живлячими лініями постійного струму 24 кВ, прокладеними по опорах контактної мережі. У разі реалізації системи розподіленого живлення з поздовжньою лінією постійного струму на існуючих тягових підстанціях 3,3 кВ

встановлюють замість резервних випрямних агрегатів (або додатково) високовольтні керовані випрямлячі.

Пункти живлення постійно-постійного струму виконуються за типом перетворювача постійно-постійного струму з проміжним контуром змінного струму. Перетворювальні пункти включають: першу сходинку перетворення постійного струму високої напруги в змінний струм (автономний інвертор); другу сходинку перетворення змінного струму високої напруги в постійний струм напругою 3,3 кВ (випрямний агрегат). На опорах контактної мережі прокладається поздовжня живляча лінія постійного струму (високовольтний фідер). Така лінія може прокладатися для парного і непарного напрямку, що забезпечує її резервування. Як високовольтна лінія може використовуватися один з підсилювальних проводів існуючої контактної мережі.

З боку 3,3 кВ перетворювальні пункти підключаються до контактної мережі загальноприйнятим способом. Паралельне живлення контактної мережі по високовольтній живлячій лінії дозволяє збільшити пропускну здатність, знизити втрати енергії в тяговій мережі, підвищити стабільність напруги у поїздів і зменшити кількість відмов контактної мережі через струмові перевантаження. Принципова схема перетворювача напруги з трансформаторним зв'язком наведена на рис. 2.4.



1 – автономний тиристорний мостовий інвертор напруги зі зворотними діодами; 2 – комутуюча LC ланка; 3 – трансформатор; 4 – випрямний блок; 5 – додаткова LC ланка зниження пульсацій вихідної напруги; 6 – конденсатори фільтрів

Рисунок 2.4 – Принципова схема перетворювача напруги постійного струму в постійний з трансформаторним зв'язком

У зв'язку з розвитком силової електроніки пропонується схема ППН на базі багатозфазного широтно-імпульсного перетворювача на сучасних IGBT-транзисторах [74]. Перетворювач виконаний за безтрансформаторною схемою та складається з шести IGBT-транзисторів, трьох діодних ключів та трьох накопичувальних дроселів (рис. 2.5).

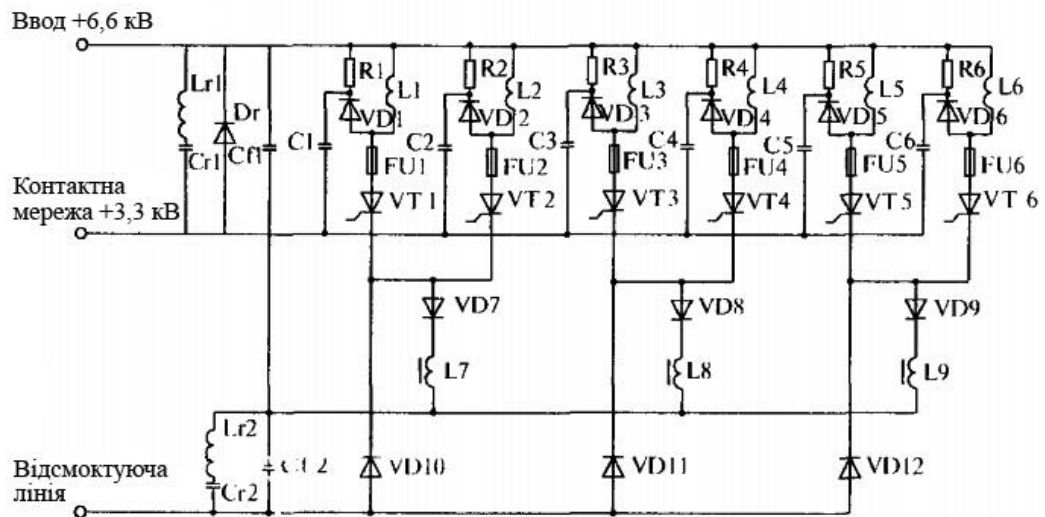


Рисунок 2.5 – Принципова схема імпульсного перетворювача постійного струму

Розглянуті вище перетворювачі мають робочу частоту 800-1000 Гц. На сьогодні вітчизняними вченими запропоновані електронні трансформатори з частотою 3 кГц [75]. Порівняння параметрів запропонованих пристроїв підсилення [71] наведено в таблиці 2.1.

Необхідно вказати, що науковцями України для застосування в розподілених системах живлення розроблено тяговий агрегат ПА-5200 [76-80]. В основу розробки дослідного зразка перетворювального агрегату ПА-5200 покладено науково-дослідні роботи з розробки технічних вимог до перетворювальних агрегатів на базі дванадцятипульсних напівкерованих випрямлячів з реверсивним вольтододатком для тягових підстанцій постійного струму. Його застосування дозволить:

- 1) регулювання вихідної випрямленої напруги з метою як компенсації відхилень напруги в живлячій мережі та похилості зовнішньої характеристики

випрямлячів, так і забезпечення заданої напруги на струмоприймачах електрорухомого складу;

2) компенсацію реактивної потужності, генерованої випрямлячами в мережу живлення з метою доведення коефіцієнта потужності мережі до величини не нижче за 0,98, рекомендованої новими світовими стандартами на якість споживаної електроенергії;

3) обмеження аварійних струмів на рівні порядку  $1,2 \div 1,3$  від максимального робочого струму, з метою зменшення установленої потужності дроселя фільтра та полегшення режимів роботи комутаційних апаратів;

4) фільтрацію низькочастотних неканонічних вихідних гармонік з метою зменшення установленої потужності реактивних елементів вихідних фільтрів при безумовному забезпеченні електромагнітної сумісності тягової мережі з пристроями залізничної автоматики;

5) безконтактний захист при коротких замиканнях у контактній мережі з метою реалізації бездугового відключення комутаційних апаратів;

6) прийом збиткової енергії рекуперації та корисне її використання;

7) підсилення живлення контактної мережі в міжпідстанційних зонах з метою недопущення провалів напруги на струмоприймачах електрорухомого складу за межі допустимого рівня;

8) зменшення струмових навантажень на живлячу мережу в моменти “пікового” споживання тягового струму.

Заявлені основні технічні характеристики ПА-5200 такі:

Напруга живлення:

Число фаз	3
Номінальне значення, кВ	10
Номінальна вихідна потужність ПА, кВт	5200
Режими роботи ПА з номінальною вихідною потужністю	тривалий
Номінальна вихідна напруга $U_{dN}$ , кВ	3,3
Максимальна вихідна напруга $U_{dm}$ , кВ, не більше ніж	4,0



Номинальний вихідний струм $I_n$ , А	1600
Діапазон робочих вихідних струмів, А	0÷1600
Допустима амплітуда струму короткого замикання тривалістю 0,2 с, А, не більше ніж	4000
Коефіцієнт корисної дії ПА, не менше ніж	0,985
Коефіцієнт потужності ПА, не нижчий ніж	0,985

Параметр	Рід струму передаваної енергії підсилення					
	постійний		змінний			
	Найменування пристрою підсилення					
	Пункт підвищеної напруги		Блок перетворення напруги	Блок розподіленого живлення	Одноагрегатний тяговий блок ОТБ з трансформатором	
	ППН-6000/6.6	ППН-6000/14	БППН-6000/10,5	БППН-6000/10,5	ТРСЗПА-6300/35	ТРСЗПА-6300/10,5
Вхідна напруга $U_1$ , кВ постійного струму (максимальне) змінного струму (лінійне)	6,6 -	14,0 -	- 10,5	- 10,5	- 35,0	- 10,5
Вхідний струм $I_1$ , А постійного струму змінного струму (фазний)	1000 -	470 -	- 330	- 330	- 94	- 314
Вхідна потужність постійного струму, кВт змінного струму (удавана), кВА	6600 -	6600 -	- 6000	- 6000	- 5698	- 5710
Вхідна номінальна потужність $P_{дн}$ , кВт	6000	6480	5640	5640	5550	5550
Номінальний випрямлений струм $I_{дн}$ , А	1685	1800	1560	1560	1500	1500
Максимальний випрямлений струм $I_{дм}$ , А	2000	(2020)	(1760)	(1760)	(1500)	(1500)
Стабілізована вихідна напруга $U_{дст}$ , В	3560	3600 3400 3200	3600 3400 3200	3600 3400 3200	3700 3600 3500	3700 3600 3500
Втрати потужності $\Delta P$ , кВт	120	120	120	120	100	100
ККД, %	98	98	98	98	98,7	98,5

## 2.3. Енергетичні канали розподіленої системи тягового електропостачання

У разі застосування системи розподіленого живлення (СРЖ) тягової мережі в міжстанційних зонах використовують два підходи:

- підсилення СТЕ за допомогою перетворювальних пунктів послідовного типу, які включаються в розріз контактної мережі на ділянках між тяговими підстанціями й живлення яких забезпечується від повздовжньої трифазної системи живлення змінного струму;

- підсилення СТЕ за допомогою перетворювальних пунктів паралельного типу, які підключаються до тягової мережі на ділянках між тяговими підстанціями й живлення яких забезпечується від спеціального фідера тягових підстанцій підвищеної напруги постійного струму (порівняно з напругою тягової мережі).

На сьогодні також опрацьовано декілька інших варіантів побудови систем розподіленого живлення, зокрема й із застосуванням змінного струму підвищеної частоти з напівхвильовим налаштуванням для живлення пунктів підсилення (ПП) тягової мережі. Розглянемо більш детально існуючі схемотехнічні рішення побудови енергетичних каналів СТЕ розподіленого типу.

### *1) Енергетичні канали з поздовжньою лінією змінного струму.*

Вперше застосування ліній змінного струму було запропоноване для живлення вольтододаткових пристроїв (ВДП) для підсилення тягової мережі проф. Кисляковим В. О. [20]. Схема живлення ВДП наведена на рис. 2.6.

На сьогодні схемотехніка енергетичних каналів змінного струму не змінилася. Для підвищення економічних показників функціонування СТЕ на сьогодні пропонується застосування більш високих напруг – 35 та 110 кВ [72, 81].

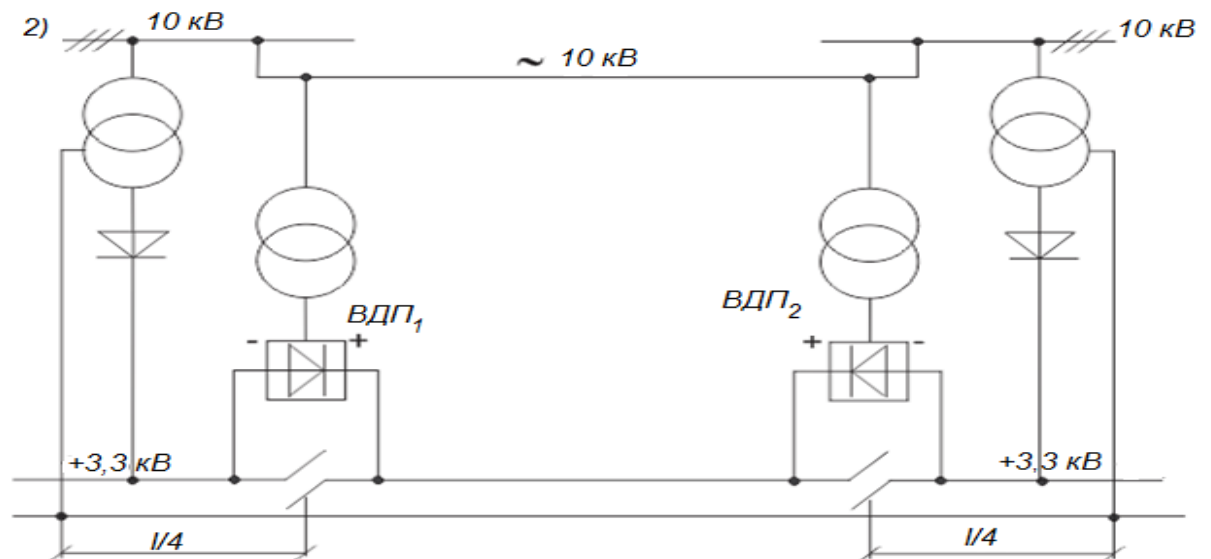


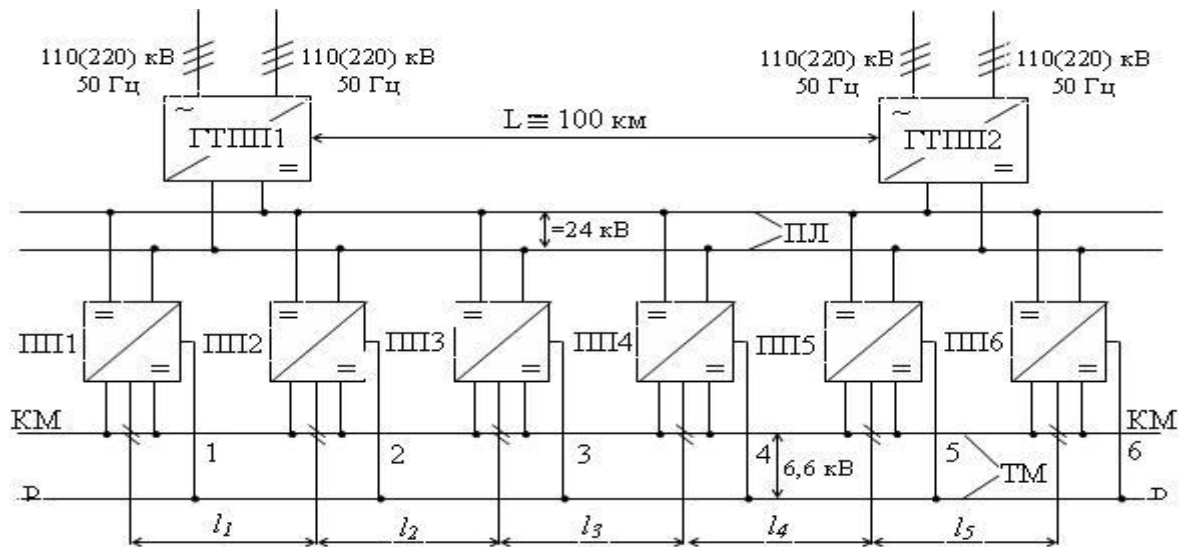
Рисунок 2.6 – Живлення ВДП від поздовжньої високовольтної лінії змінного струму

2) *Енергетичні канали з поздовжньою лінією постійного струму.*

Лінія постійного струму для живлення перетворюючих пунктів 6/3 кВ була запропонована в роботі [82]. На сьогодні для підвищення енергетичної ефективності СТЕ пропонується застосування ліній постійного струму з напругою 12, 24, 48 кВ.

Враховуючи високий рівень існуючих напівпровідникових приладів, кабельної продукції, ізоляційних і феромагнітних матеріалів, найбільш перспективною схемою розподіленого тягового електропостачання постійного струму є схема (рис. 2.7) на основі поздовжньої високовольтної лінії постійного струму з двостороннім живленням від перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій напругою 48 (24) кВ та перетворювальними пунктами живлення тягової мережі напругою 3 кВ на основі оборотних електронних трансформаторів постійної напруги 24/3 кВ [83].

У схемі рис. 2.7 двостороннє живлення поздовжньої високовольтної лінії напругою 24 кВ забезпечується головними (опорними) тяговими перетворювальними підстанціями ГТПШ, розміщеними у місцях розвинутого зовнішнього електропостачання, що забезпечує ГТПШ двома–трьома незалежними вводами трифазного змінного струму напругою 110 (220) кВ.



ГТПШ1, ГТПШ2 – головні (опорні) тягові перетворювальні підстанції; ПЛ – поздовжня високовольтна лінія постійної напруги 24 кВ; ПП1-ПП6 – перетворювальні пункти живлення тягової мережі (ТМ); КМ – контактна мережа; РМ – рейкова мережа

Рисунок 2.7 – Структурна схема децентралізованого (розподіленого) тягового електропостачання постійного струму напругою 6,6 кВ з поздовжньою високовольтною лінією постійної напруги 24 кВ

Однією з переваг розглянутої схеми децентралізованого тягового електропостачання з поздовжньою високовольтною лінією є можливість використання гнучкого способу резервування потужності її перетворювальних частин. Так, при виході з ладу одноагрегатного перетворювального пункту живлення тягової мережі, розрахунковий розмір руху на ділянках лінії повинен забезпечуватися за рахунок півторакратного запасу потужності сусідніх перетворювальних пунктів живлення. Для резервування потужності головних тягових перетворювальних підстанцій доцільно використовувати традиційний спосіб, тобто установку на них одного резервного перетворювального агрегату.

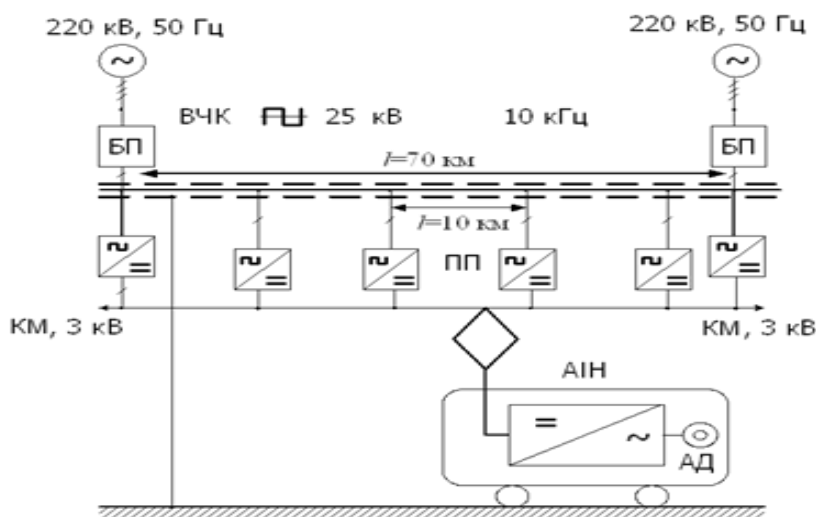
### 3) Енергетичні канали зі вставкою постійного струму.

Основна перевага СРЖ полягає в скороченні кількості зв'язків з живлячою системою СЗЕ. Останнім часом посилено розробляється для

залізниць змінного струму варіант СРЖ з використанням як поздовжньої лінії (ПЛ) однофазного кабелю при його живленні синусоїдальною напругою 50-100 кВ, 50 Гц. Пункт підсилення (ПП) виконується при цьому на основі однофазного трансформатора, що знижує напругу до величини 25 кВ в основній КМ [84]. Якщо застосувати СРЖ для живлення залізниці постійного струму, то на ПП, окрім знижувального трансформатора, необхідно встановити однофазний випрямляч з фільтром. Зберігаючи зазначену перевагу СРЖ, така структура має, проте, такі недоліки:

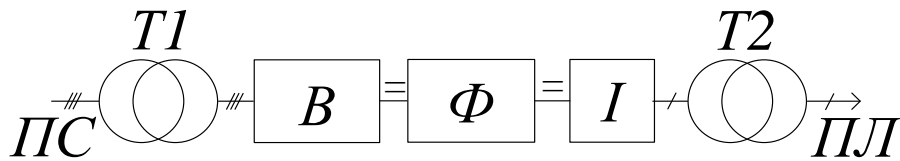
- несиметричне навантаження фаз СЗЕ;
- велика встановлена потужність трансформатора і фільтрів на ПП за рахунок низької частоти  $f = 50$  Гц напруги, що випрямляється.

Ці недоліки долаються, якщо тягова підстанція виконується як вставка постійного струму (ВПС), за допомогою якої в ПЛ формується однофазна напруга підвищеної частоти  $f_n$  з формою, близькою до прямокутної - меандру з обмеженим спектром (МОС) [84]. Загальна структура СРЖ відповідає при цьому рис. 2.8, а структура базового перетворювача (тягової підстанції) – рис. 2.9.



ВЧК – високовольтний високочастотний кабель; АІН – автономний інвертор напруги; АД – асинхронний тяговий двигун

Рисунок 2.8 – Структура системи розподіленого живлення



T1 і T2 – живлячий і навантажувальний трансформатори; В – трифазний випрямляч; Ф – фільтр в ланці постійного струму; I – однофазний інвертор

Рисунок 2.9 – Базовий перетворювач (тягова підстанція) як вставка постійного струму

Встановлена потужність трансформатора й фільтрів на ПП скорочується за рахунок підвищеної частоти  $f_n$ , а для фільтрів також за рахунок прямокутної форми напруги, що випрямляється. Крім того, при ідеальному прямокутнику співвідношення між амплітудним і дійсним значеннями дорівнює одиниці, тоді як для синусоїди воно дорівнює  $\sqrt{2}$ . За рахунок цього вдвічі скорочується встановлена потужність напівпровідникових ключів, зумовлена добутком амплітудних значень напруги і струму, а також поліпшується використання ізоляції кабелю.

Наявність навантажувального трансформатора T2 практично окупається за рахунок того, що використання живлячого трансформатора зростає до 100 % проти 68 % у структурі без ВПС. У перспективі, з вдосконаленням силових напівпровідникових ключів, придатних для застосування в інверторі, навантажувальний трансформатор може бути виключений зовсім. ВПС, як регульований об'єкт, надає системі електропостачання додаткові переваги: розширюються можливості стабілізації напруги та її регулювання з метою контролю вирівнювальних струмів через СЗЕ, обмежуються аварійні струми та ін. [84].

#### 4) Енергетичні канали з проміжною ланкою підвищеної частоти.

Перспективним напрямком створення ЕК є розробка систем живлення з проміжною ланкою підвищеної частоти. Структури напівпровідникових джерел

живлення з проміжною ланкою підвищеної частоти (ПЛПЧ) набула широкого застосування при малій потужності навантаження. Їхні основні переваги:

- за рахунок підвищення частоти радикальним чином скорочуються розміри силових електромагнітних елементів (трансформаторів і фільтрів);
- з тієї ж причини підвищується коефіцієнт корисної дії;
- за рахунок введення додаткових перетворювачів розширюються можливості управління.

Останнім часом з'явилися потужні швидкодіючі напівпровідникові прилади з необхідними характеристиками, і разом з ними виникла можливість впровадження ПЛПЧ в системі живлення електрифікованих залізниць. Проте порівняно з традиційним застосуванням ПЛПЧ системи електропостачання залізниць створюють додаткові труднощі, пов'язані з уведенням у ПЛПЧ об'єкта з розподіленими параметрами (у цьому випадку поздовжньої лінії) (ПЛ) і підвищеною потужністю, що підсилює негативні ефекти при підвищенні частоти, зокрема, скін-ефект у провідниках поздовжньої лінії й додаткові втрати в ізоляції [85].

Вказана структура містить як первинне джерело живлення трифазну промислову мережу, яка підключається через тягові підстанції (ТП), розташовані на відстані приблизно 150–200 км одна від одної. На кожній підстанції встановлюється базовий перетворювач (БП), який виробляє однофазну напругу частотою 150 або 300 Гц, величиною порядку 50 кВ і формою, що наближається до прямокутної (меандр). Ця напруга подається в поздовжню лінію, за яку доцільно використовувати коаксіальний кабель. Через проміжні пункти живлення (ПП), розташовані з інтервалом приблизно 10 км, від поздовжньої лінії живиться основна контактна мережа (КМ) постійного струму напругою 3 кВ. Застосування підвищеної частоти 300 Гц на ПП дозволяє приблизно втричі скоротити розміри трансформаторів і фільтрів на ПП, що з великим запасом перекидає витрати на додаткове електроустаткування на ТП, оскільки його встановлена потужність у декілька



разів менше сумарної встановленої потужності електроустаткування на ПП. Застосування меандра замість синусоїди майже удвічі скорочує встановлену потужність напівпровідникових приладів, а також покращує використання ізоляції кабелю за рахунок того, що для ідеального меандра співвідношення між амплітудним і діючим значеннями дорівнює одиниці, тоді як для синусоїди воно рівне  $\sqrt{2}$ . Можливе також подальше підвищення частоти в поздовжній лінії за умови розв'язання задачі хвильового налаштування системи розподіленого живлення.

Для подолання зазначених проблем пропонується режим напівхвильового налаштування[85]. Він полягає у використанні такої частоти  $f = 1/T$  основної гармоніки напруги в кабельній ПЛ, щоб на відрізку  $l_n$  між сусідніми ПЛ укладається одна напівхвиля напруги.

Застосування системи розподіленого живлення контактної мережі від кабельної поздовжньої лінії з підвищеною частотою змінної напруги дозволяє приблизно на порядок зменшити масу силових електромагнітних елементів у випрямних агрегатах, скоротити в кілька разів кількість зв'язків з живильною енергосистемою й розширити можливості керування системою електропостачання

Режим напівхвильового налаштування системи усуває індуктивний спад напруги в поздовжній лінії, що дозволяє використовувати некеровані випрямлячі, і знижує чутливість до резонансних явищ. Це дає можливість застосовувати в поздовжній лінії квазіпрямокутну форму напруг і струмів, що забезпечує вищі енергетичні показники порівняно із синусоїдальною. Зміною співвідношення між хвильовим опором кабелю й опором номінального навантаження можна до 2-3 разів знизити втрати холостого ходу в поздовжній лінії.

5) *Енергетичні канали із застосуванням альтернативних джерел електричної енергії.*

Концепція застосування альтернативних джерел для живлення ПП тягової мережі розвивається на кафедрі ІСЕ протягом останніх років під керівництвом проф. Сиченка В. Г. [86-88]. На сьогодні у світі існують приклади успішного впровадження використання електроенергії, отриманої від відновлювальних джерел, у системі електричної тяги. Так, у 2011 році було відкрито рух поїздів за маршрутом Париж-Амстердам з використанням енергії сонця від фотобатарей, встановлених на маршруті руху поїзда.

На думку вчених, децентралізація виробництва електроенергії є важливою складовою інноваційно-технологічного забезпечення структурного реформування енергетичної галузі з метою підвищення її ефективності й дозволяє серед іншого зменшити: втрати електроенергії при транспортуванні через максимальне наближення джерела до споживача, кількість і довжину магістральних ЛЕП, наслідки аварій на центральних електростанціях і головних ЛЕП, а також забезпечити взаємне багатократне резервування електрогенеруючих потужностей.

Перевага живлення ПП від сонячних батарей полягає в тому, що немає необхідності в монтажі додаткової живлячої лінії від тягової підстанції тобто забезпечується незалежність їх роботи від неї. Схема лінійного ПП складається з однофазного інвертора на IGBT транзисторах, перетворювального трансформатора й випрямляча. Для зменшення вагогабаритних розмірів трансформатора використовується напруга підвищеної частоти (700 Гц), а осердя трансформатора виконане з аморфного сплаву [88]. Більш детально синтез СРЖ з АДЕ розглянутий у кандидатській дисертації Косарева Є. М. [89].

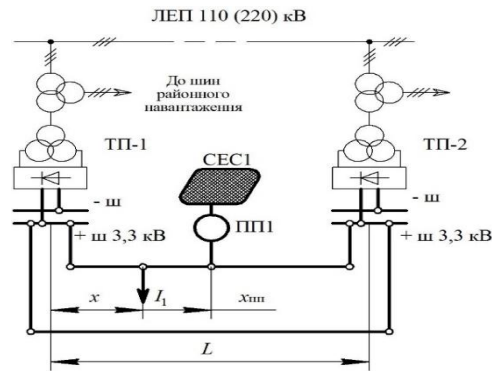


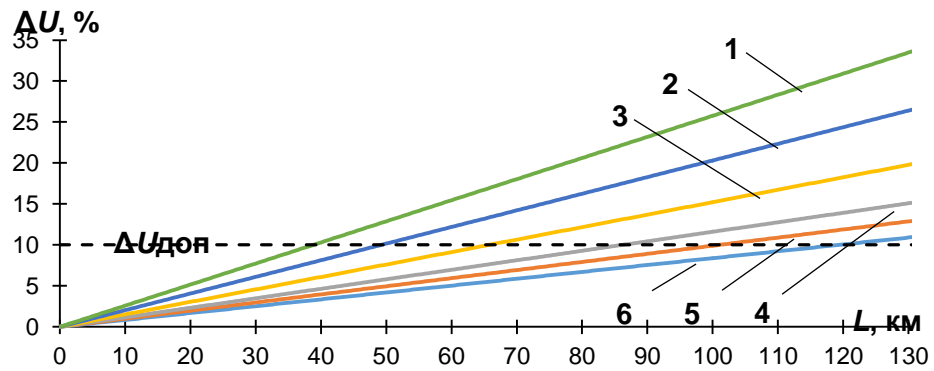
Рисунок 2.10 – Структура СТЕ із СЕС

Необхідно вказати, що розглянуті вище засоби для побудови каналів живлення пунктів підсилення мають здебільшого теоретичний характер та потребують значних капіталовкладень в інфраструктуру. Тому більш доцільно надалі розглядати засоби підвищення ефективності тягового електропостачання постійного струму напругою 3,3 кВ у рамках існуючої інфраструктури за рахунок використання на міжпідстанційних зонах елементів розподіленої структури живлення тягової мережі, тобто ліній поздовжнього електропостачання змінного струму.

*б) Оцінка доцільності живлення пунктів підсилення напругою 35 кВ.*

У роботі [90] було показано, що найбільш доцільним варіантом для підвищення ефективності поздовжніх ліній електропостачання на електрифікованих залізницях є застосування напруги 35 кВ. У цьому контексті необхідно виконати оцінку можливості застосування трифазних ліній електропостачання 35 кВ для побудови ЕК розподіленої СТЕ. Виконаємо розрахунок цієї лінії за таких умов: відстань між тяговими підстанціями 20 км; потужність пункту підсилення становить (5) 4 МВт; ПП знаходиться посередині розрахункової зони. Розрахунок виконувався за відомою методикою [91].

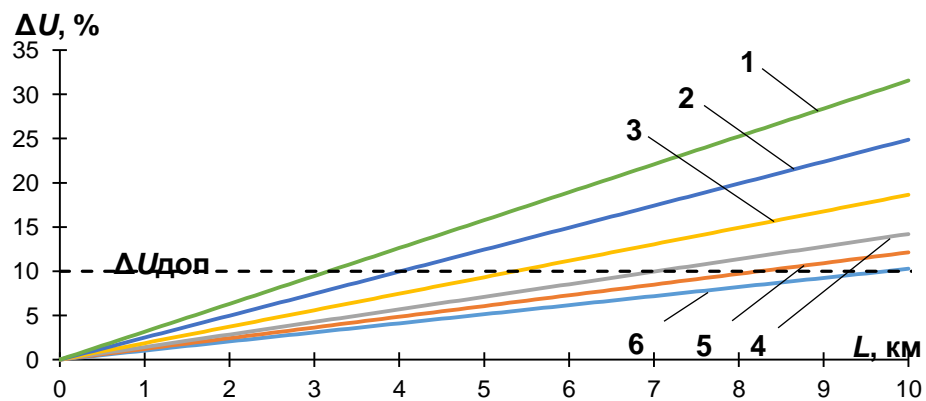
Для розрахунку приймається потужність мережевої обмотки трансформатора перетворювального агрегату 6 300 кВА. Розрахунки здійснювалися для ліній напругою 35 кВ та 10 кВ з проводами АС-35, АС-50, АС-70, АС-95, АС-120 та АС-150. Результати розрахунку наведено на рис. 2.11 та 2.12.



1 – провід АС-35; 2 – провід АС-50;

3 – провід АС-70; 4 – провід АС-95; 5 – провід АС-120; 6 – провід АС-150

Рисунок 2.11 – Втрати напруги в лінії 35 кВ



1 – провід АС-35; 2 – провід АС-50;

3 – провід АС-70; 4 – провід АС-95; 5 – провід АС-120; 6 – провід АС-150

Рисунок 2.12 – Втрати напруги в лінії 10 кВ

За результатом розрахунку було отримано допустимі довжини ліній для живлення підсилювального пункту (табл. 2.2) [92].

Таблиця 2.1 – Допустимі довжини ліній

Марка проводу	Допустима довжина лінії 35 кВ, км	Допустима довжина лінії 10 кВ, км
АС-35	38,5	3,2
АС-50	49	4
АС-70	65,5	5,4
АС-95	86,5	7
АС-120	101	8,2
АС-150	119,5	9,8

Таким чином, при живленні ПП від мережі 35 кВ можна прокласти живлячу лінію проводами АС-35, але в існуючій практиці проектування ліній поздовжнього електропостачання за умовами механічної міцності необхідне застосування проводу АС-70 [93]. У разі живлення ПП від існуючої лінії ПЕ-10 кВ, ПП необхідно розташовувати не далі ніж за 5,5 км від ТП, в іншому випадку необхідно підсилювати лінію ПЕ. Необхідно також зауважити, що для підвищення ефективності використання ліній 35 кВ, що живлять пункти підсилення у розподіленій системі, можливе застосування проводів СІП [94, 95].

#### **2.4. Синтез системи тягового електропостачання розподіленого типу підвищеної ефективності**

Вирішення проблеми вдосконалення системи постійного струму 3,0 кВ дозволяє, по-перше, зберегти існуючі промислову й сировинну бази й не вимагає відкриття нових галузей; по-друге, не потребує збільшення людських ресурсів і появи нових професій; по-третє, дозволяє практично без істотних доповнень використати існуючу систему технічного обслуговування системи постійного струму і, по-четверте, забезпечує отримання економічного ефекту від запровадження руху швидкісних поїздів і поїздів підвищеної маси [81].

За результатами аналізу науково-технічних публікацій та експериментальних досліджень можна сформулювати вимоги до СРЖ підвищеної ефективності:

- необхідна потужність тягових підстанцій та підсилювальних пунктів;
- кількість тягових агрегатів;
- кількість підсилювальних пунктів;
- відстань між тяговими підстанціями та підсилювальними пунктами;
- питома потужність тягової мережі;
- переріз контактної мережі.

Як уже зазначалось вище, при побудові СРЖ на сучасному етапі розвитку інвестиційного клімату при впровадженні швидкісного та великовагового руху

необхідно максимально використовувати існуючу інфраструктуру тягового електропостачання. Насамперед мова повинна йти про розташування тягових підстанцій та пунктів підсилення. На першому етапі впровадження СРЖ доцільно було б зберегти існуючі координати їх розташування. При цьому необхідно вирішити питання доцільної потужності тягових підстанцій та пунктів підсилення.

На сьогодні сформовано два основні підходи до побудови СРЖ:

- використання опорних підстанцій з розташованими між ними пунктами живлення на визначених відстанях [69, 81, 86]:
- використання однотипних одноагрегатних підстанцій з однаковими відстанями між ними [64, 72].

Кожна з цих концепцій має право на застосування. Водночас виконані дослідження (у зв'язку з реальною відсутністю випрямлячів на 24 кВ) показали, що застосування одноагрегатних тягових підстанцій (ОАП) є найбільш доцільним [96]. Для мінімізації капітальних вкладень в ЕК СРЖ, живлення ОАП має здійснюватись ЛЕП 35 кВ.

За існуючої системи централізованого живлення потужність тягових підстанцій розраховується за методикою, наведеною в [97, 98]. Ця методика затверджена і в існуючих нормативних документах Укрзалізниці [99]. Водночас потужність, розрахована таким чином, значно перевищує рівень необхідної доцільності та резервування. Так, в 1985-89 роках, коли на залізницях СРСР спостерігався значний обсяг перевезень, коефіцієнт використання встановленої потужності двох перетворювальних агрегатів тягових підстанцій Жовтневої дороги становив 11,6 відсотка, Московської - 19,25, Куйбишевської - 17, Свердловської - 11,8, Південно-Уральської - 16,3, Західно-Сибірської - 21,9 відсотка [93]. Можна констатувати, що і на сучасному етапі коефіцієнт використання встановленої потужності є доволі низьким (табл. 1.3), та не перевищує 20 %. Досвід впровадження швидкісного руху на постійному струмі доводить цю тенденцію. Так, середній струм тягової підстанції Соняшнікова,

що розташована між підстанціями Клин і Крюково на ділянці Москва–Санкт-Петербург, становить 2021 А, максимальний - 3086 А, однохвилинний - 2936 А, трихвилинний - 2515 А, двадцятихвилинний - 2093 А. Максимальний коефіцієнт навантаження двох перетворювальних агрегатів складає 0,32, а одного - 0,64 [100]. Таким чином, підстанції недовантажені й навіть при одному працюючому перетворювальному агрегаті його потужність використовується на 64 відсотки, тобто використовувана потужність становить 7,68 МВт. При цьому мінімальна напруга в контактній мережі на ділянці Клин - Крюково дорівнює 2907 В, середнє (однохвилинне) - 2962 В. За таких навантажень виправданою є робота зазначених вище тягових підстанцій з одним перетворювальним агрегатом.

Як уже зазначалось, на початковому етапі впровадження швидкісного руху зі швидкостями 200-250 км/год виникає необхідність у найкращому використанні вже існуючих пристроїв системи постійного струму 3,0 кВ з найменшими капітальними і експлуатаційними витратами. Виходячи з наведених вище міркувань розрахункова використовувана потужність тягових підстанцій за даними таблиці 1.5 при наявному  $K_3$  буде в межах 2,5...10 МВт, а середня потужність становитиме 6,26 МВт.

У рамках виконуваних нині робіт з модернізації тягових підстанцій на електрифікованих ділянках постійного струму [101] відбувається заміна застарілих випрямлячів на більш сучасні 12-пульсні випрямлячі виробництва НПО “Перетворювач” типу В-ТПЕД-М-12П-3,15к-3,3к У4 [41], потужність яких становить 10,395 МВт. При їх застосуванні за вимогами [99], агрегатна потужність тягової підстанції дорівнюватиме 20,79 МВт, що значно перевищує необхідні значення для забезпечення швидкісного та інтенсивного руху (ШіР). Звідси, більш доцільним є застосування випрямлячів ПА потужністю 5,2 (4,2) МВт. Їх застосування дозволить забезпечити необхідну потужність для живлення СРЖ, і виконати умови резервування, оскільки в СРЖ, резервування здійснюється за рахунок перерозподілу потужності між підстанціями. Для

забезпечення необхідного резерву на тяговій підстанції доцільно застосовувати два ПА, які працюють паралельно у вимушеному режимі. Як ОАП може бути застосований один ПА5200 (4200).

На наступному етапі синтезу необхідно вирішити завдання визначення кількості ОАП між опорними підстанціями (ОП). При цьому критерієм оптимізації є необхідність дотримання заданого рівня напруги та питомої потужності ТМ. У працях [72, 96] було доведено, що розподілена система тяги поїздів з живлячою лінією змінного струму промислової частоти має одну незаперечну перевагу: вона може бути реалізована «прямо зараз», усе необхідне обладнання випускається промисловістю. Потужність ТП і ОАП та відстань між ними – фактори взаємопов'язані та повинні забезпечувати норми питомої потужності й нормовані рівні напруги. Відповідно до прийнятої нами концепції мінімізації затрат на розроблювану систему розподіленого живлення, відстані між ТП та ОАП визначаються існуючою схемотехнікою живлення тягової мережі (рис. 2.13, а).

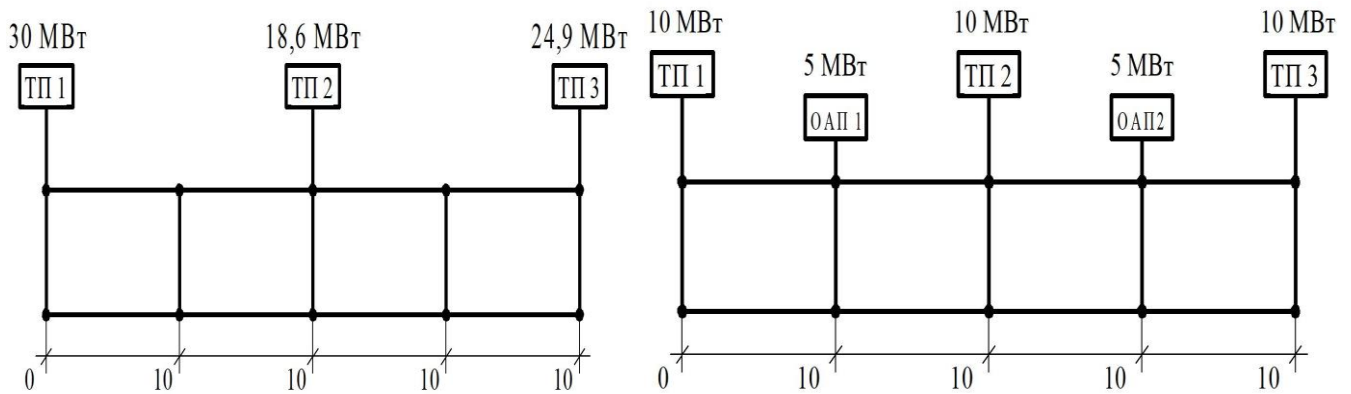
Необхідно вказати, що регулювання режимів електроспоживання на існуючих ділянках електрифікованих залізниць для пропуску ШіР здійснюється за рахунок збільшення міжпоїзного інтервалу. При цьому питома потужність змінюється таким чином, як вказано в табл. 2.2 [103].

Таблиця 2.2 – Зміна питомої потужності

Інтервал, хв	8	12	18
Питома потужність, кВт/км	480	330	220

Аналізуючи дані таблиці 2.3, треба брати до уваги, що коли ділянкою рухаються поїзди вказаної категорії, на МПЗ розташований тільки один поїзд. Звідси, для заданих умов руху достатнім буде розташування однієї ОАП на ПСК. Для підтвердження цієї гіпотези виконаємо розрахунок запропонованої структури СРЖ. Для оціночних розрахунків використовувалася симетрична система живлення, наведена на рис. 2.13, б. Схема пропонуваного одноагрегатного ТП представлена у додатку В.





а – існуюча система тягового електропостачання; б – пропонована структура системи розподіленого живлення

Рисунок 2.13 – Синтез структури СРЖ

Використовуючи залежності, отримані в [103], можна визначити втрати напруги до струмоприймача ЕРС, що розташований на розрахунковій МПЗ, за умови споживання ним сталої потужності:

$$\Delta U = \frac{U_{\text{ш}} - \sqrt{U_{\text{ш}}^2 - 4f(x)P}}{2f(x)} \cdot f(x), \quad (2.1)$$

де  $U_{\text{ш}}$  – напруга на шинах тягової підстанції, В;

$f(x)$  – функція опору розрахункової МПЗ;

$P$  – потужність, яку споживає ЕРС, Вт.

У наведеному виразі функція опору визначає схему живлення МПЗ. Визначення  $f(x)$  для різних схем живлення МПЗ та для електрифікованої ділянки з будь-якою кількістю тягових підстанцій та міжпідстанційних зон наведено в (2.2). Зважаючи на те що при розподіленій системі електропостачання схема живлення МПЗ буде двосторонньою, подальші розрахунки наведені саме для цієї схеми живлення. Таким чином, функція опору для двосторонньої схеми:

$$f(x) = r_0 \left( x - \frac{x^2}{L} \right), \quad (2.2)$$

де  $r_0$  – питомий опір тягової мережі, Ом;

$x$  – відстань від ТП до ЕРС, км;

$L$  – довжина МПЗ, км.

Підставивши вираз (2.1) в (2.2), можна визначити відстань від тягових підстанцій, на яку можна передати потужність для живлення ЕРС при заданому рівні втрат напруги в тяговій мережі.

Для першої ТП:

$$x_1 = \frac{L \left( \frac{\sqrt{P \cdot r_0 \cdot (4\Delta U^2 - 4U_{\text{ш}}\Delta U + LPr_0)}}{\frac{L}{2}} - \frac{Pr_0}{2} \right)}{Pr_0}, \quad (2.3)$$

Для другої ТП:

$$x_2 = \frac{L \left( \frac{\sqrt{P \cdot r_0 \cdot (4\Delta U^2 - 4U_{\text{ш}}\Delta U + LPr_0)}}{\frac{L}{2}} + \frac{Pr_0}{2} \right)}{Pr_0}, \quad (2.4)$$

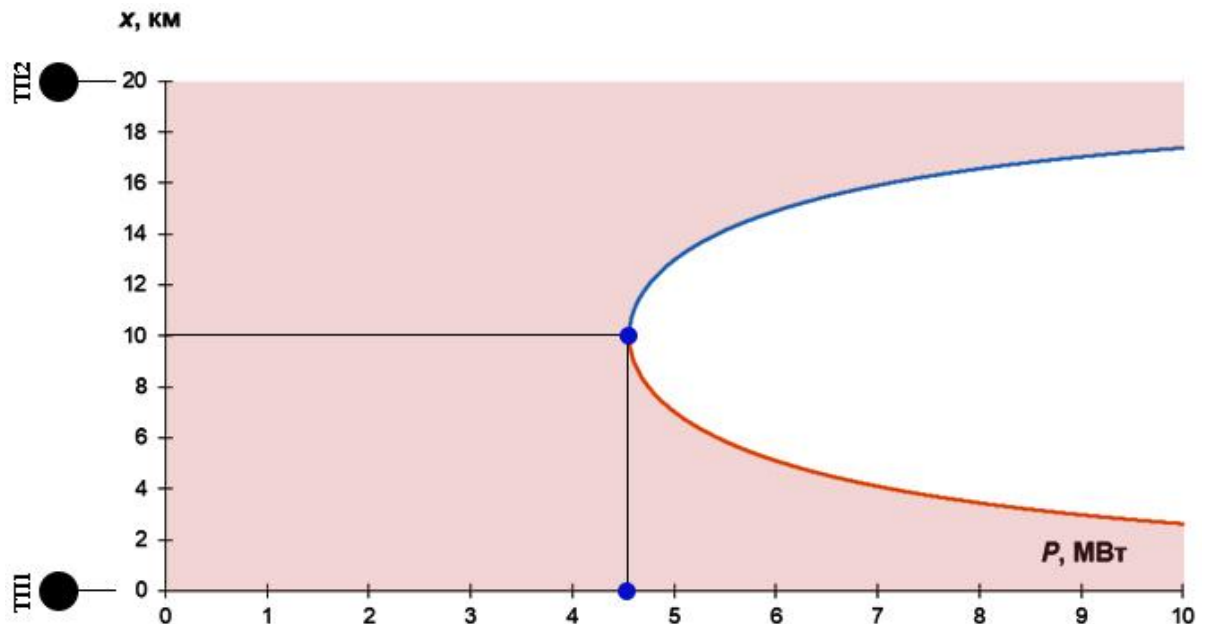


Рисунок 2.14 – Допустима відстань передачі потужності

Відстань, на яку можна передавати споживану потужність ЕРС при заданому рівні втрат напруги 400 В, наведено на рис. 2.14 та позначено

зафарбованою ділянкою. Як видно з графіка, обмеження виникають у середині міжпідстанційної зони при споживанні потужності ЕРС на рівні 4,5 МВт.

Необхідна потужність тягових підстанцій (з урахуванням втрат потужності), необхідна для забезпечення режиму сталого споживання потужності при русі ЕРС із заданим рівнем втрат напруги:

$$P(x) = \left( \frac{U_{\text{ш}} - \sqrt{U_{\text{ш}}^2 - 4r_0 \left(x - \frac{x^2}{L}\right) P}}{2r_0 \left(x - \frac{x^2}{L}\right)} \right) - \frac{U_{\text{ш}} - \sqrt{U_{\text{ш}}^2 - 4r_0 \left(x - \frac{x^2}{L}\right) P}}{2r_0 \left(x - \frac{x^2}{L}\right)} \cdot r_0 \left(x - \frac{x^2}{L}\right). \quad (2.5)$$

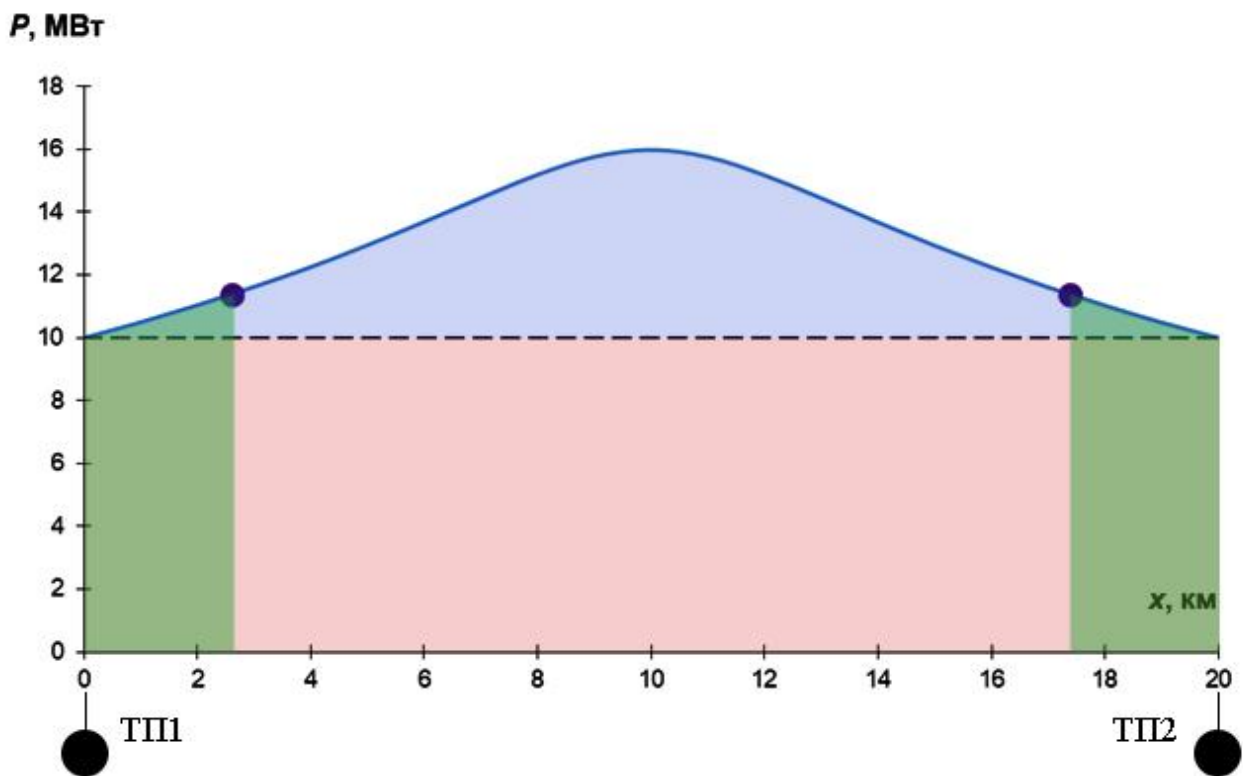


Рисунок 2.15 – Потужність тягових підстанцій для забезпечення режиму споживання сталої потужності

У цих розрахунках використовувалися такі вихідні дані: напруга на шинах ТП 3300 В, довжина МПЗ 20 км, допустимі втрати напруги 400 В, тягова мережа М120+2МФ100+А185+Р65, споживана потужність ЕРС 10 МВт.

На рис. 2.15 ділянка човоного кольору відображає потужність (10 МВт), що споживає ЕРС під час руху міжпідстанційною зоною. Ділянка синього кольору відображає потужність, яку необхідно передавати тяговими підстанціями для забезпечення режиму споживання сталої потужності електрорухомим складом. Зеленим кольором позначені ділянки, на яких можливо передавати споживану потужність ЕРС при заданому рівні втрат напруги 400 В. Тому впровадження розподіленої системи, з меншими довжинами МПЗ та регульованими ПА може вирішити цю проблему. Розташування додаткового ПА в середині МПЗ дозволяє при підвищенні напруги на шинах ТП на 40 В забезпечити пропуск ЕРС потужністю 10 МВт при заданому рівні втрат напруги (рис. 2.16).

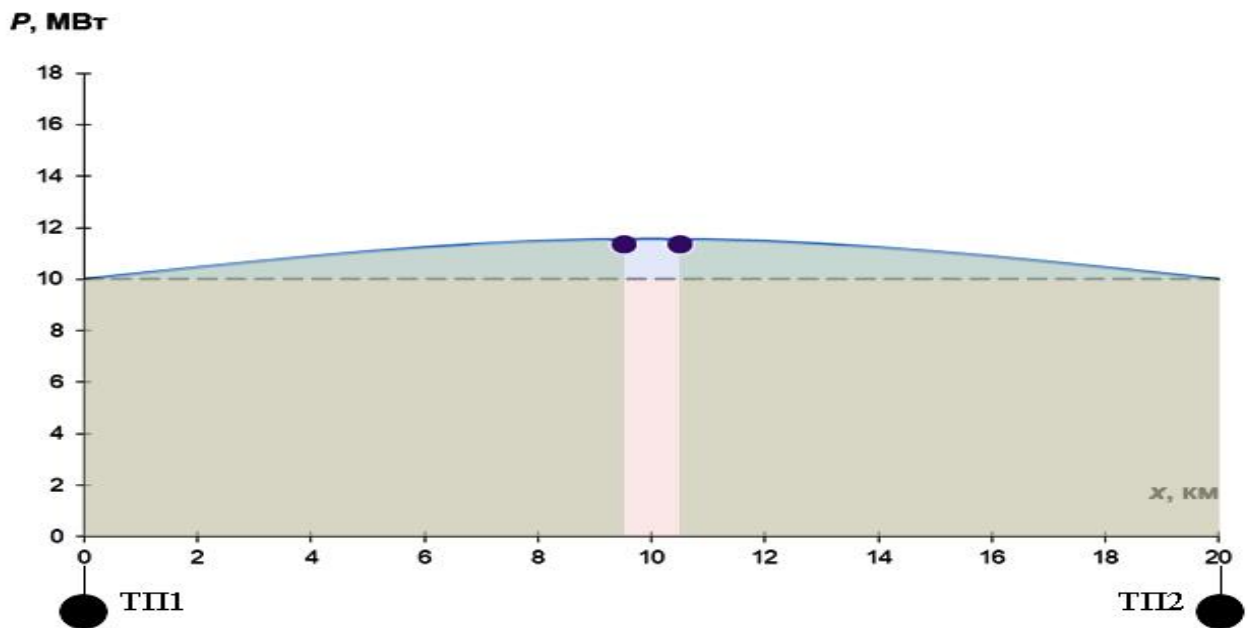


Рисунок 2.16 – Сумарна потужність тягової підстанції та додаткового ПА для забезпечення режиму споживання сталої потужності при розподіленому живленні

При цьому необхідний рівень питомої потужності МПЗ для пропуску ЕРС, залежно від напруги на шинах ТП, змінюється так, як показано на рис. 2.17.

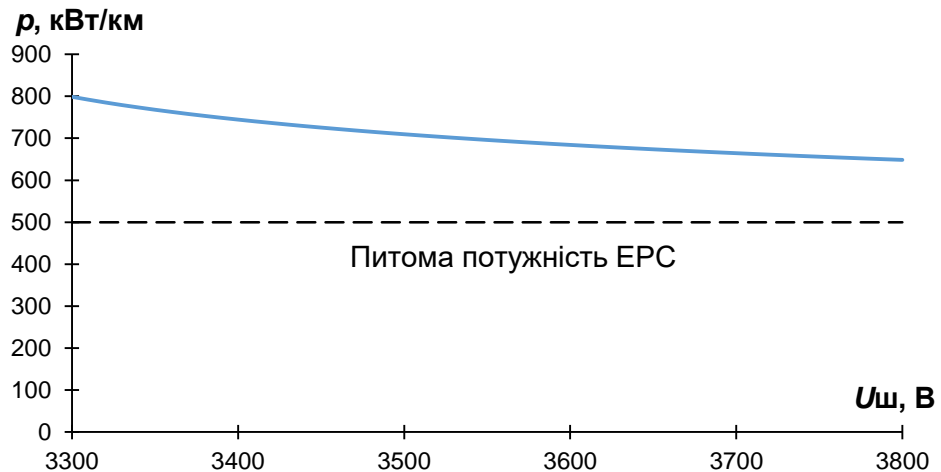


Рисунок 2.17 – Зміна рівня питомої потужності МПЗ від рівня напруги на шинах

## Висновки до розділу 2

Синтез розподіленої системи живлення тягового навантаження є складним завданням, яке вимагає вирішення багатьох питань, пов'язаних із вибором потужності підсилювальних пунктів, елементної бази та схемотехніки, а також із знаходженням оптимального способу розрахунку цієї системи та її елементів. Задача структурно-параметричного синтезу системи електропостачання залізниці розподіленого типу містить декілька етапів, серед яких найважливішими є вибір: кількості пунктів живлення, місць їх встановлення, потужності, їх елементної бази та схемотехніки.

У результаті виконаного аналізу за допустимими втратами встановлено, що для побудови системи розподіленого живлення на сучасному етапі найбільш доцільним є використання на перегонах одноагрегатних тягових підстанцій з живленням їх ліній поздовжнього електропостачання напругою 35 кВ, виконаних проводами АС-70.

Запропоновано здійснювати перехід від системи централізованого живлення до розподіленої системи зі збереженням існуючої інфраструктури живлення тягової мережі, а саме: розташування тягових підстанцій на місці існуючих, а одноагрегатних підстанцій – на постах секціонування. При цьому в

розподіленій системі живлення на тяговій підстанції необхідне застосування двох перетворювальних агрегатів загальною потужністю 10 МВт, а для одноагрегатної підстанції – 5 МВт.

У результаті виконаних розрахунків запропонованої схемотехніки системи розподіленого живлення показано, що ця система дозволяє виконати пропуск по ділянці електрорухомого складу з нормованими рівнями питомої потужності та втрат напруги.

Основні положення розділу опубліковані в працях [66, 67, 92]

### Розділ 3. ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРОПОНОВАНОЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

#### 3.1. Режими напруги та потужності

Для оцінки режиму напруги та потужності при можливому впровадженні швидкісного руху виконувалися розрахунки для електрифікованої ділянки постійного струму Б – С Придніпровської залізниці довжиною 50,8 км. Система отримує живлення за вузловою схемою від трьох тягових підстанцій. Вихідні дані для розрахунку наведені на рис. 3.1 та в табл. 3.1.

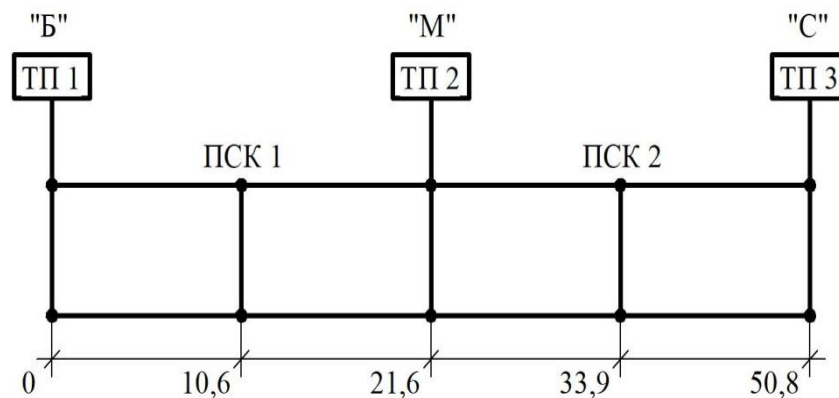


Рисунок 3.1 – Схема розрахункової ділянки централізованого живлення

Таблиця 3.1 – Параметри системи централізованого живлення

Параметр	ТП1	ТП2	ТП3
Потужність, МВт	12,6	25,2	18,9
Напруга холостого ходу, В	3397	3420	3391
Тягова мережа	М120+2МФ100+А185+Р65		

При розрахунках приймалось, що ділянкою рухається поїзд із середньою швидкістю 160 км/год, середньою споживаною потужністю 4,2 МВт та піковою потужністю 8,8 МВт. Графік руху поїзда та профіль споживаної потужності наведено на рис. 3.2 та 3.3.

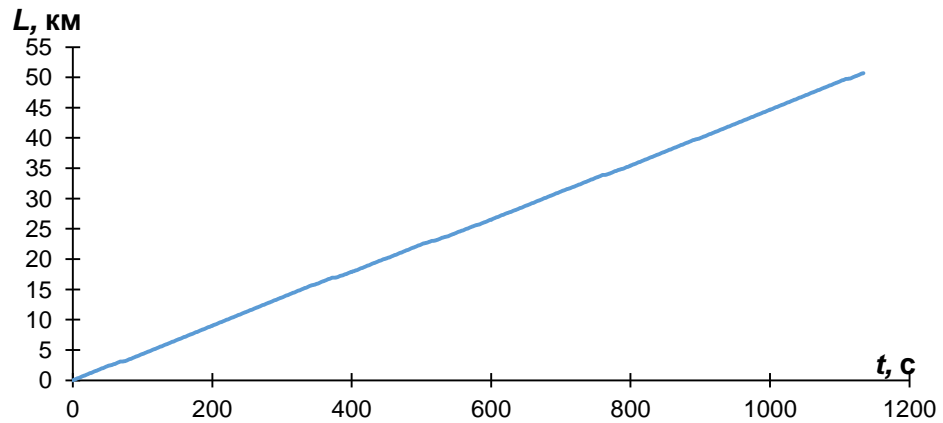


Рисунок 3.2 – Графік руху поїзда

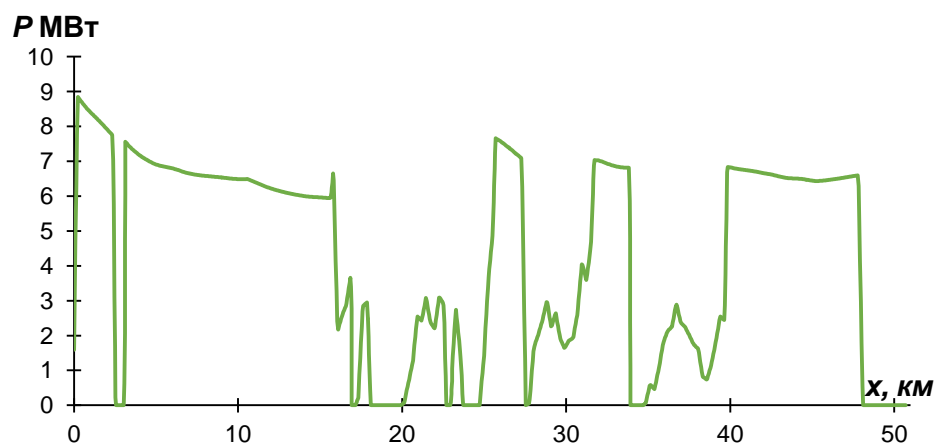


Рисунок 3.3 – Профіль споживаної поїздом потужності

Розрахунки рівня напруги виконувалися на математичній моделі [105], з можливістю урахування взаємного впливу кожного навантаження на попутній та, залежно від схеми живлення, на суміжній коліях:

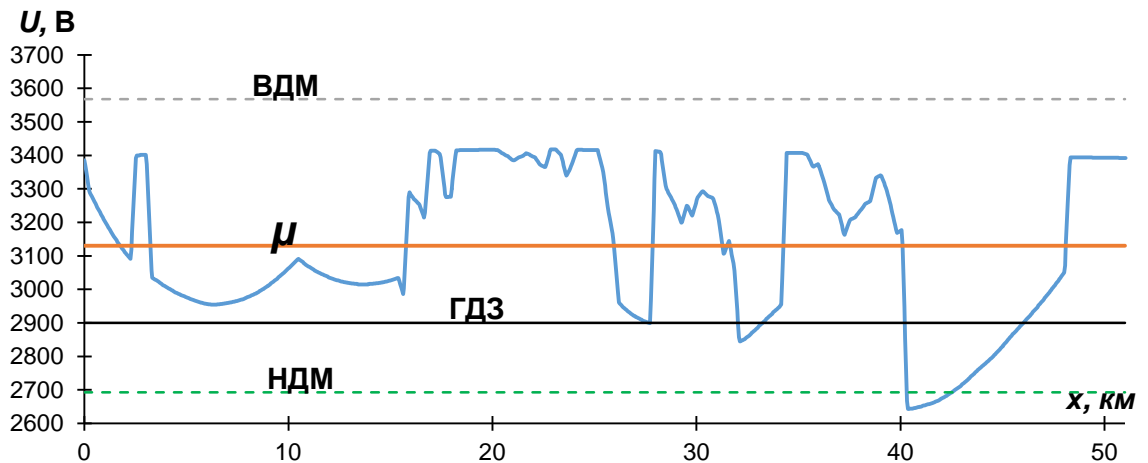
$$U_j(x) = U_{\text{ш}} - I_j(x) \cdot f_R(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n_1} \Delta U'_k(x, x_k) - \sum_{k=n_1}^{n_1+n_2} \Delta U''_k(x, x_k), \quad (3.1)$$

де  $k$  – номер навантаження на відповідній колії;  $n_1, n_2$  – кількість навантажень на 1-й та 2-й коліях;

$\Delta U'_k(x, x_k)$  – функція розподілу спаду напруги від  $k$ -го навантаження на попутній колії, В;

$\Delta U''_k(x, x_k)$  – те саме на суміжній колії, В.





ВДМ – верхня довірча межа; НДМ – нижня довірча межа; ГДЗ – гранично-допустиме значення;  $\mu$  – математичне сподівання

Рисунок 3.4 – Напруга на стрumoприймачі ЕРС

На рис. 3.4 зображено залежність зміни напруги на стрumoприймачі ЕРС. У результаті розрахунку мінімальне значення напруги на стрumoприймачі становило 2 652 В, що зумовлено складним профілем розрахункової ділянки та різким зростанням тягової потужності для підтримання сталої швидкості руху поїзда. З графіка рис. 3.4 видно, що режим напруги на електрифікованій ділянці не відповідає поставленим вимогам для впровадження швидкісного руху. Навіть при визначенні математичного сподівання вище номінального значення, рівень напруги не відповідає нормованим значенням, довірчий діапазон її зміни складає 875 В, а його нижня межа виходить за гранично-допустимий рівень напруги для швидкісного руху – 2900 В.

У результаті розрахунку за допомогою програми iSET (Додаток Б) також було визначено зміну рівня напруги на шинах тягових підстанцій під час проходження поїзда (рис. 3.5).

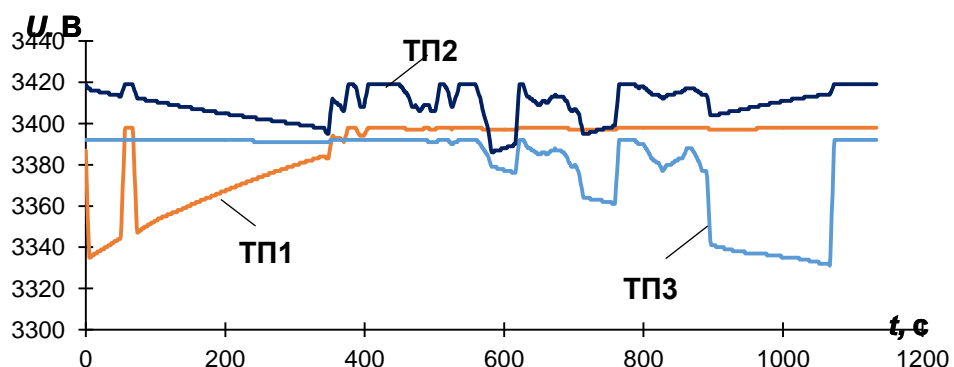


Рисунок 3.5 – Зміна рівня напруги на шинах тягових підстанцій

Як видно з рисунка, рівень напруги на шинах тягових підстанцій не виходить за межі нормованих значень, а діапазон її зміни становить 92 В в середньому для трьох тягових підстанцій.

Для оцінки режиму напруги при розподіленому живленні розрахунки проводилися за аналогічних умов руху поїзду та параметрів колії. Відмінність полягала в схемі живлення тягової мережі. Для розподіленої системи живлення були обрані керовані перетворювальні агрегати ПА-5200 по 2 агрегати на кожній тяговій підстанції та по одному агрегату на посту секціонування. Вихідні дані для розрахунку наведено на рис. 3.2, 3.3, 3.6 та в табл. 3.2.

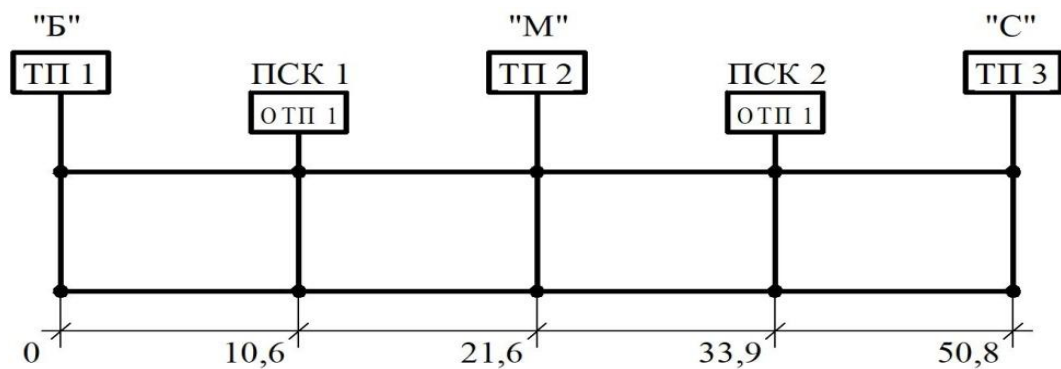
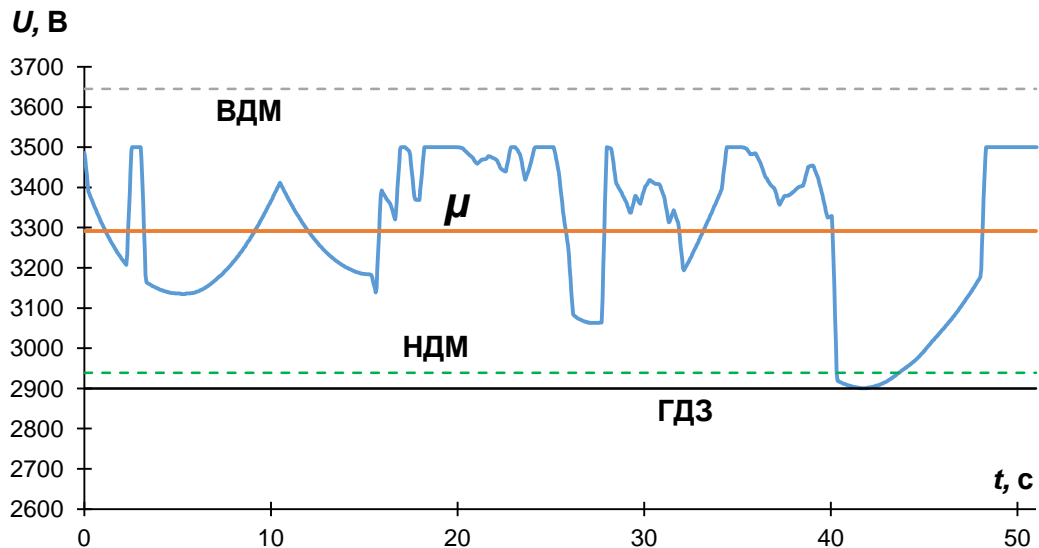


Рисунок 3.6 – Схема розрахункової ділянки розподіленого живлення

Таблиця 3.2 – Параметри системи розподіленого живлення

Параметр	ТП1	ПСК1	ТП2	ПСК2	ТП3
Потужність, МВт	10,4	5,2	10,4	5,2	10,4
Напруга холостого ходу, В	3500	3500	3500	3500	3500
Тягова мережа	М120+2МФ100+А185+Р65				

За результатами розрахунку були визначені такі показники режиму напруги. При розподіленій системі живлення напруга на струмоприймачі ЕРС була в межах допустимих значень, довірчий інтервал її зміни становив 705 В при середньому значенні 3291 В (рис. 3.7).



ВДМ – верхня довірча межа; НДМ – нижня довірча межа; ГДЗ – гранично-допустиме значення;  $\mu$  – математичне сподівання

Рисунок 3.7 – Напруга на струмоприймачі ЕРС при розподіленій системі живлення:

За рахунок установки керованих випрямних агрегатів діапазон зміни напруги на шинах тягових підстанцій зменшився та в середньому складав 80 В при математичному сподіванні 3490 В (рис. 3.8).

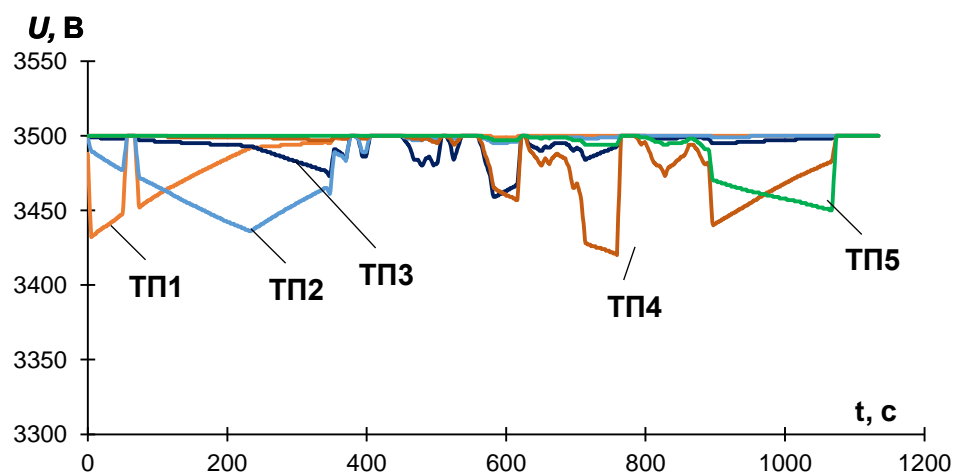


Рисунок 3.8 – Зміна рівня напруги на шинах тягових підстанцій в розподіленій системі живлення

Оцінка режиму потужності при впровадженні швидкісного руху виконувалася на основі вищенаведених розрахунків. Відповідно до параметрів

системи (див. табл. 3.1 та 3.2), сумарна встановлена потужність тягових підстанцій при централізованому живленні становить 56,7 МВт, сумарна встановлена потужність агрегатів при розподіленому живленні – 41,6 МВт.

Питома потужність, що споживається ЕРС з 1 км електрифікованої ділянки, визначається за формулою (3.2) (рис. 3.9).

$$p = \frac{W_e}{L}; \quad (3.2)$$

де  $W_e$  – спожита електроенергія ЕРС за час руху розрахунковою ділянкою, кВт·год;

$T$  – час руху ЕРС ділянкою, год;

$L$  – довжина електрифікованої ділянки, км.

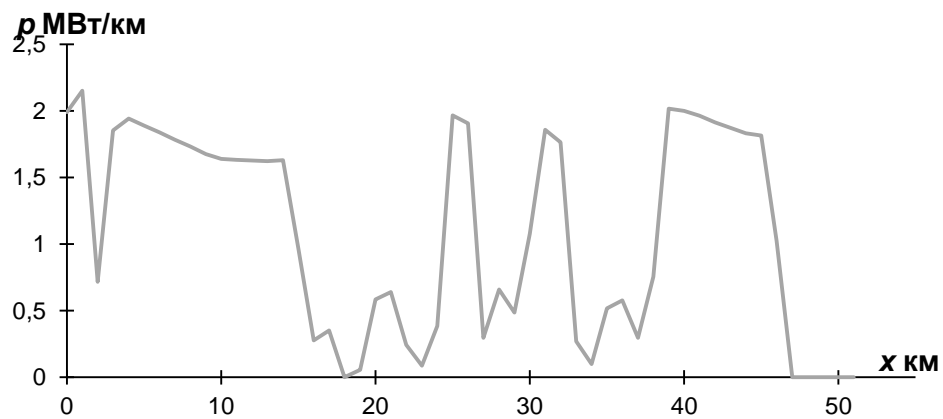


Рисунок. 3.9 – Питома потужність, що споживається ЕРС під час руху ділянкою

Питому потужність, яку може забезпечити існуюча система, можна визначити за формулою

$$P_{ТП} = \frac{\int_0^T (P_{ТП1}(t) + P_{ТП2}(t) + P_{ТП2}(t)) dt}{L}; \quad (3.3)$$

де  $P_{ТП1}(t)$ ,  $P_{ТП2}(t)$ ,  $P_{ТП3}(t)$  – потужності, що генеруються відповідними тяговими підстанціями під час руху ЕРС.

Потужність, що віддається тяговою підстанцією до навантаження, визначається за формулою

$$P_{ТП}(x(t)) = U_{ШТП}(t) \cdot \varphi(x(t)) \cdot I_e(x(t)), \quad (3.4)$$

де  $U_{ШТП}(t)$  – напруга на шинах тягової підстанції, В;

$\varphi(x(t))$  – функція струморозподілу;

$I_e(x(t))$  – струм електрорухомого складу, А;

$x(t)$  – координата розташування електрорухомого складу залежно від часу, км.

Функції струморозподілу тягових підстанцій визначаються за допомогою методу вузлових потенціалів у матричному вигляді:

$$\bar{F}(x, S) = |G| \cdot |A(S)|^{-1} \cdot \bar{B} \quad (3.5)$$

де  $|G|$  – діагональна матриця провідностей тягових підстанцій;

$|A(S)|$  – базисна матриця схеми, побудована за допомогою методу вузлових потенціалів;

$\bar{B}$  – вектор струмів (навантажень), що задаються, у вузлах.

Матриці  $|A(S)|$ ,  $|G|$  та  $\bar{B}$  є динамічними й змінюють свій розмір залежно від поїзної ситуації на розрахунковій ділянці та місцеположення окремого навантаження. На рис. 3.10 та рис. 3.11 наведено графічне зображення функцій струморозподілу тягових підстанцій та пунктів живлення відповідно до заданих параметрів систем тягового електропостачання.

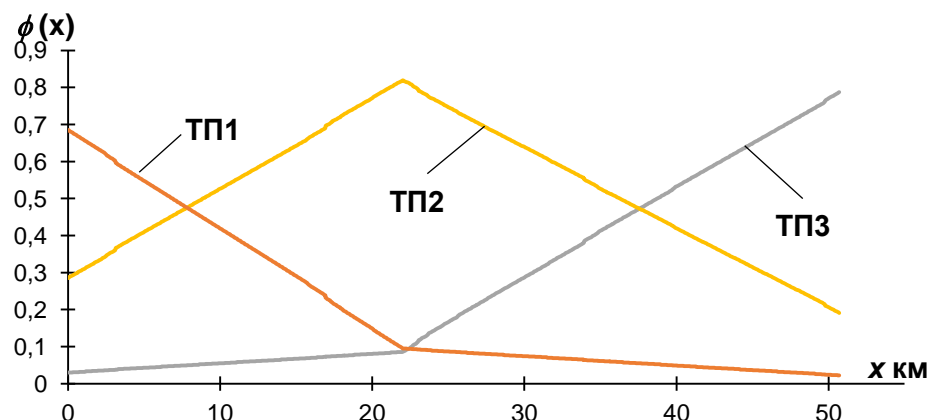


Рисунок 3.10 – Функції струморозподілу тягових підстанцій при централізованому живленні

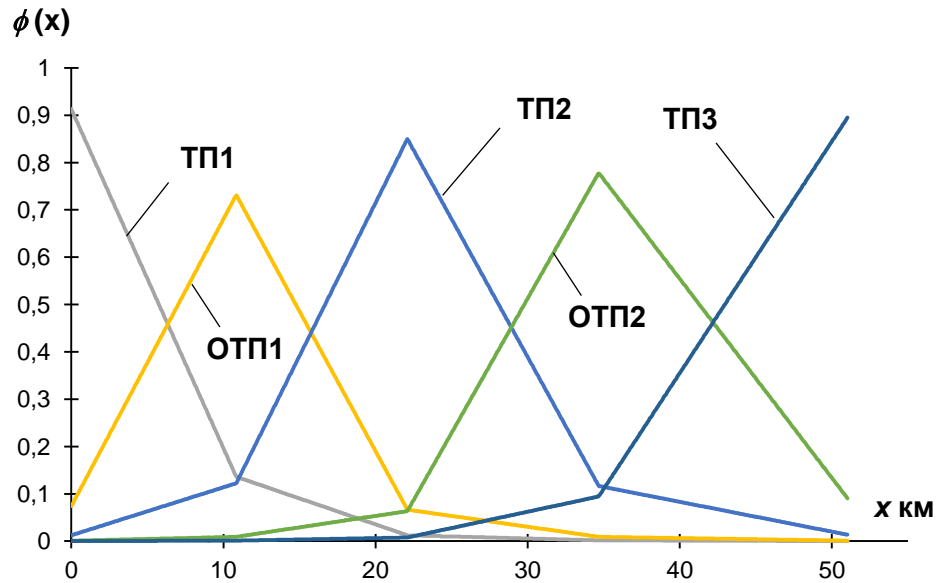


Рисунок 3.11 – Функції струморозподілу тягових підстанцій при розподіленому живленні

У свою чергу, напруга на шинах тягової підстанції може бути визначена як

$$U_{\text{ШТП}}(t) = U_{\text{ХХ}} - \rho \cdot \varphi(x(t)) \cdot I_e(x(t)), \quad (3.6)$$

де  $U_{\text{ХХ}}$  – напруга холостого ходу тягової підстанції, яка визначається положенням анцапф трансформатора та може бути розрахована за формулою [107], В;

$\rho$  – внутрішній опір тягової підстанції, Ом;

Таким чином, підставивши (3.4) в (3.3), можна отримати вираз

$$P_{\text{ТП}}(x(t)) = U_{\text{ХХ}} \cdot \varphi(x(t)) \cdot I_e(x(t)) - \rho \cdot \varphi(x(t))^2 \cdot I_e(x(t))^2, \quad (3.7)$$

з аналізу якого видно, що перший добуток – це згенерована тяговою підстанцією потужність для живлення ЕРС, а другий – втрати потужності на внутрішньому опорі тягової підстанції.

Таким чином, для покращення режиму потужності в системі тягового електропостачання постійного струму необхідно або за рахунок підвищення напруги холостого ходу збільшувати першу складову виразу, або за рахунок збільшення потужності тягової підстанції зменшувати її внутрішній опір, тим самим зменшуючи другу складову.

Як показує аналіз [108], застосування тягових підстанцій зі значною встановленою потужністю призводить до зменшення коефіцієнта її використання. Тому доцільніше використовувати керовані тягові підстанції невеликої потужності, розподілені вздовж міжпідстанційної зони. Підвищення напруги холостого ходу призведе до зростання внутрішнього опору тягової підстанції, але не викличе суттєвого збільшення втрат потужності.

Внутрішній опір некерованої тягової підстанції відповідно до [107] визначається:

$$\rho = \frac{U_{\text{ХХ}}}{I_{\text{НОМ}}} \cdot A \cdot \left( \frac{u_k}{100 \cdot n} + \frac{S_{\text{НОМ}}}{S_{\text{КЗ}}} \right), \quad (3.8)$$

де  $I_{\text{НОМ}}$  – номінальний струм перетворювального агрегату, А;

$A$  – коефіцієнт, що характеризує нахил вольт-амперної характеристики перетворювального агрегату;

$u_k$  – напруга короткого замикання тягового трансформатора, %;

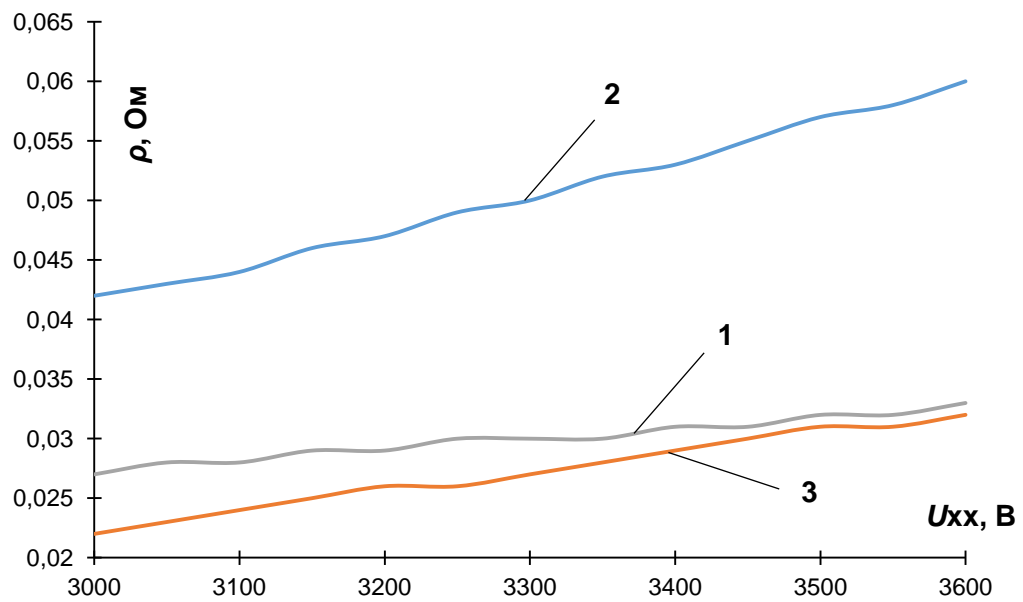
$n$  – кількість одночасно працюючих перетворювачів;

$S_{\text{НОМ}}$  – номінальна потужність перетворювача, кВА;

$S_{\text{КЗ}}$  – потужність короткого замикання на шинах, до яких підключено перетворювальний агрегат, кВА.

У разі використання керованого перетворювального агрегату, його номінальний вихідний струм буде залежати від рівня напруги, тому величина внутрішнього опору тягової підстанції буде змінюватися відповідно до (3.9), рис. 3.12.

$$\rho(U_{\text{ХХ}}) = \frac{U_{\text{ХХ}}}{S_{\text{НОМ}}} \cdot A \cdot \left( \frac{u_k}{100 \cdot n} + \frac{S_{\text{НОМ}}}{S_{\text{КЗ}}} \right), \quad (3.9)$$



1 – некерований перетворювальний агрегат; 2 – керований перетворювальний агрегат ПА-5200, 3 – два керованих перетворювальних агрегати ПА-5200

Рисунок 3.12 – Зміна внутрішнього опору тягової підстанції відповідно до зміни напруги холостого ходу

З урахуванням формул (3.7) та (3.9) можна записати вираз для визначення потужності, що генерується тяговою підстанцією в складі розподіленої системи живлення з урахуванням струморозподілу на розрахунковій ділянці:

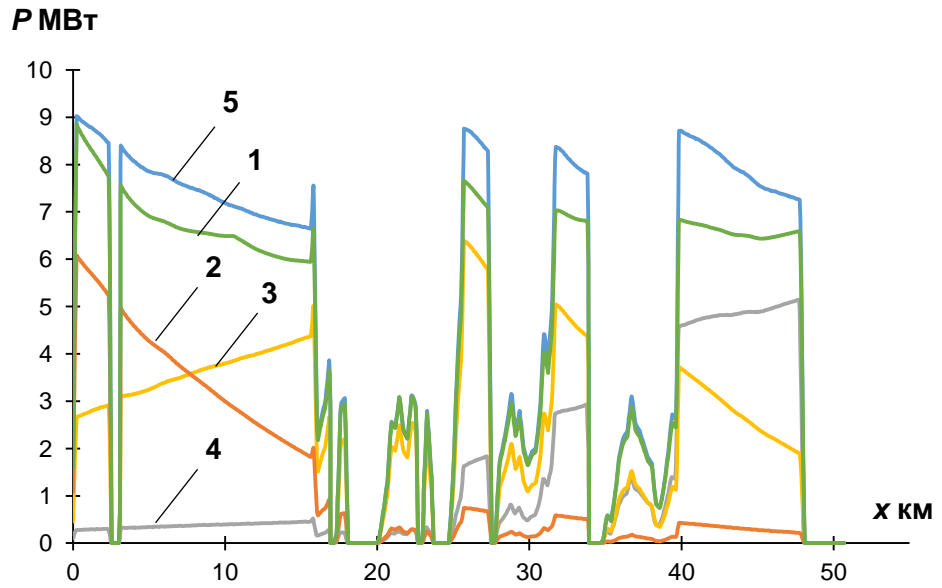
$$P_{ТП}(x(t)) = P_{32}(x(t)) - AP_{32}(x(t)) \cdot \left( \frac{P_{32}(x(t))}{S_{кз}} - \frac{u_{кз}}{100} \cdot k_3(x(t)) \right), \quad (3.10)$$

де  $P_{32}(x(t))$  – згенерована тяговою підстанцією потужність для живлення ЕРС,  $P_{ТП}(x(t)) = U_{xx} \cdot \varphi(x(t)) \cdot I_e(x(t))$ ;

$k_3(x(t))$  – коефіцієнт завантаження тягової підстанції,  $k_3(x(t)) = \frac{P_{32}(x(t))}{S_{ном} \cdot n}$ .

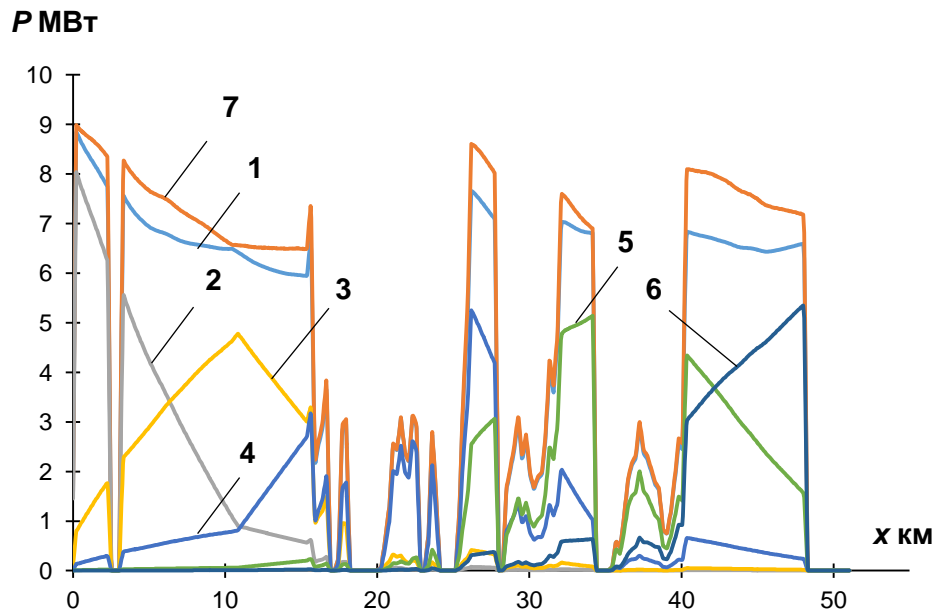
На основі вищевикладених виразів були отримані криві зміни генерації потужності тяговими підстанціями централізованої та розподіленої системи для живлення ЕРС, що рухається ділянкою (рис. 3.13, 3.14).





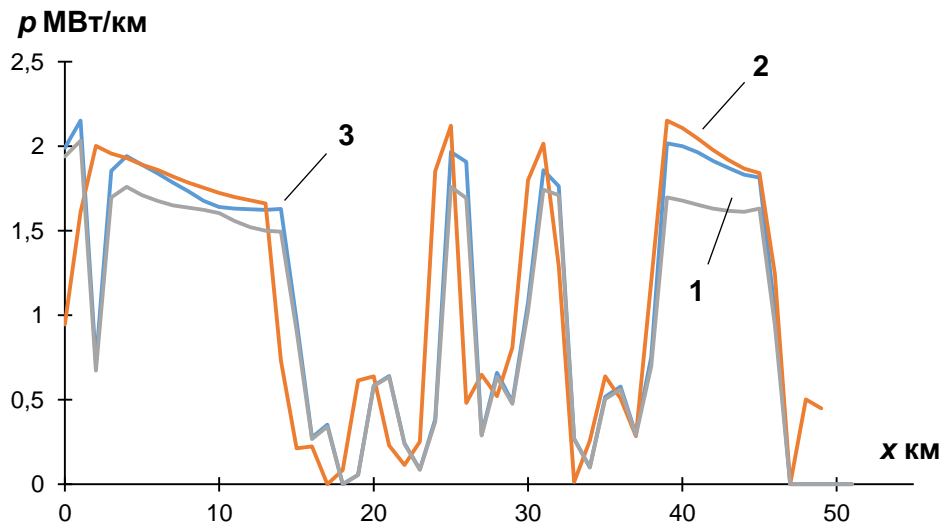
1 – ЕРС; 2 – ТП1; 3 – ТП2; 4 – ТП3; 5 – сумарна потужність тягових підстанцій

Рисунок 3.13 – Зміна генерованої потужності ТП при централізованому живленні в кожен момент часу під час руху ЕРС ділянкою



1 – ЕРС; 2 – ТП1; 3 – ТП2; 4 – ТП3; 5 – ТП4; 6 – ТП5; 7 – сумарна потужність тягових підстанцій

Рисунок 3.14 – Зміна генерованої потужності ТП при розподіленому живленні в кожен момент часу під час руху ЕРС ділянкою:



1 – при централізованому живленні; 2 – при розподіленому живленні; 3 –  
споживання ЕРС

Рисунок 3.15 – Питома потужність на розрахунковій ділянці

Як впливає з аналізу графіка (рис. 3.15), централізована система живлення для електрифікованої ділянки постійного струму Б – С Придніпровської залізниці довжиною 50,8 км не в змозі задовольнити потреби швидкісного поїзду за споживанням потужності на кілометр колії, що призводить до неможливості забезпечення нормованого рівня напруги в тяговій мережі (див. рис. 3.4).

## 3.2. Аналіз енергетичних показників у пропонованій системі

### 3.2.1. Коефіцієнт завантаження тягових підстанцій

З урахуванням сумарної встановленої потужності на тягових підстанціях при централізованому живленні, виконані вище розрахунки свідчать про достатню (навіть надлишкову) встановлену потужність тягових підстанцій для забезпечення швидкісного руху розрахунковою ділянкою (див. рис. 3.1), але водночас середнє значення коефіцієнта використання потужності тягових підстанцій не перевищує 10 % (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Коефіцієнт завантаження тягових підстанцій (ЦЖ)

Значення коефіцієнта завантаження	ТП1	ТП2	ТП3
max	48,2	25,3	27,2
Середнє	9,5	9,2	6,4

При розподіленому живленні, за рахунок зменшення встановленої потужності тягових підстанцій, та майже однакової потужності, що генерується тяговими підстанціями, коефіцієнт завантаження змінився таким чином (табл. 3.4), у середньому підвищився у 1,5 разу.

Таблиця 3.4 – Коефіцієнт завантаження тягових підстанцій (РЖ)

Значення коефіцієнта завантаження	ТП1	ПСК1	ТП2	ПСК2	ТП3
max	77,2	91,9	50,48	98,85	51,42
Середнє	8,3	20,02	8,2	19,86	7,3

### 3.2.2. Навантажувальна здатність проводів контактної мережі

На багатьох ділянках переріз проводів контактної мережі наближується до значення  $600 \text{ мм}^2$  у мідному еквіваленті. В умовах зростання пікових електричних навантажень неможливо забезпечити термічну стійкість контактної мережі та знизити втрати напруги за рахунок підвішування додаткових проводів. Так, на ділянці постійного струму Л – В Львівської залізниці для забезпечення нормованого рівня напруги на струмоприймачі ЕРС та дотримання умов термічної стійкості контактної мережі у разі проходження двох електровозів 2ЕС10 та 2ЕС6 було підвішено 5 додаткових підсилювальних проводів. Як показують дослідні дані [109], споживані струми важковагових поїздів можуть значно перевищувати навантажувальну здатність контактної мережі.

За результатами розрахунків для централізованої та розподіленої систем живлення встановлено запас навантажувальної здатності проводів типових

контактних підвісок, що використовуються на ділянках, електрифікованих постійним струмом (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Запас навантажувальної здатності контактних підвісок

Система живлення	Централізована				Розподілена			
	М-	М-	М-	М-	М-	М-	М-	М-
Тип контактної мережі	М-	М-	М-	М-	М-	М-	М-	М-
Допустимий струм контактної мережі при 15 % зносі, А	1630	2120	2710	3290	1630	2120	2710	3290
Максимальний розрахунковий струм у контактній мережі, А	2341,6				1880			
Запас навантажувальної здатності за струмом, %	- 43,7	10,6	13,6	28,8	- 15,3	11,3	30,6	42,8

\* знак «мінус» вказує на перевищення навантажувальної здатності контактної мережі за струмом.

### 3.2.3. Дослідження втрат електроенергії в системі розподіленого живлення

Втрати електроенергії або к.к.д. системи тягового електропостачання є одними з основних критеріїв оцінки енергетичної ефективності електротягової мережі. Вони визначають експлуатаційні витрати електрифікованої ділянки.

У роботі [110] при дослідженні к.к.д. запропоновано враховувати такі втрати енергії:

- втрати в міді знижувальних трансформаторів трансформаторних підстанцій –  $W_{ГТТ}$ ;
- втрати холостого ходу знижувальних трансформаторів трансформаторних підстанцій –  $W_{x\_ГТТ}$ ;

- втрати на активному опорі лінії живлення –  $W_{ЛЖ}$  ;
- втрати в міді перетворювальних трансформаторів живлячих пунктів і втрати у випрямній установці –  $W_{ПЖ}$  ;
- втрати холостого ходу перетворювальних трансформаторів живлячих пунктів –  $W_{x\_ПЖ}$  ;
- втрати в тяговій мережі –  $W_{ТМ}$  .

Збільшення інтенсивності руху, як відомо, призводить до збільшення струмових навантажень на всі елементи системи тягового електропостачання і, отже, до збільшення втрат енергії і зниження к.к.д. Однак при деякому міжпоїздному інтервалі к.к.д. досягає максимуму, а потім відбувається його зниження за рахунок превалювання втрат, незалежних від струму. У будь-якому випадку за інших рівних умов енергетична ефективність розподіленої системи тягового електропостачання тим вища, чим менша відстань між живлячими пунктами, незважаючи на те, що із зменшенням відстані їх потужність теж зменшується. Втрати електроенергії визначаються шляхом інтегрування за часом функції розподілу втрат потужності в тяговій мережі, яка, у свою чергу, визначається як добуток струму, що протікає по ділянці контактної мережі, та втрат напруги на цій ділянці.

Відповідно до [105] розподіл струму в тяговій мережі визначається за допомогою отриманих потенціалів у вузлах схеми (3.5), опорів віток між ними та графіка руху поїздів:

$$i_{K1} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r_1}, \quad (3.11)$$

де  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – потенціали відповідно першого та другого вузла, В;

$r_1$  – величина опору вітки між першим та другим вузлом, Ом.

Далі, за наявності іншого навантаження на розрахунковій ділянці, за допомогою принципу суперпозиції визначається розподіл струмів у контактній мережі від усіх поїздів:

$$I_{K1}(x) = \sum_{i=1}^{n_1} I_{K1}(2i-1, x) + \sum_{i=1}^{n_2} I_{K1}(2i, x) + I_{\text{вир}}, \quad (3.12)$$

де  $2i-1, 2i$  – визначають номери непарного та парного поїздів;

$n_1, n_2$  – кількість поїздів відповідно на першій та другій колії.

Визначення функції розподілу втрат напруги передбачає використання функції розподілу струмів у контактній мережі з накопичувальним домноженням на відповідну відстань та питомий опір мережі.

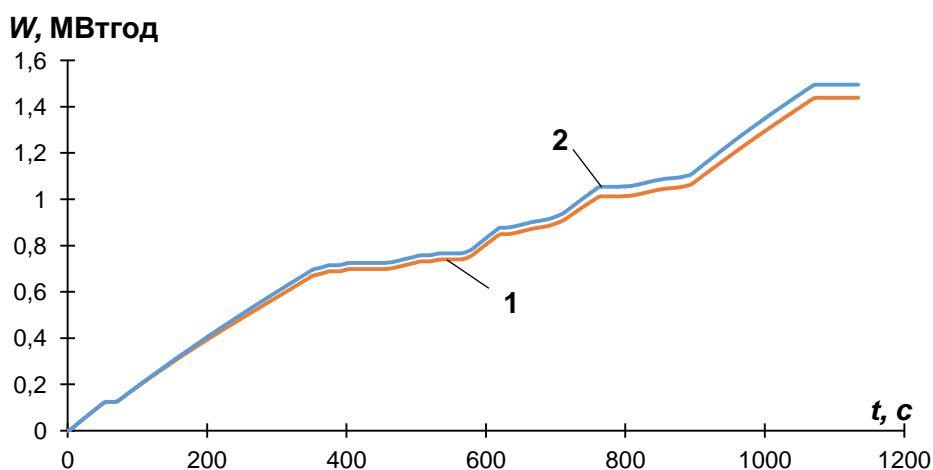
$$\Delta U_{K1}(x) = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta U_{K1}(2i-1, x) + \sum_{i=1}^{n_2} \Delta U_{K2}(2i, x) + I_{\text{вир}} \cdot r_0 \cdot x, \quad (3.13)$$

де  $\Delta U_{K1}(2i-1, x)$  – втрати напруги в тяговій мережі від поїздів, що рухаються в парному напрямку, В;

$\Delta U_{K2}(2i, x)$  – втрати напруги в тяговій мережі від поїздів, що рухаються в непарному напрямку, В;

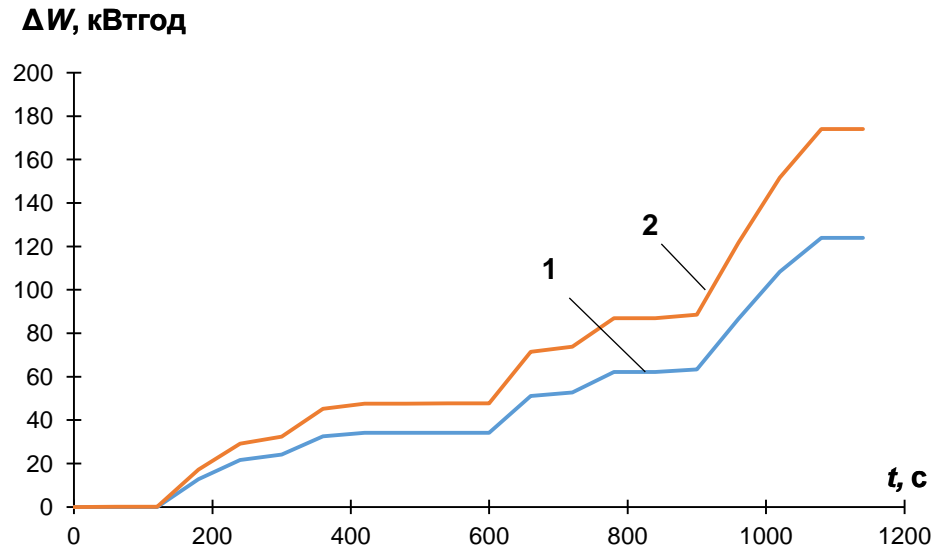
$I_{\text{вир}} \cdot r_0 \cdot x$  – втрати напруги в тяговій мережі від протікання вирівнювальних струмів, В;

За результатами наведених розрахунків були отримані криві, показані на рис. 3.16, 3.17.



1 – розподілене живлення; 2 – централізоване живлення

Рисунок 3.16 – Витрати електроенергії на тягу поїздів



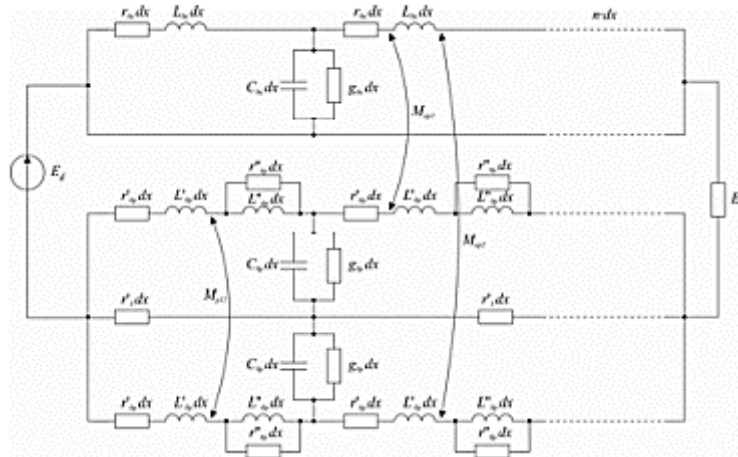
1 – розподілене живлення; 2 – централізоване живлення

Рисунок 3.17 – Втрати електроенергії в системі тягового електропостачання

### Втрати потужності від вищих гармонік

У результаті процесів споживання електричної енергії навантаженням та резонансів у тяговій мережі зростають струми та напруги вищих гармонік. Тому у ході розрахунку режимів функціонування тягової мережі необхідно враховувати амплітудно-частотні характеристики реактивного й активного опору елементів. Не менш важливим фактором є величина навантаження. Розрахунок амплітудно-частотних характеристик суттєво ускладнюється необхідністю врахування розподіленості параметрів ліній тягового електропостачання [111].

Розрахунок централізованої та розподіленої систем тягового електропостачання постійного струму виконувався на імітаційній моделі. Схема заміщення електрифікованої ділянки з навантаженням має вигляд, зображений на рис. 3.18.



$E$  – напруга на шинах тягової підстанції,  $E_n$  – (електровоз) навантаження ТМ

Рисунок 3.18 – Схема заміщення елементарної ділянки ТМ (показана одна колія)

Втрати потужності з урахуванням оціночних втрат від вищих гармонік визначаються за формулою [112]

$$\Delta S = \sum_n^m I_n^2 \cdot Z_n, \quad (3.14)$$

де  $I_n$  – значення струму  $n$ -ї гармоніки, А;

$Z_n$  – значення опору на частоті  $n$ -ї гармоніки, Ом.

Для отримання амплітудно-частотної характеристики опору дослідної ділянки згідно з методикою, запропонованою в пакеті MATLAB Simulink, розроблено модель СТЕ з використанням вихідних даних параметрів ємності та індуктивностей контурів згладжувальних фільтрів тягової підстанції (рис. 3.19), вихідної ємності та питомого опору тягової мережі.



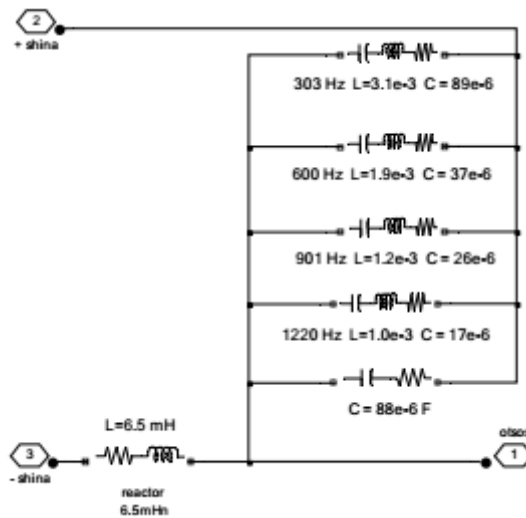


Рисунок 3.19 – Simulink модель згладжувального фільтра тягової підстанції

У результаті моделювання отримано зміну опору розрахункової ділянки в заданому діапазоні частот рис. 3.20.

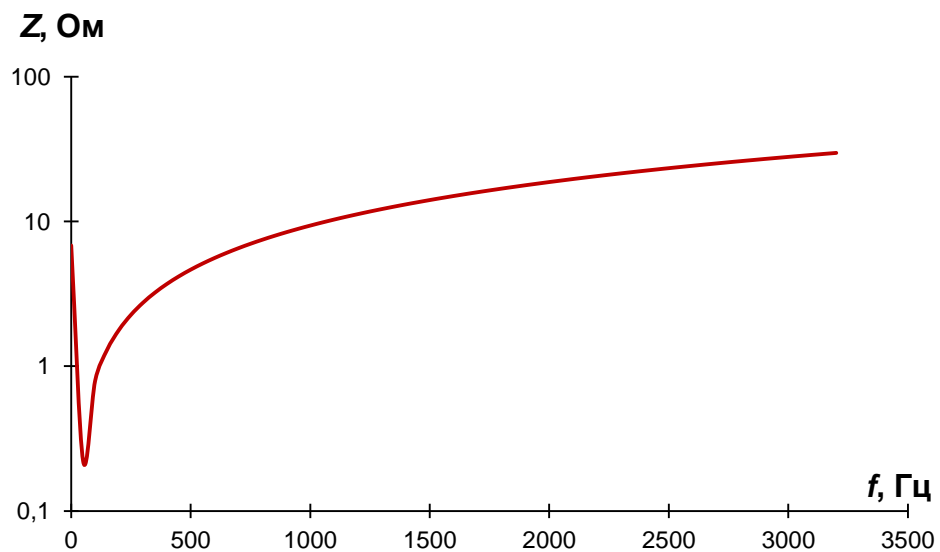


Рисунок 3.20 – АЧХ опору тягової мережі розподіленої СТЕ

Розрахунок втрат потужності в розподіленій системі з урахуванням втрат від вищих гармонік відбувався для ЕРС, параметри руху та енергоспоживання якого наведені на рис. 3.1, 3.2. Розрахунок виконувався з дискретністю за часом 1 хв, при цьому отримано 19 розрахункових точок, значення струму в яких зведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати розрахунку струму

№ розрахункової точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Величина струму, А	470.9	1	2315	2208	2090	1999	800.1	1	874.6	1	2529	776.7	2460	1	685.5	2582	2418	2227	1

Для кожної точки визначався спектральний склад струму шляхом розкладання в ряд Фур'є струму ЕРС за період (рис. 3.21, 3.22 (спектр показаний без постійної складової)).

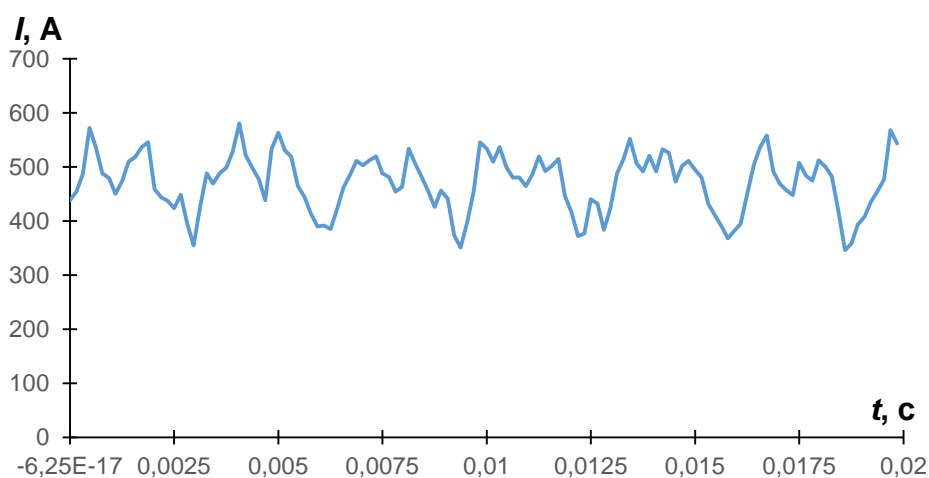


Рисунок 3.21 – Часова діаграма періоду струму ЕРС в першій точці

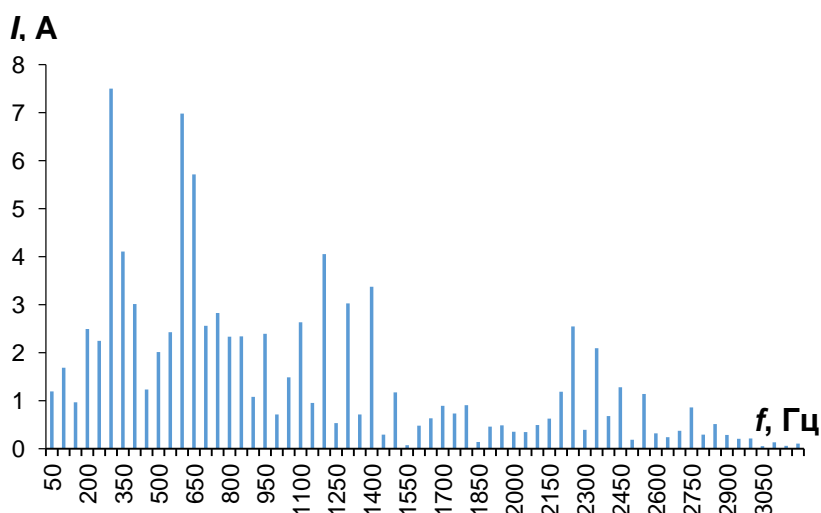
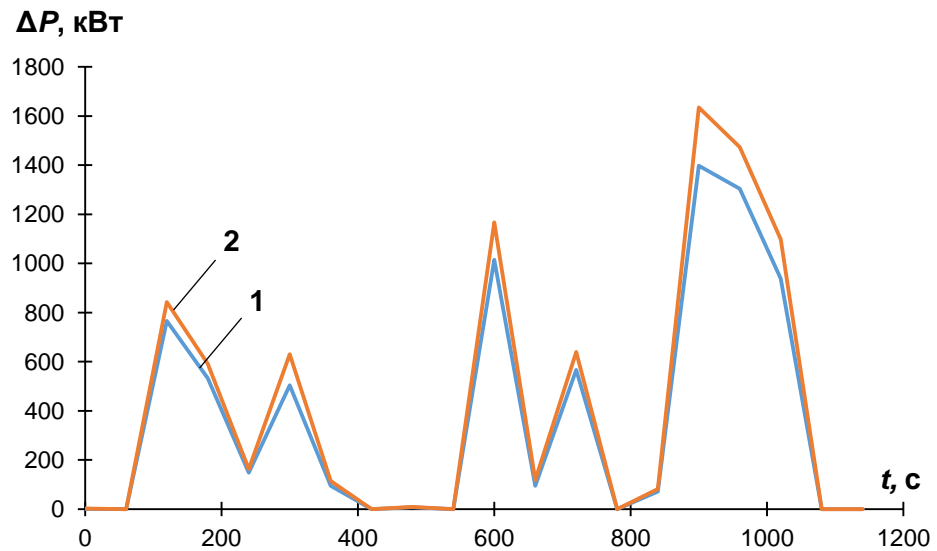


Рисунок 3.22 – Спектральний склад струму ЕРС в першій точці

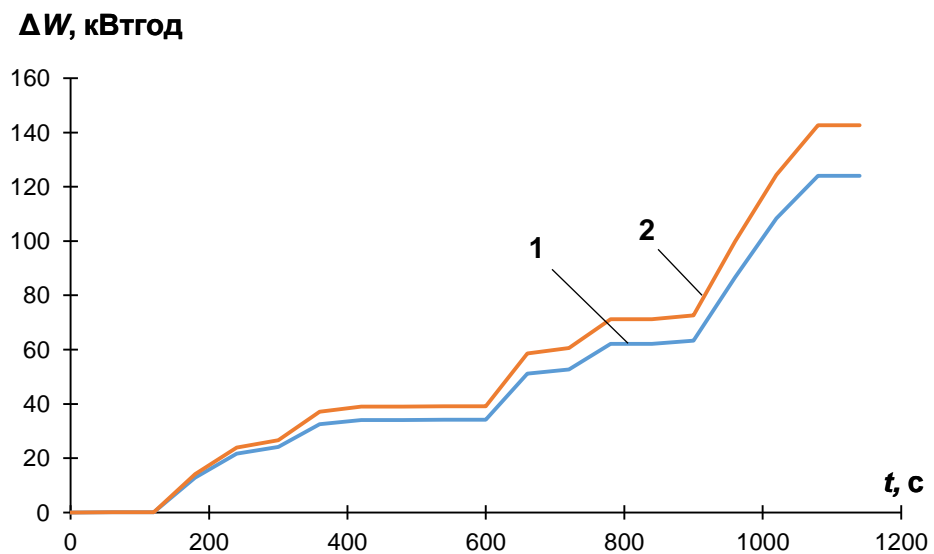
За результатами розрахунків отримано значення втрат потужності та електроенергії в тяговій мережі, вказані на рис. 3.23, 3.24.



1 – класичний розрахунок;

2 – розрахунок з урахуванням втрат від вищих гармонік

Рисунок 3.23 – Втрати потужності в тяговій мережі



1 – класичний розрахунок; 2 – розрахунок з урахуванням втрат від вищих гармонік

Рисунок 3.24 – Втрати електроенергії в тяговій мережі

Порівнюючи отримані результати, можна сказати, що при врахуванні втрат від вищих гармонік, втрати потужності зросли в середньому на 16 % порівняно з класичним розрахунком, при цьому втрати електроенергії зросли на

13 %. Додаткові втрати від вищих гармонік складають майже 3 %, що потребує їх врахування при розрахунках.

Порівняльний аналіз енергетичних показників запропонованої розподіленої системи та існуючої системи централізованого живлення зведено в таблицю 3.7.

Таблиця 3.7 – Енергетичні показники системи тягового електропостачання

Показник		Централізоване живлення	Розподілене живлення
Режим напруги на струмоприймачі ЕРС, В	$M(U)$	3130	3291
	$\max(U)$	3418	3500
	$\min(U)$	2643	2901
	Величина довірчого інтервалу зміни	875	705
Витрати електроенергії на тягу, кВт·год		1495	1437
Середні втрати потужності, кВт	Без урахування вищих гармонік	524	372
	З урахуванням вищих гармонік	631	428
Втрати електроенергії, кВт·год	Без урахування вищих гармонік	174,9	123,9
	З урахуванням вищих гармонік	210,6	142,7
ККД		0,92	0,95

Оціночні розрахунки показали, що при проходженні одного швидкісного поїзда розрахунковою ділянкою із заданими параметрами впровадження системи розподіленого живлення дозволяє:

1. Забезпечити необхідний рівень питомої потужності в тяговій мережі в межах 2,00 – 2,15 МВт/км, що дало змогу обмежити мінімальне значення напруги на струмоприймачі ЕРС на рівні 2900 В.
2. Зменшити навантаження на проводи контактної мережі за рахунок децентралізації джерел живлення.
3. Зменшити неактивну потужність та втрати потужності в тяговій мережі за рахунок покращення режиму напруги в системі тягового електропостачання.

4. Досягти економії електроенергії в розмірі 57,2 кВт·год, що складає 4,3 % від спожитої електроенергії поїздом.

### 3.3. Оцінка стійкості функціонування пропонованої системи

Процес споживання електричної енергії в тяговій мережі відбувається за наявності різнорідних збурень, що мають нестационарний характер. До них можна віднести зміну режимів роботи електрорухомого складу залежно від особливостей графіка руху поїздів, профілю колії й наявних обмежень, а також наявність різного роду перехідних процесів. Через це напруга на струмоприймачі та споживана потужність змінюються в значних межах, що може призвести до втрати стійкості функціонування системи тягового електропостачання (СТЕ). Підхід до кількісної оцінки стійкості СТЕ за напругою був виконаний у роботі [113]. Авторами в результаті аналітичних розрахунків було доведено наявність у тягової мережі зон, які не мають стійкості за напругою. Результати аналітичного розрахунку статичної стійкості за напругою на досліджуваній ділянці Б-С наведені на рис. 3.25.

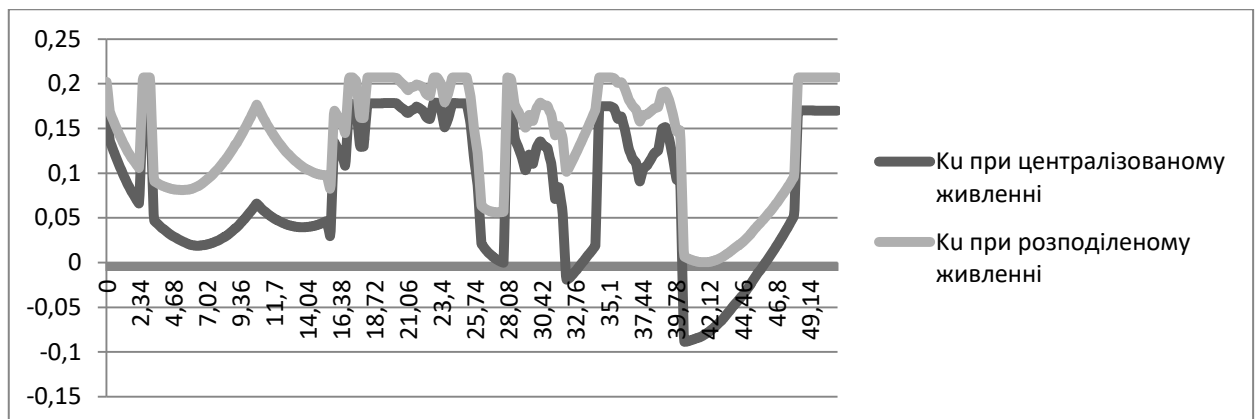


Рисунок 3.25 – Статична стійкість за напругою на ділянці Б-С

Аналіз рис. 3.25 показує, що аналітичний підхід не дозволяє повною мірою робити висновок про стійкість СТЕ за напругою і, відповідно, за потужністю. Звідси можна зробити очевидний висновок про необхідність розробки нових підходів до регулювання напруги в тяговій мережі. У реальних умовах керуючі впливи на рівень напруги здійснюються маловитратними тривіальними засобами підсилення тягової мережі: збільшенням перерізу

проводів, застосуванням пунктів паралельного з'єднання. Однак ці засоби не в змозі забезпечити необхідну стійкість СТЕ за напругою та потужністю і не дозволяють регулювати напругу в тяговій мережі.

Рівень напруги в тяговій мережі залежить від великої кількості факторів і, змінюючись у часі, площині й просторі, має імовірнісний характер зі складними взаємозв'язками. При впровадженні швидкісного руху виникає завдання розробки нових підходів до управління режимом напруги в інтелектуальній, самонастроювальній системі електропостачання розподіленого типу, побудованій на сучасній елементній базі. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку енергетики, які втілилися в концепцію Smart Grid, що є на сьогодні основною технологічною і методологічною базою для підвищення ефективності енергоспоживання [114]. Можна сформулювати таке розуміння інтелектуальної СТЕ: використання передових технологій транспорту електроенергії, діагностика стану обладнання, широкомасштабний моніторинг режимів і управління ними з використанням нових засобів і технологій для забезпечення надійності передачі електроенергії й керованості тягової мережі.

Аналіз стійкості СТЕ виконують на основі експериментальних даних, що моделюють поведінку струму й напруги в контактній мережі. Дослідження показують, що струми й напруги в контактній мережі мають нестационарний характер. У ході моделювання ці величини зручно представляти часовими рядами. Найбільш ефективним інструментарієм для аналізу часових рядів є рекурентний аналіз. Найбільш плідним підходом до вирішення цієї проблеми був підхід Вебера і Марвана [115- 117]. У [115] розкрито методи й найбільш успішні практики теоретичних і практичних аспектів рекурентного аналізу, який використовується при аналізі часових рядів. У цій роботі показані сучасні досягнення рекурентного аналізу в медицині, геофізиці, радіоелектроніці, астрономії, гідро- і аеродинаміці, космонавтиці. Однак методи цього аналізу для дослідження процесів у тягових мережах до сьогодні не використовувалися. У принципі, виміряні часові ряди генеруються базовою динамічною системою,

яка визначає деякі (або всі) змінні стану цієї системи в часі відповідно до набору детермінованих правил. Ці правила зазвичай представлені набором диференціальних рівнянь з впливом (або без впливу) шуму. Будемо вважати, що праві частини автономних диференціальних рівнянь є квадратичні поліноми від декількох змінних. Невідомі квадратичних правих частин системи диференціальних рівнянь можуть бути визначені на основі спеціальної процедури, що базується на методі найменших квадратів і описана в роботах [116, 117]. Праці [118, 119] присвячені підходам до опису динамічних систем на основі різноманітних часових рядів при впливі шуму.

При аналізах стійкості систем тягового електропостачання необхідно також визначити запас стійкості системи (рівень робастності). Як правило, при дослідженні цього питання проводять побудову областей стійкості. Комплексною роботою, де описується метод рекурентних областей для різних додатків, є робота [120]. У праці [121] описано інструментарій для аналізу стійкості динамічних систем на основі методу Ляпунова. Наведені в цій роботі теоретичні положення вимагають адаптації до тягових мереж, урахування специфіки тягового електропостачання.

Оцінка стійкості за напругою є основним питанням при аналізах стійкості енергетичних систем. У роботах [122, 123, 124] запропоновані різні індекси стійкості напруги (VSI). Ці індекси можуть використовуватися для оптимізації децентралізованих систем електропостачання (DG), виявлення слабких ділянок та прийняття контрзаходів для підвищення стійкості. У [122] розглянуто VSI з різних аспектів, таких як концепції, допущення, критичні значення й т. д. У роботі [123] описано методи моніторингу стійкості енергосистеми за напругою в умовах неповноти інформації на базі штучних нейронних мереж. Варто зазначити, що проблемам стійкості в енергосистемах приділялося значно більше уваги, ніж у системах тягового електропостачання. Одним з методів підвищення стійкості систем електропостачання за напругою є застосування регуляторів напруги (VR). У [124] пропонується використовувати генетичний

алгоритм для визначення кількості, місця розташування і номінальної потужності VR. Теоретичні положення, наведені в [122, 123, 124], не враховують необхідність модернізації систем тягового електропостачання в найближчій перспективі.

На сьогодні існує безліч публікацій, присвячених перспективним тяговим системам. Так, у [125] запропонована сегментна технологія живлення тягової мережі, при якій ділянка тягового електропостачання розбивається на кілька сегментів, а технологія синхронного вимірювання застосовується для швидкого і точного визначення несправностей і їх розташування.

Модернізація структури та схемотехніки систем тягового електропостачання необхідна для забезпечення стійкості перспективних режимів електроспоживання у зв'язку з розширенням полігону швидкісного руху і, як наслідок, до зростання навантаження. В інтелектуальних системах тягового електропостачання нового покоління проблеми забезпечення заданого рівня надійності й стійкості в усіх режимах роботи будуть ще більш актуальними.

Нехай

$$x_0 = x(t_0), x_1 = x(t_1), \dots, x_n = x(t_n), \quad (3.15)$$

кінцева послідовність чисельних значень деякої скалярної динамічної змінної, виміряна з постійним кроком часу  $\Delta t$  в моменти  $t_i = t_0 + i\Delta t$ ;  $x_i = x(t_i)$ ;  $i = 0, 1, \dots, n$ . Послідовність (3.15) називається часовим рядом [115, 116, 117]. У принципі, виміряні часові ряди генеруються базовою динамічною системою, яка визначає деякі (або всі) змінні стану цієї системи в часі відповідно до набору детермінованих правил. Ці правила зазвичай представлені набором диференціальних рівнянь з впливом (або без впливу) шуму. Відомо, що будь-який такий набір диференціальних рівнянь застосуванням методу Коші може бути перетворений у набір автономних рівнянь першого порядку. Динамічні змінні у всіх отриманих рівняннях першого порядку складають фазовий простір, а кількість таких змінних визначає розмірність цього фазового простору, яку позначимо через  $n$ . Будемо вважати, що можна виміряти напругу й постійний струм (дві змінні), а також, якщо



можливо, інші динамічні характеристики СТЕ. Прийmemo, що серед цих характеристик можуть бути похідні за часом від напруги і струму. Якщо похідні не можуть бути виміряні, передбачається, що існують досить гладкі апроксимації цих похідних [116]. Будемо вважати, що правими частинами автономних диференціальних рівнянь є квадратичні поліноми від декількох змінних. Крім того, використовуємо спеціальну процедуру визначення невідомих квадратичних правих частин системи диференціальних рівнянь, яка була запропонована в [115, 116]. Ця процедура базується на методі найменших квадратів і спирається на той факт, що можна з достатньою точністю обчислити компоненти  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ , ...,  $x_n(t)$  вектора  $x(t)$  (часового ряду [10]) і його похідної  $dx/dt$ .

На електрифікованій ділянці НДВ-П у результаті експериментального дослідження були побудовані часові залежності для струму й напруги в контактній мережі. Для цього було проведено 12470 вимірів з інтервалом 1 секунда. Графіки отриманих залежностей наведені на рис. 3.26, 3.27.

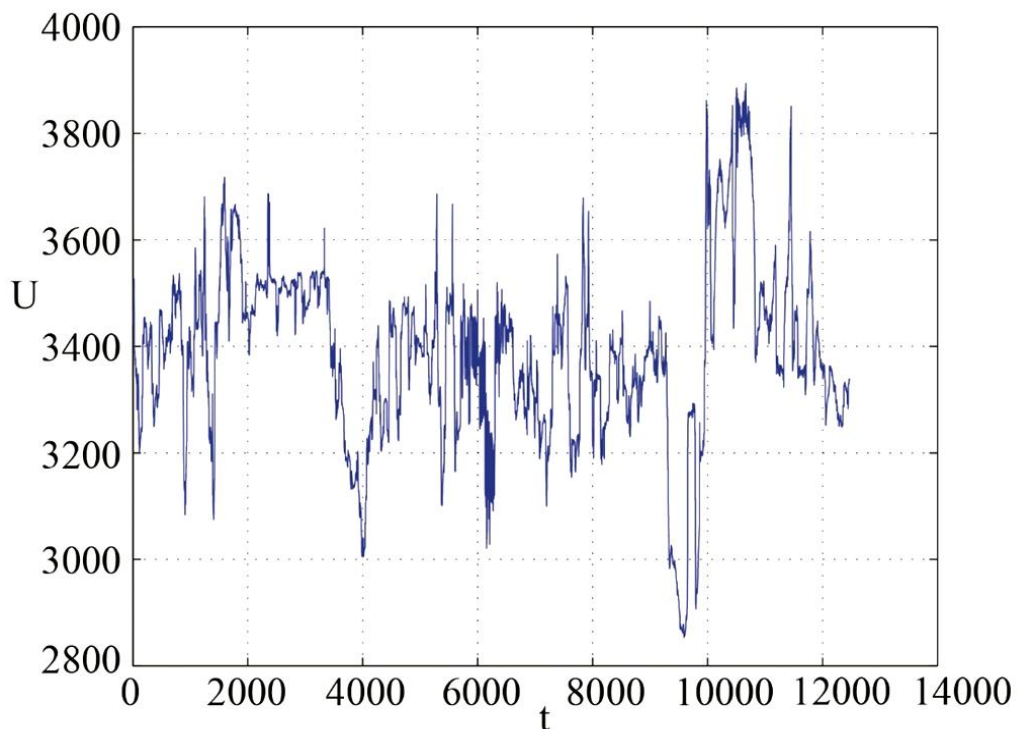


Рисунок 3.26 – Напруга на струмоприймачі  $U(t)$

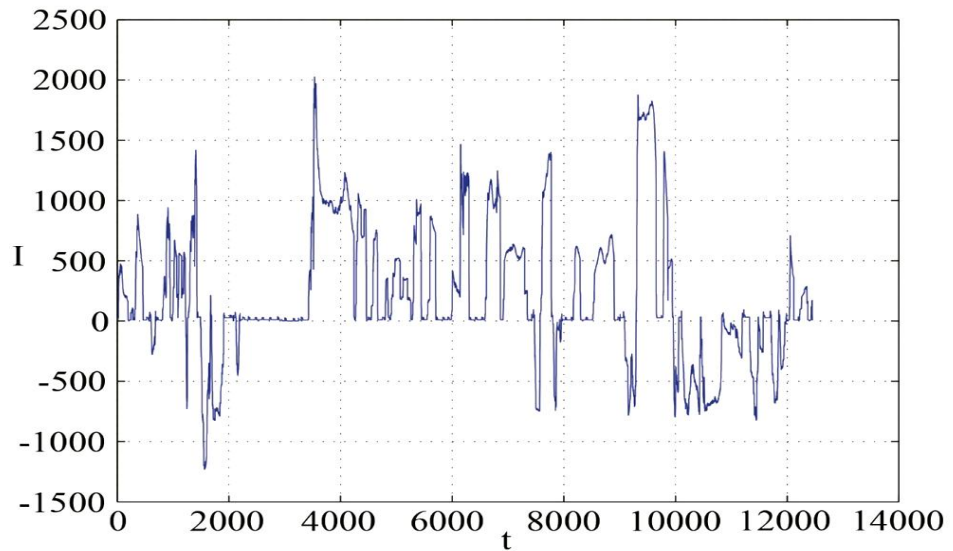


Рисунок 3.27 – Споживаний електрорухомим складом струм  $I(t)$

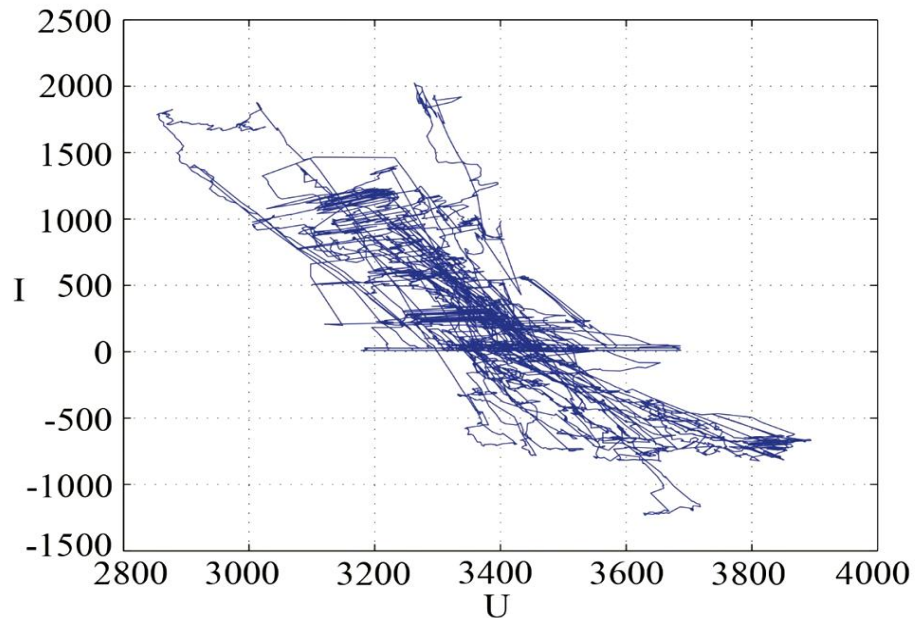


Рисунок 3.28 – Вольт-амперна ( $U-I$ ) характеристика контактної мережі  
(експериментальні дані)

Попередній аналіз отриманих даних показує, що вони мають нестационарний характер. Наголосимо, що нестационарність може проявлятися в появі детермінованого або стохастичного тренду, що змінюється в часі з дисперсією і коваріацією. Існують дві основні мети аналізу часових рядів: визначення характеру часового ряду й прогнозування (прогнозування майбутніх значень часового ряду за поточними й минулим значенням). Обидві

ці цілі вимагають, щоб модель часового ряду була ідентифікована й більш-менш формально описана [115, 116, 117, 118].

Для успішного виконання моделювання процесів, наведених на рис. 3.26-3.28, необхідно скористатися методами нелінійного рекурентного аналізу [115, 120]. Перший крок такого моделювання: визначення розмірності вкладення фазового простору, де відбувається процес. Визначення цієї розмірності зображено на рис. 3.29.

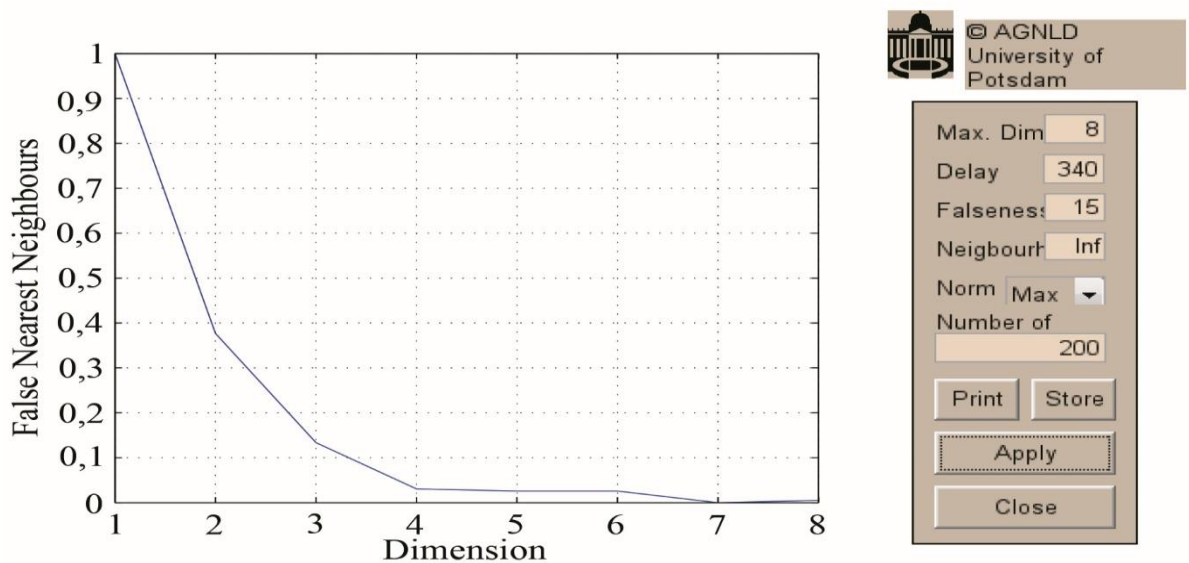


Рисунок 3.29 – Пошук розмірності простору вкладення за допомогою методу найближчих помилкових сусідів [116-118].

Тепер скористаємося методом найменших квадратів [118, 119]. Спочатку за даними, наведеними на рис. 3.26, 3.27, обчислимо розмірність фазового простору, у якому відбувається процес [120]. Ця розмірність виявилася рівною  $n = 4$ . Далі в результаті застосування методу найменших квадратів маємо таку систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= y(t), \\
 \dot{y}(t) &= 0,0193 - 0,0072x(t) + 0,0218y(t) - \xi_1 z(t) + \\
 & 0,0057u(t) - \xi_2 x(t)y(t) + 0,000422x^2(t), \\
 \dot{z}(t) &= u(t), \\
 \dot{u}(t) &= 0,0294 - 0,0145x(t) - 0,8506y(t) - 0,0019z(t) - \\
 & -0,0095u(t) + 0,2380x(t)y(t) + 0,0017x^2(t).
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Тут  $x(t) = U(t)$ ,  $z(t) = I(t)$ ,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – керуючі параметри; напруга  $U(t)$  і струм  $I(t)$  вимірюються в кіловольтах (kV) і кілоамперах (kA). Поведінка розв’язків системи (3.16) наведена на рис. 3.30-3.33.

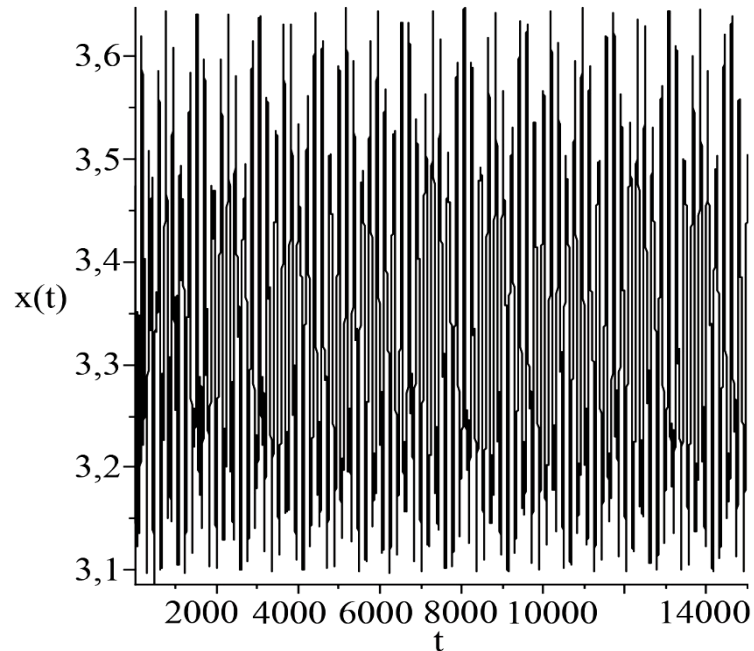


Рисунок 3.30 – Поведінка напруги  $U(t)$  при  $\varepsilon_2=0.0039$  та  $\varepsilon_1=0.0008$   
(квазіперіодична поведінка)

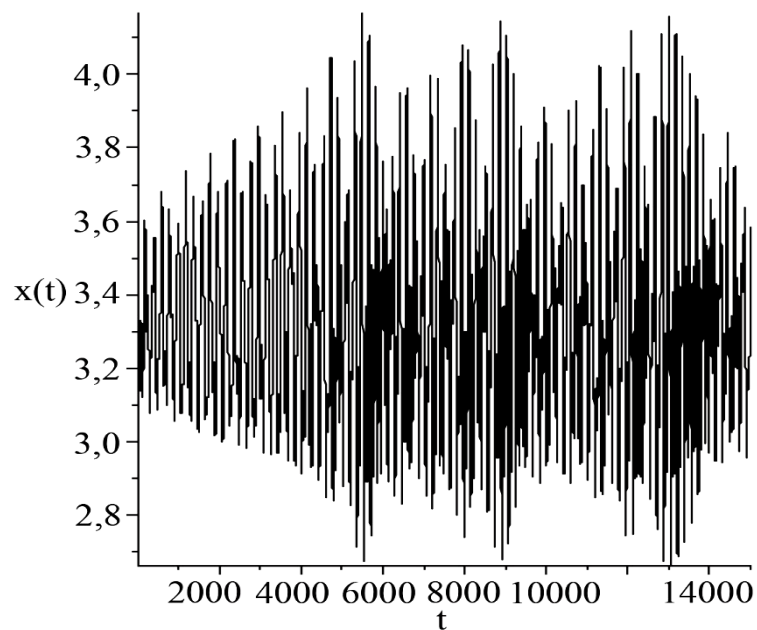


Рисунок 3.31 – Поведінка напруги  $U(t)$  при  $\varepsilon_2=0.0039$  (та  $\varepsilon_1=0.00088$ )  
(хаотична поведінка)

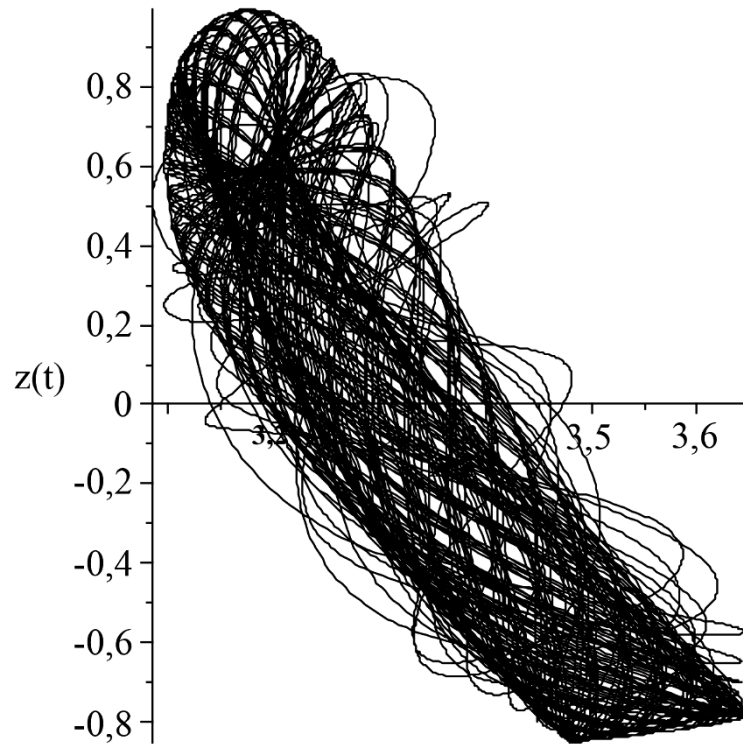


Рисунок 3.32 – Поведінка  $U-I$  характеристики при  $\epsilon_2=0.0039$  та  $\epsilon_1=0.0008$   
(квазіперіодична поведінка)

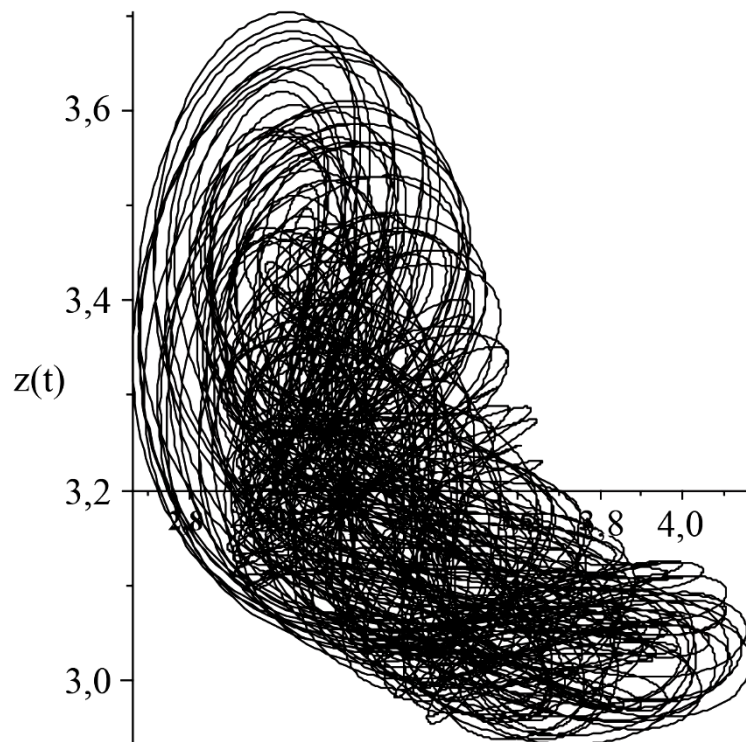


Рисунок 3.33 – Поведінка  $U-I$  характеристики при  $\epsilon_2=0.0039$  та  $\epsilon_1=0.00088$   
(хаотична поведінка)

Очевидно, що динаміка системи (3.16) може бути змінена за допомогою керуючих параметрів  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$ . Більш ефективно ці зміни можуть бути продемонстровані за допомогою показників Ляпунова (рис. 3.34, 3.35) [115, 116, 117, 120].

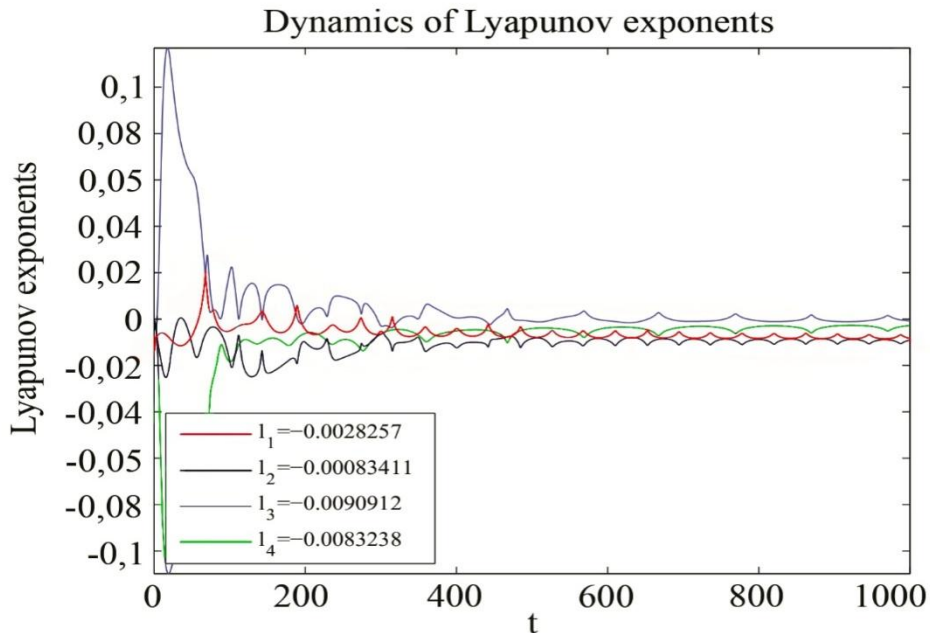


Рисунок 3.34 – Показники Ляпунова для системи (3.16) при  $\epsilon_1=0.00088$ ,  
 $\epsilon_2=0.0039$

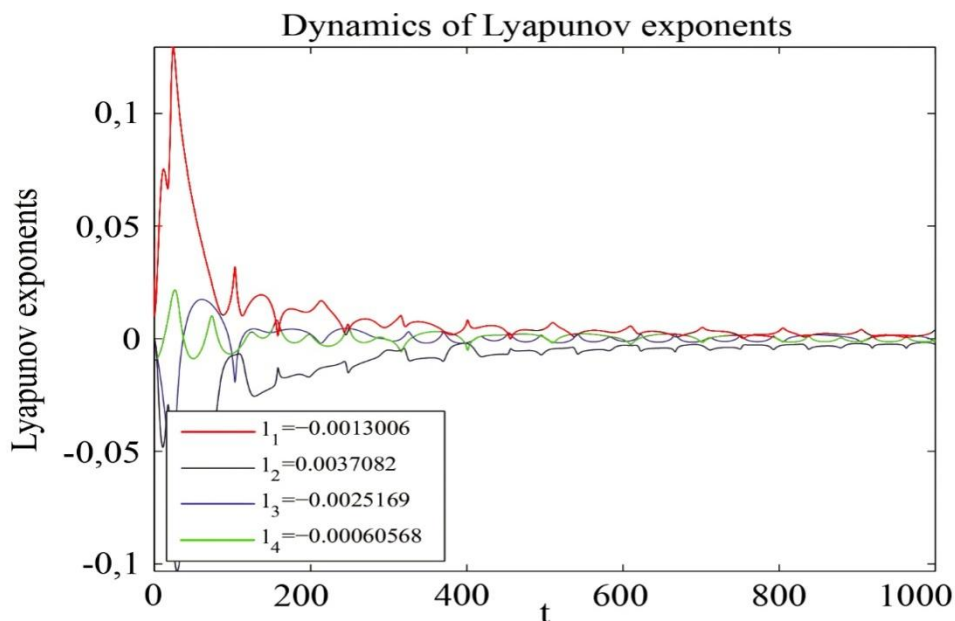


Рисунок 3.35 – Показники Ляпунова для системи (3.16) при  $\epsilon_1=0.00088$ ,  $\epsilon_2=0.01$

На рис. 3.34 один з показників Ляпунова є позитивним . Це свідчить про наявність хаотичних процесів у системі (3.16). На рис. 3.35 всі чотири показника Ляпунова є від'ємними. Це означає стабілізацію всіх процесів у системі (3.16).

Розглянемо таке узагальнення системи (3.16):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = y(t), \\ \dot{y}(t) = a_{10} + a_{11}x(t) + a_{12}y(t) + a_{13}z(t) + \\ + a_{14}u(t) + b_{12}x(t)y(t) + b_{11}x^2(t), \\ \dot{z}(t) = u(t), \\ \dot{u}(t) = a_{20} + a_{21}x(t) + a_{22}y(t) + a_{23}z(t) + \\ + a_{24}u(t) + b_{21}x(t)y(t) + b_{22}x^2(t), \end{cases} \quad (3.17)$$

де  $a_{10}, \dots, b_{11}, a_{20}, \dots, b_{22}$  – дійсні параметри.

За певних значень параметрів ця система описує динаміку змін напруги й струму в контактній мережі (див. рівняння (3.16)). Зауважимо, що напруга  $U(t) = x(t)$  і струм  $I(t) = z(t)$  вимірюються за допомогою рухомої лабораторії, що рухається з постійною швидкістю  $v$  уздовж контактної мережі. Зауважимо, що для того, щоб вивчити процеси в контактній мережі, зручнішою буде динамічна модель, у якій напруга  $U(t) = x(t)$  і струм  $I(t) = z(t)$  представлені як функції  $U(s) = x(s)$ ,  $I(s) = z(s)$  відстані  $s$  від деякої початкової точки. Таке уявлення дуже зручно в разі, коли стабілізація напруги в контактній мережі реалізується з деяких фіксованих точок, розташованих уздовж маршруту руху поїзда, наприклад, на тягових підстанціях або пунктах підсилення. Крім того, ми будемо вважати, що управління напругою здійснюється за допомогою регулятора  $U_{input}(s) = f(U(s), U'(s), I(s), I'(s))$ , де  $f(\dots)$  – дійсна функція своїх аргументів. Таким чином, перехід від моделі, у якій  $x(t)$  і  $z(t)$  представлені як функція часу  $t$ , досягнутий за допомогою заміни незалежної змінної  $t$  незалежною змінною  $s$ , згідно з формулою  $s = vt$ . У цьому випадку  $y(t) \rightarrow vy(s)$ ,  $u(t) \rightarrow vu(s)$ , і система (3.17) переходить у таку систему:



$$\begin{aligned}
\dot{x}(s) &= y(s), \\
\dot{y}(s) &= (a_{10} + a_{11}x(s) + a_{12}vy(s) + a_{13}z(s) + \\
&+ a_{14}vu(s) + b_{12}vx(s)y(s) + b_{11}x^2(s) + U_{input}(s)) / v^2, \\
\dot{z}(s) &= u(s), \\
\dot{u}(s) &= a_{20} + a_{21}x(s) + a_{22}vy(s) + a_{23}z(s) + \\
&+ a_{24}vu(s) + b_{21}vx(s)y(s) + b_{22}x^2(s) + I_{input}(s) / v^2.
\end{aligned} \tag{3.18}$$

де швидкість  $v = const$  вимірюється в м/с і  $U(s) = x(s)$ ,  $I(s) = z(s)$  – деякі функції відстані. Для простоти збережені колишні позначення залежних змінних  $x$  і  $z$  у знову отриманій системі. Змінні  $x(t)$  і  $z(t)$  замінені змінними  $x(s)$  і  $z(s)$ .

Уведемо в систему (3.18) закон управління за формулою

$$\begin{aligned}
U_{input}(S) &= (-0,00088 + piecewise(s < 10000, 0, k_1))I(s) + \\
&+ (0,0057 + piecewise(s < 10000, 0, k_2))vI(s) + (-0,0039 + \\
&+ piecewise(s < 10000, 0, k_3))vU(s)U(s) \equiv \\
&\equiv -0,00088 + piecewise(s < 10000, 0, k_1)z(s) + \\
&+ (0,0057 + piecewise(s < 10000, 0, k_2))vU(s) + \\
&+ piecewise(s < 10000, 0, k_2))vU(s) + \\
&+ (-0,0039 + piecewise(s < 10000, 0, k_3))vx(s)y(s).
\end{aligned} \tag{3.19}$$

де значення дійсної функції  $f = piecewise(s < Dist; b; c)$  дорівнює  $b$ , якщо  $s < a$  і  $c$  в протилежному випадку;  $0 < Dist < 120000$  метрів.

Запропонований закон управління означає, що регулювання напруги буде реалізовано за допомогою зворотного зв'язку, який вводиться в систему на відстані  $Dist$  метрів від початкової точки. Зауважимо, що на рис. 3.27 вимірювання струму беруться від деякого нульового рівня. Це звичайна практика вимірювань у контактній мережі з використанням постійного струму. Тут цей нульовий рівень відповідає значенню 1,5 кА.

Вплив на динаміку системи (3.18) закону управління (3.19) для швидкості  $v = 15$  м / с,  $Dist = 10000$  (або  $60000$ ) метрів і різних значеннях коефіцієнтів  $k1$ ,  $k2$ ,  $k3$  детально розглянутий у роботі [126]. У ній показано, що лінійний регулятор, який використовує тільки пропорційне посилення



$U_{input}(s)=k_1I(s)$  або аперіодичну ланку  $U_{input}(s)=k_1I(s)+k_2vI'(s)$ , менш ефективний, ніж нелінійні регулятори, оскільки нелінійний регулятор забезпечує більшу ніж у 5 разів швидкість стабілізації процесів.

Важливою проблемою є проблема робастності (нечутливості до малих збурень) побудованого регулятора. Проблема робастності є досить складною. Тому будемо розглядати тільки один з її аспектів.

Надалі під робастною системою (3.18) будемо розуміти запас стійкості цієї системи з побудованим регулятором (система замкнута зворотним зв'язком). Цей запас стійкості може бути визначений на основі побудови областей стійкості. Як показують розрахунки [126], проблема стабілізації напруги в контактній мережі не залежить від місця введення генеруючих потужностей. Тому скористаємося системою (3.18) для пошуку областей стійкості [121, 127]. Уведемо в систему (3.18) закон управління  $U_{input}=k_1U(t) - U(t)=k_1x(t)y(t)$  и  $I_{input}=k_2U(t) - U(t)=k_2x(t)y(t)$ , де  $k_1$ ,  $k_2$  – дійсні параметри. Тоді маємо таку замкнуту систему:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= y(t), \\ \dot{y}(t) &= 0,0193 - 0,0072x(t) + 0,0218y(t) - 0,00088z(t) + \\ &+ 0,0057u(t) - (0,0039 + k_1)x(t)y(t) + 0,000422x^2(t), \\ \dot{z}(t) &= u(t), \\ \dot{u}(t) &= 0,0294 - 0,0145x(t) - 0,8506y(t) - 0,0019z(t) - \\ &- 0,0095u(t) + (0,2380 + k_2)x(t)y(t) + 0,0017x^2(t). \end{aligned} \tag{3.20}$$

Положенням рівноваги системи (3.20) при  $k_1=k_2=0$  є точка з координатами  $x^* = 3.336576430$ ,  $y^* = 0$ ,  $z^* = -0.02878756292$ ,  $u^* = 0$ . Будемо шукати область стійкості системи (3.18) в околі положення рівноваги  $(x^*, y^*, z^*, u^*)$ . Обчислимо якобіан  $A=(a_{ij})$  [121] системи (3.18) в точці  $(x^*, y^*, z^*, u^*)$ .

Тут елементи матриці якобіана мають такі значення:

$$\begin{aligned} a_{11}=a_{13}=a_{14}=a_{31}=a_{32}=a_{33}=0, \\ a_{12}=a_{34}=1, \\ a_{21}=-0.004383929493, \\ a_{23}=-0.00088, \\ a_{22}=0.00878735192+3.336576430k_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{41} &= -0.00315564014, \\
a_{42} &= -0.0564948097 + 3.336576430k_2, \\
a_{43} &= -0.0019, \\
a_{44} &= -0.0095.
\end{aligned}$$

Нехай  $E$  – це одинична матриця порядку 4. Характеристичний поліном матриці  $A$  буде мати вигляд

$$\begin{aligned}
\det(\lambda E_4 - A) &= \lambda^4 + c_1\lambda^3 + c_2\lambda^2 + c_3\lambda + c_4 = \\
&= \lambda^4 + (0.00071264808 - 3.336576430k_1)\lambda^3 + \\
&+ (0.006522470065 - 0.03169747608k_1 - \\
&- 0.002936187258k_2)\lambda^2 + (-0.00000677692221 - \\
&- 0.006339495217k_1 + 0.002936187258k_2)\lambda + \\
&+ 0.000005552502714
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Поліноми Гурвіца [123] для матриці  $A$ :

$$\begin{aligned}
\Delta_1(k_1, k_2) &= c_1 = 0.00071264808 - 3.336576430k_1, \\
\Delta_2(k_1, k_2) &= c_2 - c_3 = (0.00071264808 - 3.336576430k_1) \times \\
&\times (0.006522470065 - 0.03169747608k_1 - 0.01901848565k_2) - \\
&- (-0.00000677692221 - 0.006339495217k_1 + 0.002936187258k_2), \\
\Delta_3(k_1, k_2) &= c_2c_3 - c_3^2 - c_1^2c_4 = (0.00071264808 - 3.336576430k_1) \times \\
&\times (0.006522470065 - 0.03169747608k_1 - 0.01901848565k_2) \times \\
&\times (-0.00000677692221 - 0.006339495217k_1 + 0.002936187258k_2) - \\
&- (-0.00000677692221 - 0.006339495217k_1 + 0.002936187258k_2)^2 - \\
&- (0.00071264808 - 3.336576430k_1)^2 \times 0.000005552502714, \\
\Delta_4(k_1, k_2) &= c_4 = 0.000005552502714.
\end{aligned}$$

Область стійкості визначається умовами

$$\begin{aligned}
\Delta_1(k_1, k_2) &> 0, \\
\Delta_2(k_1, k_2) &> 0, \\
\Delta_3(k_1, k_2) &> 0, \\
\Delta_4(k_1, k_2) &> 0.
\end{aligned}$$

Тепер уведемо в систему (3.18) закон управління  $U_{input} = k_1 I(t) = k_1 z(t)$  та  $I_{input} = k_2 I(t) = k_2 z(t)$ , де  $k_1, k_2$  – дійсні параметри. У цьому випадку також формуємо поліноми Гурвіца

$$\begin{aligned}
\Delta_1(k_1, k_2) &> 0, \\
\Delta_2(k_1, k_2) &> 0, \\
\Delta_3(k_1, k_2) &> 0, \\
\Delta_4(k_1, k_2) &> 0.
\end{aligned}$$

У площині параметрів  $k_1, k_2$  область стійкості для нелінійного закону  $U_{input} = k_1 U(t)$   $U'(t) = k_1 x(t)y(t)$  та  $I_{input} = k_2 U(t)$   $U'(t) = k_2 x(t)y(t)$  наведена на рис. 3.36.

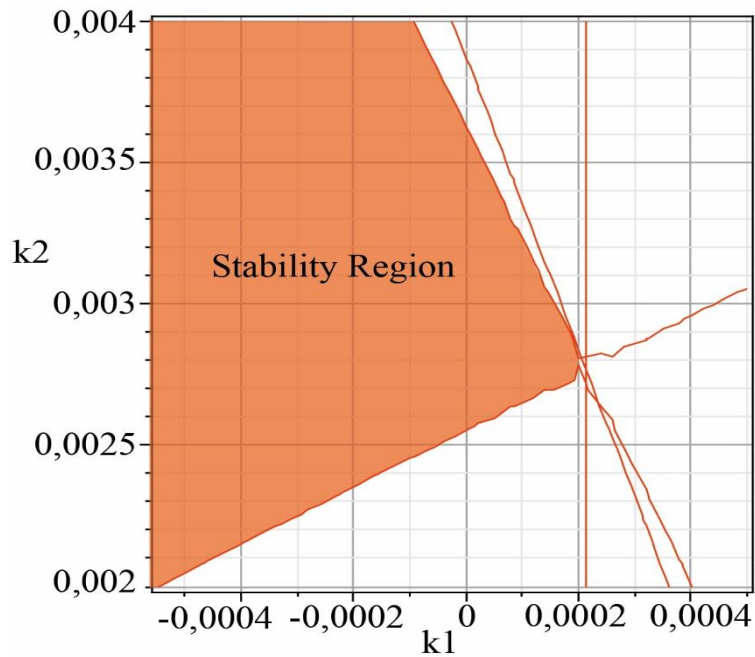


Рисунок 3.36 – Область стійкості для системи (3.20) для нелінійного закону управління  $U_{input}=k_1U(t)$   $U'(t)=k_1x(t)y(t)$  і  $I_{input}=k_2U(t)$   $U'(t)=k_2x(t)y(t)$

У площині параметрів  $k_1$ ,  $k_2$  область стійкості для закону управління  $U_{input}=k_1I(t)=k_1z(t)$  и  $I_{input}=k_2I(t)=k_2z(t)$  наведена на рис. 3.37.

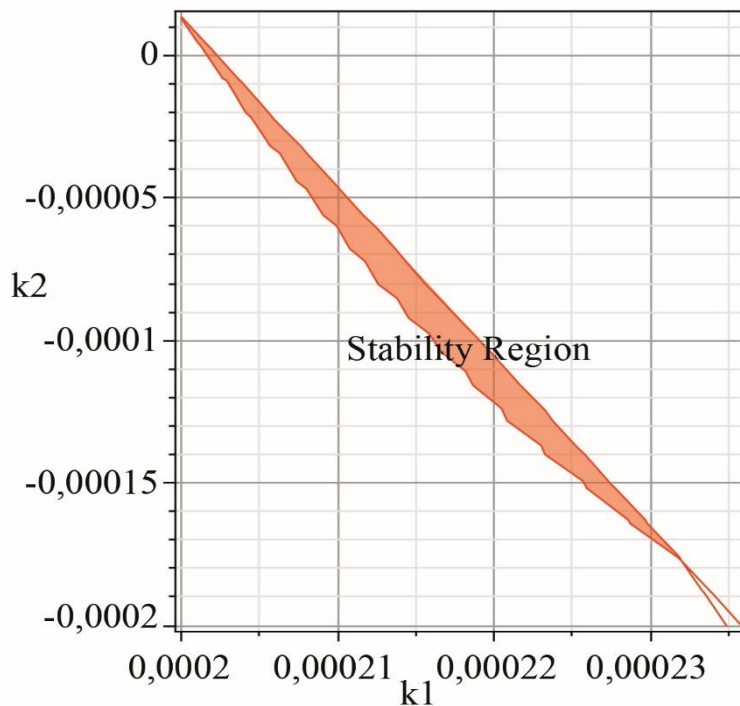


Рисунок 3.37 – Область стійкості для системи (3.20) для лінійного закону управління  $U_{input}=k_1I(t)=k_1z(t)$  і  $I_{input}=k_2I(t)=k_2z(t)$

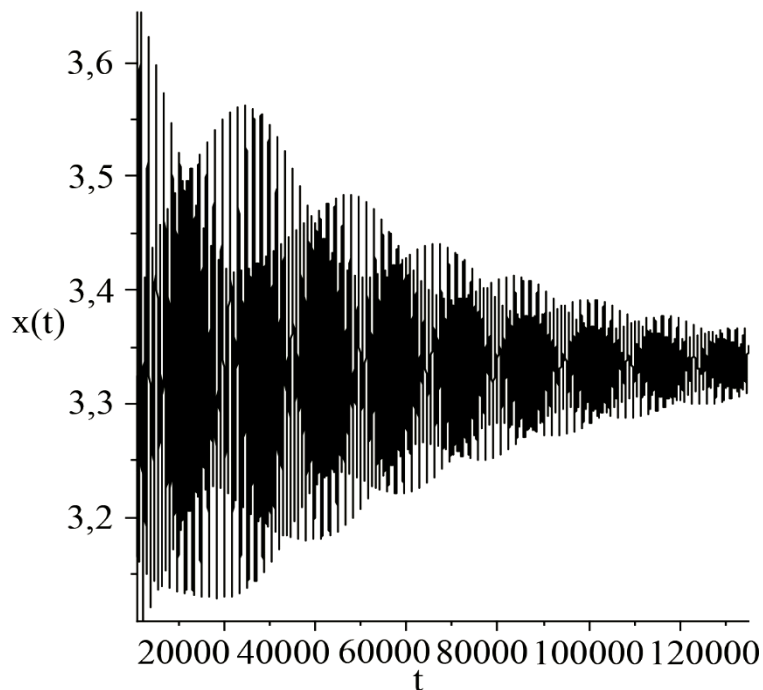


Рисунок 3.38 – Поведінка функції  $x(t)$  (напруга в контактній мережі) для системи (3.20) при лінійному законі управління  $U_{input}=k_1z(t)$ ,  $I_{input}=k_2z(t)$

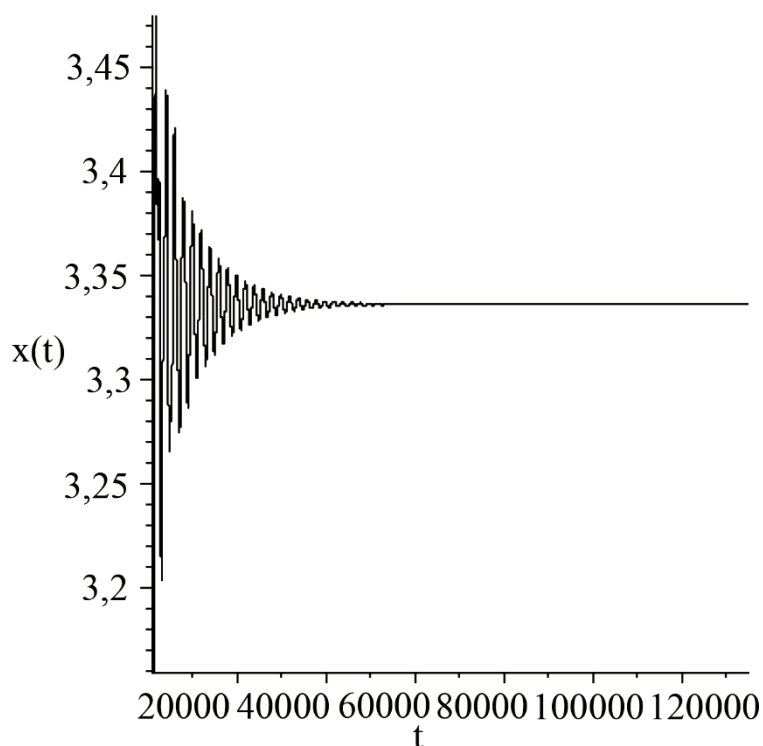


Рисунок 3.39 – Поведінка функції  $x(t)$  (напруга в контактній мережі) для системи (3.20) при нелінійному законі управління  $U_{input}=k_1x(t)y(t)$ ,  $I_{input}=k_2x(t)y(t)$

Таким чином, як випливає з наведених рисунків, нелінійний регулятор має кращі робастні властивості, ніж лінійний регулятор. Крім того, область стійкості лінійного регулятора досить мала. Ця обставина не дозволяє використовувати такі регулятори для вирішення завдання стабілізації напруги в контактній мережі. Також слід сказати, що області стійкості побудовані для лінеаризованої системи (3.20). Звідси випливає, що області стійкості для нелінійної системи (3.18) можуть виявитися ширшими, ніж області, зазначені на рис. 3.36.

### **Висновки до розділу 3**

Оцінка ефективності функціонування запропонованої системи розподіленого живлення показала, що вона дозволяє забезпечити необхідний рівень питомої потужності в тяговій мережі в межах 2,00 – 2,15 МВт/км, і це дало змогу обмежити мінімальне значення напруги на струмоприймачі ЕРС на рівні 2900 В. При цьому діапазон зміни напруги на шинах тягових підстанцій зменшується на 12 В, а в тяговій мережі – на 170 В.

Застосування СРЖ дозволяє зменшити струмові навантаження на проводи контактної мережі, тобто можна застосовувати полегшену контактну підвіску. При цьому за рахунок покращення режиму напруги в системі тягового електропостачання зменшується неактивна потужність та втрати потужності в тяговій мережі, підвищується коефіцієнт корисної дії на 3 %, а економія електроенергії становить 4,3 % від спожитої електроенергії поїздом.

Встановлено, що аналітичний підхід не дозволяє повною мірою робити висновки про стійкість СТЕ за напругою і, відповідно, за потужністю. Звідси можна зробити очевидний висновок про необхідність розробки нових підходів до регулювання напруги в тяговій мережі. У реальних умовах керуючі впливи на рівень напруги здійснюються маловитратними тривіальними засобами підсилення тягової мережі: збільшенням перерізу проводів, застосуванням пунктів паралельного з'єднання. Однак ці засоби не в змозі забезпечити необхідну стійкість СТЕ за напругою та потужністю і не дозволяють

регулювати напругу в тяговій мережі, що вимагає розробки нових підходів до синтезу регуляторів напруги та законів їх функціонування.

На підставі експериментальних даних запропоновано математичну модель зміни струму й напруги в тяговій мережі, що дозволяє оцінити якість процесів електроспоживання та області стійкої роботи системи тягового електропостачання. Структура моделі розроблялася з використанням нелінійного рекурентного аналізу, що дозволяло виявити приховані складові процесу. Наприклад, крім вимірних струму й напруги, розраховувалися їх похідні.

У результаті виконаного порівняльного аналізу структур регуляторів з лінійними і нелінійними законами управління показано, що область стійкості для нелінійного закону управління з огляду на гіперхаотичні властивості системи є дуже вузькою, порядку  $\Delta k = 0,00005$ , а для лінійного  $\Delta k = 0,000004$ , тобто ще на порядок менша. Це явище пояснюється високою динамічною чутливістю системи до зміни зовнішніх чинників.

Доведено, що регулятор з нелінійним законом управління має кращу робастність, оскільки напруга в контактній мережі стабілізується вже при  $t = 4$ , а при лінійному управлінні вона тільки виходить на режим стабілізації після  $t = 12$ . При цьому зона стабілізації напруги в тяговій мережі при застосуванні нелінійного закону управління в 3-4 рази ширша, порівняно із використанням лінійного закону.

## **Розділ 4. СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ТА РЕЖИМИ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

### **4.1. Система вимірювань та контролю рівнів напруги для розподіленої системи тягового електропостачання**

При впровадженні системи розподіленого та керованого електропостачання виникає завдання вимірювання рівнів напруги на струмоприймачах електрорухомого складу для забезпечення ефективної роботи системи. Слід зауважити, що контроль напруги необхідно здійснювати в декількох точках, розподілених вздовж електрифікованої ділянки, для ідентифікації її зміни під час руху міжпідстанційною зоною будь-якої кількості поїздів.

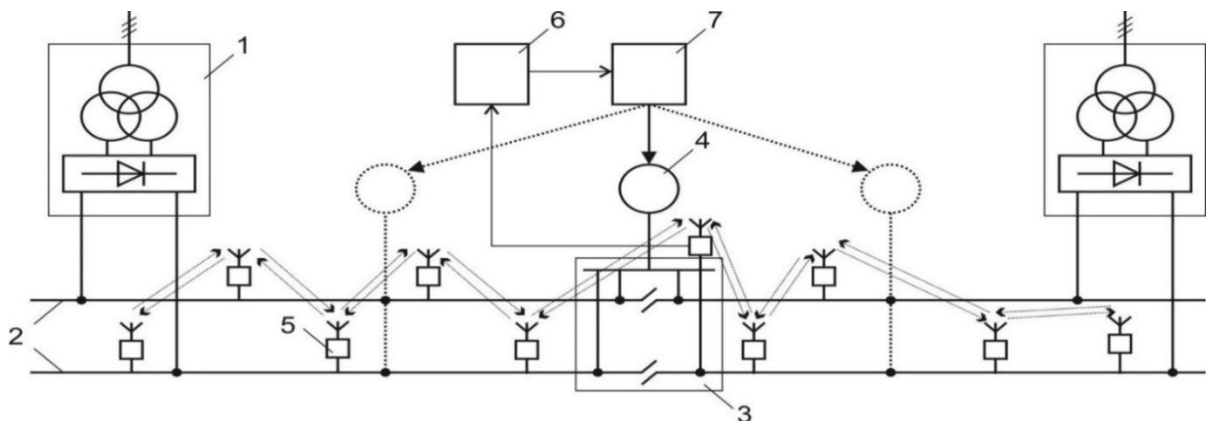
Як відомо, на залізницях України контроль за режимом напруги в тяговій мережі виконується на підставі вимірювань напруги на шинах тягових підстанцій та на електрорухомому складі. Але на основі такого методу контролю напруги неможливо створити цілісну систему вимірювань, яка б стала підґрунтям при побудові сучасної системи електричної тяги, побудованої за принципом розподіленого та керованого електропостачання.

Для вирішення подібної задачі в середині 70-х років минулого сторіччя було запропоновано спосіб, який полягає у вимірюванні рівня напруги на шинах 3,3 кВ двох суміжних тягових підстанцій, подальшого обчислення середньої втрати напруги до струмоприймача електрорухомого складу на підставі емпіричної залежності відносно втрати напруги до поста секціонування, яка у свою чергу визначається як середнє значення між виміряними напругами на шинах суміжних тягових підстанцій. Отримане таким чином середнє значення напруги на струмоприймачеві подається на командний пристрій регулювання напруги в системі СТАРНК [128], який залежно від різниці заданої уставки напруги та напруги на струмоприймачеві генерує команду, що передається блокам

регулювання випрямних агрегатів суміжних тягових підстанцій для підвищення напруги безпосередньо на шинах тягових підстанцій.

Для удосконалення автоматичного регулювання напруги в контактній мережі також був розроблений спосіб [129], який полягає в тому, що вимірюють напругу на постах секціонування суміжних з тяговою підстанцією, порівнюють виміряні значення зі встановленими уставками напруги та формують керуючий вплив на блок регулювання напруги на шинах тягової підстанції залежно від співвідношення між собою напруги постів секціонування та необхідності мінімізації додаткових втрат потужності від виникнення вирівнювальних струмів між іншими тяговими підстанціями.

Для контролю рівнів напруги в контактній мережі безпосередньо на струмоприймачах електрорухомого складу незалежно від кількості поїздів на міжпідстанційній зоні на кафедрі «Інтелектуальних систем електропостачання» було розроблено спосіб, суть якого полягає в тому, що для визначення напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму вимірюють напругу на шинах суміжних тягових підстанціях та на шинах поста секціонування всередині міжпідстанційної зони. При цьому додатково вимірюють розподіл напруги уздовж міжпідстанційної зони (рис. 4.1) [130].



1 – тягова підстанція; 2 – контактна мережа; 3 – пост секціонування; 4 – підсилювальний пункт тягової мережі; 5 – пристрій вимірювання напруги з бездротовою передачею даних; 6 – блок декодування даних; 7 – система управління

Рисунок 4.1 – Структурна схема системи розподілених вимірювань напруги на ділянці електрифікованої залізниці



Одним з основних завдань при побудові розподіленої системи вимірювань є визначення місця розташування датчиків напруги [131]. Стратегія розміщення датчиків напруги повинна базуватися на умові забезпечення коректною інформацією системи управління тяговим електропостачанням, але при цьому необхідно також враховувати якісно-вартісні показники системи.

Аналізуючи систему тягового електропостачання, її режими роботи та параметри, можна стверджувати, що розміщення пристроїв вимірювання напруги вздовж електрифікованої ділянки є багатоцільовою задачею оптимізації з великою кількістю змінних (у загальному випадку це кількість датчиків, їх потужність та тип), до того ж частина змінних є аналоговими (значення струмів, потужностей, довжини ділянок), а частина – дискретними даними (місця розташування датчиків та їх кількість). Тому для визначення місця розміщення датчика напруги в роботі пропонується використати метод сенсорних вузлів [132]. Дослідження сенсорності вузлів – це один з напрямків структурного аналізу електроенергетичних систем, які використовують оцінку реакції напруги вузлів на зміну навантажень у них [133]. Вузли зі значними змінами напруги на одиницю потужності навантаження називають сенсорними, а вузли з найменшими змінами напруги – жорсткими. Саме сенсорні вузли для задачі розміщення пристроїв вимірювання напруги в розподіленій системі тягового електропостачання є найбільш інформативними, а їх реакція на зміну навантаження – показовою. Тобто необхідно визначити з розрахованого режиму напруги найслабкіші точки тягової мережі.

Реалізацію цього методу доцільно розглянути на прикладі електрифікованої ділянки розподіленого живлення (рис. 4.2).

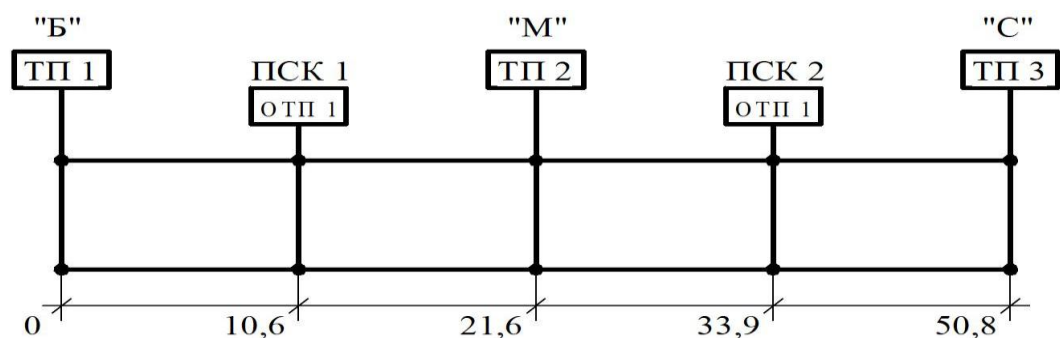
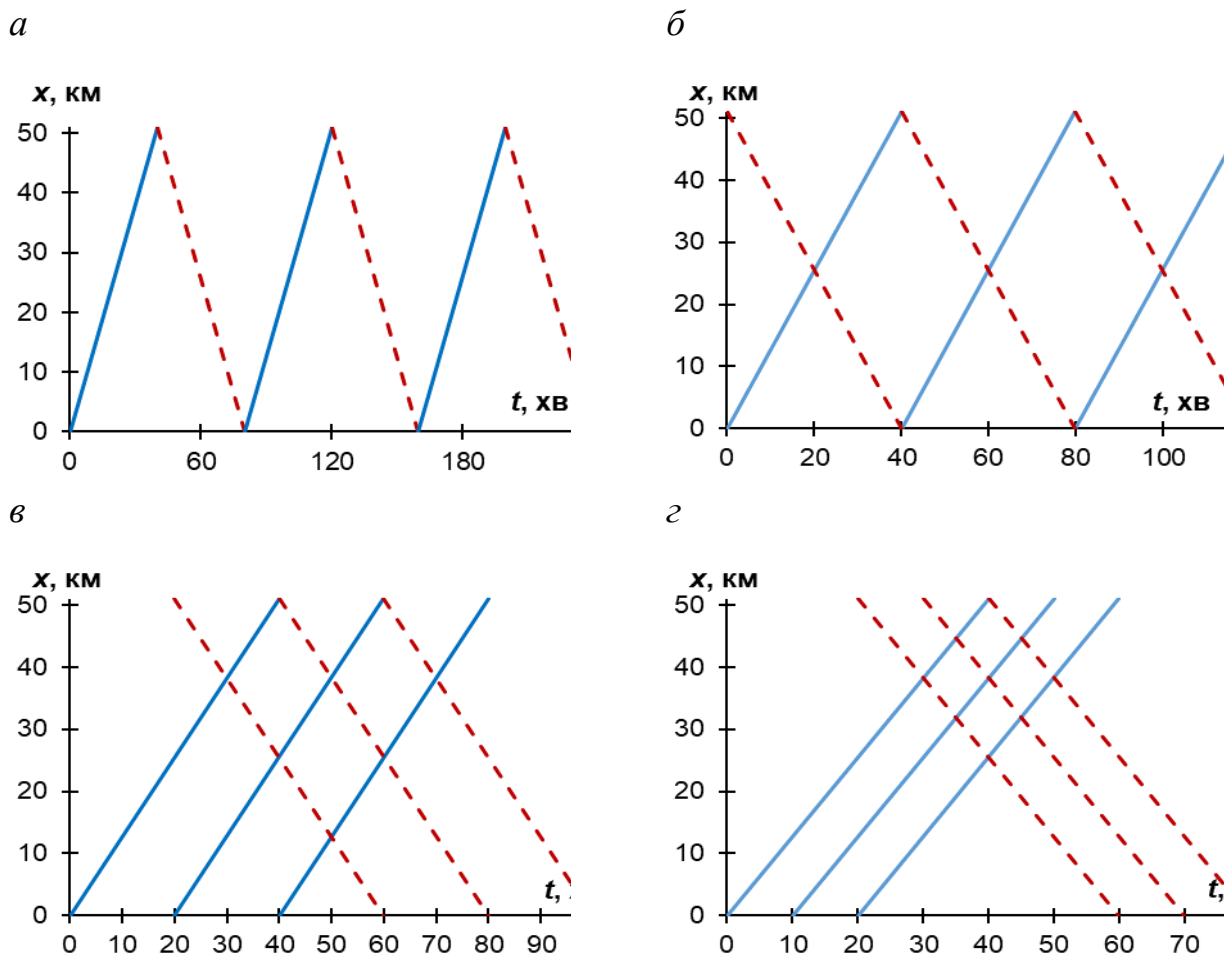


Рисунок 4.2 – Схема розрахункової ділянки розподіленого живлення

Розрахункова ділянка двоколійна, довжиною 50,8 км, має 4 міжпідстанційні зони та отримує живлення від 3 тягових підстанцій за вузловою схемою, додатково на постах секціонування розміщені одноагрегатні тягові підстанції. Тягові підстанції мають однакову напругу на шинах 3 300 В, тягова мережа по всій довжині однакова – М120+2МФ100+А185+Р65. Сенсорність вузлів досліджувалася з дискретністю 1 км.

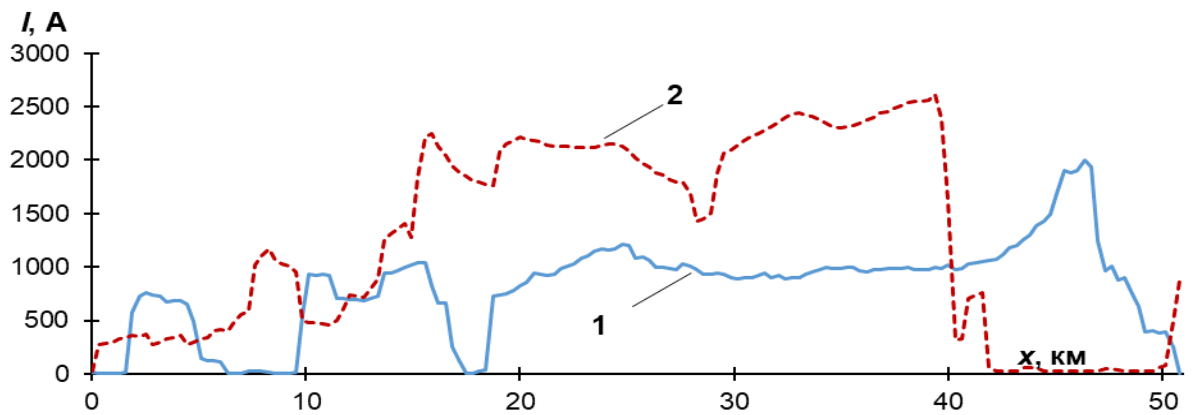
На ділянці графіки руху трьох пар поїздів реалізовані таким чином, що реакції сенсорних вузлів визначалися спочатку окремо від кожного навантаження, потім з поступовим ущільненням міжпоїзного інтервалу до 10 хв (рис. 4.3). Струми ЕРС наведено на рис. 4.4.



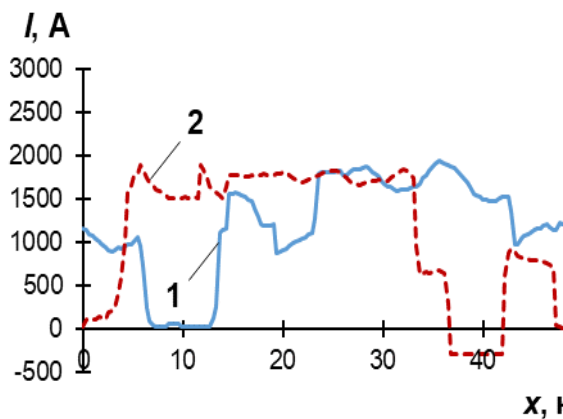
а – поїзний інтервал 80 хв; б – поїзний інтервал 40 хв; в – поїзний інтервал 20 хв; г – поїзний інтервал 10 хв

Рисунок 4.3 – Графік руху поїздів ділянкою

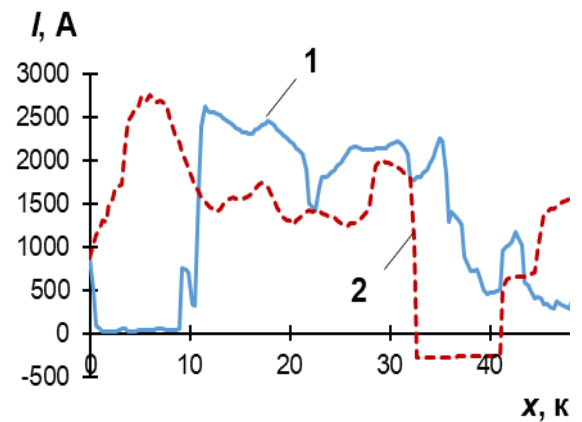
а.



б.



в.



1 – парний напрямок; 2 – непарний напрямок

Рисунок 4.4 – Струми електрорухомого складу

Сенсорні вузли у системі визначалися таким чином:

1. Для кожного графіка руху, для кожного дискретного вузла розраховувалась зміна напруги (інтервал 1 хв) протягом реалізації графіка руху поїздів.

2. У кожній точці визначалося максимальне та мінімальне значення напруги, на основі яких були побудовані залежності рис. 4.5.

3. Точка з максимальною амплітудою коридору зміни напруги, тобто точка, що відповідає умові (1), визначалась як найчутливіший сенсорний вузол для заданої ділянки схеми (для кожної МПЗ).

$$s = \max_{[a;b]} (U_{\max j} - U_{\min j}), \quad (4.1)$$

де  $a$  – координата початку ділянки;

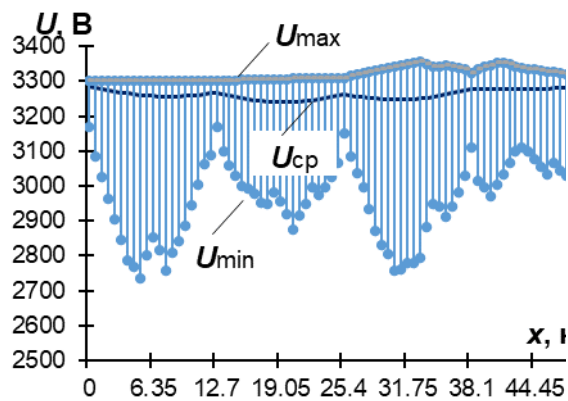
$b$  – координата кінця ділянки;

$j$  – номер досліджуваного вузла;

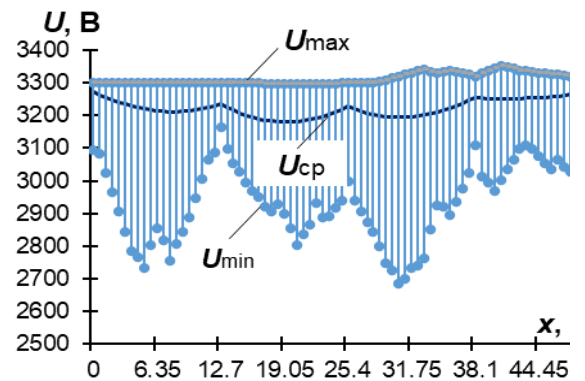
$U_{\max j}$  – максимальне значення напруги в  $j$ -му вузлі;

$U_{\min j}$  – мінімальне значення напруги в  $j$ -му вузлі;

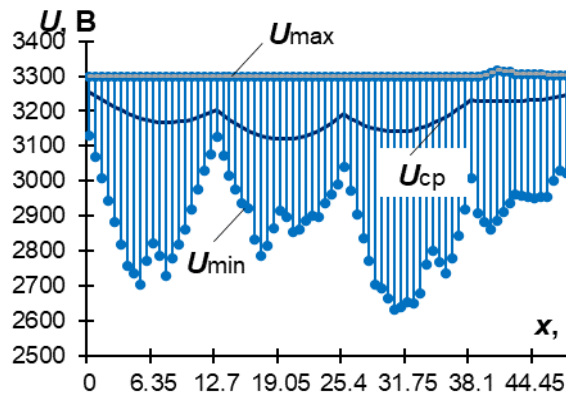
*а*



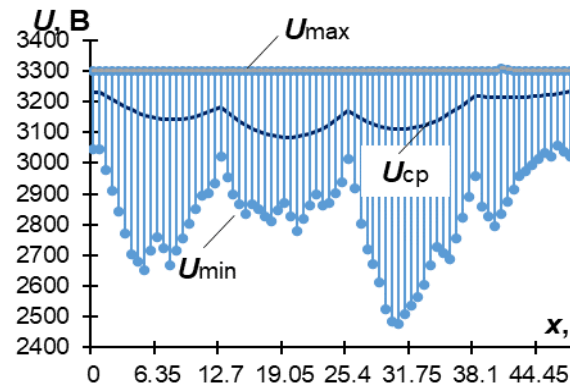
*б*



*в*



*г*



а – інтервал руху 80 хв; б – інтервал руху 40 хв; в – інтервал руху 20 хв; г –  
інтервал руху 10 хв;

Рисунок 4.5 – Графік зміни напруги для ГРП

Результати розрахунку найчутливіших вузлів для дослідної ділянки відповідно до отриманих результатів наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Сенсорні вузли розрахункової ділянки

Графік руху поїздів	а. міжпоїзний інтервал 80 хв				б. міжпоїзний інтервал 40 хв				в. міжпоїзний інтервал 20 хв				г. міжпоїзний інтервал 10 хв			
	Координата найчутливішого сенсорного вузла для кожної МПЗ	5	20,3	30,5	40	5	20,3	30,5	40	5	17	30,5	40	5	20,3	30,5

Для подальших розрахунків прийняті найслабкіші точки контактної мережі, що визначаються координатами: 5 км, 20,3 км, 30,5 км, 40 км.

Як видно з отриманих результатів, відстань між найслабкішими точками тягової мережі становить 10,2 – 15,3 км. За умови розміщення в обраних точках датчиків напруги з бездротовою передачею даних, може бути забезпечена пряма видимість сусідніх пристроїв. (рис. 4.6). Перевірка довжини зони прямої видимості виконується за методом Френеля [133].

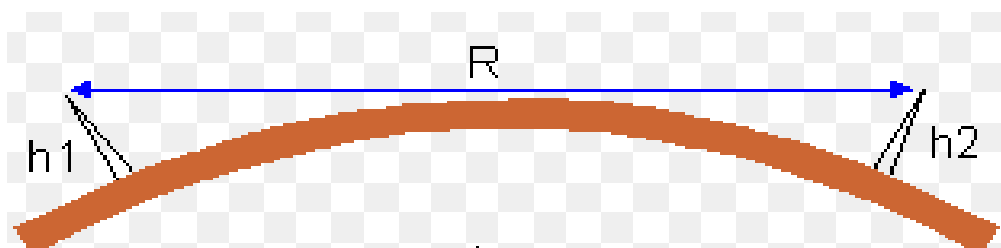


Рисунок 4.6 – Відстань для встановлення датчиків

Оскільки датчики будуть розміщені на опорах контактної мережі, можна задатись висотою встановлення датчика в межах від 5 до 9,5 м (табл. 4.2) (абсолютна висота не враховувалась).

Таблиця 4.2 – Можливі висоти встановлення датчиків

$h_{м1}$	$h_{м2}$	$h_{м3}$	$h_{м4}$	$h_{м5}$	$h_{м6}$	$h_{м7}$	$h_{м8}$	$h_{м9}$	$h_{м10}$
5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5

Для розрахунку відстані розташування датчиків скористаємося формулою Френеля

$$R_{км} = 3,57 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (4.2)$$

Де  $h_{m1}$ - висота, на якій буде встановлено датчик 1, м;

$h_{m2}$ - висота, на якій буде встановлено датчик 2, м;

$R_{км}$ - відстань встановлення датчиків, км.

Отримані результати розрахунків показали, що гранична довжина зони прямої видимості датчиків розташована в межах від 15,9 до 22 км, залежно від висоти встановлення, що значно більше за відстань між найслабшими точками тягової мережі.

Для забезпечення зв'язку між датчиками на значній відстані та забезпечення надійної передачі інформації пристрої вимірювання напруги необхідно додатково обладнати антенами. Оскільки датчики напруги будуть розташовані не лише в сенсорних вузлах ділянки, а й на тягових підстанціях, необхідно забезпечити резервування дії антен, тобто щоб у разі виходу з ладу одного з датчиків, інформація могла передаватися наступній антені. Таким чином можна забезпечити безперебійну роботу системи вимірювань.

Максимальний радіус зони антени обчислюється за формулою

$$Radius(mts) = 17.3 \cdot \sqrt{\frac{D}{4 \cdot f}} \quad (4.3)$$

де  $D$  – відстань між антенами, км;

$f$  – частота передавача, ГГц.

Оскільки радіус зони дії антени досягає свого максимуму в центральній точці й при наближенні до антени зменшується, зона дії антени в конкретній точці залежить від відстані до неї:

$$r = 17.3 \cdot \sqrt{\frac{1}{f} \cdot \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2}}, \quad (4.4)$$

де  $f$  – частота, ГГц,  $D_1$  і  $D_2$  - відстань до точки від антен, км.

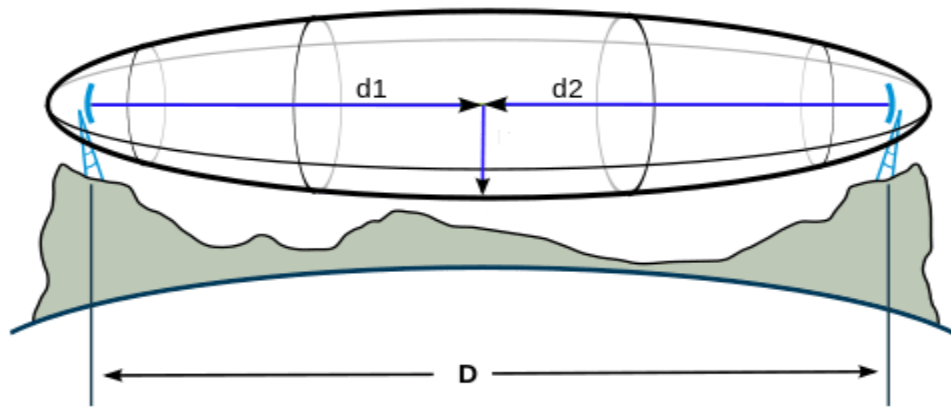


Рисунок 4.7 – Радіус покриття антени

Результати розрахунків радіусу дії антен наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Максимальний радіус дії антени

Координата розташування датчика	0	5	10,6	20,3	21,6	30,5	33,9	40	50,8
Радіус дії антени, км, не більше ніж	20.9 ТП1	25.2 (п.)	21.4 ОТП1	20.6 (п.)	22.6 ТП2	19.8 (п.)	26.5 ОТП2	19.8 (п.)	26.5 ТП3

\* п. – встановлення датчика на перегоні.

Як видно з отриманих результатів розрахунку, радіус дії антен перевищує відстань між сусідніми датчиками та забезпечує резервування передачі інформації при виході одного датчика з ладу.

Таким чином вперше створено методика вибору місць розташування датчиків напруги розподіленої системи вимірювань на основі сенсорного методу та методу Френеля. Згадана система вимірювань дозволяє отримувати інформацію о напрузі в тяговій мережі, що є базою для забезпечення раціональних режимів систем розподіленого живлення.

#### 4.2. Застосування активного перетворювача

При великій інтенсивності руху поїздів необхідно мати істотний запас регулювання напруги для забезпечення вимог швидкісного руху. Як показують розрахунки реальної ділянки (розділ 3), у деяких випадках СРЖ із

застосовуваними перетворювачами ПА-5200 не може забезпечити необхідну стійкість за напругою. Звідси виникає необхідність застосування в СРЖ більш досконалої структури випрямляча. Аналіз доступних публікацій [134, 135, 136, 137] показує, що найбільш вигідним рішенням є матеріалізація концепції “активної підстанції” із застосуванням активного випрямляча.

Активний випрямляч напруги (АВН) є додатковим пристроєм для перетворювача частоти, за допомогою якого гальмівна потужність повертається в мережу. Він здійснює двоспрямоване перетворення енергії і забезпечує постійну напругу живлення незалежно від стану навантаження. Сучасна елементна база з використанням принципів імпульсної модуляції дозволяє забезпечити близький до одиниці коефіцієнт потужності перетворювачів електроенергії. Трифазні активні випрямлячі напруги (АВН) належать до порівняно нового класу перетворювачів, які можуть працювати в випрямному й інверторному режимах, передаючи енергію з мережі змінного струму в ланцюг постійного і назад, тобто змінюючи напрямок потоку потужності. При цьому змінюється напрямок струму при незмінній полярності напруги [134, 135, 136, 137]. У цих перетворювачів поліпшений гармонійний склад струму, споживаного з мережі, а також є можливість отримання бажаного значення коефіцієнту потужності, у тому числі близького до одиниці.

АВН можуть застосовуватися в трьох випадках:

- 1) для отримання стабільної постійної напруги від мережі змінного струму з можливістю рекуперації енергії;
- 2) як перша ланка у дволанкових перетворювачів для живлення двигунів постійного струму з можливістю регулювання швидкості й рекуперативного гальмування;
- 3) як перша ланка у дволанкових перетворювачів для живлення асинхронних двигунів з можливістю регулювання швидкості й рекуперативного гальмування.



Для вибору оптимальної схеми випрямного агрегату тягової підстанції необхідне дотримання низки критеріїв [138]: підтримка вихідної напруги 3,3 кВ в широкому діапазоні навантажень (від десятків ампер до декількох кілоампер), можливість реалізації рекуперації енергії, реалізація коефіцієнта потужності, близького до одиниці, мінімальний вміст вищих гармонік споживаного струму. Повномостова підвищувальна схема АВ відповідає всім вищепоставленим вимогам: забезпечує коефіцієнт потужності, близький до одиниці, низький вміст вищих гармонік мережі і є оптимальною схемою активного випрямляча тягової підстанції. Активний випрямляч напруги (далі АВН) порівняно з іншими топологіями має такі переваги: ця схема забезпечує двосторонню передачу енергії і ставить менші навантажувальні вимоги до IGBT ключів. Схема АВН зображена на рисунку 4.8. Вона складається з шести силових IGBT ключів, вихідного конденсатора й трьох вхідних дроселів.

Для управління даними перетворювачем був розглянутий варіант широтно-імпульсного регулювання. Перевагою цього способу управління є простота реалізації, постійна частота широтно-імпульсної модуляції, що, у свою чергу, полегшує роботу силових фільтрів. Така система управління має двоконтурну систему регулювання. Інтегральний регулятор першого контуру забезпечує стабілізацію вихідної напруги. Стала часу регулятора вибирається таким чином, щоб виключити вплив високочастотних пульсацій напруги на навантаженні, привнесених широтно-імпульсним модулятором. Другий контур виконаний на основі пропорційного регулятора й формує синусоїдальний сигнал задання вхідного струму, що збігається за фазою з вхідною напругою. Для забезпечення стійкості системи автоматичного регулювання необхідно забезпечити відношення між похідними сигналу завдання і пилоподібного сигналу модулятора 1: 2.

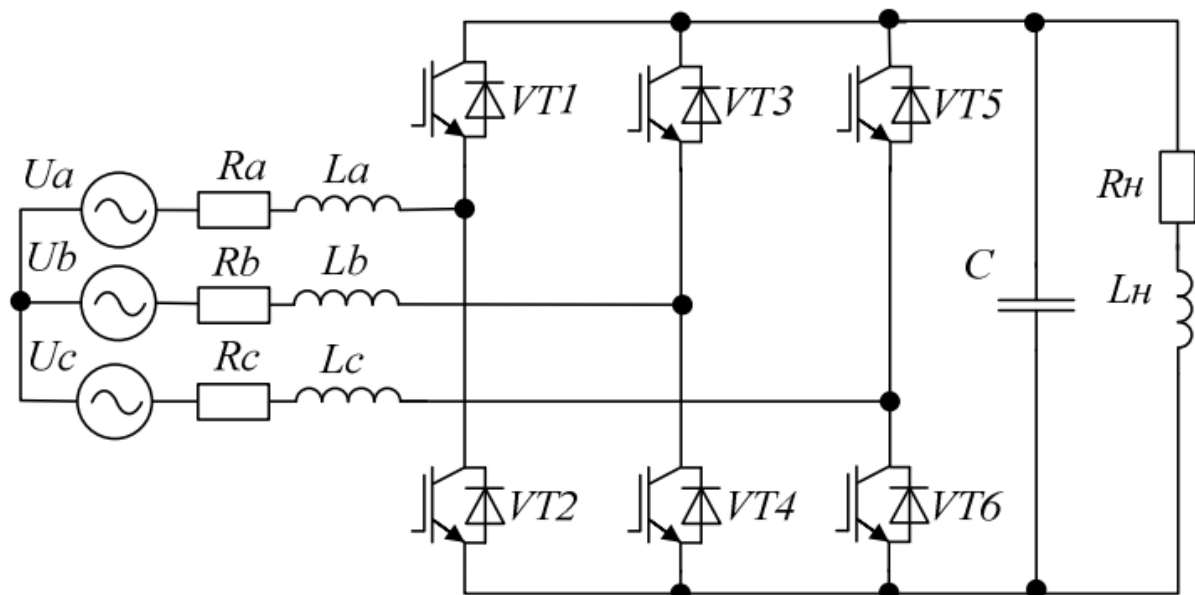


Рисунок 4.8 – Схема активного трифазного випрямляча.

Оскільки за своєю топологією перетворювач є підвищувальним, необхідною умовою його роботи є дотримання відношення  $U_{\text{вх}} < U_{\text{н}}$ . Дотримання зазначених принципів побудови САР дозволяє досягти близького до одиниці коефіцієнта потужності й забезпечити споживання з мережі синусоїдального струму. Індуктивність входних фільтрових дроселів залежить від частоти модуляції, а також параметрів входних і вихідних величин. Можливість роботи активного випрямляча в інверторному режимі дозволяє використовувати в ланці постійного струму (у місці підключення фільтрового конденсатора  $C_d$ ), енергоємних накопичувачів електричної енергії, увімкнених через додатковий узгоджувальний DC/DC перетворювач [139]. Таке рішення дозволяє поліпшити енергетичні характеристики системи, підвищити її стійкість в умовах нестаціонарності навантаження, а також виконати тимчасову утилізацію енергії рекуперації з подальшим її поверненням.

Технічні характеристики пропонованого активного випрямляча такі:

Кількість фаз.....				3
Живляча	напруга,	кВ	.....	35
Номинальна	вихідна	потужність,	кВт.....	5200

Номінальний струм,  $I_H$ , А.....1600  
 Вихідна напруга, В.....0÷3300

Для перевірки можливості дотримання необхідних режимів напруги на розробленій Simulink-моделі (рис. 4.9) виконувалися варіантні розрахунки різних режимів роботи при взаємодії тягової підстанції та тягової мережі.

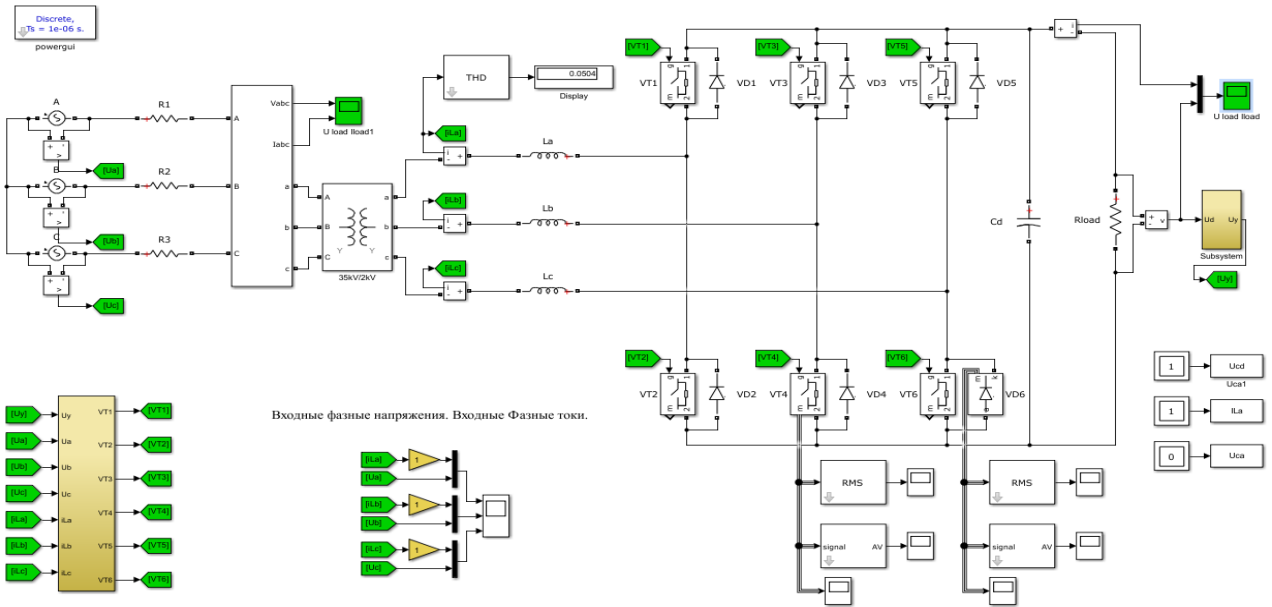
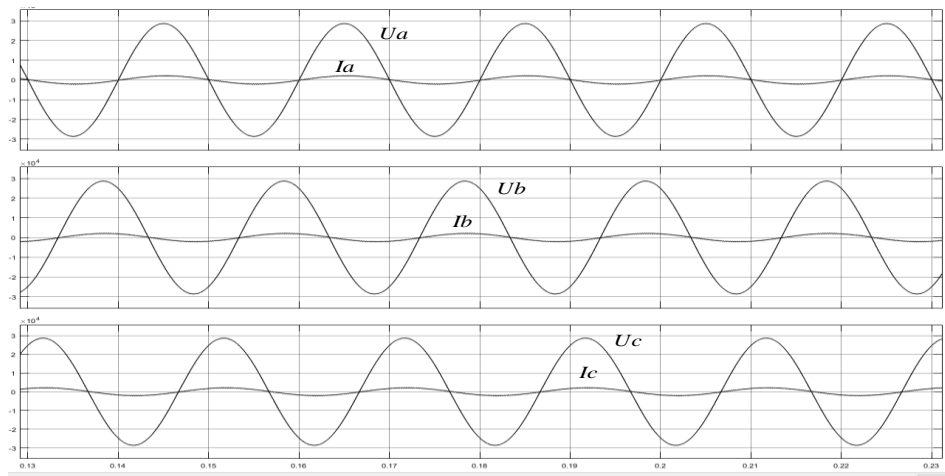


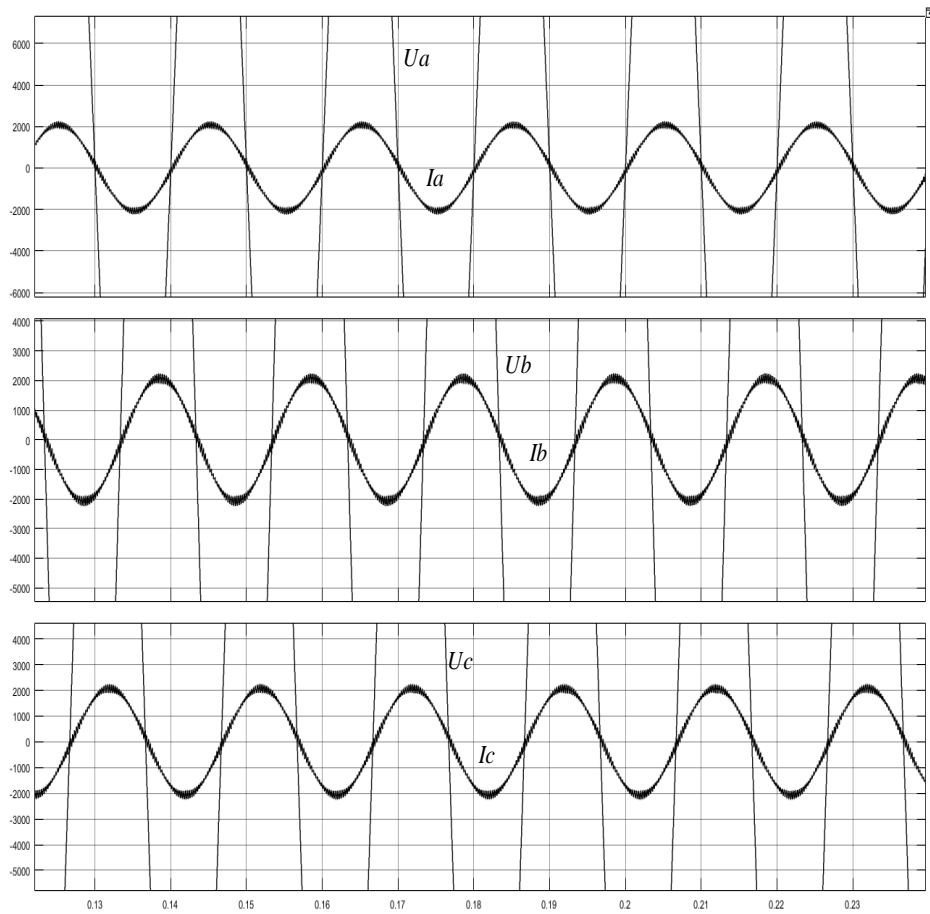
Рисунок. 4.9. – Simulink-модель запропонованого випрямляча

Результати моделювання режимів функціонування випрямляча наведені на рис. 4.10- 4.13.

**Сталий режим роботи перетворювача**



a)



б)

Рисунок 4.10 – Осцилограми фазних струмів та напруг на виході знижувального трансформатора

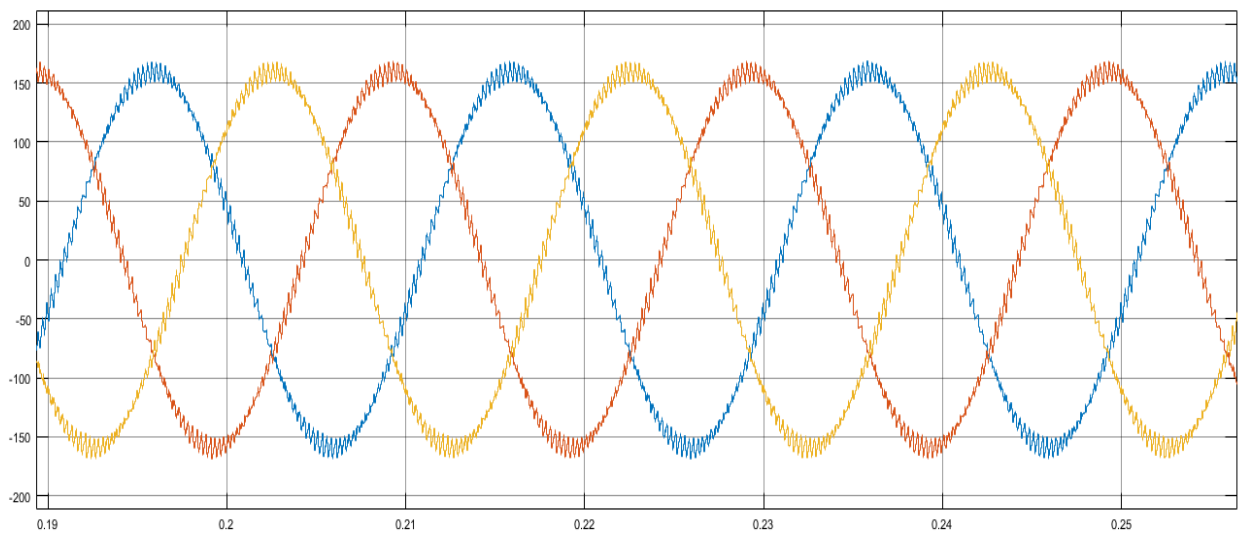


Рисунок 4.11 – Осцилограма вхідного струму (до трансформації)

### Режим стрибкоподібної зміни вхідної напруги

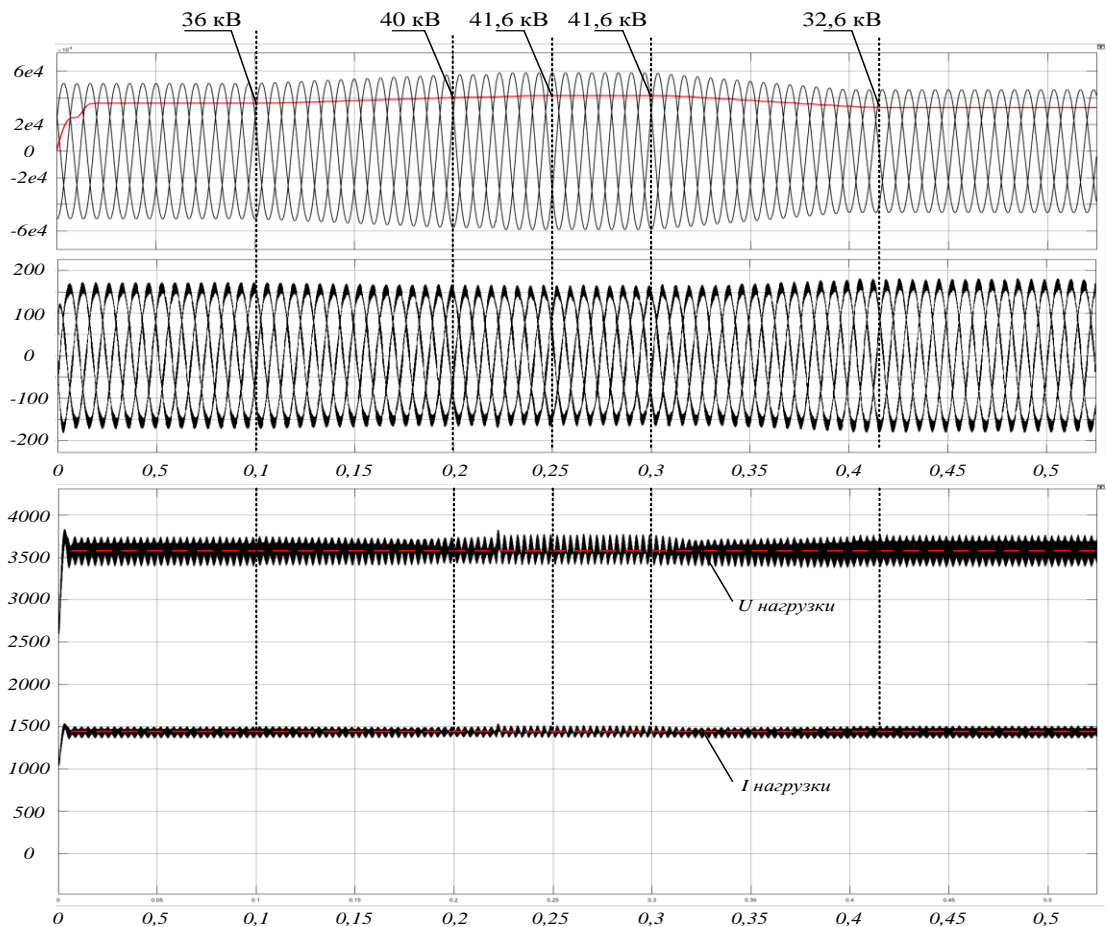


Рисунок 4.12 – Діаграми вхідних та вихідних струму та напруг активного випрямляча при стрибкоподібній зміні вхідної величини

Як видно з діаграм, перетворювач компенсує просадку вхідної напруги в межах  $\pm 20\%$ .

Розрахунок вихідних дроселів визначається в режимі максимальної напруги на вході перетворювача.

#### Режим відриву струмоприймача

У моделі було досліджено короткочасний (тривалістю менше одного періоду мережі) відрив пантографа. Тривалість перехідного процесу виходу на робочий режим після відновлення дії споживача в цьому випадку займає близько 0,5 періоду мережі. Більш тривалий режим відриву пантографа спричиняє більший час відновлення.

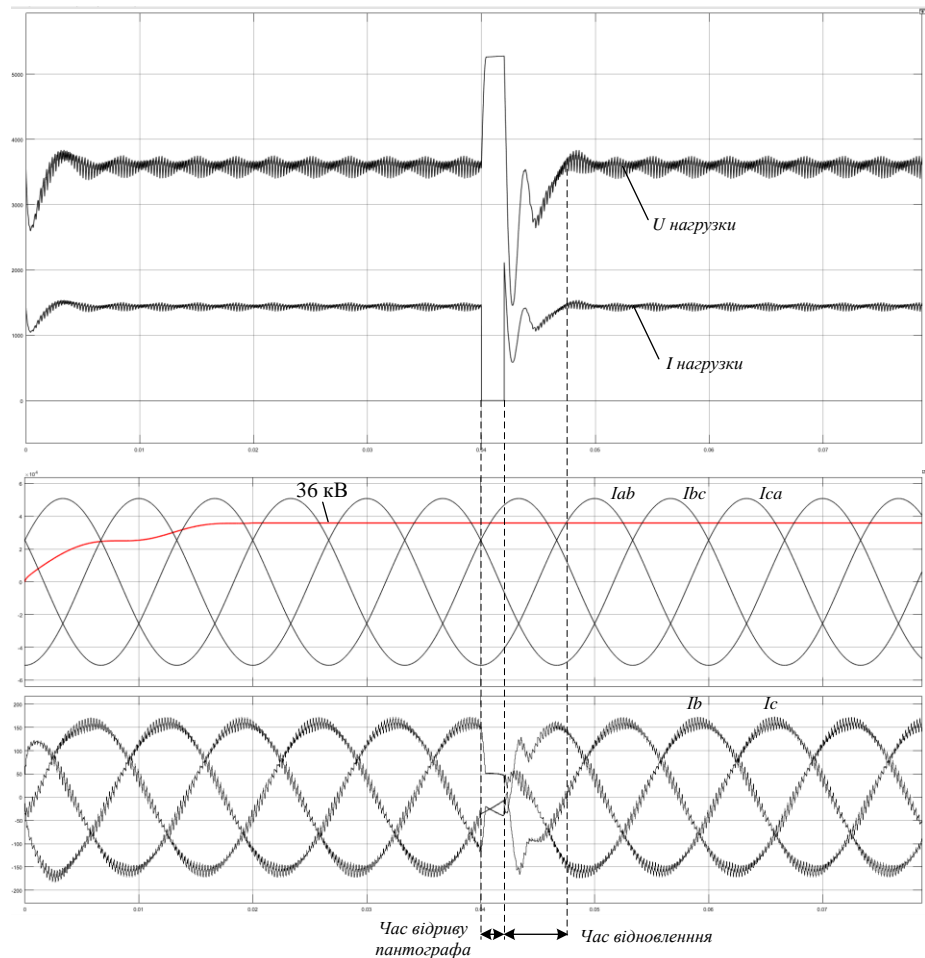


Рисунок 4.13 – Експеримент «відрив струмоприймача»

### Накид навантаження

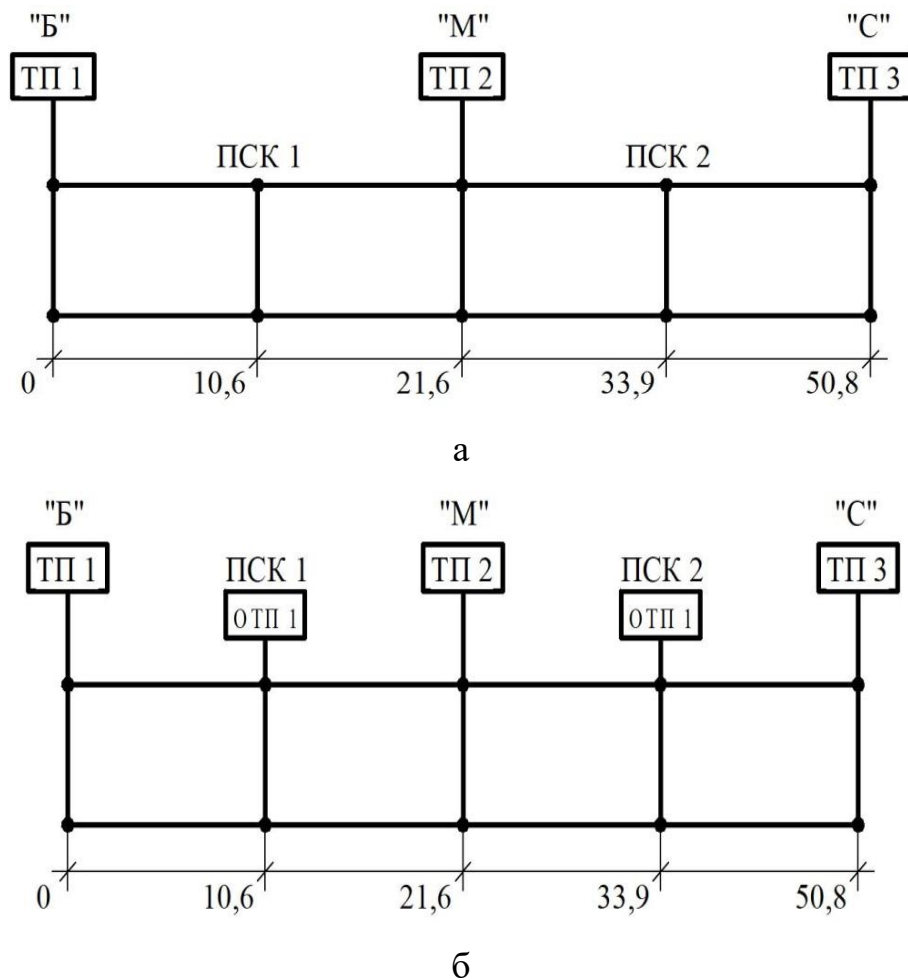
У моделі досліджено стійкість системи на стрибкоподібну зміну навантаження від  $P_{\text{ном}}$  до  $P_{\text{ном}} \times 2$  (модель в'їзду другого рухомого складу на ділянку КМ, від якої відбувалося живлення іншого рухомого складу).

Результати дослідження моделі показали практично абсолютну стійкість системи до такого роду збурення.

## 4.3. Особливості функціонування системи розподіленого живлення у вимушеному режимі

Визначення режиму напруги і оцінка його впливу на роботу електрорухомого складу і пристроїв електропостачання є одним з найбільш важливих завдань при побудові сучасної інтелектуальної системи тягового електропостачання. Функціонування СТЕ, як відомо, відбувається в

нормальному, вимушеному та аварійному режимах [113]. Розрахунок енергетичних показників системи тягового електропостачання у нормальному та вимушеному режимах для централізованого (ЦЖ) та розподіленого живлення (РЖ) виконувався на прикладі електрифікованої ділянки постійного струму, наведеної на рис. 4.16. Вимушений режим роботи системи тягового електропостачання являє собою перехід однієї з тягових підстанцій (ТП 2) в режим поста секціонування.



а – централізоване живлення; б – розподілене живлення

Рисунок 4.12 – Схема розрахункової ділянки у нормальному та вимушеному режимах роботи відповідно

Для розрахунку приймалися вихідні дані, наведені в третьому розділі, розрахунок виконувався для того ж графіка руху (3-й розділ).

Таблиця 4.4 – Результати розрахунку енергетичних показників.

Режими роботи	Схема живлення	Значення напруги, В			Втрати електроенергії, кВт·год
		мінімальне	середнє	максимальне	
Нормальний	Централізоване	2643	3130	3418	174,9
	Розподілене	2901	3292	3500	123,9
Вимушений	Централізоване	2225	2933	3397	227,7
	Розподілене	2687	3144	3500	170,7

Для розрахунку аварійного режиму точка короткого замикання (КЗ) приймалась на 15 км [141]. Розрахунок проводився для централізованого (рис. 4.17) та розподіленого живлення (рис. 4.18).

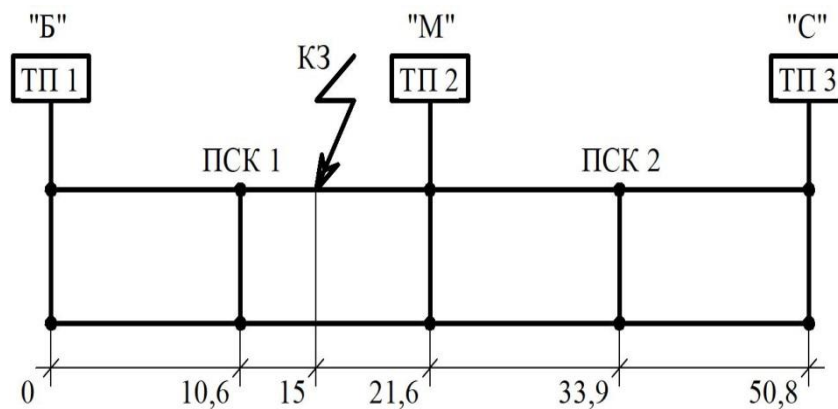


Рисунок 4.13– Розрахункова схема короткого замикання в централізованій схемі живлення

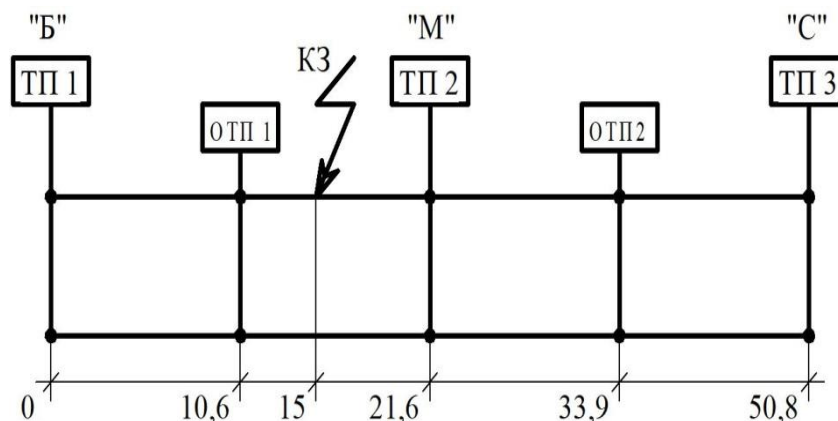


Рисунок 4.14 – Розрахункова схема короткого замикання в розподіленій схемі живлення

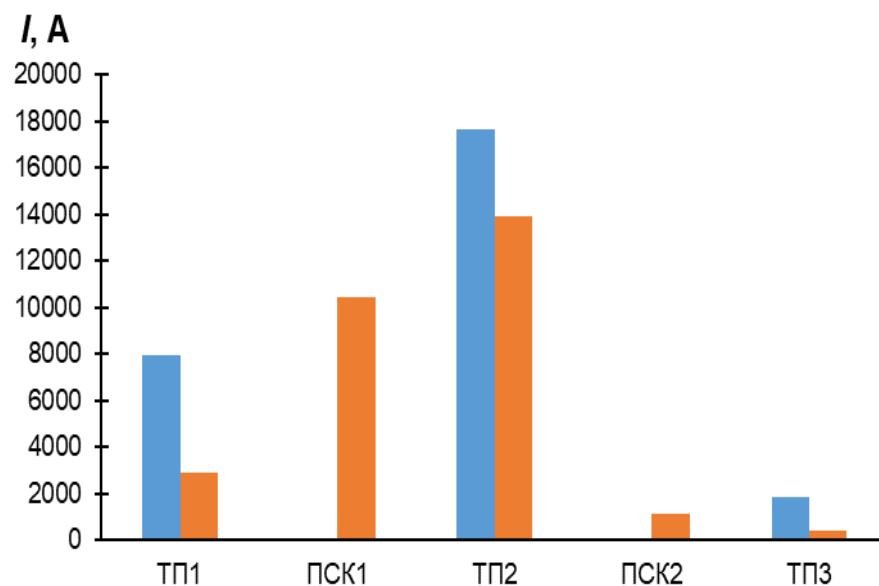


При розрахунку ЦЖ максимальне значення струму в точці КЗ становить 27,412 кА, мінімальне – 23,049 кА. Струми тягових підстанцій наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Струми тягових підстанцій при короткому замиканні

№ ТП та ПП	Централізоване живлення		Розподілене живлення	
	$I_{KЗ_{max}} = 27412 \text{ А}$	$I_{KЗ_{min}} = 23049 \text{ А}$	$I_{KЗ_{max}} = 28784 \text{ А}$	$I_{KЗ_{min}} = 26123 \text{ А}$
ТП-1	7949,5	6684,2	2890,6	2351,1
ПП-1	-	-	10412,1	10266,3
ТП-2	17625,9	14820,5	13931,5	12643,5
ПП-2	-	-	1134,7	757,6
ТП-3	1836,6	1544,3	403,6	94

При розрахунку РЖ максимальне та мінімальне значення струму в точці КЗ зросли та досягли 28,784 кА і 26,123 кА відповідно. Зростання струму короткого замикання відбувається за рахунок генерації в систему додаткової потужності одноагрегатними тяговими підстанціями. Через установку додаткових джерел живлення також змінився струморозподіл у тяговій мережі. Струми тягових підстанцій та ОТП наведені в таблиці 4.5. Розподіл струмів для різних схем живлення показано на рис. 4.19.



1 – централізоване живлення; 2 – розподілене живлення

Рисунок 4.15 – Зміна розподілу струмів:

Аналіз табл. 4.5 та рис. 4.19 показує значну зміну в перерозподілі струмів при застосуванні одноагрегатних тягових підстанцій. Ця обставина зумовлена невеликою різницею між встановленими потужностями тягових підстанцій і одноагрегатних тягових підстанцій та відповідно невеликою різницею їх внутрішнього опору. Тобто одноагрегатні тягові підстанції мають велике значення в підживленні точки КЗ, особливо якщо остання розташована поблизу ОТП. Це явище необхідно враховувати при практичних розрахунках систем тягового електропостачання з розподіленим живленням та вживати необхідні заходи щодо забезпечення селективності спрацьовування пристроїв релейного захисту на тягових підстанціях та ОТП.

#### **4.4. Особливості функціонування релейного захисту розподіленої тягової мережі**

Функції релейного захисту тягової мережі повинні бути спрямовані на захист системи тягового електропостачання та забезпечення стабільної роботи зовнішньої електричної мережі загального призначення, при цьому не повинна порушуватися робота пристроїв релейного захисту та виключатися хибні спрацьовування [142, 143]. Основним пристроєм для захисту контактної мережі постійного струму є швидкодіючі вимикачі (ШВ). Складність налаштування захисту зумовлена невеликою різницею між максимальними навантаженнями і мінімальними струмами КЗ. На практиці це призводить до значної кількості хибних спрацьовувань, що погіршує надійність електропостачання й прискорює знос комутаційного обладнання.

Захист повинен працювати надійно й селективно. У нашому випадку, при заданій точці КЗ повинен відключитися ШВ на ТПЗ і на посту секціонування (ПС) - точка ППЗ. Вимикач, встановлений на ТП4, є резервним за умовами селективності. Для підвищення надійності функціонування розподіленої СТЕ в цьому випадку можуть бути застосовані пристрої телеблокування між вимикачами, встановленими із обох сторін фідерної зони [144]. Телеблокування, окрім іншого, за наявності мертвих зон захисту, усуває

неминуче підживлення місця короткого замикання при відмові фідерних швидкодіючих вимикачів.

Чим більша різниця між максимальними робочими струмами і мінімальними струмами КЗ, тим з більшою чутливістю працює захист, тобто зменшується кількість хибних спрацьовувань. Як видно з розрахунків (табл. 4.5), мінімальні струми КЗ при розподіленому живленні більші, ніж при звичайному централізованому. Крім того, при застосуванні розподіленого живлення зменшуються робочі струми, які протікають по фідерах підстанції, за рахунок додаткового живлення від пунктів підсилення.

З цього можна зробити висновок, що використання СРЖ поліпшує роботу захисту тягової мережі постійного струму.

На сьогодні при наявних застарілих ШВ, їх уставка налаштовується механічними засобами з низькою точністю і, крім цього, вона залежить від стабільності струму “утримуючої” котушки. Тому налаштувати струм відключення ШВ з точністю меншою ніж 100 А достатньо проблематично. Виходячи з цього є сенс використовувати мікропроцесорні захисти, які дозволяють достатньо просто налаштувати струм уставки з великою точністю [145].

Найбільшого поширення для захисту тягової мережі постійного струму 3 кВ в Україні отримали цифрові захисти МРЗС-05А-02 (ПО “Київприлад”) [146] і ЦЗАФ-3,3 (зараз ІнТер-3,3 ТОВ “НІЕФА-ЕНЕРГО”) [147]. Ці багатофункціональні мікропроцесорні захисти, незважаючи на однакові характеристики, мають низку відмінностей. Це, насамперед, зумовлено тим, що комплект ЦЗАФ-3,3 зразу проектувався для захисту контактної мережі постійного струму з урахуванням специфіки режимів роботи тягового електропостачання. Конструктори намагалися не тільки реалізувати в одному пристрої відомі захисти фідерів постійного струму, але й поліпшити їхні характеристики. Комплект МРЗС-05А-02 створювався пізніше на базі багатофункціонального програмованого мікропроцесорного захисту МРЗС-05.

Комплект МРЗС-05 має гнучку архітектуру внутрішніх зв'язків, що дає можливість активувати з набору необхідні захисти й потім програмувати логіку їхньої взаємодії, можна призначати входам і виходам різні функції.

Обидва цифрові комплекти мають діапазон регулювання уставки по струму від 500 до 8000 А. МРЗС-05А-02 дозволяє налаштувати струм уставки з дискретністю 1 А, а ЦЗАФ-3,3 - з дискретністю 50 А. Таким чином, при експлуатації розподіленої СТЕ застосування мікропроцесорних захистів дозволяє підвищити селективність завдяки більш точному налаштуванню.

#### **4.5. Дослідження процесів рекуперації в розподіленій системі**

Особливістю роботи енергосистем електрифікованого транспорту є велика нерівномірність тягового електроспоживання й можливість значної рекуперації енергії (до 30...40 % від тягового електроспоживання). Проблемою раціонального використання рекуперативної енергії в системі неавтономного електротранспорту є складність забезпечення тягового навантаження в зоні рекуперації, що є випадковим процесом і не може повною мірою регулюватися оптимізацією транспортного потоку. За відсутності в тяговій мережі відповідного рівня поїзного навантаження рекуперація стає неможливою і на електротранспорті застосовується режим реостатного або механічного гальмування, коли генерована енергія утилізується гальмівними пристроями. На сьогодні для системи електротягів зазначена проблема вирішується за кількома напрямками, основними з яких є локалізація надлишкової енергії гальмування електротранспорту стаціонарними або бортовими накопичувачами, її передача через тягові підстанції (ТП) в живлячу енергосистему або на суміжні міжпідстанційні зони до віддалених тягових навантажень [148].

Питання підвищення ефективності використання енергії рекуперації електротранспорту в умовах зростання обсягів тягового електроспоживання та цін на енергоносії суттєво загострюються. Проблеми передачі енергії в тягову мережу в разі електричного гальмування електротранспорту розглядалися

неодноразово [149 - 155] та [157, 158], проте до сьогодні вирішені частково. Неможливість синхронізації процесів генерування і споживання енергії різними одиницями електротранспорту вимагає пошуку технічних та організаційних заходів підвищення ефективності використання енергії рекуперації. Особливістю режиму рекуперації на електрифікованому транспорті є його суттєва залежність

від рівня напруги в тяговій мережі, що визначається двома основними факторами:

1. Режим тягового електроспоживання в зоні рекуперації;
2. Режим напруги на шинах суміжних ТП.

Необхідно вказати, що проблема рекуперації детально розглянута в роботі [156]. Водночас у розподіленій системі тягового електропостачання енергообмінні процеси мають свою специфіку, що вимагає проведення додаткових досліджень [141]. Розрахунки виконувалися для наведених вище схем централізованого та розподіленого живлення, графік руху поїзда та параметри струмоспоживання наведені на рис. 4.20 та 4.21.

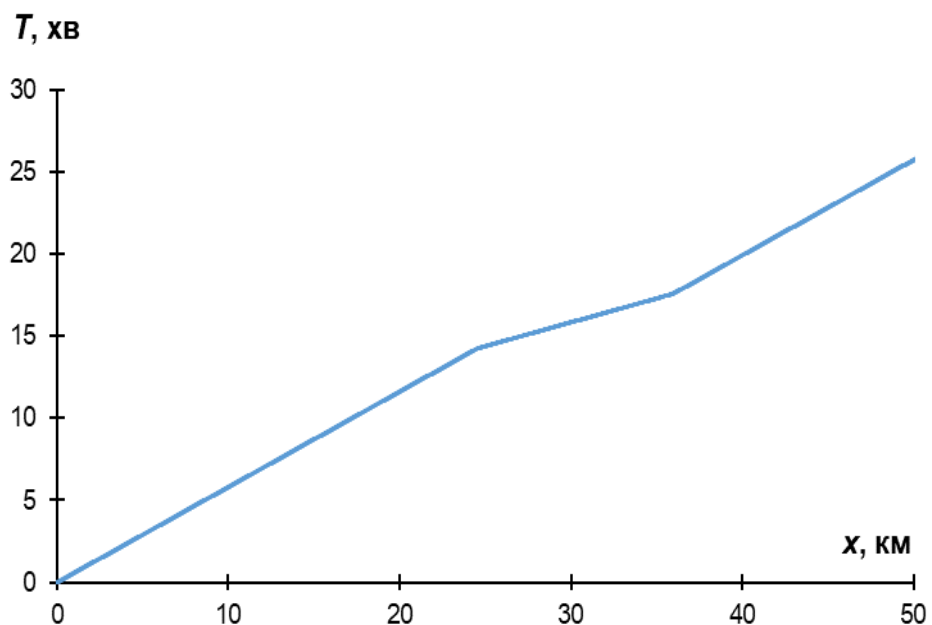


Рисунок 4.16 – Графік руху поїзда

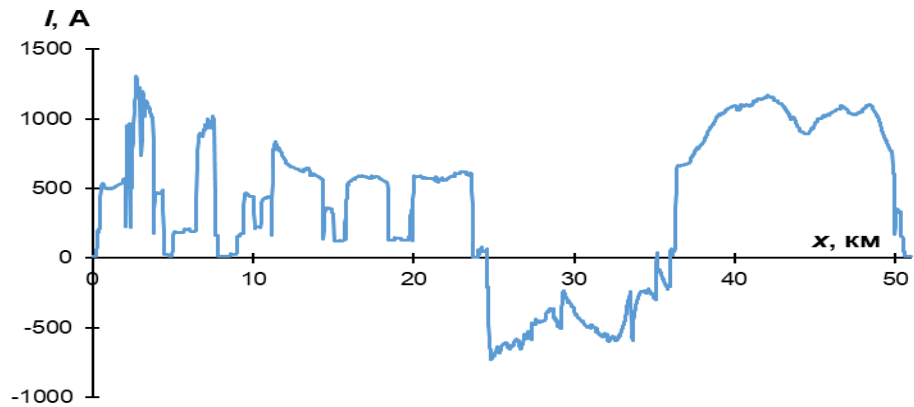


Рисунок. 4.17 – Параметри струмоспоживання під час руху розрахунковою ділянкою

У результаті розрахунку отримано криві зміни напруги на струмоприймачі ЕРС при рекуперації енергії.

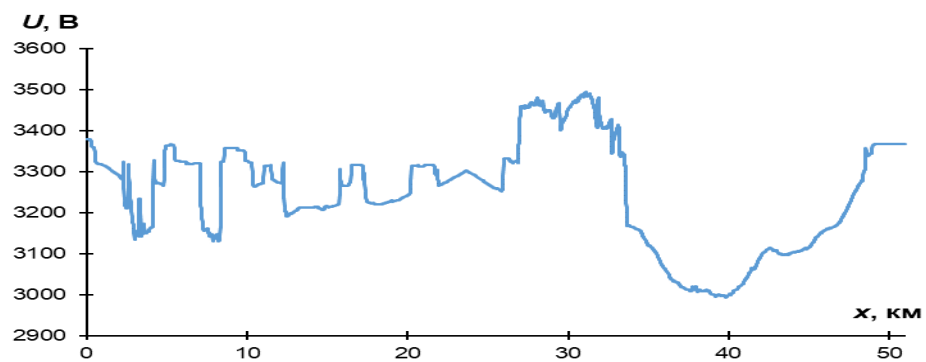


Рисунок 4.18 – Напруга на струмоприймачі ЕРС при централізованому живленні

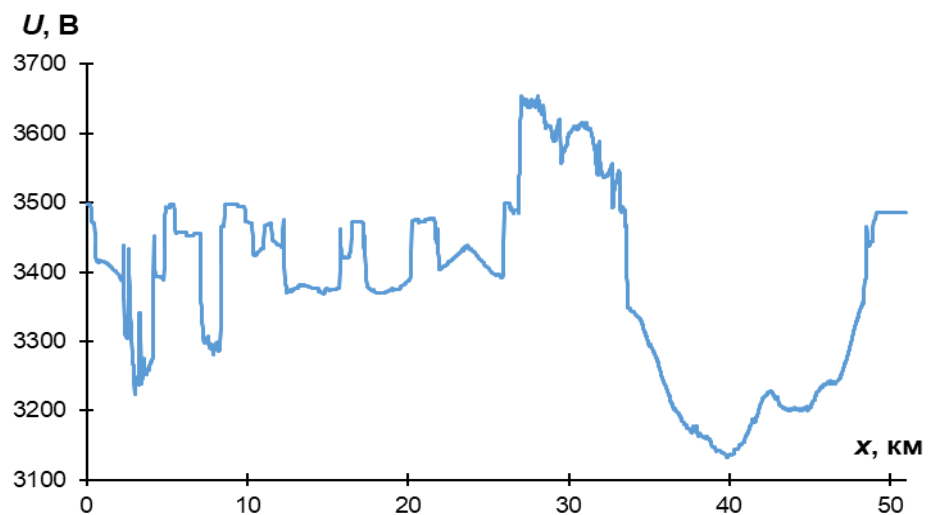


Рисунок 4.19 – Напруга на струмоприймачі ЕРС при розподіленому живленні

Таблиця 4.6 – Параметри напруги при рекуперації енергії

Параметр	Система живлення	
	Централізована	Розподілена
Мінімальне значення, В	2993	3132
Середнє значення, В	3246	3383
Максимальне значення, В	3495	3655
Діапазон зміни напруги, В	502	523

Аналіз отриманих результатів (табл. 4.6) показує, що для нормально встановленої схеми живлення режим напруги в тяговій мережі хоча і відповідав встановленим вимогам, але були наявні значні розмахи зміни напруги. Мінімальне значення напруги для централізованого живлення становило 2993 В, для розподіленого – 3132 В. Найвище значення напруги на струмоприймачі зафіксоване в режимі рекуперації, яке становить 3655 В при розподіленому живленні. Таким чином, розмах зміни рівня напруги на струмоприймачі ЕРС у середньому сягав 500 В як для системи централізованого, так і для системи розподіленого живлення, при цьому середній рівень напруги в системі розподіленого живлення вищий.

#### Висновки до розділу 4

Встановлено, що для впровадження системи розподіленого живлення необхідна розробка системи контролю напруги в тяговій мережі. У результаті виконаних досліджень виявлено, що гранична довжина зони прямої видимості датчиків перебуває в межах від 15,9 до 22 км, залежно від висоти встановлення, що значно більше за відстань між найслабшими точками тягової мережі. При цьому радіус дії антен перевищує відстань між сусідніми датчиками та забезпечує резервування передачі інформації при виході одного датчика з ладу.

Для підвищення стійкості за напругою розробленої системи розподіленого живлення застосовано активний випрямляч напруги, який здійснює двоспрямоване перетворення енергії й забезпечує постійну напругу

живлення незалежно від стану навантаження. Виконаними дослідженнями на Simulink-моделі доведено, що розроблений активний перетворювач компенсує просадку вхідної напруги в межах  $\pm 20\%$  та стійкий до різного роду збурень, які виникають у процесі взаємодії системи тягового електропостачання та електрорухомого складу.

При застосуванні розподіленого живлення зменшуються робочі струми фідерів тягових підстанцій, змінюється струморозподіл у тяговій мережі та зростають струми короткого замикання за рахунок генерації в систему додаткової потужності одноагрегатними тяговими підстанціями, що дозволяє покращити функціонування релейного захисту тягової мережі постійного струму.

Для забезпечення більш точних рівнів уставок швидкодіючих вимикачів в розподілених системах електропостачання необхідно застосовувати мікропроцесорні захисти. Підвищити надійність функціонування захисту в розподіленій системі живлення можливо за рахунок пристроїв телеблокування, які за наявності мертвих зон захисту усувають неминуче підживлення місця короткого замикання при відмові фідерних швидкодіючих вимикачів.

У режимі рекуперації при фактично однакових рівнях змін напруги на струмоприймачах електровозів середній рівень напруги в системі розподіленого живлення вищий і становить 3 383 В.



## **Розділ 5. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛЕНОГО ЖИВЛЕННЯ ПІДВИЩЕНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ**

Оцінка економічної ефективності системи розподіленого живлення постійного струму з рознесенням потужності по довжині міжпідстанційної зони, наукові принципи побудови якої викладено вище, може бути виконана шляхом порівняння цієї системи з централізованою системою тягового електропостачання зіставленням різниці капітальних витрат і різниці експлуатаційних витрат обох варіантів. Для цього визначимо капітальні вкладення і експлуатаційні витрати тільки в тій їх частині, які в різних варіантах не є однаковими. Для розглянутих вище систем СЦЖ та СРЖ капітальні вкладення в контактну мережу будуть однакові для двох варіантів, тому враховувати їх не будемо. Відрізнятись будуть тільки капітальні вкладення в обладнання тягових підстанцій. Відмінність капітальних витрат на обладнання тягових підстанцій в аналізованих випадках зумовлено різною кількістю тягових підстанцій і різною встановленою потужністю. Експлуатаційні витрати будуть відрізнятись в СЦЖ та СРЖ за рахунок різних витрат на амортизацію тягових підстанцій, завдяки різним коефіцієнтам завантаження трансформаторів, перетворювачів, різним втратам у тяговій мережі і в обладнанні тягових підстанцій, різними втратами від вищих гармонійних складових. Вихідними даними для техніко-економічного розрахунку будуть дані табл. 1.5. та табл. 3.7. Для висновків про загальну оцінку економічної ефективності розглянутих систем будемо далі оперувати усередненими даними й величинами.

### ***Капітальні витрати***

Для дослідної ділянки довжиною  $L$  км капітальні витрати можна розрахувати за таким виразом:

$$K = K_{\Pi} n_{\Pi} + K_{\text{ОАП}} n_{\text{оап}} + K_{\text{к}} L, \quad (5.1)$$

де  $K_{\pi}$  – вартість тягової підстанції,  $K_{\text{ОАП}}$  – вартість одноагрегатних підстанцій (встановлюються тільки при розрахунку капітальних вкладень для розподіленої системи живлення) ;  $n_{\pi}$  – кількість тягових підстанцій на лінію довжиною  $L$ ;  $n_{\text{оап}}$  – кількість одноагрегатних підстанцій на лінію довжиною  $L$ ;  $K_{\text{к}}$  – вартість одного кілометра контактної мережі.

У випадку рівномірного розташування тягових підстанцій їх число на ділянці буде дорівнювати:

$$n = \frac{L}{\ell} + 1, \quad (5.2)$$

де  $\ell$  – довжина однієї міжпідстанційної зони.

Далі по тексту будемо робити позначення таким чином: індекс 1 будемо надавати складовим, що стосуються класичної системи централізованого електропостачання; а індекс 2 – складовим, що стосуються пропонованої системи розподіленого живлення.

Усереднену вартість тягових підстанцій приймаємо таким чином:  $K_{\pi 1}=70,5$  млн грн,  $K_{\pi 2}=50,2$  млн грн,  $K_{\text{ОАП}1}=0$  млн грн (у системі ЦЖ не передбачено встановлення ОАП),  $K_{\text{ОАП}2}=35,7$  млн грн, (отримано шляхом усереднення матеріалів тендерів аналогічного обладнання за 2018 р.). Капітальні витрати за варіантами розраховуємо за формулою (5.1) (для розрахункової ділянки, що наведена на рис. 4.2) без врахування витрат на тягову мережу, тому що в обох варіантах ці витрати однакові. Результати розрахунків заносимо в табл. 5.1.

### ***Експлуатаційні витрати***

#### *Витрати на амортизацію тягових підстанцій*

Витрати на амортизацію тягових підстанцій  $Z_a$  дорівнюють:

$$Z_a = \frac{\alpha_n}{100} (K_{\pi} n_{\pi} + K_{\text{ОАП}} n_{\text{оап}}), \quad (5.3)$$

де  $\alpha_n$  – річна норма амортизації обладнання тягових підстанцій, %.

Річна норма амортизації розраховується відповідно до [159].

Розрахунки амортизаційних витрат наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Капітальні витрати та амортизаційні відрахування на тягові підстанції

Показник	Одиниця виміру	Значення
Капітальні витрати на СЦЖ $K_1$	млн грн	211,5
Капітальні витрати на СРЖ $K_2$	млн грн	222,0
Річна норма амортизації обладнання тягових підстанцій $\alpha_{\text{п}}$	%	4,4
Середньорічна сума амортизаційних відрахувань СЦЖ $Z_{a1}$	млн грн	9,31
Середньорічна сума амортизаційних відрахувань СРЖ $Z_{a2}$	млн грн	9,77

*Витрати покриття втрат електроенергії в тяговій мережі та в обладнанні тягових підстанцій.* Втрати електроенергії в тяговій мережі дослідної ділянки отримані для обох варіантів шляхом імітаційного моделювання в програмному середовищі iSET, а втрати електроенергії в обладнанні підстанцій розраховано відповідно до [160, 161, 162]. При розрахунку втрат електричної енергії в обладнанні тягових підстанцій враховуємо тільки втрати в знижувальних трансформаторах, перетворювальних трансформаторах та в перетворювальних агрегатах. Інші втрати не будемо враховувати, зважаючи на їх малу величину.

Розрахунок втрат електроенергії в трансформаторах виконується на основі таких вихідних даних:

а) паспортні або каталожні:

- номінальна потужність трансформатора  $S_{\text{н}}$ , кВА;
- потужність обмоток ВН, СН, НН -  $S_{\text{вн}}$ ,  $S_{\text{сн}}$ ,  $S_{\text{нн}}$ , кВА (у паспорті або каталозі дана у відсотках до номінальної потужності);
- втрати потужності в міді обмоток ВН, СН, НН у разі повного їх завантаження  $\Delta P_{\text{вн}}$ ,  $\Delta P_{\text{сн}}$ ,  $\Delta P_{\text{нн}}$ , кВт;
- струм холостого ходу трансформатора  $I_{\text{х.х.}}$ , %;

- втрати реактивної потужності трансформатора у разі холостого ходу, кВАр,

$$\Delta Q_{x.x} = S_H \cdot I_{x.x} / 100; \quad (5.4)$$

- напруга короткого замикання кожної з обмоток трансформатора, %

$$U_{BK} = 0,5 \cdot (U_{BH-CH} + U_{BH-НН} - U_{CH-НН}); \quad (5.5)$$

$$U_{CK} = 0,5 \cdot (U_{BH-CH} + U_{CH-НН} - U_{BH-НН}); \quad (5.6)$$

$$U_{HK} = 0,5 \cdot (U_{BH-НН} + U_{CH-НН} - U_{BH-CH}); \quad (5.7)$$

Де  $U_{BH-CH}$ ,  $U_{CH-НН}$ ,  $U_{BH-НН}$  беруться з паспорта чи каталогу;

- реактивна потужність, що споживається обмотками ВН, СН, НН трансформатора при повному навантаженні, кВАр,

$$\Delta Q_{BH} = S_{BH} \cdot U_{BK} / 100; \quad (5.8)$$

$$\Delta Q_{CH} = S_{CH} \cdot U_{CK} / 100; \quad (5.9)$$

$$\Delta Q_{НН} = S_{НН} \cdot U_{HK} / 100; \quad (5.10)$$

б) споживання активної ( $WP_{BH}$ ,  $WP_{CH}$ ,  $WP_{НН}$ ), кВт·год, та реактивної ( $WQ_{BH}$ ,  $WQ_{CH}$ ,  $WQ_{НН}$ ), кВАр·год, електроенергії, що пройшла за розрахунковий період крізь обмотки відповідно високої, середньої та низької напруги трансформатора. При визначенні за показниками розрахункових лічильників на стороні середньої та низької напруги трансформатора

$$WP_{BH} = WP_{CH} + WP_{НН},$$

$$WQ_{BH} = WQ_{CH} + WQ_{НН};$$

в) кількість годин роботи трансформатора в розрахунковий період (календарна кількість годин)  $T_{п}$  ;

г) кількість годин роботи підприємства (споживача) або кількість годин роботи трансформатора під навантаженням у розрахунковий період  $T_{р}$ .

Обчислюючи втрати електроенергії в трансформаторі послідовно визначають:

а) фактичну потужність кожної обмотки трансформатора за даними фактичного споживання активної та реактивної електроенергії за розрахунковий період, кВА:

$$S_{\phi \text{ вн}} = \sqrt{P_{\phi \text{ вн}}^2 + Q_{\phi \text{ вн}}^2}; \quad (5.11)$$

$$S_{\phi \text{ сн}} = \sqrt{P_{\phi \text{ сн}}^2 + Q_{\phi \text{ сн}}^2}; \quad (5.12)$$

$$S_{\phi \text{ нн}} = \sqrt{P_{\phi \text{ нн}}^2 + Q_{\phi \text{ нн}}^2}; \quad (5.13)$$

$$\text{де } P_{\phi \text{ вн}} = WP_{\phi \text{ вн}} / T_p = (WP_{\phi \text{ сн}} + WP_{\phi \text{ нн}}) / T_p; \quad (5.14)$$

$$Q_{\phi \text{ вн}} = WQ_{\phi \text{ вн}} / T_p = (WQ_{\phi \text{ сн}} + WQ_{\phi \text{ нн}}) / T_p \quad (5.15)$$

$$P_{\phi \text{ сн}} = WP_{\phi \text{ сн}} / T_p; \quad (5.16)$$

$$Q_{\phi \text{ сн}} = WQ_{\phi \text{ сн}} / T_p; \quad (5.17)$$

$$P_{\phi \text{ нн}} = WP_{\phi \text{ нн}} / T_p; \quad (5.18)$$

$$Q_{\phi \text{ нн}} = WQ_{\phi \text{ нн}} / T_p; \quad (5.19)$$

б) коефіцієнт завантаження кожної з обмоток трансформатора:

$$k_{з \text{ вн}} = S_{\phi \text{ вн}} / S_{\text{н вн}}; \quad (5.20)$$

$$k_{з \text{ сн}} = S_{\phi \text{ сн}} / S_{\text{н сн}}; \quad (5.21)$$

$$k_{з \text{ нн}} = S_{\phi \text{ нн}} / S_{\text{н нн}}; \quad (5.22)$$

де  $S_{\text{вн}}$ ,  $S_{\text{сн}}$ ,  $S_{\text{нн}}$  – номінальна потужність обмоток високої, середньої та низької напруги трансформатора, кВА;

в) втрати активної електроенергії, кВт·год,

$$\Delta WP = \Delta P_{\text{х.х.}} \cdot T_{\text{п}} + (\Delta P_{\text{вн}} \cdot k_{з \text{ вн}}^2 + \Delta P_{\text{сн}} \cdot k_{з \text{ сн}}^2 + \Delta P_{\text{нн}} \cdot k_{з \text{ нн}}^2) \cdot T_p; \quad (5.23)$$

г) втрати реактивної електроенергії, кВАр·год

$$\Delta WQ = \Delta Q_{\text{х.х.}} \cdot T_{\text{п}} + (\Delta Q_{\text{вн}} \cdot k_{з \text{ вн}}^2 + \Delta Q_{\text{сн}} \cdot k_{з \text{ сн}}^2 + \Delta Q_{\text{нн}} \cdot k_{з \text{ нн}}^2) \cdot T_p \quad (5.24)$$

За формулами (5.4)-(5.24) розраховують втрати електроенергії в знижувальних трансформаторах  $\Delta WP_{\text{тт}}$  та в перетворювальних

трансформаторах  $\Delta W_{P_{тр}}$ . У цій дисертаційній роботі приймаємо  $T_p = T_{п} = 8760$  год.

Втрати електроенергії в перетворювачах можуть бути розраховані відповідно до [2] залежно від їх типу таким чином:

$$\Delta W_{BA} = 0.0007 \cdot W_{P_{\phi}}, \quad (5.25)$$

де  $\Delta W_{BA}$  - втрати в перетворювачах,

$W_{P_{\phi}}$  - фактичне споживання активної електроенергії на тягу за розрахунковий період.

Вартість втрат електричної енергії в обладнанні тягових підстанцій та в тяговій мережі  $Z_e$  дорівнює:

$$Z_e = C_e (\Delta W_{P_{ит}} + \Delta W_{P_{тр}} + \Delta W_{BA} + \Delta W_{P_{тм}}) T_p, \quad (5.26)$$

де  $\Delta W_{P_{тм}}$  - втрати активної електроенергії в тяговій мережі.

Результати розрахунку вартості втрат електричної енергії наведено в табл. 5.2

Таблиця 5.2 – Вартість втрат електроенергії за варіантами

Показник	Одиниця виміру	Значення
Закупівельний тариф на електроенергію	грн/кВт·год	1, 61887
Вартість втрат електроенергії в СЦЖ $Z_{e1}$	млн грн	8,948
Вартість втрат електроенергії в СРЖ $Z_{e2}$	млн грн	6,070
Вартість зменшення втрат електроенергії $Z_2 - Z_1$	млн грн	2,879

### ***Щорічні приведені витрати***

Щорічні приведені витрати при СЦЖ та СРЖ можуть бути розраховані таким чином:

$$Z = K \cdot E_n + Z_a + Z_e, \quad (5.27)$$

де  $E_n$  – норматив економічної ефективності

Результати розрахунку приведених витрат наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Результати розрахунку щорічних приведених витрат, млн грн

№	Показник	Позначення	Значення показника при	
			СЦЖ	СРЖ
1	Капітальні витрати	К	211,5	222
2	Амортизаційні відрахування	З <sub>а</sub>	9,31	9,77
3	Вартість втрат електричної енергії на дослідній ділянці	З <sub>е</sub>	8,948	6,070
4	Приведені річні витрати, млн грн	З	44,70	43,59

### Висновки до розділу 5

В існуючих умовах старіння силових пристроїв існуючої системи тягового електропостачання постійного струму економічно ефективним варіантом посилення системи тягового електропостачання є варіант децентралізованої системи розподіленого живлення з двоагрегатними тяговими підстанціями й одноагрегатними тяговими підстанціями, що встановлюються на місці постів секціонування. На основі розрахунку приведених щорічних витрат можна стверджувати, що при використанні СРЖ досягається ефективне використання капітальних вкладень та мінімальні річні експлуатаційні витрати. Реалізація системи СРЖ дозволяє щорічно економити на дослідній ділянці 2,879 млн грн за рахунок зменшення вартості втрат електричної енергії в системі живлення.

## Висновки

У дисертаційній роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішене науково-прикладне завдання підвищення енергетичної ефективності систем тягового електропостачання постійного струму за рахунок розробки наукових принципів побудови енергоефективної системи розподіленого живлення, яка забезпечує швидкісний рух і максимально вписується в існуючу інфраструктуру. Основні наукові результати та висновки полягають в такому.

1. Виконаний експериментальний аналіз режимів напруги та потужності в системі тягового електропостачання постійного струму показав, що рівні напруги на шинах дослідних тягових підстанцій мають широкий розкид значень та, за відсутності пристроїв регулювання напруги, не можуть забезпечити нормовану якість напруги на струмоприймачах електрорухомого складу. Напруга на шинах 3,3 кВ має різкозмінний характер, а її максимальні коливання сягають значення 1 300 В. Повна встановлена потужність тягових підстанцій дослідних ділянок перебуває в межах 12–50 МВт, але сучасний стан тягового електропостачання постійного струму характеризується зростаючим дефіцитом необхідної потужності для забезпечення швидкісного руху. При цьому коефіцієнт завантаження обладнання не перевищує 15 %.

2. Розроблено концепцію побудови енергоефективних розподілених систем тягового електропостачання постійного струму, які максимально вписуються в існуючу інфраструктуру: розташування двоагрегатних тягових підстанцій запропоновано здійснити на місці існуючих, одноагрегатних підстанцій – на постах секціонування. Це дозволило зменшити втрати енергії в тяговій мережі й в обладнанні підстанцій, поліпшити використання встановленого обладнання до 50% на двоагрегатних підстанціях, підвищити коефіцієнт потужності та поліпшити умови захисту системи електропостачання. За рахунок зменшення втрат, розрахунковий ККД розглянутої системи збільшено з 0,92 до 0,95.



3. Вдосконалений метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання на базі функцій опору дозволив розраховувати потужності тягових підстанцій, які необхідні для забезпечення режиму сталого споживання потужності при русі електрорухомого складу із заданим рівнем втрат напруги.

Розрахунками встановлено доцільність застосування на тягових підстанціях двох перетворювальних агрегатів загальною потужністю 10 МВт, а для одноагрегатної підстанції – одного перетворювального агрегату потужністю 5 МВт. Розрахунки показали, що запропонована система дозволяє забезпечити необхідний рівень питомої потужності в тяговій мережі в межах 2,00 – 2,15 МВт/км, що дало змогу обмежити мінімальне значення напруги на струмоприймачі ЕРС на рівні 2 900 В. При цьому діапазон зміни напруги на шинах тягових підстанцій зменшується на 120 В, а в тяговій мережі – на 170 В.

4. Запропонована на підставі експериментальних даних математична модель процесу зміни струму й напруги в тяговій мережі дозволяє оцінити якість процесів електроспоживання та області стійкої роботи розподіленої системи тягового електропостачання. Структура моделі розроблена з використанням нелінійного рекурентного аналізу, що дозволило виявити приховані складові процесу. Наприклад, крім виміряних струму й напруги, розраховувалися їх похідні. Це дає змогу описувати динамічні процеси в задачах аналізу ефективності функціонування системи тягового електропостачання.

5. Модернізований метод забезпечення стійкості роботи систем тягового електропостачання постійного струму на основі використання нелінійного закону управління дозволяє забезпечити необхідну стійкість за напругою в умовах організації швидкісного руху поїздів, а саме підтримання мінімальної допустимої напруги не нижче рівня 2900В. Розрахунками встановлено, що регулятор з нелінійним законом управління має кращу робастність, а зона стабілізації напруги в тяговій мережі в разі застосування нелінійного закону управління в 3-4 рази ширша, порівняно з використанням лінійного закону управління.

6. Для підвищення стійкості розробленої системи розподіленого живлення

застосовано активний випрямляч напруги, який здійснює двоспрямоване перетворення енергії й забезпечує постійну напругу живлення незалежно від стану навантаження. Виконаними дослідженнями на Simulink-моделі доведено, що розроблений активний перетворювач компенсує просадку вхідної напруги в межах  $\pm 20\%$  та стійкий до різного роду збурень, які виникають у процесі взаємодії системи тягового електропостачання та електрорухомого складу.

7. Для ефективного забезпечення коректною інформацією системи управління тяговим електропостачанням необхідним є створення розподіленої системи вимірювання напруги. Запропонований у роботі принцип розміщення датчиків напруги на основі методу сенсорних вузлів та методу Френеля дозволяє раціонально їх розташувати та запобігти появі «мертвих» зон. На дослідній ділянці 50 км за розрахунками датчики запропоновано розташувати в найслабших точках: 10,6; 20,3; 21,6; 30,5; 33,9; 40; 50,8; гранична довжина зони прямої видимості датчиків перебуває в межах від 15,9 до 22 км.

8. Техніко-економічні розрахунки показали, що запропонована енергоефективна розподілена система електропостачання тяги поїздів постійного струму, яка максимально вписується в існуючу інфраструктуру, дозволяє ефективно використовувати капітальні вкладення та досягти мінімальних річних експлуатаційних витрат. Реалізація запропонованої системи розподіленого живлення дозволяє щорічно економити на дослідній ділянці 2,879 млн грн за рахунок зменшення вартості втрат електричної енергії в системі живлення.

## Список використаних джерел

1. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2015 році / Департамент електропостачання. Київ : ТОВ «ВД «Мануфактура», 2016.
2. Денисюк С. П., Василенко В. І. Енергетична ефективність та енергозбереження // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2016. № 1. С. 33-44.
3. Маркман Г. З. Энергоэффективность преобразования и транспортировки электрической энергии : учебное пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2008. 184 с.
4. Бондар-Підгурська О. В. Науково-методичні підходи до оцінки енергоефективності як фактора конкурентоспроможності промислової продукції в інноваційній моделі розвитку України [Електронний ресурс] // Наукові пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту. Економічні науки : зб. наук. пр. Кіровоград : КНТУ, 2012. Вип. 22, ч. 2. С. 75-83. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npkntu\\_e\\_2012\\_22\(2\)\\_\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npkntu_e_2012_22(2)__15) (дата звернення 15.04.2019)
5. Сухонос М. К. Система показателей энергоэффективности энергоинфраструктуры предприятия // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2011. № 7. С. 25-34.
6. Бітюков С. Д., Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г. Підвищення ефективності виробництва та використання енергетичних ресурсів // Українські залізниці. 2014. № 8 (14). С. 51-53.
7. Денисюк С. П., Кузнецов В. Г., Сиченко В. Г., Крупинський О. М. Енергозбереження та енергетичний менеджмент у пристроях тягового електропостачання / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2015. 264 с.
8. Hubsyki P. V. Reserves for improving the energy efficiency of traction power systems // Problemy kolejnictwa. Warszawa, 2018. T. 62, z. 178. P. 7-12.

9. Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г., Босий Д. О., Саблін О. І. Енергетика тягових мереж. Дніпро : Вид-о ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. 210 с.
10. Овчаренко Т. И., Васюченко П. В., Кирисов И. Г. Анализ существующих систем электроснабжения промышленных предприятий как фактор повышения их эффективности // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2012. № 7. С. 17-22.
11. ДСТУ 3755-98. Енергозбереження. Номенклатура показників енергоефективності та порядок їхнього внесення у нормативну документацію. Введ. 1999.07.01. Офіц. вид. Київ : Вид-во Держстандарту України, 1999. 13 с.
12. Švarcberg L. E. Energy efficiency exploitation of technical systems // Scientific Journals Maritime University of Szczecin. 2013. 35(107). P. 132–137.
13. Бурков А. Т., Мирсаитов М. М. Особенности методики определения электропотребления при выборе максимальной скорости пассажирских составов // Изв. ПГУПС. 2015. № 1 (42). С. 5-11.
14. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока : монография. Екатеринбург : УрГУПС, 2010. 176 с.
15. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрических железных дорог. Москва : Трансжелдориздат, 1958. 288 с.
16. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков. Москва : Транспорт, 1982. 207 с.
17. Мирошниченко Р. И. Сравнительная оценка способов усиления системы постоянного тока 3 кВ // Вестн. Всесоюз. научно-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 1973. №1. С. 1–12.
18. Марикин А. Н. Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Петербург. гос. ун-т путей сообщения. Санкт-Петербург, 2008.

19. Бесков Б. А., Геронимус Б. Е., Давыдов В. Н., Крестьянов М. Е., Марквард Г. Г., Минин Г. А. Проектирование системы электроснабжения электрических железных дорог : учебное пособие. Москва : Трансжелдориздат, 1963.
20. Кисляков В. А. Сравнительная оценка технических показателей различных способов усиления электрифицированных линий постоянного тока // Сб. тр. МИИТа. 1978. № 604. С. 3-21.
21. Векслер М. И. Усиление устройств тягового электроснабжения. Москва : Транспорт, 1984.
22. Сиченко В. Г., Саєнко Ю. Л., Босий Д. О. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць. Дніпро : ПФ Стандарт-Сервіс, 2015.
23. Косарев С. М. Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму // Електрифікація транспорту. 2015. № 9. С. 37–43.
24. Аржанников Б. А., Набойченко И. О. Совершенствование системы и устройств тягового электроснабжения // Евразия вести. 2015. № 9. С. 22 – 23.
25. Шалимов М. Т., Маслов Г. П., Магай Г. С. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог. Омск, 2002.
26. Котельников А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. Москва : Интекст, 2002.
27. Bosiy D., Sablin O., Khomenko I., Kosariev Ye., Kebal I., Myamlin S. Intelligent technologies for efficient power supply in transport systems. Transport Problems. 2017. Vol. 12 (SE). P. 57 - 71.
28. Hitoshi Hayashiya, Shinya Kikuchi, Kazushi Matsuura et al. Possibility of energy saving by introducing energy conversion and energy storage technologies in

- traction power supply system // 15th European Conference «Power Electronics and Applications (EPE), 2013». Lille, France, 2013.
29. Lee Hanmin, Kim Gildong, Lee Changmu, Joung Euijin, Test of DC 1500 V Stationary Energy Storage System // International Journal of Railway. 2012. Vol. 5, No. 3. P. 124–128.
  30. Vincenzo Galdi, Giuseppe Graber, Antonio Piccolo, Alfonso Capasso, Regina Lamedica, Alessandro Ruvio, Energy management of Auxiliary Battery Substation supporting high-speed train on 3 kV DC systems // Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). International Conference on 22-25 Nov. 2015.
  31. Сберегающие технологии тягового электроснабжения с рекуперацией энергии торможения поездов / А. Т. Бурков, В. М. Варенцов, А. Н. Марикин и др. // 2-я Евроазиатская конф. по транспорту : тезисы докл. Санкт-Петербург, 2000. С. 93.
  32. ГОСТ 13109-97. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. Київ : Держстандарт, 1999.
  33. Гончаров Ю. П., Сыченко В. Г., Босый Д. А., Пастушенко М. С., Косарев Е. Н. Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии // Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane. 2014. № 162. С. 65–82.
  34. Гончаров Ю. П. и др. Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей // Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. Сер.: Техн. науки. 2015. № 30, т. 2. С. 98 – 108.
  35. Гончаров Ю. П. и др. Система распределения питания с промежуточным звеном повышенной частоты для электрифицированных железных дорог // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2011. № 38. С. 82–89.

36. Смирнов Д. Б. Совершенствование методики расчета распределенной системы тягового электроснабжения : дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2010. 153 с.
37. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. Москва : УМК МПС, 2002. 638 с.
38. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики / под ред. В. А. Веникова. Москва : Высшая шк., 1981. 288 с.
39. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. Москва : Мир, 1976. 760 с.
40. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. Москва : Мир, 1973. 960 с.
41. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королюк, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, А. Ф. Турбин. Москва : Наука, 1985. 640 с.
42. Rojek A. Traction power supply in 3 kV DC system. Warshawa : KOW media&marketing Sp. Z o.o., 2012. 250 s.
43. Shelag A. Influence of voltage in 3 kV DC cafenary on traction and energy paramers of the supplied vehieles. Radom: Spatium, 2013. 158 s.
44. Котельников А. В. Основные требования к системам и устройствам тягового электроснабжения скоростных и высокоскоростных магистралей // Новое в хозяйстве электроснабжения / под ред. А. Б. Косарева. Москва : Интекст, 2003. 143 с
45. Сиченко В. Г., Косарев Є. М., Губський П. В., Замаруєв В. В., Івахно В. В., Стисло Б. О. Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму // Електрифікація транспорту. 2016. № 11. С. 61-70.
46. Дзюман В. Г., Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г., Кирилюк Т. І. Дослідження роботи системи електропостачання постійного струму при пропуску здвоєних поїздів // Електротехніка і електромеханіка. 2011. № 3. С. 74-76.

47. Марикин А. Н., Самонин А. П., Жемчугов В. Г. Способы усиления тягового электроснабжения постоянного тока при интенсивном движении поездов // Изв. ПГУПС. 2012. № 3. С. 123-127.
48. Сиченко В. Г., Босий Д. О., Косарев Є. М. Оптимізація керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму з пунктами підсилення // Вісн. Вінницького політехн. ін-ту. 2015. № 6. С. 95-103.
49. Марикин А. Н., Мизинцев А. В. Новые технологии в сооружении и реконструкции тяговых подстанций. Москва : Маршрут, 2008. 220 с.
50. Sychenko V., Bosiy D., Kosarev E. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current // The archives of transport. 2015. Vol. 35, is. 3. P. 63-70.
51. Котельников А. В. К вопросу о выборе системы тягового электроснабжения при организации регулярного скоростного сообщения на линии Санкт-Петербург–Москва // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе : сб. научн. тр. ОАО ВНИИЖТ. Москва : Интекст, 2010. С. 5-12.
52. Марский В. Е. Подготовка тягового электроснабжения для организации скоростного движения на линии Санкт-Петербург–Москва // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе : сб. научн. тр. ОАО ВНИИЖТ. Москва : Интекст, 2010. С. 15-19.
53. Яндович В. Н., Сыченко В. Г., Антонов А. В. Сравнительный анализ контактных подвесок в странах Евросоюза и Украины: организация надежного токосъема // Електрифікація транспорту. 2014. № 7. С. 67 –77.
54. Бурков А. Т., Бурков С. А., Шарпилова М. А. Режимы движения и особенности тяговых расчетов при определении нагрузок на устройства электроснабжения высокоскоростных линий // Элтранс-2011. Санкт-Петербург : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. 584 с.
55. Стромский П. П., Гуткин Л. В. О сопротивлении движению электропоезда высокоскоростной специализированной магистрали // В кн.:



- Эксплуатационные и технические параметры специализированных пассажирских магистралей / под ред. Е. А. Сотникова, С. С. Жаброва. Москва : Транспорт, 1989. С. 41-46.
56. Гуткин Л. В., Горин Н. Н. Эксплуатационные и технические параметры тягово-электрооборудования высокоскоростною электропоезда // В кн.: Эксплуатационные и экономические параметры специализированных пассажирских магистралей / под ред. Е. А. Сотникова, С. С. Жаброва. Москва : Транспорт, 1989. С. 28-41.
57. Снижение расхода энергии в поезде путем оптимизации методов регулирования // Железные дороги мира. 2003. № 1. С. 31-35.
58. Аржанников Б. А., Бурков А. Т., Галкин А. Г., Мансуров В. А., Набойченко И. О. Перспектива разработки системы электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения 24 кВ для скоростной магистрали Москва-Екатеринбург // Тренды. События. Рынки. 2012. № 7. С. 48-50.
59. Устенко А. В. Развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. 2013. Вип. 136. С. 49-55.
60. Развитие высокоскоростного транспорта // Железные дороги мира. 2007. № 10. С. 9-17.
61. Hubskeyi Petro, Kuznetsov Valeriy, Drubetskyi Anton, Afanasov Andrii, Pulin Mykola. Studying of the power modes in the traction line for ensuring the high-speed traffic // Technology audit and production reserves. 2018. Vol 5, no 1(43). Industrial and technology systems. P. 42-51.
62. Бесекерский В. А. Динамический синтез систем автоматического регулирования : учебное пособие. Москва : Наука, 1970. 576 с.
63. Сыченко В. Г. Выбор управляющего критерия при разработке микропроцессорной адаптивной системы регулирования на шинах тяговой подстанции // Транспорт. Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта : межвуз. сб. научн. тр. Днепропетровск, 1999. С. 166–172.

64. Марикин, А.Н. Проблема разработки перспективных систем электрической тяги поездов [Текст]/ А.Н. Марикин //Тез. докл. первого международного симпозиума: Элтранс-2001. «Электрификация и развитие железнодорожного транспорта России. Традиции, Современность, Перспективы».- СПб.: ПГУПС,2001.
65. Аржанников Б. А. Системы и элементы теории автоматического регулирования напряжения в тяговом электроснабжении : учебное пособие Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 181 с.
66. Фесик М. О., Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г., Губський П. В. Сучасна методологія керування потужністю тягової мережі постійного струму для швидкісного руху // Тези VII Міжнародної науково-практ. конф. «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», 16-19.02.2016 р., с. Розлуч. С. 81.
67. Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г., Кордін О. П., Косарев Є. М., Губський П. В. Підвищення енергетичної ефективності керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму // Энергооптимальные технологии перевозочного процесса : тезисы 1-й Международной научно-практ. конф. (Моршин, 16-20 мая 2016 г.). Днепропетровск : ДНУЖТ, 2016. С. 123.
68. Сыченко В. Г., Матусевич А. А., Рогоза А. В., Павличенко М. Е., Васильев И. Л., Пулин Н. Н. Повышение энергетической эффективности в эволюционирующих системах электроснабжения // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 27 (1249). С. 182-186.
69. Сердинов С. М. Выбор систем тока и напряжения// Электрическая и тепловозная тяга. 1982. № 1. С. 36-39; №. С. 40-42.
70. Устройство вольтодобавочное [Электронный ресурс]. Режим доступа : [http://www.nfenergo.ru/rus\\_product.html?itemid=61](http://www.nfenergo.ru/rus_product.html?itemid=61) (дата звернення 15.04.2019). – Назва з екрана.

71. Аржанников Б. А., Набойченко И. О. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ : монография. Екатеринбург : УрГУПС, 2015.
72. Смирнов Д. Б. Совершенствование методики расчета распределенной системы тягового электроснабжения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2010. 22 с.
73. Аржанников Б. А., Вербицкий В. А. Схема питания железных дорог постоянного тока. Патент РФ № 2329160, опубл. 20.07.2008 г. Бюл. № 20, 3 с.
74. Федотов А. А., Васильев С. Н., Мизинцев А. В. и др. Энергоснабжение контактной сети постоянного тока повышенным напряжением преобразователя по усиливающему проводу // Материалы 2-го международного симпозиума Элтранс-2003. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2003.
75. Сергієнко М. І., Гончаров Ю. П., Панасенко М. В., Замаруєв В. В., Хворост М. В., Божко В. В., Козачок В. М. Електронні трансформатори для систем електричної тяги з живленням від контактної мережі постійного струму // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. Луганськ, 2009. № 4, ч. 1. С. 183-188.
76. Хворост М. В. Базові положення теорії випрямлячів-стабілізаторів напруги для перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітенів з повздовжньою лінією постійного струму // Научно-техн. сб. «Коммунальное хозяйство городов». 2004. № 60. С. 236–247.
77. Хворост М. В., Божко В. В. Силові схеми перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітена з повздовжньою лінією живлення // Електротехніка і електромеханіка. 2005. № 1. С. 106–109.
78. Панасенко Н. В., Божко В. В., Гончаров Ю. П. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрофицированных железных дорог // Залізничний трансп. України. 2007. № 4. С. 76 –80.

79. Максимчук В. Ф., Панасенко М. В., Божко В. В., Гончаров Ю. П., Замаруєв В. В., Сиченко В. Г. Стабілізуючі тягові перетворювальні агрегати з системою активної фільтрації для електропостачання тягових мереж постійного струму швидкісних магістралей // Залізничний трансп. України. 2011. № 6. С. 26-31.
80. Панасенко М. В., Гончаров Ю. П., Сиченко В. Г., Божко В. В. Перетворювальний агрегат для тягової підстанції постійного струму. Патент на корисну модель : Україна, № 51917, H02M 7/00 опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15.
81. Левин А. М., Аржанников Б. А. О выборе системы электрификации // Ж.-д. транспорт. 1988. №7. С. 37-39.
82. Третьяк Т. П. Расчет системы энергоснабжения постоянного тока повышенного напряжения // Вестн. Всесоюзного научно-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 1968. № 8. С. 14-17.
83. Хворост Н. В., Гончаров Ю. П., Панасенко Н. В. Обратимый преобразователь для связи двух линий постоянного тока в системе распределенного тягового электроснабжения // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». Київ, 2004. Ч. 6. С. 99–106.
84. Панасенко Н. В., Гончаров Ю. П., Замаруєв В. В., Кривошеев С. Ю., Иванов А. Е., Морозов Л. Л., Сыченко В. Г. Преобразователь формы напряжения для систем электроснабжения контактной сети переменного тока // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. Лазаряна. 2009. Вип. 29. С. 76-81.
85. Сокол Е. И., Гончаров Ю. П., Ивахно В. В., Сыченко В. Г. и др. Выпрямители с комбинированной фильтрацией для присоединения к системам переменного тока с выраженными резонансными свойствами // Гірнична електромеханіка та автоматика : науково-техн. зб. НГУ. 2011. Вип. 86. С. 54-62.

86. Sychenko V. G., Bosiy D. O., Kosarev E. M. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current // Archives of Transport. 2015. Vol. 35, iss. 3. P. 63–70.
87. Сиченко В. Г. Інтеграція сонячної енергетики у систему тягового електропостачання постійного струму // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Сер.: Автоматика та приладобудування. 2015. № 12 (1121). С. 364 – 368.
88. Гончаров Ю. П., Сокол Е. И., Замаруев В. В. и др. Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей // Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. пр. Маріуполь, 2015. Вип. 30. С. 200-211.
89. Косарев Є. М. Покращення режиму напруги в системі тягового електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму : дис. ... канд. техн. наук. Дніпро, 2018. 194 с.
90. Сиченко В. Г., Кузнецов В. В., Міщенко А. В., Бондар О. І., Кордін О. П. Оцінка енергоефективності ліній повздожнього електропостачання залізниць при підвищенні напруги в мережі // Електрифікація транспорту. 2017. № 14. С. 94-101.
91. Бондар І. Л., Бондар О. І., Сиченко В. Г. Електричні системи та мережі нетягових споживачів залізничного транспорту : навч. посібник. Дніпропетровськ : Вид-во Маковецький, 2009. 184 с.
92. Губський П. В. Енергетичні канали живлення розподілених систем тягового електропостачання // Електрифікація транспорту. 2018. № 15. С. 23-30.
93. Ратнер М. П., Могилевский Е. Л. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. Москва : Транспорт, 1985. 295 с.
94. Горюнов В. Н., Бубенчиков А. А., Гиршин С. С., Петрова Е. В., Левченко А. А. Эффективность применения самонесущих изолированных проводов в современных электроэнергетических системах [Электронный ресурс] // Омский научн. вестн. 2009. № 1. С. 106-108. Режим доступа: [https://cyberleninka.ru /article/n/effektivnost-primeneniya-samonesuschih-](https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-primeneniya-samonesuschih-)

- izolirovannyh-provodov-v-sovremennyh-elektroenergeticheskikh-sistemah (дата звернення 15.04.2019).
95. СИП-3, СИП-3...г, СИПн-3, СИПн-3...г [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.bkz.com.ua/cables/online\\_catalogue/xlpe/sip/sip-3/](http://www.bkz.com.ua/cables/online_catalogue/xlpe/sip/sip-3/) (дата звернення 15.04.2019). Назва з екрана.
  96. Аржанников Б. А. Два варианта усиления системы электроснабжения тяги постоянного тока [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2008-04a18> (дата звернення 15.04.2019).
  97. Тихменев Б. Н., Горин Н. Н., Кучумов В. А. Электрическая тяга постоянного тока: возможности усиления // Ж.-д. транспорт. 1987. № 7. С. 48–50.
  98. Тер-Оганов Э. В., Пышкин А. А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 431 с.
  99. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. Київ, 2005. 80 с.
  100. Аржанников Б. А. Возможности системы электроснабжения постоянного тока для пропуска скоростных пассажирских и грузовых поездов повышенного веса [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2009> (дата звернення 15.04.2019).
  101. Концепція будівництва та оновлення тягових підстанцій / Укрзалізниця. Київ : Головне управління електрифікації та електропостачання, 2005. 16 с.
  102. Андриенко П. Д., Ильин А. Г., Наконечный В. Ф. Диодные выпрямители нового поколения на ток 3150 А, напряжение 3300В для магистральных железных дорог // Тезисы I Международной научно-практ. конф. «Трансэлектро-2007». Крым. Мисхор, 2007. С. 2.
  103. Марикин А. Н., Самонин А. П., Жемчугов В. Г. Способы усиления тягового электроснабжения постоянного тока при интенсивном движении поездов [Электронный ресурс] // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. 2012. № 3. С. 123-127. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-usileniya->

- tyagovogo-elektrosnabzheniya-postoyannogo-toka-pri-intensivnom-dvizhenii-poezdov (дата звернення 15.04.2019).
104. Босий Д. О. Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності // Електрифікація транспорту. 2014. № 8. С. 15–25.
  105. Косарев Є. М. Математична модель керованої розподіленої системи тягового електропостачання постійного струму // Електрифікація транспорту. 2017. № 14. С. 15–27.
  106. Сыченко В. Г. и др. Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающим пунктом [Електронний ресурс]. 2014. Режим доступу: <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/3616> (дата звернення 15.04.2109).
  107. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Москва : Транспорт, 1982.
  108. Косарев Є. М., Сиченко В. Г., Губський П. В. та ін. Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму // Електрифікація транспорту. 2016. № 11. С. 61–70.
  109. Кузнецов В. Г. Развитие теоретических основ энергосбережения в системах электропостачання тяги поїздів постійного струму. Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2012. 390 с.
  110. Смирнов Д. Б. Совершенствование методики расчета распределенной системы тягового электроснабжения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2010. 22 с.
  111. Сиченко В. Г. Моделювання електромагнітних процесів у тяговій мережі постійного струму // Вісн. Дніпропетр. нац. техн. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2011. Вип. 38. С. 73-76.
  112. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Москва : Гардарики, 2006. 701 с.

113. Сиченко В. Г., Пулін М. М., Рогоза А. В. Кількісна оцінка стійкості системи тягового електропостачання постійного струму за напругою // Вісн. Вінницького політехн. ін-ту. 2018. № 3. С. 77–83.
114. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы / под общ. ред. А. В. Кириленко; Ин-т электродинамики НАН Украины. Киев : ИЭД НАН Украины, 2014. 408 с.
115. Webber C. L., Marwan N. Recurrence Quantification Analysis. Theory and Best Practice. New-York : Springer, 2015. 214 p.
116. Liu Z. Chaotic time series analysis // Mathematical Problems in Engineering. 2010. Vol. 2010. P. 1–31.
117. Kantz H., Schreiber T. Nonlinear Time Series Analysis. 2nd Edition. Cambridge : Cambridge University Press, 2004. 388 p.
118. Georgiev N. V., Gospodinov P. N., Petrov V. G. Multi-variant time series based reconstruction of dynamical Systems // Advanced Modeling and Optimization. 2006. № 8. P. 53 – 64.
119. Petrov V. G., Kurths J., Georgiev N. V. Reconstructing differential equations from a time series // International Journal Bifurcation and Chaos. 2003. № 13. P. 3307 – 3323.
120. Marwan N., Romano M., Thiel M., Kurths J. Recurrence plots for the analysis of complex systems // Physics Reports. 2007. № 438. P. 237–329.
121. Khalil H. K. Nonlinear systems. 2nd Edition. New-Jersey : Prentice Hall, 1996. 604 p.
122. Modarresi J., Gholipour E., Khodabakhshian A. A comprehensive review of the voltage stability indices // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 63. P. 1–12.
123. Mohammad S., Gupta A., Choudhary D., Chakrabarti S. Voltage stability monitoring of power systems using reduced network and artificial neural network // International Journal of Electrical Power & Energy Systems . 2017. Vol. 87. P. 43–51.



124. Mehdi Attar, Omid Homaei, Hamid Falaghi, Pierluigi Siano A novel strategy for optimal placement of locally controlled voltage regulators in traditional distribution systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. Vol. 96. P. 11–22.
125. Li Qunzhan. New generation traction power supply system and its key technologies for electrified railways // Journal of Modern Transportation. 2015 Vol. 23, Is. 1. P. 1–11.
126. Sychenko V., Kuznetsov V., Kosariev Ye., Hubsnyi P., Belozyorov V., Zaytsev V., Pulin M. Development of the approach to providing sustainability of the system of direct power supply system // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. 2018. Vol. 5/2 (95). P. 47-57.
127. Gantmacher F. R. The Theory of Matrices. Providence, Rhode Island : AMS Chelsea Publishing, 2000. 550 p.
128. Мирошниченко Р. И. О возможностях системы постоянного тока 3 кВ// Ж.-д. транспорт. 1979. №12. С. 32-34.
129. Аржанников Б. А. Резервы электрифицированных линий // Ж.-д. транспорт. 1987. № 2. С. 55-57.
130. Косарев С. М., Сиченко В. Г., Босий Д. О. Спосіб стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму, МПК H02J 1/00, H02J 13/00. № U201412905, Квіт. 27, 2015.
131. Босий Д. О. Пристрій вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних, № U201408019, Січ. 12, 2015.
132. Лежнюк П. Д., Лесько В. О. Оцінка чутливості втрат потужності в електричних мережах : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2010.
133. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П. Альтернативна енергетика в Україні : монографія. Дніпропетровськ : НГУ, 2013.
134. Popescu M., Bitoleanu A., Suru V. Indirect Current Control in Active DC Railway Traction Substations. 2015. IEEE. P. 192-197.

135. Single Phase Current-Source Active Rectifier: design, simulation and practical problems. 2007. IEEE. P. 644-649.
136. Bitoleanu A., Popescu M., Linca M., Suru V. The Performances of an Active Filtering and Regenerative System for DC Railway Traction Substations // The 9th international symposium on advanced topics in electrical engineering, May 7-9, 2015, Bucharest, Romania. P. 626-631.
137. Michalik J., Molnair J., Peroutka Z. Design Considerations for Single Phase Current-Source Active Rectifier. EPE-PEMC 2006, Portoro2, Slovenia, 2006. P. 1366-1371.
138. Плахтій О. А. Огляд схем трифазних активних випрямлячів з корекцією коефіцієнта потужності для тягової підстанції постійного струму // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. 2013. Вип. 142. С. 144-150.
139. Sokol E., Zamaruiev V., Ivakhno V., Voitovych Y. Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier // 16th international symposium pärnü 2017 “Topical problems in the field of electrical and power engineering” and “doctoral school of energy and geotechnology iii“ pärnü, Estonia (January16 - 21, 2017). P. 160,162.
140. Тер-Оганов Э. В., Пышкин А. А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 431 с.
141. Исследование систем и устройств автоматического регулирования напряжения в контактной сети // Труды УЭМИИТа. 1982. Вып. 68.
142. Сокол Е. И., Гриб О. Г. и др. Расчет релейной защиты и систем автоматики в электроэнергетике. Харьков : ФОП Панов А. М., 2017. 412 с.
143. Фигурнов Е. П. Релейная защита. Киев : Транспорт Украины, 2004. 565 с.
144. Аппаратура автоматики и телемеханики в устройствах энергоснабжения (конструкция, наладка и эксплуатация) / под ред. Василевского Н. Н. и др. Москва : Транспорт, 1971.
145. Данилов О. А., Рябокiнь Б. А. Реалiзацiя двозонного захисту фiдерiв тягових пiдстанцiй постійного струму 3,3 кВ на мiкропроцесорному комплектi // Електрифiкацiя транспорту. 2011. № 2, С. 41-43.

146. Режим доступу : URL: <http://www.kievpribor.com.ua/rus/download.htm>
147. Устройство комплектное распределительное постоянного тока на напряжение 825 В серии "КВ-825" [Электронный ресурс]. Режим доступу : URL: [http://www.nfenergo.ru/rus\\_product.html?itemid=89](http://www.nfenergo.ru/rus_product.html?itemid=89) (дата звернення 15.04.2019)
148. Саблін О. І., Босий Д. О., Кузнецов В. Г., Баб'як М. О., Косарев Є. М., Губський П. В. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму // Вісн. Вінницького політехн. ін-ту. 2016. № 2. С. 73-79.
149. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги. Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2011. 456 с.
150. Сопов В. И. Способы повышения эффективности использования энергии электрического торможения подвижного состава [Электронный ресурс] / В. И. Сопов // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012. Режим доступу : URL:<http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43> (дата звернення 15.04.2019).
151. Тарута П. В. Повышение эффективности использования энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения постоянного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.07. Омск, 2004. 23 с.
152. Вильгельм А. С. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на железных дорогах постоянного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.07. Омск, 2013. 20 с.
153. Пулін М. М., Скрипник О. І. Проблеми перемикання тягової підстанції з випростувального режиму в інверторний і навпаки // Вісн. НУ «Львівська політехніка». 2003. № 497. С. 161-165.
154. Саблин О. И. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта // Вестн. НТУ«ХПИ». 2013. Вып. 38. С. 186-189.
155. Сберегающие технологии тягового электроснабжения с рекуперацией энергии торможения поездов / [А. Т. Бурков, В. М. Варенцов, А. Н.

- Марикин и др]. // II Евроазиатская конференция по транспорту : тез. докл. Санкт-Петербург : ЦНИИТ СЭТ, 2000. 93 с.
156. Саблін О. І. Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту : дис. ... д-ра техн. наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт (27 – транспорт) / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро, 2018. 364 с.
157. Sablin O. et al. Distribution of Excess Regenerative Energy in Electric Transport Systems on the Basis of Fuzzy Logic Application //Archives of Transport. 2017. T. 42.
158. Kuznetsov V. G., Sablin O. I., Chornaya A. V. Improvement of the regenerating energy accounting system on the direct current railways //Archives of transport. 2015. T. 36. №. 4. S. 35--42.
159. Інструкція розрахунку технологічних втрат електроенергії в пристроях тягового електропостачання ЦЕ-0007. Київ, 2003.
160. Методичні рекомендації з бухгалтерського обліку основних засобів, затверджені наказом Мінфіну України «Щодо нарахування амортизації основних засобів на підприємстві» від 30.09.2003 р. № 561.
161. Терешина Н. П., Лapidус Б. М., Трихунков М. Ф. Экономика железнодорожного транспорта. Москва : УМЦ ЖДТ, 2006.
162. Бюджетирование на железнодорожном транспорте : учебное пособие / Н. П. Терешина и др.; под ред. Н. П. Терешиной, Л. В. Шкуриной. Москва : ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. 292 с.

## **Додаток А**

**Експериментальні дослідження режимів напруги та  
потужності в системі тягового електропостачання постійного  
струму**

Експериментальні дослідження режимів електроспоживання виконувалися згідно з розробленою на кафедрі “Інтелектуальні системи електропостачання” методикою з використанням розробленого програмно-апаратного комплексу.

Вибіркові результати експериментальних досліджень зміни напруги на шинах тягових підстанцій 3,3 кВ наведені на рис. А.1 та рис. А.2.

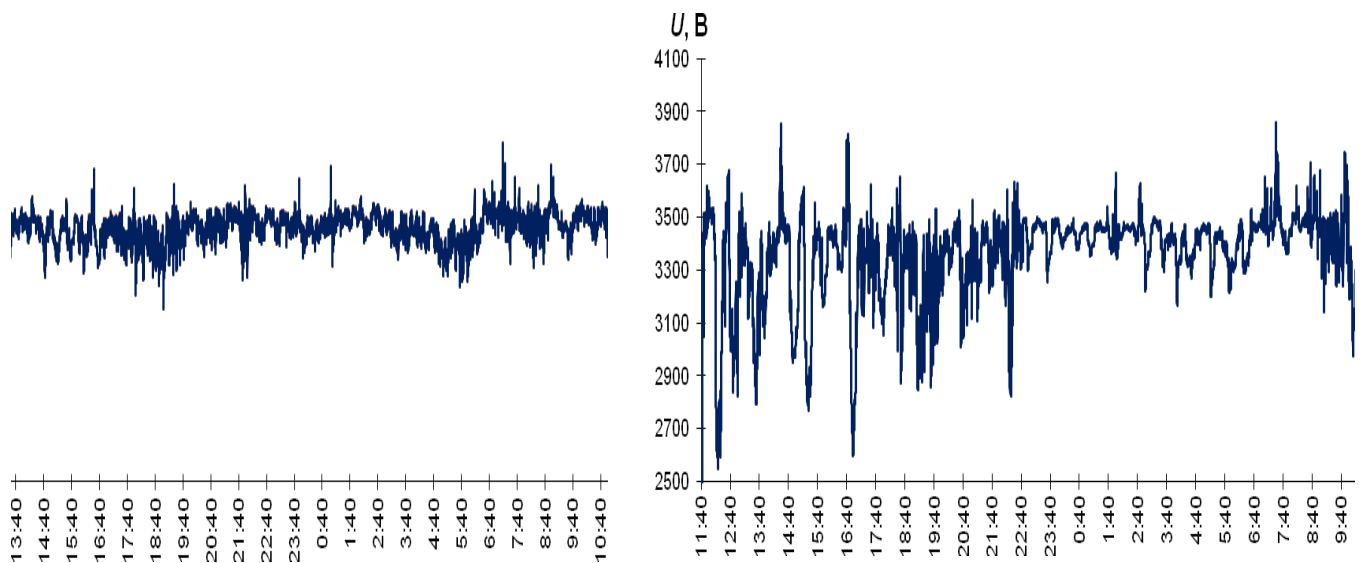


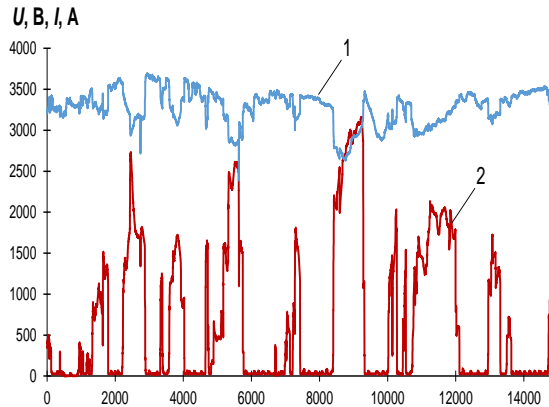
Рисунок А.1 – Напруга на шинах 3,3 кВ тягової підстанції 1

Рисунок А.2 – Напруга на шинах 3,3 кВ тягової підстанції 2

З аналізу статистичних даних про зміну напруги на шинах тягових підстанцій можна зробити висновок, що рівні напруги на шинах дослідних тягових підстанцій мають широкий розкид значень та, за відсутності пристроїв регулювання напруги, не можуть забезпечити нормовану якість напруги на струмоприймачах ЕРС.

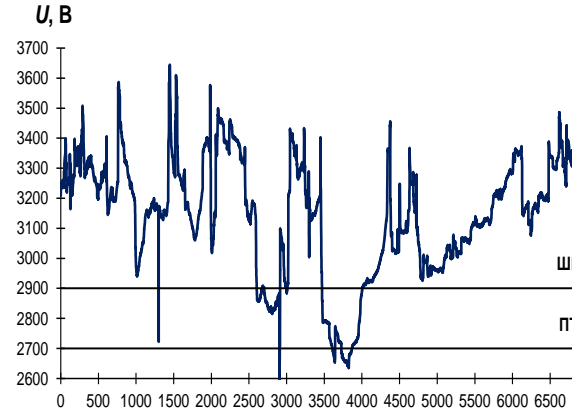
#### **Оцінка рівнів напруги на струмоприймачах електрорухомого складу**

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



1 – напруга на струмоприймачах;  
2 – споживаний струм

Рисунок А.3 – Реалізація струму і напруги зведеного поїзда на дослідній ділянці



ШР – норма напруги для швидкісного руху; ПТЕ – норма напруги за ПТЕ

Рисунок А.4 – Напруга на струмоприймачах у режимі тяги

На струмоприймачі електровоза напруга також має різкозмінний характер. Максимальні коливання в режимі тяги можуть досягати значення 545 В, а в режимі вибігу – 618 В. Отримані результати зумовлюють необхідність зменшення коливань напруги в тяговій мережі та забезпечення сталості його ймовірнісних характеристик у межах, передбачених нормативними документами для високошвидкісного транспорту. При цьому для забезпечення більш високих енергетичних показників функціонування ЕРС необхідно ставити задачу зменшення діапазону змін напруги на струмоприймачах протягом всього часу руху поїзда по перегону.

### Оцінка рівнів напруги на посту секціонування

Дослідження виконувалися на ділянці Синельникове II – Роздори, вимірювання проводились на ПСК Вишневецьке: «+» шина 3 кВ, контур робочого заземлення ПСК «-» (А5). Вимірювання проводились для нормальної схеми живлення контактної мережі дослідної ділянки, для цього в період вимірювань увімкнені всі фідери ПСК Вишневецьке, а також ввімкнені ШВ ППЗ-242 км и ППЗ-251 км.

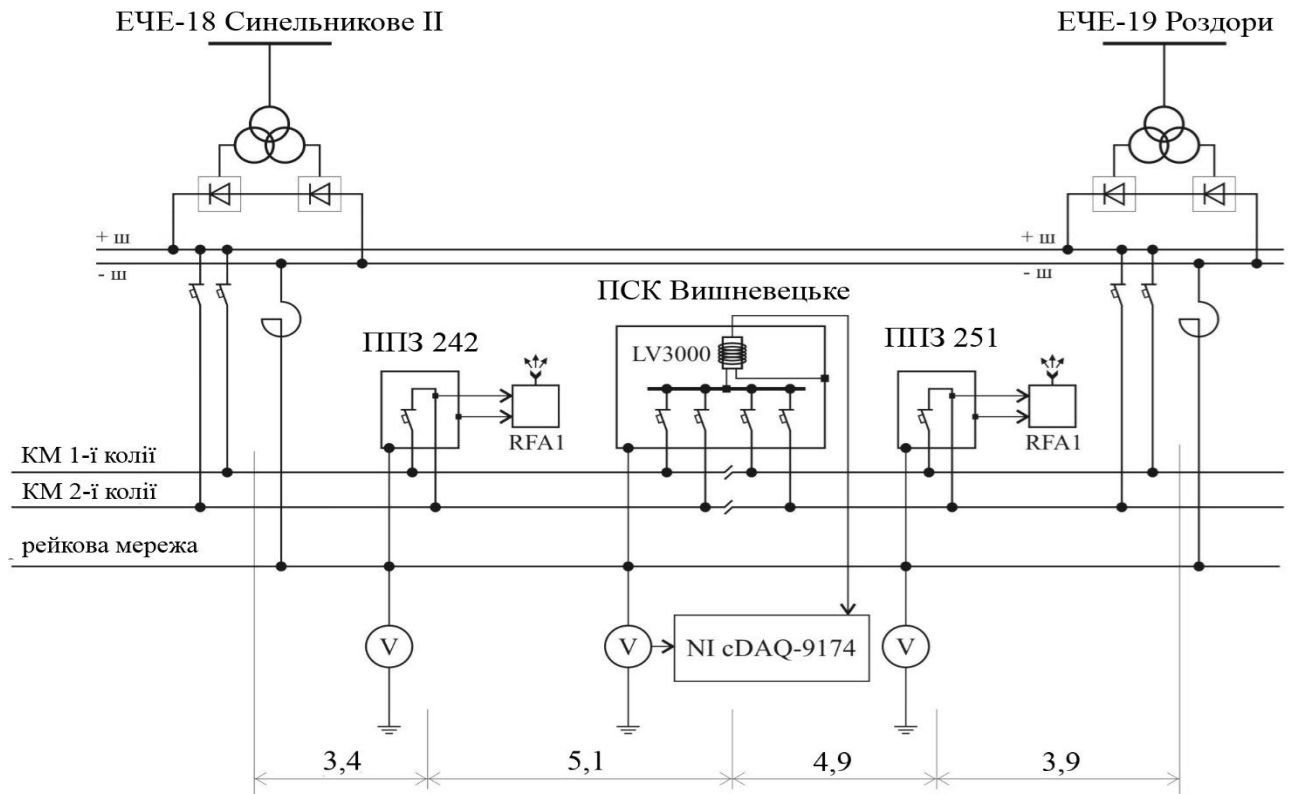


Рисунок А.5 – Схема підключення вимірювальної апаратури на дослідній ділянці

Графік за результатами вимірювань наведено на рис. 1.9. Числові характеристики режиму напруги в різних режимах роботи ПСК наведені в таблиці 1.2 у першому розділі. Їх аналіз показує, що на шинах поста секціонування напруга також має різкозмінний характер, максимальні коливання напруги можуть досягати значення 615 В.

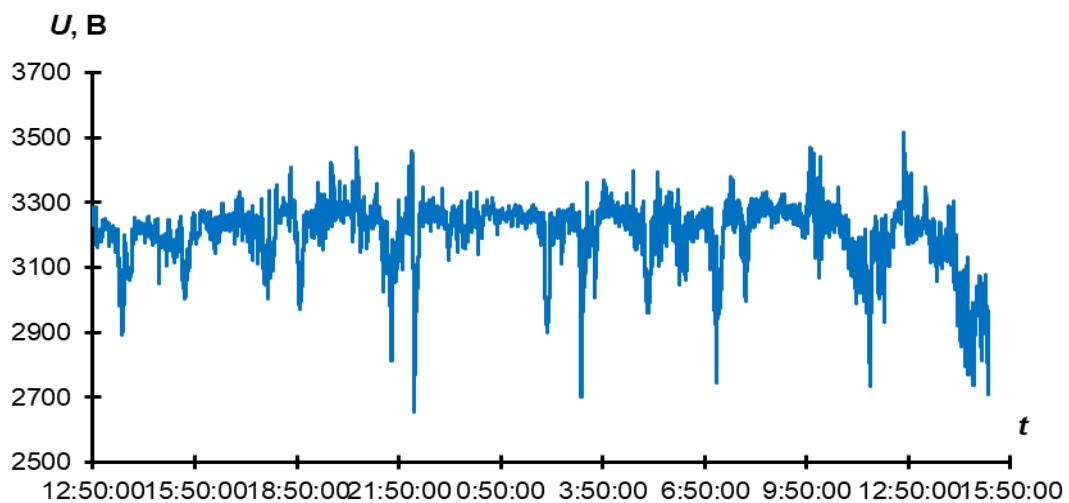


Рисунок А.6 – Напруга на ПСК Вишневецьке



### Режими потужності в тяговій мережі

Коефіцієнт використання режимної потужності та обладнання тягових підстанцій не перевищує 14 %. Це підтверджується експериментальними даними, які були отримані на тягових підстанціях Придніпровської залізниці (див. табл. 1.3).

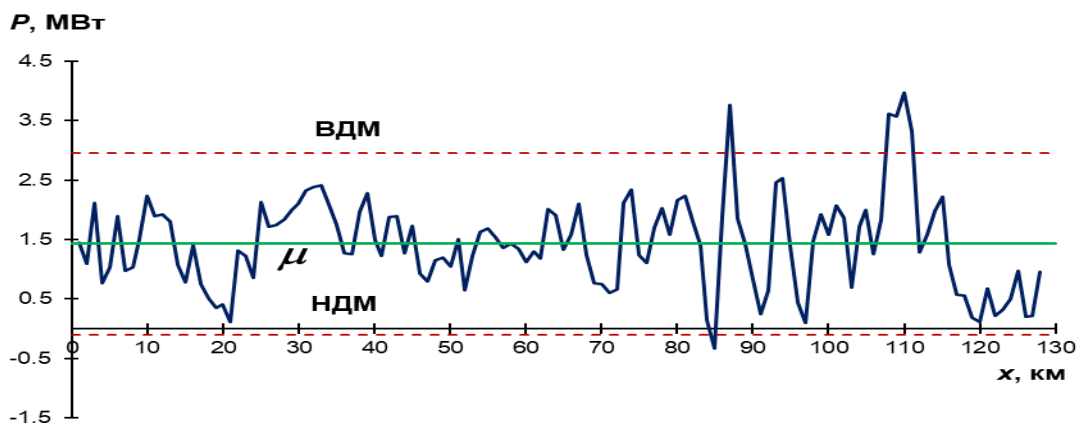
Дослідження режимів роботи тягової мережі та споживаної електровозами потужності проводились на Придніпровській залізниці:

- на ділянці НД Вузол – П'ятихатки. Довжина ділянки 128 км, контактна мережа М-120+2МФ100+А185. Ділянка отримує живлення від 9 тягових підстанцій. Рух поїздів відбувався в парному та непарному напрямках.

- на ділянці НД Вузол НД Вузол – Демуріно. Довжина ділянки 135 км, контактна мережа на ділянці М-120+2МФ100+А185. Ділянка отримує живлення від 9 тягових підстанцій. Рух поїздів відбувався в парному та непарному напрямках.

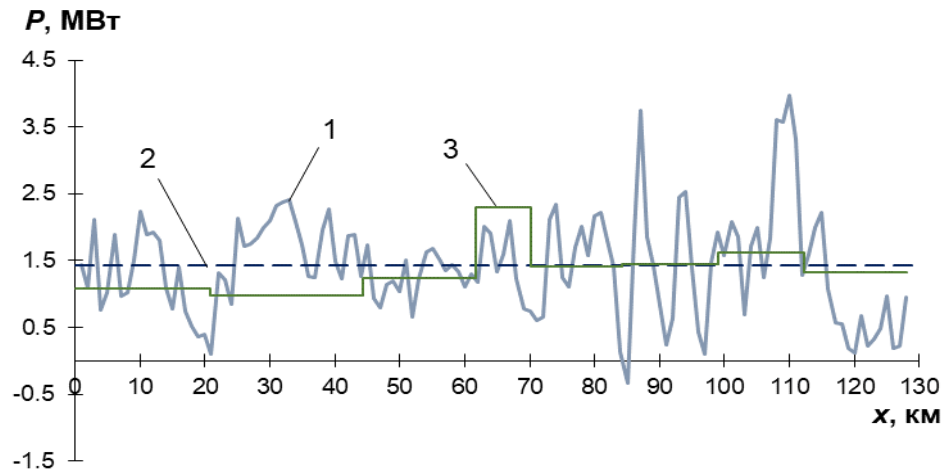
- на ділянці Синельникове – Демуріно. Довжина ділянки 96 км, контактна мережа М-120+2МФ100+А185. Ділянка отримує живлення від 6 тягових підстанцій. Рух поїздів відбувався в парному та непарному напрямках.

Узагальнені результати досліджень режимів потужності в тяговій мережі наведені в таблиці 1.4 та на рис. А.7 – А17



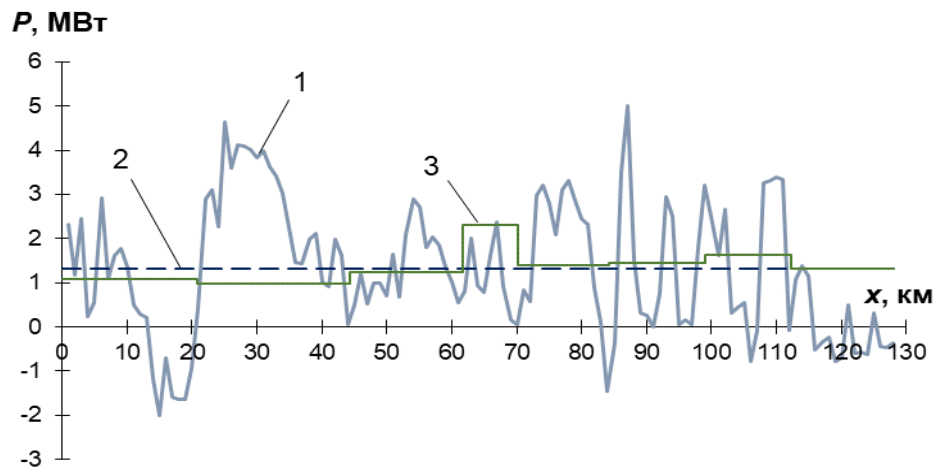
ВДМ – верхня довірча межа; НДМ – нижня довірча межа за умови, що в роботі перебуває один перетворювач

Рисунок А.7 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою НД Вузол – П’ятихатки в парному та непарному напрямках  
ДІЛЯНКА НД ВУЗОЛ – П’ЯТИХАТКИ



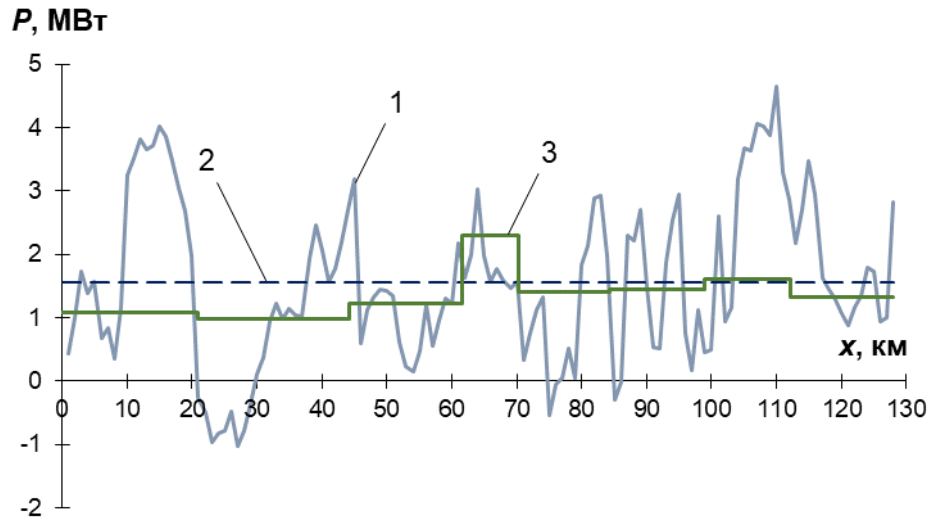
1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС; 3 – потужність на МПЗ, яку можуть забезпечити суміжні ТП

Рисунок А.8 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою НД Вузол – П’ятихатки в парному та непарному напрямках:



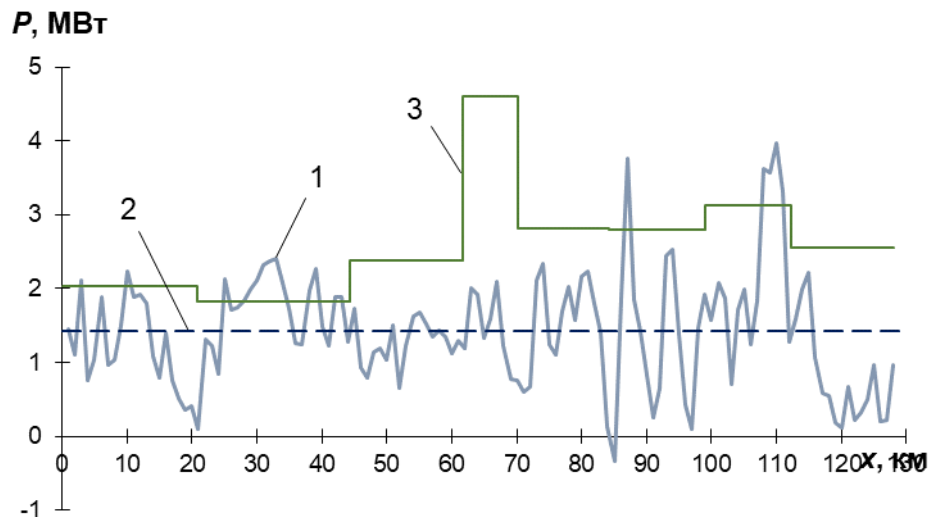
1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС; 3 – потужність на МПЗ, яку можуть забезпечити суміжні ТП

Рисунок А.9 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою НД Вузол – П’ятихатки в непарному напрямку



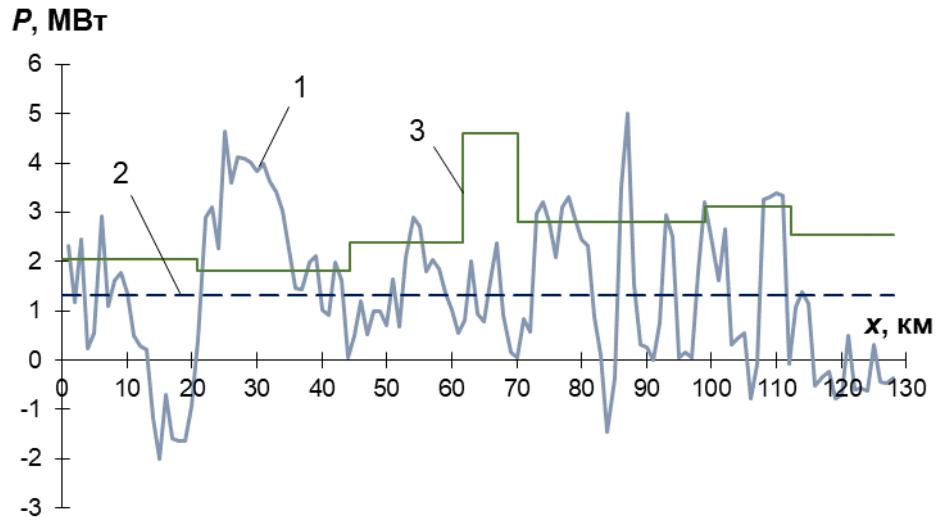
1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС; 3 – потужність на МПЗ, яку можуть забезпечити суміжні ТП за умови, що в роботі перебувають два перетворювачі

Рисунок А.10 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою НД Вузол – П'ятихатки в парному напрямку



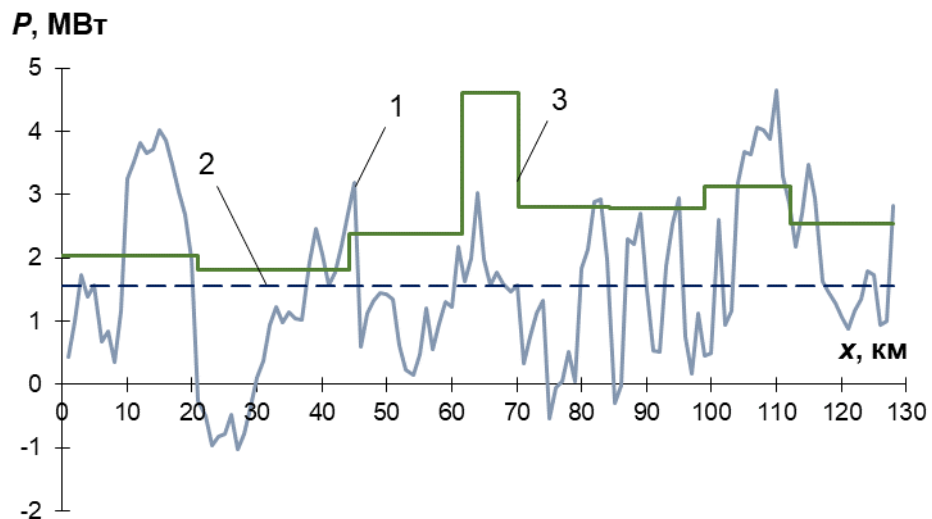
1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС; 3 – потужність на МПЗ, яку можуть забезпечити суміжні ТП

Рисунок А.11 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою НД Вузол – П'ятихатки в парному та непарному напрямках:



1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС; 3 – потужність на МПЗ, яку можуть забезпечити суміжні ТП

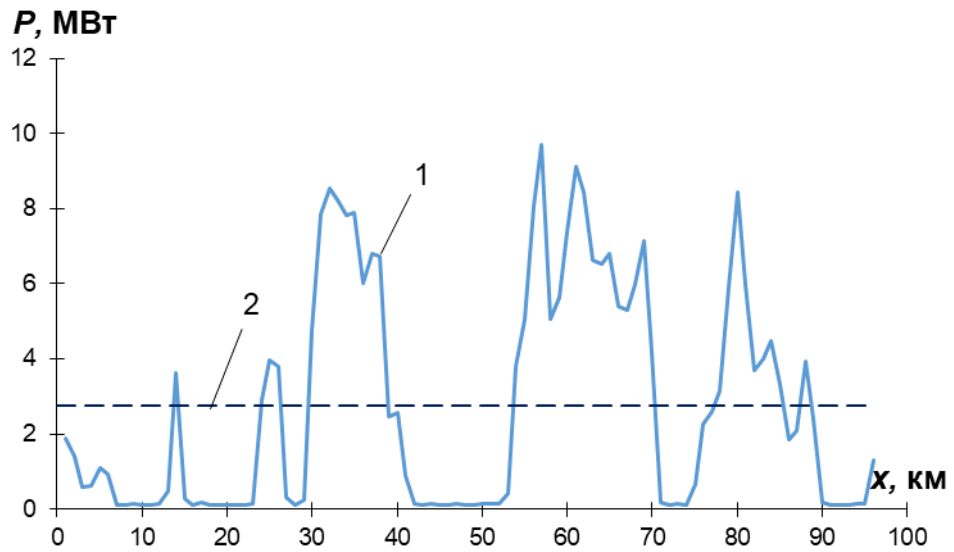
Рисунок А. 12 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою НД Вузол – П’ятихатки в непарному напрямку



1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС; 3 – потужність на МПЗ, яку можуть забезпечити суміжні ТП

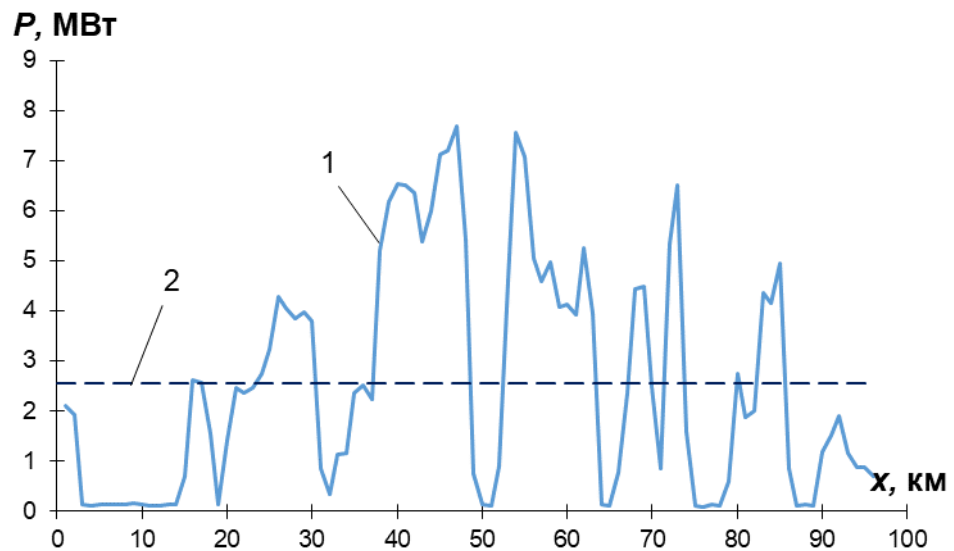
Рисунок А.13 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою НД Вузол – П’ятихатки в парному напрямку

### ДІЛЯНКА СИНЕЛЬНИКОВЕ – ДЕМУРІНО



1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС

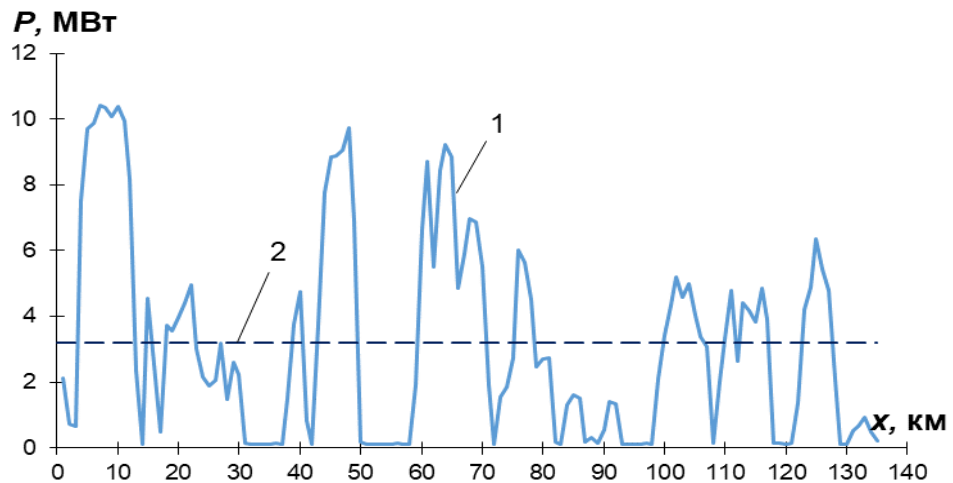
Рисунок А.14 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою Синельникове – Демуріно в непарному напрямку



1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС

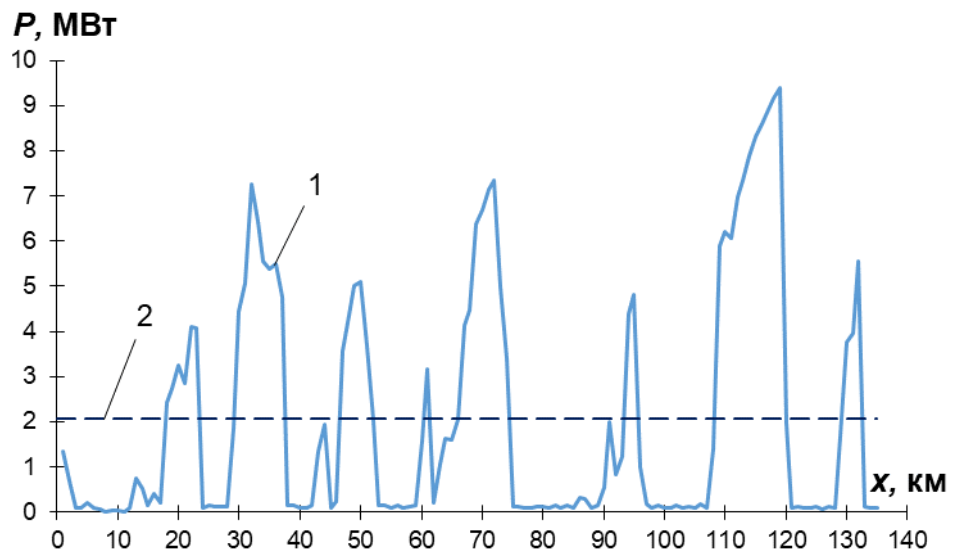
Рисунок А.15 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою Синельникове – Демуріно в парному напрямку

### ДІЛЯНКА НД ВУЗОЛ – ДЕМУРІНО



1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС

Рисунок А.16 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою НД Вузол – Демуріно в непарному напрямку



1 – споживана на кожному кілометрі потужність ЕРС; 2 – середня споживана потужність ЕРС

Рисунок А.17 – Середня зміна споживання потужності на кілометр під час руху ділянкою НД Вузол – Демуріно в парному напрямку

Аналіз отриманих результатів показує, що в тяговій мережі існують зони обмеженого електроспоживання, тобто зони, де споживана потужність ЕРС перевищує можливості СТЕ з передачі необхідного рівня потужності.

## **Додаток Б**

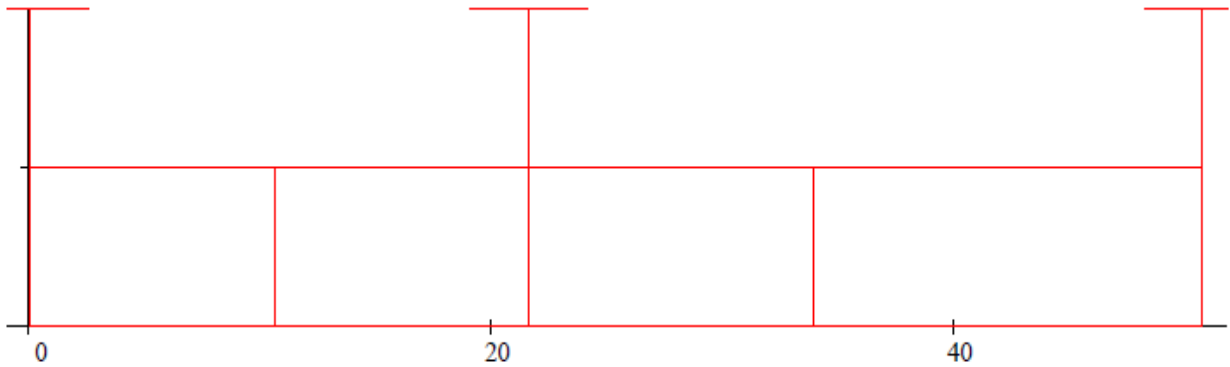
**Фрагмент лістингу програми з розрахунку систем тягового електропостачання (iSET)**

$$r_0 = 0.05 \quad \underline{\underline{TOL}} = 10^{-6} \quad \underline{\underline{ORIGIN}} = 1$$

 $\underline{\underline{S}} =$ 

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	5	10.6	20.3	21.6	30.5	33.9	40	50.8
2	1	0	0	0	1	0	0	0	1
3	0	0	1	0	0	0	1	0	0
4	1	0	0	0	1	0	0	0	1
5	$3.5 \cdot 10^3$	0	$3.5 \cdot 10^3$	0	$3.5 \cdot 10^3$	0	$3.5 \cdot 10^3$	0	$3.5 \cdot 10^3$
6	0.1	0	0.2	0	0.1	0	0.2	0	0.1

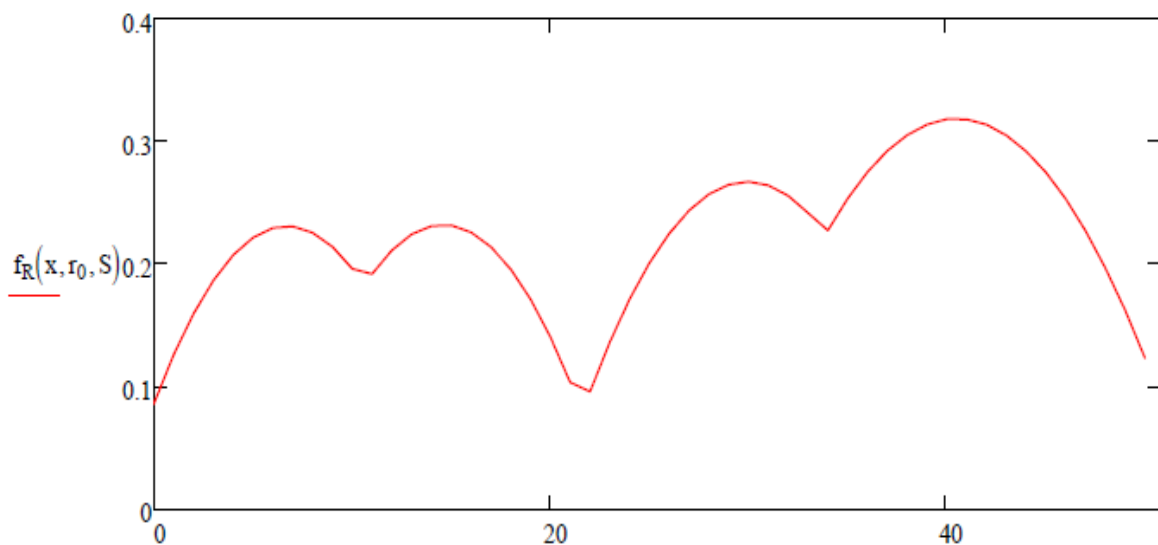
$$pS = \text{plot}(S) \quad \underline{\underline{L}} = \max[(S^T)^{(1)}] = 50.8 \quad \underline{\underline{T}} = 1135 \quad x = 0, 1 \dots L \quad t = 0, 1 \dots T \quad L = 50.8$$



$$TT = 1$$

$$\underline{\underline{TT}} = \text{AddTrainPacket}(TT, 1, vt_1, vx_1, vI_1, 1, 0, 0)$$

Функція опору





Напруга на 15 км

Функція струморозподілу ТП

$$U_K(r_0, S, TT, 15, 1, t) =$$

$3.5 \cdot 10^3$
$3.483 \cdot 10^3$
$3.466 \cdot 10^3$
$3.449 \cdot 10^3$
$3.431 \cdot 10^3$
$3.413 \cdot 10^3$
$3.4 \cdot 10^3$
$3.399 \cdot 10^3$
...

$$U_{K\max} = 3500$$

$$U_{K\min} = 2901$$

$$F(x, r_0, S)_1 =$$

0.863
0.829
0.794
0.76
0.726
0.691
0.657
0.623
...

$$F(x, r_0, S)_1 = 0.1$$

$$F(x, r_0, S)_2 = 0.362$$

$$F(x, r_0, S)_3 = 0.484$$

$$F(x, r_0, S)_4 = 0.039$$

$$F(x, r_0, S)_5 = 0.014$$

Максимальний струм КЗ

$$I_{KZ\max} = \frac{U_{K\max}}{f_R(15, r_0, S)} = 28784$$

$$i = 1..5$$

$$I_{KZTP\max} = I_{KZ\max} \cdot F(x, r_0, S)_i$$

$$I_{KZTP\max} = \begin{pmatrix} 2890.6 \\ 10412.1 \\ 13931.5 \\ 1134.7 \\ 403.6 \end{pmatrix}$$

Мінімальний струм КЗ

$$I_{KZ\min} = \frac{U_{K\min}}{f_R(15, r_0, S)} = 26123$$

$$I_{KZTP\min} = I_{KZ\min} \cdot F(x, r_0, S)_i$$

$$I_{KZTP\min} = \begin{pmatrix} 2612.3 \\ 9456.5 \\ 12643.5 \\ 1018.8 \\ 365.7 \end{pmatrix}$$

## Визначення раціональних допустимих відстаней між підстанціями

$$L := 20 \quad U_w := 3300 \quad dU := U_w - 2900 = 400 \quad r_0 := 0.051$$

Напруга на струмоприймачі ЕРС

$$U_e = U_w - \frac{U_w - \sqrt{U_w^2 - 4r_0 \cdot \left(x - \frac{x^2}{L}\right) P}}{2 \cdot \left[r_0 \cdot \left(x - \frac{x^2}{L}\right)\right]} \cdot \left[r_0 \cdot \left(x - \frac{x^2}{L}\right)\right]$$

Втрати напруги до струмоприймача

$$dU = \frac{U_w - \sqrt{U_w^2 - 4r_0 \cdot \left(x - \frac{x^2}{L}\right) P}}{2 \cdot \left[r_0 \cdot \left(x - \frac{x^2}{L}\right)\right]} \cdot \left[r_0 \cdot \left(x - \frac{x^2}{L}\right)\right]$$

З цього рівняння знаходимо відстань, на яку можна передати задану потужність  $P$  при заданому рівні втрат напруги  $dU$  в тяговій мережі

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{L \cdot \left[ \frac{\sqrt{P \cdot r_0 \cdot (4 \cdot dU^2 - 4 \cdot U_w \cdot dU + L \cdot P \cdot r_0)}}{L} + \frac{P \cdot r_0}{2} \right]}{P \cdot r_0} \\ \frac{L \cdot \left[ \frac{\sqrt{P \cdot r_0 \cdot (4 \cdot dU^2 - 4 \cdot U_w \cdot dU + L \cdot P \cdot r_0)}}{L} - \frac{P \cdot r_0}{2} \right]}{P \cdot r_0} \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{від другої ТП} \\ \text{від першої ТП} \end{matrix}$$

Залежність відстані від потужності, на яку можна передати задану потужність  $P$  при заданому рівні втрат напруги  $dU$  в тяговій мережі

$$x_1(P) := \frac{L \cdot \left[ \frac{\sqrt{P \cdot r_0 \cdot (4 \cdot dU^2 - 4 \cdot U_w \cdot dU + L \cdot P \cdot r_0)}}{L} - \frac{P \cdot r_0}{2} \right]}{P \cdot r_0} \quad \text{Для першої ТП,}$$

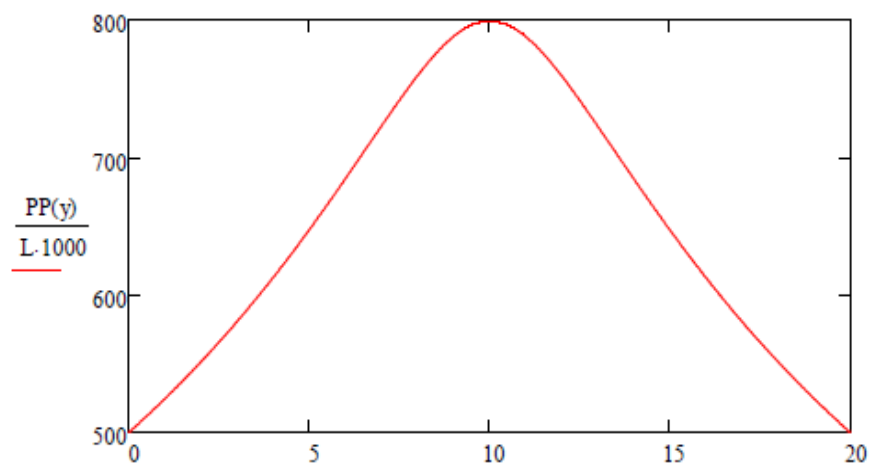
$$x_2(P) := \frac{L \cdot \left[ \frac{\sqrt{P \cdot r_0 \cdot (4 \cdot dU^2 - 4 \cdot U_w \cdot dU + L \cdot P \cdot r_0)}}{L} + \frac{P \cdot r_0}{2} \right]}{P \cdot r_0} \quad \text{Для другої ТП}$$

Потужність з урахуванням втрат, яку треба передавати для забезпечення режиму сталого споживання потужності EPC

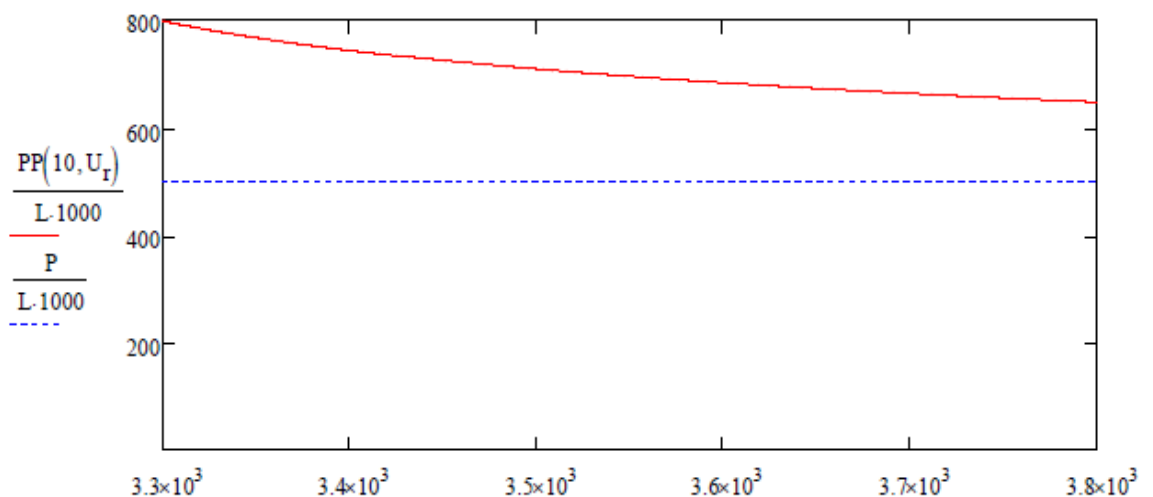
$$P := 10000000$$

$$PP(y) := \left[ \frac{U_w - \sqrt{U_w^2 - 4 \cdot r_0 \cdot \left(y - \frac{y^2}{L}\right) P}}{2 \cdot \left[r_0 \cdot \left(y - \frac{y^2}{L}\right)\right]} \right] - \frac{U_w - \sqrt{U_w^2 - 4 \cdot r_0 \cdot \left(y - \frac{y^2}{L}\right) P}}{2 \cdot \left[r_0 \cdot \left(y - \frac{y^2}{L}\right)\right]} \cdot \left[ r_0 \cdot \left(y - \frac{y^2}{L}\right) \right]$$

$$\int_{x1(P)}^{x2(P)} PP(y) - P \, dy = 5.732 \times 10^7$$



$$PP(y, U_w) := \left[ \frac{U_w - \sqrt{U_w^2 - 4 \cdot r_0 \cdot \left(y - \frac{y^2}{L}\right) P}}{2 \cdot \left[r_0 \cdot \left(y - \frac{y^2}{L}\right)\right]} \right] - \frac{U_w - \sqrt{U_w^2 - 4 \cdot r_0 \cdot \left(y - \frac{y^2}{L}\right) P}}{2 \cdot \left[r_0 \cdot \left(y - \frac{y^2}{L}\right)\right]} \cdot \left[ r_0 \cdot \left(y - \frac{y^2}{L}\right) \right]$$



## Функції опору та струморозподілу

```

parse(S) := if (S2,1 ≠ 1) · (S4,1 ≠ 1) · (S3,1 = 0)
  | obj1,1 ← S1,1
  | obj1,2 ← -1
  | obj1,3 ← "Begin"
  | lst ← cols(S)
  | for i ∈ 1..lst
    | if (S2,i = 1) · (S4,i = 1)
      | objrows(obj)+1,1 ← S1,i
      | objrows(obj),2 ← S6,i
      | objrows(obj),3 ← "Subst"
    | if S3,i ≠ 0
      | objrows(obj)+1,1 ← S1,i
      | objrows(obj),2 ← S3,i
      | objrows(obj),3 ← "Node"
    | if (S2,lst ≠ 1) · (S4,lst ≠ 1) · (S3,lst = 0)
      | objrows(obj)+1,1 ← S1,lst
      | objrows(obj),2 ← -1
      | objrows(obj),3 ← "End"
  | obj

AddERS(T, x, I) := xbeg ← T1,1
  | xend ← Trows(T),1
  | f ← 1
  | for i ∈ 1..rows(T)
    | if Ti,1 = x
      | f ← 0
      | break
  | if (xbeg < x < xend) · (f = 1)
    | Trows(T)+1,1 ← x
    | Trows(T),2 ← I
    | Trows(T),3 ← "ERS"
    | csort(T, 1)
  | T otherwise

```

```

write_row(Var, r_num, N, x, Type, L_n, L_r, R_n, R_r, U_n, U_r, D_n, D_r) :=
  | Varr_num,1 ← N
  | Varr_num,2 ← x
  | Varr_num,3 ← Type
  | Varr_num,4 ← L_n
  | Varr_num,5 ← L_r
  | Varr_num,6 ← R_n
  | Varr_num,7 ← R_r
  | Varr_num,8 ← U_n
  | Varr_num,9 ← U_r
  | Varr_num,10 ← D_n
  | Varr_num,11 ← D_r
  | Var

```

```

make_graf(r_0, T) :=
  n ← 0
  N ← rows(T)
  r_p ← 10-6
  for i ∈ 1..N
    if Ti,3 = "Begin"
      n ← n + 1
      res ← write_row[res, n, n, Ti,1, Ti,3, -1, -1, n + 2, r_0 · (Ti+1,1 - Ti,1), -1, -1, -1, -1]
      n ← n + 1
      res ← write_row[res, n, n, Ti,1, Ti,3, -1, -1, n + 2, r_0 · (Ti+1,1 - Ti,1), -1, -1, -1, -1]
    if Ti,3 = "ERS"
      n ← n + 1
      res ← write_row[res, n, n, Ti,1, Ti,3, n - 2, r_0 · (Ti,1 - Ti-1,1), n + 2, r_0 · (Ti+1,1 - Ti,1), -1, -1, -1, -1]
      n ← n + 1
      res ← write_row[res, n, n, Ti,1, Ti,3, n - 2, r_0 · (Ti,1 - Ti-1,1), n + 2, r_0 · (Ti+1,1 - Ti,1), -1, -1, -1, -1]
    if Ti,3 = "Subst"
      n ← n + 1
      res ← write_row[res, n, n, Ti,1, Ti,3, if(i > 1, n - 2, -1), if[i > 1, r_0 · (Ti,1 - Ti-1,1), -1], if(i < N, n + 2, -1), if[i < N, r_0 · (Ti+1,1 - Ti,1), -1], 0, Ti,2, n + 1, r_p]
      n ← n + 1
      res ← write_row[res, n, n, Ti,1, Ti,3, if(i > 1, n - 2, -1), if[i > 1, r_0 · (Ti,1 - Ti-1,1), -1], if(i < N, n + 2, -1), if[i < N, r_0 · (Ti+1,1 - Ti,1), -1], n - 1, r_p, -1, -1]
    if Ti,3 = "Node"
      if Ti,2 = 1
        n ← n + 1
        res ← write_row[res, n, n, Ti,1, Ti,3, if(i > 1, n - 2, -1), if[i > 1, r_0 · (Ti,1 - Ti-1,1), -1], if(i < N, n + 2, -1), if[i < N, r_0 · (Ti+1,1 - Ti,1), -1], -1, -1, n + 1, r_p]
        n ← n + 1
        res ← write_row[res, n, n, Ti,1, Ti,3, if(i > 1, n - 2, -1), if[i > 1, r_0 · (Ti,1 - Ti-1,1), -1], if(i < N, n + 2, -1), if[i < N, r_0 · (Ti+1,1 - Ti,1), -1], n - 1, r_p, -1, -1]
      if Ti,2 = 2
        n ← n + 1
        res ← write_row[res, n, n, Ti,1 - 0.001, Ti,3, if(i > 1, n - 2, -1), if[i > 1, r_0 · (Ti,1 - Ti-1,1), -1], -1, -1, -1, -1, -1]
        n ← n + 1
        res ← write_row[res, n, n, Ti,1 - 0.001, Ti,3, if(i > 1, n - 2, -1), if[i > 1, r_0 · (Ti,1 - Ti-1,1), -1], -1, -1, -1, -1, -1]
        n ← n + 1
        res ← write_row[res, n, n, Ti,1 + 0.001, Ti,3, -1, -1, if(i < N, n + 2, -1), if[i < N, r_0 · (Ti+1,1 - Ti,1), -1], -1, -1, -1, -1]
        n ← n + 1
        res ← write_row[res, n, n, Ti,1 + 0.001, Ti,3, -1, -1, if(i < N, n + 2, -1), if[i < N, r_0 · (Ti+1,1 - Ti,1), -1], -1, -1, -1, -1]
    if Ti,3 = "End"
      n ← n + 1
      res ← write_row[res, n, n, Ti,1, Ti,3, n - 2, r_0 · (Ti,1 - Ti-1,1), -1, -1, -1, -1, -1]
      n ← n + 1
      res ← write_row[res, n, n, Ti,1, Ti,3, n - 2, r_0 · (Ti,1 - Ti-1,1), -1, -1, -1, -1, -1]
  1
res

```

```

Construct_A(G) :=
  N ← rows(G)
  inf ← 106
  g ← 0
  for i ∈ 1..N
    for j ∈ 4, 6..10
      if Gi,j ≠ -1
        if Gi,j+1 ≠ 0
          g ← g +  $\frac{1}{G_{i,j+1}}$ 
          if Gi,j ≠ 0
            resi,Gi,j ←  $-\frac{1}{G_{i,j+1}}$ 
            resGi,j,i ←  $-\frac{1}{G_{i,j+1}}$ 
          otherwise
            g ← inf
            if Gi,j ≠ 0
              resi,Gi,j ← -inf
              resGi,j,i ← -inf
            break
    resi,i ← g
  g ← 0
res

```

```

fR(x, r, 0, S) :=
  x ← round(x, 6)
  PS ← parse(S)
  PS ← AddERS(PS, x, 1)
  Graf ← make_graf(r, 0, PS)
  f ← 0
  for i ∈ 1..rows(Graf)
    if |Grafi,2 - x| < 10-6
      n ← Grafi,1
      f ← 1
      break
  if f = 1
    A ← Construct_A(Graf)
    Evrows(A) ← 0
    Evn ← 1
    (A-1 · Ev)n
  NaN otherwise

```

```

 $\underline{\underline{F}}(x, r_0, S) := \begin{array}{l} x \leftarrow \text{round}(x, 6) \\ PS \leftarrow \text{parse}(S) \\ PS \leftarrow \text{AddERS}(PS, x, 1) \\ \text{Graf} \leftarrow \text{make\_graf}(r_0, PS) \\ f \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1 \dots \text{rows}(\text{Graf}) \\ \quad \text{if } |\text{Graf}_{i,2} - x| < 10^{-6} \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} n \leftarrow \text{Graf}_{i,1} \\ f \leftarrow 1 \\ \text{break} \end{array} \right. \\ \text{if } f = 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} A \leftarrow \text{Construct\_A}(\text{Graf}) \\ \text{Ev}_{\text{rows}(A)} \leftarrow 0 \\ \text{G}_{\text{rows}(A), \text{rows}(A)} \leftarrow 0 \\ \text{Ev}_n \leftarrow 1 \\ \text{for } i \in 1 \dots \text{rows}(\text{Graf}) \\ \quad \text{if } \text{Graf}_{i,3} = \text{"Subst"} \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1 \dots \text{rows}(PS) \\ \quad \text{if } (PS_{j,1} = \text{Graf}_{i,2}) \cdot (PS_{j,3} = \text{"Subst"}) \cdot (\text{mod}(i, 2) \neq 0) \\ \quad \quad \quad \left| \begin{array}{l} G_{i,i} \leftarrow \frac{1}{PS_{j,2}} \\ \text{ind}_{\text{rows}(\text{ind})+1} \leftarrow i \\ \text{break} \end{array} \right. \\ \quad \quad \quad 1 \end{array} \right. \\ M \leftarrow G \cdot A^{-1} \cdot \text{Ev} \\ \text{for } i \in 1 \dots \text{rows}(\text{ind}) \\ \quad \text{res}_i \leftarrow M_{(\text{ind}_i)} \\ \text{res} \end{array} \right. \\ \text{NaN otherwise} \end{array}$ 

```

```

dU(x, x_n, I_n, n, r_0, S) := PS ← parse(S)
                             PS ← AddERS(PS, x_n, I_n)
                             PS ← AddERS(PS, x, 1)
                             Graf ← make_graf(r_0, PS)
                             f1 ← 0
                             for i ∈ 1..rows(Graf)
                               if |Grafi,2 - x| < 10-6
                                 | ind_x ← Grafi,1
                                 | f1 ← 1
                                 | break
                             f2 ← 0
                             for i ∈ 1..rows(Graf)
                               if |Grafi,2 - x_n| < 10-6
                                 | ind_xn ← Grafi,1
                                 | f2 ← 1
                                 | break
                             if (f1 = 1) · (f2 = 1)
                               | A ← Construct_A(Graf)
                               | Evrows(A) ← 0
                               | Evind_x ← 0
                               | Evind_xn ← I_n
                               | M(1) ← Graf(2)
                               | M(2) ← A-1 · Ev
                               if n = 1
                                 | for i ∈ 1..rows(M)
                                 |   if mod(i, 2) ≠ 0
                                 |     | Mvrows(Mv)+1,1 ← Mi,1
                                 |     | Mvrows(Mv),2 ← Mi,2
                                 |   1
                               if n = 2
                                 | for i ∈ 1..rows(M)
                                 |   if mod(i, 2) = 0
                                 |     | Mvrows(Mv)+1,1 ← Mi,1
                                 |     | Mvrows(Mv),2 ← Mi,2
                                 |   1
                               | linterp(Mv(1), Mv(2), x)
                             NaN otherwise

```



## Функції розрахунку режиму напруги та потужності

$$U_x(x, r_0, S) := \begin{cases} \text{vec}_1 \leftarrow 1\_vec(S) \\ \text{vec}_p \leftarrow p\_vec(S) \\ \text{vec}_r \leftarrow r\_vec(r_0, S) \\ \text{vec}_E \leftarrow E\_vec(S) \\ \text{vec}_{Ux} \leftarrow U_{xx}(\text{vec}_E, I_K(\text{vec}_p, \text{vec}_r, \text{vec}_E), \text{vec}_p) \\ \text{linterp}(\text{vec}_1, \text{vec}_{Ux}, x) \text{ if } \text{rows}(\text{vec}_p) > 1 \\ \text{vec}_{E1,1} \text{ otherwise} \end{cases}$$

$$U_(r_0, S, TT, n, t) := \begin{cases} \text{vec}_p \leftarrow p\_vec(S) \\ \text{vec}_E \leftarrow E\_vec(S) \\ \text{vec}_r \leftarrow r\_vec(r_0, S) \\ x_{cur} \leftarrow x_e(TT, n, t) \\ I_{cur} \leftarrow I_e(TT, n, t) \\ U_x(x_{cur}, r_0, S) - I_{cur} \cdot f_R(x_{cur}, r_0, S) \end{cases}$$

$$\text{find}_x(TT, t) := \begin{cases} \text{for } i \in 1.. \text{rows}(TT) \\ \quad n \leftarrow (TT_i)_1 \\ \quad vt \leftarrow (TT_i)_2 \\ \quad vx \leftarrow (TT_i)_3 \\ \quad vI \leftarrow (TT_i)_4 \\ \quad \text{if } \min(vt) \leq t \leq \max(vt) \\ \quad \quad M \leftarrow 0 \\ \quad \quad \text{res}_{\text{rows}(res)+1,1} \leftarrow n \\ \quad \quad M^{(1)} \leftarrow vt \\ \quad \quad M^{(2)} \leftarrow vx \\ \quad \quad M \leftarrow \text{csort}(M, 1) \\ \quad \quad \text{res}_{\text{rows}(res),2} \leftarrow \text{linterp}(M^{(1)}, M^{(2)}, t) \\ \quad \quad M \leftarrow 0 \\ \quad \quad M^{(1)} \leftarrow vx \\ \quad \quad M^{(2)} \leftarrow vI \\ \quad \quad M \leftarrow \text{csort}(M, 1) \\ \quad \quad \text{res}_{\text{rows}(res),3} \leftarrow \text{linterp}(M^{(1)}, M^{(2)}, \text{res}_{\text{rows}(res),2}) \\ \quad \text{res if } \text{res} \neq 0 \\ \quad \text{break otherwise} \end{cases}$$

```

U(r_0, S, TT, n, t) :=
  vec_p ← p_vec(S)
  vec_r ← r_vec(r_0, S)
  vec_E ← E_vec(S)
  vec_k ← k_vec(TT)
  res_find ← find_x(TT, t)
  if rows(res_find) > 0
    f ← 0
    for i ∈ 1..rows(res_find)
      if res_findi,1 = vec_kn
        f ← 1
        ind ← i
        break
    break if f = 0
  otherwise
    x ← res_findind,2
    I ← res_findind,3
    U_res ← Ux(x, r_0, S) - I · fR(x, r_0, S)
    for i ∈ 1..rows(res_find)
      if i ≠ ind
        x_n ← res_findi,2
        I_n ← res_findi,3
        n_n ← 1 if (mod(res_findi,1}, 2) = 0) · (mod(res_findind,1}, 2) = 0)
        n_n ← 2 otherwise
        _dU ← dU(x, x_n, I_n, n_n, r_0, S)
        U_res ← U_res - _dU if IsNaN(_dU) = 0
    U_res
  break otherwise

UK(r_0, S, TT, x_k, n_n, t) :=
  1
  U_res ← Ux(x_k, r_0, S)
  res_find ← find_x(TT, t)
  for i ∈ 1..rows(res_find)
    x_n ← res_findi,2
    I_n ← res_findi,3
    _dU ← dU(x_k, x_n, I_n, n_n, r_0, S)
    U_res ← U_res - _dU if IsNaN(_dU) = 0
  U_res

```

$$U_m(r_0, S, TT, n, t) := \left| \begin{array}{l} \text{vec}_1 \leftarrow 1\_vec(S) \\ \text{vec}_p \leftarrow p\_vec(S) \\ \text{vec}_E \leftarrow E\_vec(S) \\ \text{res}_f \leftarrow \text{find}_x(TT, t) \\ \text{res} \leftarrow U_x(\text{vec}_1, r_0, S) \\ f_R \leftarrow f_R(\text{vec}_1, r_0, S) \\ \text{for } i \in 1..rows(\text{res}_f) \\ \quad \left| \begin{array}{l} x \leftarrow \text{res}_{f_i,2} \\ I \leftarrow \text{res}_{f_i,3} \\ \_F \leftarrow F(x, r_0, S) \\ \text{res} \leftarrow \text{res} - I \cdot \_F \cdot f_R \text{ if } \text{IsNaN}(\_F) = 0 \end{array} \right. \\ \text{res} \end{array} \right.$$

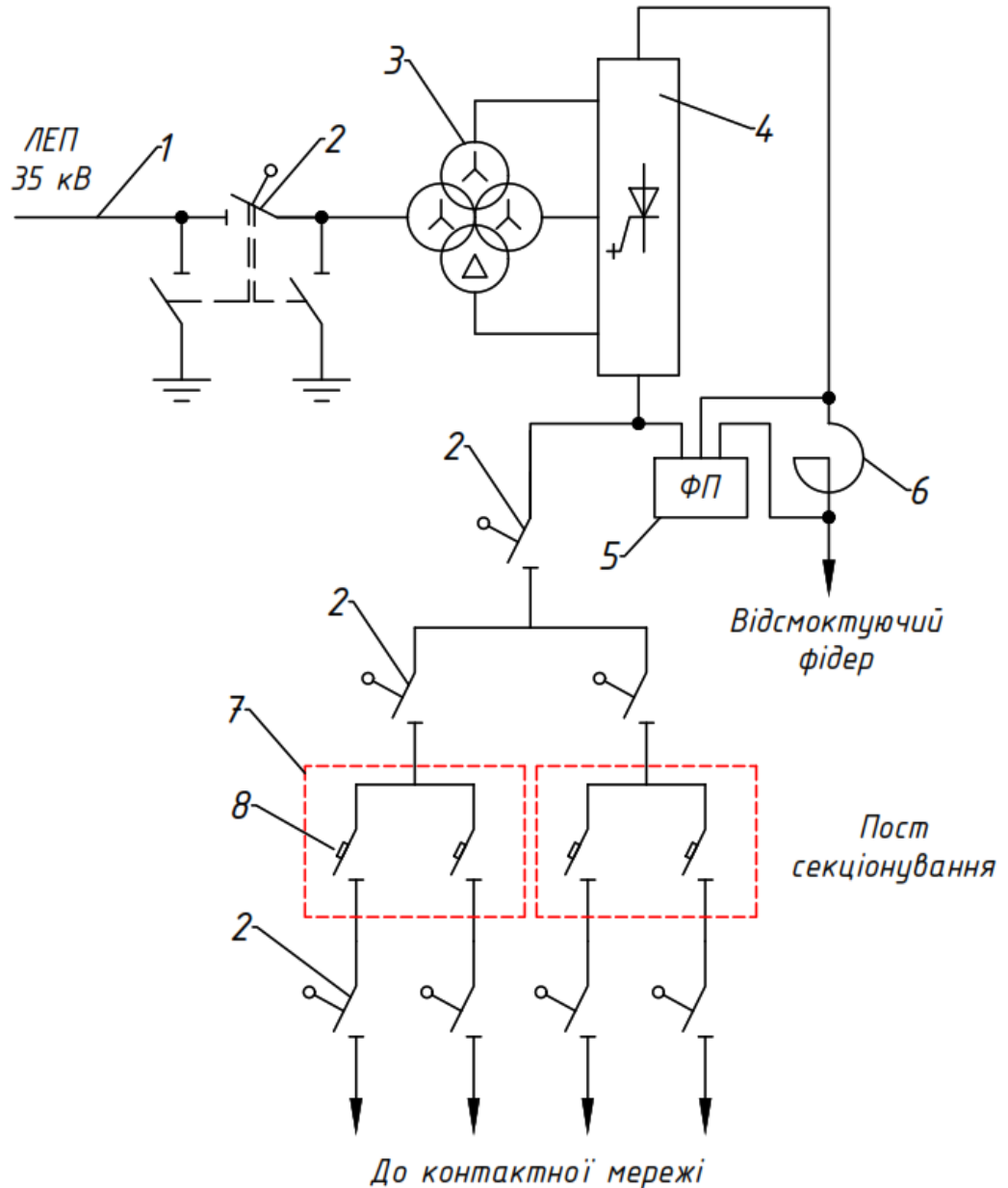
### Функції розрахунку енергетичних показників

$$\text{NumToN}(TT, n) := \left| \begin{array}{l} \text{vec}_k \leftarrow k\_vec(TT) \\ \text{for } i \in 1..rows(\text{vec}_k) \\ \quad \text{if } n = \text{vec}_{k_i} \quad P_e(r_0, S, TT, t) := \left| \begin{array}{l} \text{res}_f \leftarrow \text{find}_x(TT, t) \\ \text{sum} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..rows(\text{res}_f) \\ \quad \left| \begin{array}{l} \_U \leftarrow U(r_0, S, TT, \text{NumToN}(TT, \text{res}_{f_i,1}), t) \\ \text{sum} \leftarrow \text{sum} + \_U \cdot \text{res}_{f_i,3} \text{ if } \text{IsNaN}(\_U) = 0 \end{array} \right. \\ \text{sum} \end{array} \right. \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{res} \leftarrow i \\ \text{break} \end{array} \right. \\ \text{res} \end{array} \right.$$

$$TT, t) := \left| \begin{array}{l} \text{vec}_1 \leftarrow 1\_vec(S) \\ \text{res}_f \leftarrow \text{find}_x(TT, t) \\ \text{sum} \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 1..rows(\text{vec}_1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} \_U \leftarrow U_m(r_0, S, TT, j, t) \\ \text{for } i \in 1..rows(\text{res}_f) \\ \quad \left| \begin{array}{l} x \leftarrow \text{res}_{f_i,2} \\ I \leftarrow \text{res}_{f_i,3} \\ \_F \leftarrow F(x, r_0, S) \\ \text{sum} \leftarrow \text{sum} + I \cdot \_F \cdot \_U \text{ if } \text{IsNaN}(\_F) = 0 \end{array} \right. \\ \text{sum} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$dP(r_0, S, TT, t) := \left| \begin{array}{l} \text{vec}_1 \leftarrow 1\_vec(S) \\ \text{res}_f \leftarrow \text{find}_x(TT, t) \\ \text{sum} \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 1..rows(\text{vec}_1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} \_U \leftarrow U_m(r_0, S, TT, j, t) \\ \text{for } i \in 1..rows(\text{res}_f) \\ \quad \left| \begin{array}{l} x \leftarrow \text{res}_{f_i,2} \\ I \leftarrow \text{res}_{f_i,3} \\ \_F \leftarrow F(x, r_0, S) \\ \text{pp}_s \leftarrow \text{pp}_s + I \cdot \_F \cdot \_U \text{ if } \text{IsNaN}(\_F) = 0 \\ \text{if } j = rows(\text{vec}_1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} \_Ue \leftarrow U(r_0, S, TT, \text{NumToN}(TT, \text{res}_{f_i,1}), t) \\ \text{pe}_s \leftarrow \text{pe}_s + \_Ue \cdot \text{res}_{f_i,3} \text{ if } \text{IsNaN}(\_Ue) = 0 \end{array} \right. \\ \text{pp}_s - \text{pe}_s \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right.$$

## Додаток В. Однолінійна схема одноагрегатної тягової підстанції



- 1 – живляча ЛЕП; 2 – роз'єднувач; 3 – перетворювальний трансформатор;  
 4 – перетворювальний блок; 5 – фільтрувальний пристрій; 6 – реактор;  
 7 – пост секціонування; 8 – швидкодіючий вимикач

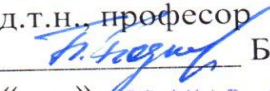
Рисунок Г.1 – Однолінійна схема  
 одноагрегатного тягового блока з ПА-5200

## **Додаток Г**

**Акти використання результатів дисертації**

## ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор Дніпровського  
національного університету залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
д.т.н., професор

 Б.Є. Боднар  
« 4 » ~~БОДНАР Б Є~~ 2019 р.

21 SEP 2019

## АКТ

використання результатів дисертаційної роботи  
Губського Петра Вячеславовича  
на тему «Підвищення енергетичної ефективності системи тягового  
електропостачання при швидкісному русі»

м. Дніпро

\_\_\_\_\_ 2019 р.

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті, прийняті до використання наукові та практичні результати, викладені в дисертації Губського П.В.:

1. Наукові принципи побудови енергоефективних систем розподіленого живлення, на основі яких забезпечуються організація швидкісного руху (дисципліна «Енергозбереження» для студентів п'ятого курсу спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»).

2. Вдосконалений метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання на базі функцій опору (дисципліна «Електропостачання залізниць» для студентів четвертого та п'ятого курсів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»).

Декан факультету  
«Управління енергетичними процесами»,  
д.т.н., проф.



А.М. Афанасов

Зав. каф. «Інтелектуальні системи  
електропостачання»  
д.т.н., проф.



В.Г. Сиченко



Затверджую

Заступник генерального директора  
ТОВ «ДАК-Енергетика»



І. В. Доманський  
2019 р.

### АКТ

використання результатів дисертаційної роботи  
Губського Петра В'ячеславовича  
на тему **«Підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання постійного струму при швидкісному русі»**

Комісія у складі начальника планово-виробничого відділу Апушкіна С. І., начальника відділу технічного контролю Резника Д. В., начальника сервісного відділу Гайдука В. О. підтверджує, що наступні результати кандидатської дисертації Губського Петра В'ячеславовича на тему **«Підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання постійного струму при швидкісному русі»** використано при розробці обладнання постів секціонування та одно агрегатних тягових підстанцій та систем їх управління:

1. Розроблені наукові підходи побудови енергоефективних розподілених систем тягового електропостачання постійного струму, в яких розташування дво-агрегатних тягових підстанцій запропоновано здійснити на місці існуючих, одно агрегатних підстанцій - на постах секціонування, дозволили зменшити втрати енергії в тяговій мережі і в обладнанні підстанцій, покращити використання встановленого обладнання, підвищити коефіцієнт потужності та покращити умови захисту системи електропостачання.
2. Для ефективного забезпечення коректною інформацією системи управління тяговим електропостачанням необхідним є створення розподіленої системи вимірювання напруги. Запропонований в роботі принцип розміщення датчиків напруги на основі метода сенсорних вузлів та методу Френеля дозволяє раціонально розмістити датчики, запобігти появі "мертвих" зон.

\_\_\_\_\_ С.І. Апушкін  
\_\_\_\_\_ Д.В. Резник  
\_\_\_\_\_ В.О. Гайдук

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Генеральний директор  
ТДВ «Інститут Дніпродіпротранс»



П.О. Пшінько

2019 р.

**АКТ**

використання результатів дисертаційної роботи  
Губського Петра Вячеславовича  
на тему «**Підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання постійного струму при швидкісному русі**»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Губського П.В. будуть використані в проектно-вишукувальному інституті ТДВ «Інститут Дніпродіпротранс» з метою вибору енергоефективних рішень під час корегування проекту на електрифікацію залізничної лінії Запоріжжя – Комиш-Зоря РФ «Придніпровська залізниця» ПАТ «Укрзалізниця» при виборі систем тягового електропостачання постійного струму на дільниці.

Найбільш істотними результатами, що мають найбільше теоретичне та практичне значення, вважаємо наступні:

1. Наукові підходи та принципи створення системи розподіленого живлення постійного струму, яка дозволяє забезпечити необхідний рівень питомої потужності в тяговій мережі в межах 2 – 2,15 МВт/км, зменшити навантаження на проводи контактної мережі, зменшити неактивну потужність та втрати потужності в тяговій мережі.

2. Принципи вибору параметрів системи контролю напруги в тяговій мережі на базі сенсорного методу та методу Френеля, які дозволяють обрати відстані між датчиками напруги, радіус антен для забезпечення резервування передачі інформації і надійної роботи систем розподіленого живлення.

Очікується, що в разі впровадження на залізницях постійного струму України результатів дисертації можна зменшити витрати електроенергії на 4-5% від спожитої електроенергії на тягу поїздів.

Головний інженер  
ТДВ «Інститут Дніпродіпротранс», к.т.н.

В. В. Марочка

Начальник відділу  
Електрифікації

С. М. Сквирський



ЗАТВЕРДЖУЮ:



Начальник служби електропостачання  
РФ «Львівська залізниця»  
СЛУЖБА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

М. М. Пулін

2019 р.

**АКТ**

використання результатів дисертаційної роботи  
Губського Петра Вячеславовича  
на тему «Підвищення енергетичної ефективності системи тягового  
електропостачання постійного струму при швидкісному русі»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Губського П.В. будуть впроваджуватися службою електропостачання РФ «Львівська залізниця» з метою розробки заходів з підвищення енергетичної і економічної ефективності системи електропостачання тяги поїздів постійного струму.

Найбільшою уваги з отриманих результатів заслуговують:

1. Нові принципи регулювання напруги в розподіленій системі живлення на базі нелінійного регулятора, що дозволяють забезпечити стійкість систем тягового електропостачання в усіх режимах при організації швидкісного руху.

2. Принципи побудови систем тягового електропостачання з активним випрямлячем напруги, який дозволяє компенсувати просадку вхідної напруги в межах  $\pm 20\%$  та забезпечити стійкість до різного роду збурень, виникаючих при взаємодії системи тягового електропостачання та електрорухомого складу.

Результати дисертаційної роботи Губського Петра Вячеславовича можуть бути застосовані також на інших залізницях постійного струму зі звичайним, прискореним та швидкісним рухом.

Начальник Дорожньої  
Електротехнічної лабораторії

А. І. Барна