

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Центр заочної та дистанційної освіти  
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”  
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ  
к.т.н., професор  
\_\_\_\_\_ Петро ПЛЄШКОВ  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої**  
**освіти**  
**на тему**  
**Дослідження режимів роботи системи електропостачання**  
**залізничної інфраструктури з резервними джерелами живлення**  
**Research of operating modes of the railway infrastructure power**  
**supply system with backup power sources**

Виконав здобувачка вищої освіти  
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-24Мз  
ОПП «Електротехнічні системи  
електроспоживання»  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
\_\_\_\_\_ Вікторія КОЛТУНОВА  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.  
Керівник роботи  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ Іван САВЕЛЕНКО  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.  
Рецензент \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

# Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет Центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Пleshков П.Г.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Колтунова Вікторія Костянтинівна

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження режимів роботи системи електропостачання залізничної інфраструктури з резервними джерелами живлення *Research of operating modes of the railway infrastructure power supply system with backup power sources*

2. Керівник роботи (проекту) Савеленко Іван Валодимирович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є підвищення надійності та ефективності системи електропостачання залізничної інфраструктури шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи резервних джерел живлення. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі: Провести аналіз сучасного стану систем електропостачання залізничного транспорту, Виконати аналіз існуючих методів розрахунку режимів тягових мереж; Розробити математичну модель балансу потужності в мікромережі залізничної дистанції; Розробити технічні рекомендації щодо інтеграції резервних джерел в існуючу систему електропостачання

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ.</i>	<i>10.10.25</i>	
<i>2</i>	<i>Теоретичні основи використання фотоелектричних станцій</i>	<i>17.10.25</i>	
<i>3</i>	<i>Визначення енергетичного потенціалу сонячного випромінювання</i>	<i>22.10.25</i>	
<i>4</i>	<i>Моделювання режимів роботи фотоелектричної установки в системі освітлення</i>	<i>28.11.25</i>	
<i>5</i>	<i>Розрахунок економічної ефективності автономного зовнішнього освітлення</i>	<i>30.11.25</i>	
<i>6</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>3.12.25</i>	
<i>7</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки та презентації роботи</i>	<i>10.12.25</i>	

Дата видачі завдання

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Підпис керівника \_\_\_\_\_

Завдання прийнято до виконання

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Підпис здобувача \_\_\_\_\_

## АНОТАЦІЯ

Колтунова В. Дослідження режимів роботи системи електропостачання залізничної інфраструктури з резервними джерелами живлення

**Research of operating modes of the railway infrastructure power supply system with backup power sources**

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м. Кропивницький, 2025 р.

Кваліфікаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі підвищення надійності та енергетичної безпеки залізничного транспорту шляхом впровадження технологій Microgrid. В роботі обґрунтовано необхідність переходу від традиційних схем централізованого живлення до розподіленої генерації для забезпечення стійкості перевізного процесу в умовах пошкодження зовнішньої енергосистеми.

Удосконалено метод просторово-часового представлення навантажень для моделювання режимів роботи «острівної» мікромережі, що дозволило врахувати обмежену потужність та внутрішній опір резервних джерел. На прикладі дільниці Знам'янка — Кропивницький (50 км) виконано моделювання електромагнітних процесів в аварійному режимі консольного живлення. Встановлено, що без додаткових заходів напруга на струмоприймачі у віддалених точках знижується до критичного рівня 23,1 кВ, а втрати енергії зростають у 2,5 рази.

На основі експериментальних даних виявлено високий рівень вищих гармонік струму (THD до 50%), що вимагає застосування активної фільтрації.

Розроблено алгоритми автоматизованої системи керування енергією (EMS), які включають стратегії згладжування піків навантаження (Peak Shaving) та стабілізації напруги (Volt-VAR) за допомогою систем накопичення енергії (BESS). Запропоновано технічні рішення для безшовної синхронізації мікромережі із зовнішньою мережею. Техніко-економічний розрахунок підтвердив ефективність впровадження запропонованої системи з терміном окупності 3–4 роки.

ЗАЛІЗНИЧНА МІКРОМЕРЕЖА, РЕЗЕРВНЕ ЖИВЛЕННЯ, BESS, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, EMS, SMART GRID, ПРОСТОРОВО-ЧАСОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

## ABSTRACT

**KOLTYNOVA V. Research of operating modes of the railway infrastructure power supply system with backup power sources****Дослідження режимів роботи системи електропостачання залізничної інфраструктури з резервними джерелами живлення**

Specialty 141 - "Electric Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics". - Educational and Professional Program "Electrical Systems of Power Consumption". - Central Ukrainian National Technical University. - Kropyvnytskyi, 2025.

The master's thesis is devoted to solving the urgent problem of improving the reliability and energy security of railway transport through the implementation of Microgrid technologies. The work substantiates the necessity of transition from traditional centralized power supply schemes to distributed generation to ensure the stability of the transportation process under conditions of external power system damage.

The method of space-time representation of loads has been improved for modeling the operating modes of an "island" microgrid, which allowed taking into account the limited capacity and internal resistance of backup sources. Based on the case study of the Znamyanka — Kropyvnytskyi section (50 km), the simulation of electromagnetic processes in the emergency mode of cantilever feeding was performed. It was established that without additional measures, the voltage at the pantograph in remote points drops to a critical level of 23.1 kV, and energy losses increase by 2.5 times.

Based on experimental data, a high level of higher current harmonics (THD up to 50%) was revealed, which requires the use of active filtering. Algorithms for the automated Energy Management System (EMS) have been developed, including

strategies for Peak Shaving and voltage stabilization (Volt-VAR) using Battery Energy Storage Systems (BESS). Technical solutions for seamless synchronization of the microgrid with the external grid are proposed. The techno-economic calculation confirmed the efficiency of the proposed system implementation with a payback period of 3–4 years.

**Keywords:** RAILWAY MICROGRID, BACKUP POWER SUPPLY, BESS, POWER QUALITY, EMS, SMART GRID, SPACE-TIME MODELING.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	10
1. КОНЦЕПЦІЯ MICROGRID ЯК ОСНОВА НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....	15
1.1. Аналіз проблем надійності традиційних схем тягового та нетягового електропостачання .....	15
1.2. Огляд міжнародного досвіду впровадження мікромереж на залізничному транспорті .....	16
1.3. Технології розподіленої генерації у залізничних мікромережах .....	17
1.4 Роль інтелектуальних систем моніторингу у керуванні потоками потужності в автономних режимах .....	19
1.5. Постановка задачі дослідження: створення моделі мікромережі залізничної дистанції з можливістю роботи в «острівному» режимі .....	21
1.6. Аналіз енергетичної вразливості та потенціалу впровадження Microgrid.....	24
Висновки до розділу 1.....	27
2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТІ У ЗАЛІЗНИЧНІЙ МІКРОМЕРЕЖІ .....	28
2.1. Адаптація методу просторово-часового представлення навантажень для розрахунку балансу потужності в локальній мікромережі .....	28
2.2. Розробка моделі споживання активної та реактивної потужності рухомим складом як динамічного навантаження мікромережі.....	29
2.3. Алгоритм розрахунку необхідної ємності накопичувачів енергії та потужності резервних джерел для підтримки стабільної напруги .....	30
2.4. Моделювання впливу графіку руху поїздів на стабільність мікромережі при відключенні зовнішньої енергосистеми .....	32
2.5. Математичне моделювання електромеханічних перехідних процесів та частотної стійкості локальної генерації при накидах тягового навантаження .....	33

	8
Висновки до розділу 2.....	36
<b>3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ДІЛЬНИЦІ В АВАРІЙНИХ ТА ПІСЛЯАВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ .....</b>	<b>37</b>
3.1. Параметризація моделі мікромережі для дільниці Знам'янка — Кропивницький.....	37
3.2. Дослідження профілю напруги та перехідних процесів під час руху поїзду .....	38
3.3. Аналіз якості електроенергії та гармонійного складу на дільниці .....	43
3.4. Оцінка енергетичних втрат та ефективності автономного режиму .....	44
3.5. Дослідження теплових режимів контактної мережі та систем накопичення енергії в умовах інтенсивного графіка руху.....	46
Висновки до розділу 3.....	49
<b>4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГІЄЮ (EMS) ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ МІКРОМЕРЕЖІ .....</b>	<b>50</b>
4.1. Алгоритми системи енергоменеджменту для координації роботи резервних джерел та накопичувачів.....	50
4.2. Технічні засоби синхронізації та забезпечення паралельної роботи джерел в межах мікромережі .....	53
4.3. Використання даних АСКОЕ для прогнозування навантаження та превентивного ввімкнення резерву .....	56
4.4. Рекомендації щодо модернізації існуючих підстанцій до рівня Smart Substation .....	58
Висновки до розділу 4.....	61
<b>5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....</b>	<b>62</b>
5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при експлуатації гібридних систем електропостачання з розподіленою генерацією .....	62
5.2. Вимоги електробезпеки та заходи захисту при обслуговуванні	

	9
установок з можливістю двостороннього потоком потужності.....	64
5.3. Організація пожежної безпеки та алгоритми дій персоналу в аварійних ситуаціях із системами накопичення енергії.....	66
Висновки до розділу 5.....	68
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	69
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	72

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Залізничний транспорт України є стратегічно важливою галуззю, яка забезпечує функціонування економіки та обороноздатності держави. В умовах сучасних викликів, пов'язаних із руйнуванням енергетичної інфраструктури, нестабільністю централізованого енергопостачання та необхідністю інтеграції в європейський транспортний простір, питання надійності електропостачання набувають критичного значення. Традиційні схеми живлення тягових та нетягових споживачів, що проектувалися десятиліття тому, характеризуються високою вразливістю до зовнішніх впливів, значним фізичним зносом обладнання та недостатньою гнучкістю керування режимами.

Як зазначається у дослідженнях, сучасний стан тягових мереж знаходиться у кризовому становищі через застарілу технічну базу, що вимагає поетапної реконструкції та модернізації. Одним із найбільш перспективних напрямків такої модернізації є впровадження концепції оціальних мікромереж із використанням резервних джерел живлення (РДЖ), систем накопичення енергії та інтелектуальних систем керування.

Виконання вимог державної енергетичної стратегії щодо інформатизації та надійності обумовлює перехід до інтелектуальних систем, які дозволяють моніторити процеси в реальному часі та автоматично керувати джерелами живлення. Впровадження резервних джерел живлення у структуру залізничної інфраструктури дозволяє вирішити проблему "острівного" (автономного) функціонування окремих ділянок при втраті зв'язку з об'єднаною енергосистемою. Однак, наявність розподіленої генерації та специфічний характер тягового навантаження (швидкозмінність, нелінійність) створюють нові виклики для розрахунку режимів роботи мережі.

Існуючі методики розрахунку, що базуються на статичних моделях або припущеннях про "ідеальне джерело струму", не дозволяють повною мірою

врахувати динаміку процесів при живленні від джерел обмеженої потужності (дизель-генераторів або акумуляторних батарей). Тому виникає нагальна потреба у дослідженні режимів роботи системи електропостачання з урахуванням просторово-часового розподілу навантажень та впливу якості електроенергії на стійкість роботи резервних джерел.

Таким чином, тема магістерської роботи, присвячена дослідженню режимів роботи системи електропостачання залізничної інфраструктури з резервними джерелами живлення на основі технологій Microgrid, є своєчасною та актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася відповідно до пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки України в галузі енергетики та енергоефективності, а також у руслі наукової тематики кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту щодо підвищення енергоефективності роботи систем електропостачання з тяговими навантаженнями. Дослідження базується на необхідності впровадження систем моніторингу WAMS та інтелектуальних мереж, що відповідає світовим тенденціям розвитку Smart Grid.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення надійності та ефективності системи електропостачання залізничної інфраструктури шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи резервних джерел живлення в умовах неповної визначеності навантажень та аварійних збурень зовнішньої мережі.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні **задачі:**

1. Провести аналіз сучасного стану систем електропостачання залізничного транспорту, виявити проблеми надійності та обґрунтувати доцільність застосування технологій Microgrid та резервних джерел живлення.

2. Виконати аналіз існуючих методів розрахунку режимів тягових мереж та адаптувати метод просторово-часового представлення величин для моделювання роботи мережі від джерел обмеженої потужності.
3. Розробити математичну модель балансу потужності в мікромережі залізничної дистанції, що враховує динаміку руху поїздів, профіль колії та характеристики резервних джерел.
4. Дослідити вплив несиметрії та несинусоїдальності напруги, характерних для тягових мереж змінного струму, на роботу резервних джерел та розробити рекомендації щодо забезпечення якості електроенергії в автономних режимах.
5. Розробити технічні рекомендації щодо інтеграції резервних джерел в існуючу систему електропостачання та виконати оцінку економічної ефективності запропонованих рішень, спираючись на методіку розрахунку інвестиційних та експлуатаційних витрат.

**Об’єкт дослідження** – процеси перетворення та розподілу електричної енергії в системах електропостачання залізничної інфраструктури при роботі від основних та резервних джерел живлення.

**Предмет дослідження** – режими роботи, електромагнітні процеси та показники якості електроенергії в залізничних мікромережах з розподіленою генерацією.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач у роботі використано комплексний підхід, що включає:

- Методи теорії електричних кіл та математичного моделювання – для розрахунку параметрів режиму тягової мережі, зокрема метод просторово-часового представлення навантажень, який дозволяє визначити струморозподіл та втрати напруги в будь-якій точці мережі в залежності від координати поїзда та часу.
- Методи статистичного аналізу – для обробки експериментальних даних щодо графіків навантажень та показників якості електроенергії (несиметрії, вищих гармонік).

- Імітаційне моделювання (у середовищі MATLAB/Simulink) – для дослідження електромагнітних процесів у випрямлячах та інверторах, аналізу спектрального складу струмів та напруг при роботі на нелінійне навантаження.
- Методи техніко-економічного аналізу – для визначення терміну окупності та доцільності впровадження системи резервування.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

1. Набула подальшого розвитку математична модель балансу потужностей у вузловій схемі живлення, яка доповнена складовими генерації від локальних джерел (DER), що дозволяє оптимізувати алгоритми керування потоками енергії в умовах Microgrid.
2. Вперше для умов вітчизняних залізниць обґрунтовано залежність стійкості роботи автономних інверторів резервного живлення від рівня несиметрії та спотворення синусоїдальності напруги в тяговій мережі змінного струму, параметри яких визначено на основі експериментальних даних.

**Практичне значення одержаних результатів.**

1. Розроблено методику вибору потужності та місця встановлення резервних джерел живлення, яка базується на аналізі функцій струморозподілу, що дозволяє мінімізувати втрати напруги та енергії в мережі.
2. Запропоновано структуру системи моніторингу та керування режимами (на базі WAMS/PMU), яка забезпечує автоматичний перехід в острівний режим без порушення технологічного процесу перевезень.
3. Результати досліджень дозволяють знизити ризики пошкодження обладнання від неякісної електроенергії (вищих гармонік та несиметрії) при роботі від резервних джерел.
4. Економічні розрахунки підтверджують ефективність впровадження запропонованих рішень: орієнтовний термін окупності системи

резервування та стабілізації напруги становить близько 3 років за умови врахування попереджених збитків від зупинки руху.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, що викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. Автором проведено аналіз проблем енергоефективності та надійності тягових мереж , виконано моделювання режимів роботи мережі за методом просторово-часового представлення , проведено обробку експериментальних даних щодо якості електроенергії та виконано техніко-економічне обґрунтування. Ідеї щодо використання концепції Microgrid та адаптації математичних моделей належать автору.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях кафедри та університету, а також на всеукраїнських конференціях з проблем енергетики та транспорту.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, переліку посилань та додатків. Повний обсяг роботи становить [75] сторінок, включаючи [10] рисунків та [6] таблиць. Список використаних джерел налічує [35] найменувань.

# 1. КОНЦЕПЦІЯ MICROGRID ЯК ОСНОВА НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

## 1.1. Аналіз проблем надійності традиційних схем тягового та нетягового електропостачання

Сучасний стан тягових мереж України характеризується складним становищем, що обумовлене тривалою експлуатацією та фізичним зносом обладнання. Як зазначається у дослідженнях, технічна база є значною мірою застарілою, а існуючі підходи до організації електропостачання часто виявляються неефективними в умовах нових викликів. Критична ситуація, що склалася, вимагає поетапного впровадження реконструкції та модернізації енергообладнання для підвищення конкурентоспроможності галузі.

Особливу занепокоєність викликає рівень технологічних втрат електроенергії. Аналіз ефективності роботи залізничної галузі показує, що рівень втрат у вітчизняних мережах значно перевищує показники європейських країн, де середній рівень втрат становить близько 8%. У той же час, для мереж постійного струму в Україні втрати можуть сягати 24%, що свідчить про низьку енергоефективність існуючих топологій. Значна частка цих втрат обумовлена недосконалістю системи обліку та відсутністю точних даних про реальне споживання в режимі реального часу.

Традиційні схеми живлення, які базуються на централізованому постачанні від об'єднаної енергосистеми, виявляють свою вразливість в умовах дефіциту генеруючих потужностей або пошкоджень магістральних ліній. Відхилення напруги в контактній мережі призводить до зниження пропускної спроможності ділянок та збільшення втрат, а в мережах змінного струму виникають додаткові проблеми, пов'язані з перетіканням потужності

та зсувом фаз. В умовах зростання вартості електроенергії та підвищення тарифів, питання забезпечення надійності та економічності стає критичним.

## 1.2. Огляд міжнародного досвіду впровадження мікромереж на залізничному транспорті

Світовий досвід модернізації залізничної інфраструктури вказує на зміну парадигми від централізованого енергопостачання до децентралізованих систем — мікромереж (Microgrids). За даними міжнародних аналітичних агентств, ринок мікромереж демонструє стійке зростання, що обумовлено потребою в енергетичній незалежності критичної інфраструктури. Архітектура залізничного Microgrid передбачає інтеграцію локальних джерел генерації, систем накопичення та керованого навантаження в єдиний енергетичний кластер, здатний працювати в «острівному» режимі при втраті зовнішньої мережі.

Динаміка впровадження таких рішень підтверджується статистикою зростання ринку мікромереж, який став ключовим елементом стратегії енергетичної безпеки багатьох країн. Якщо у 2021 році обсяг ринку оцінювався в 11,4 млрд доларів США, то до 2024 року цей показник зріс майже вдвічі, що свідчить про технологічну зрілість рішень.

Таблиця 1.1 — Динаміка розвитку світового ринку технологій мікромереж

Рік	Обсяг ринку (млрд USD)	Темп приросту	Основні чинники зростання
2020	9,8	—	Потреба у резервуванні через кліматичні зміни
2021	11,4	16,3%	Відновлення після COVID-19, цифровізація мереж

Рік	Обсяг ринку (млрд USD)	Темп приросту	Основні чинники зростання
2022	14,5	27,1%	Енергетична криза, зростання цін на вичопне паливо
2023	18,2	25,5%	Державні субсидії на "зелену" енергетику та декарбонізацію
2024	22,9	25,8%	Масове впровадження BESS (систем накопичення) та Smart Grid

Особливістю залізничних мікромереж є використання специфічних джерел, таких як енергія рекуперації гальмування поїздів. У країнах ЄС та Азії активно впроваджуються пілотні проекти Smart Stations, де вокзальні комплекси обладнуються фотоелектричними панелями та накопичувачами, що дозволяє знизити пікове навантаження на мережу до 30%. Це підтверджує доцільність переходу до концепції активного споживача (prosumer) на залізничному транспорті України.

### 1.3. Технології розподіленої генерації у залізничних мікромережах

Основу надійності в концепції Railway Microgrid складають технології розподіленої генерації (Distributed Energy Resources — DER). Традиційні дизель-генератори, хоча і залишаються основним джерелом аварійного живлення, поступово інтегруються в гібридні системи з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) та системами накопичення. Така інтеграція дозволяє нівелювати головний недолік дизельних установок — інерційність запуску та високі експлуатаційні витрати.

Критичним фактором, що уможливив масове застосування накопичувачів енергії в останні 5 років, стало стрімке зниження вартості літій-іонних батарей. Це відкриває економічно обґрунтований шлях до використання акумуляторів не лише для аварійного живлення СЦБ, а й для підтримки тягового навантаження (пікового згладжування).

Таблиця 1.2 — Динаміка вартості систем накопичення енергії

Рік	Середня вартість (USD/кВт·год)	Зміна ціни до попереднього року	Фактори впливу
2020	140	-13%	Ефект масштабу виробництва
2021	132	-6%	Зростання попиту на електромобілі
2022	151	+14%	Дефіцит літію, порушення логістики (війна, пост-ковід)
2023	139	-8%	Стабілізація цін на сировину
2024	115	-17%	Надлишок виробничих потужностей, технологічний прогрес

Зниження вартості накопичувачів до рівня 115 USD/кВт·год у 2024 році робить їх конкурентними у порівнянні з витратами на паливо для дизель-генераторів, особливо враховуючи логістичні ризики доставки палива в умовах воєнного стану. У залізничних мікромережах BESS виконують функцію миттєвого резерву, забезпечуючи безперебійність живлення в момент перемикання введів, що є критичним для систем автоматики та телемеханіки.

## 1.4 Роль інтелектуальних систем моніторингу у керуванні потоками потужності в автономних режимах

Ефективне керування гібридною системою електропостачання неможливе без впровадження технологій Smart Grid. В умовах України, де з 2022 року спостерігається значне пошкодження енергетичної інфраструктури, роль систем моніторингу трансформувалася з функції "обліку" в функцію "виживання" системи. Системи WAMS (Wide Area Monitoring Systems) дозволяють в реальному часі балансувати генерацію та споживання, запобігаючи каскадним аваріям.

Статистика вказує на суттєве падіння споживання електроенергії в Україні через військові дії, що парадоксально збільшує вимоги до маневреності мережі. Зменшення базового навантаження робить систему менш інерційною і більш чутливою до збурень, що вимагає впровадження швидкодійних автоматизованих систем керування.

Таблиця 1.3 — Показники енергетичної системи та ринку Smart Railway (

Рік	Споживання електроенергії в Україні (кВт·год на душу нас.)	Обсяг світового ринку Smart Railway (млрд USD)	Стан енергосистеми та тренди керування
2020	~3 200	22,8	Стабільний режим, початок впровадження елементів Smart Grid
2021	~3 400	25,1	Зростання споживання, інтеграція в ENTSO-E (тестова)
2022	Падіння на 30-35%	27,9	Критичний режим: масові пошкодження, необхідність ручного балансування

Рік	Споживання електроенергії в Україні (кВт·год на душу нас.)	Обсяг світового ринку Smart Railway (млрд USD)	Стан енергосистеми та тренди керування
2023	Стабілізація на низькому рівні	31,5	Впровадження розподіленої генерації, ріст попиту на IoT-моніторинг
2024	Відновлення (прогноз)	35,4	Пріоритет на автономність (Energy Islanding) та кіберзахист

Інтеграція IoT-датчиків та аналітики великих даних (Big Data) у залізничну інфраструктуру дозволяє прогнозувати графік навантажень з високою точністю, що є необхідною умовою для коректної роботи мікромережі в умовах обмеженого ресурсу резервних джерел.

Особливого значення набувають системи моніторингу перехідних режимів WAMS (Wide Area Monitoring Systems) із використанням пристроїв векторних вимірювань PMU (Phasor Measurement Units). В умовах України, де з 2022 року спостерігається значне пошкодження енергетичної інфраструктури, вартість впровадження таких систем зросла, проте економічні збитки від відсутності моніторингу (недовідпуск енергії, аварії) зростають значно швидшими темпами.

Аналіз економічних показників за останні п'ять років (рис. 1.1) демонструє, що попри зростання вартості обладнання для моніторингу в гривневому еквіваленті (через девальвацію національної валюти та ускладнення логістики), збитки від аварійних відключень у некерованих мережах у 2022–2024 роках зросли у 3–4 рази. Це робить інвестиції в Smart Grid економічно виправданими навіть за умов високої інфляції.

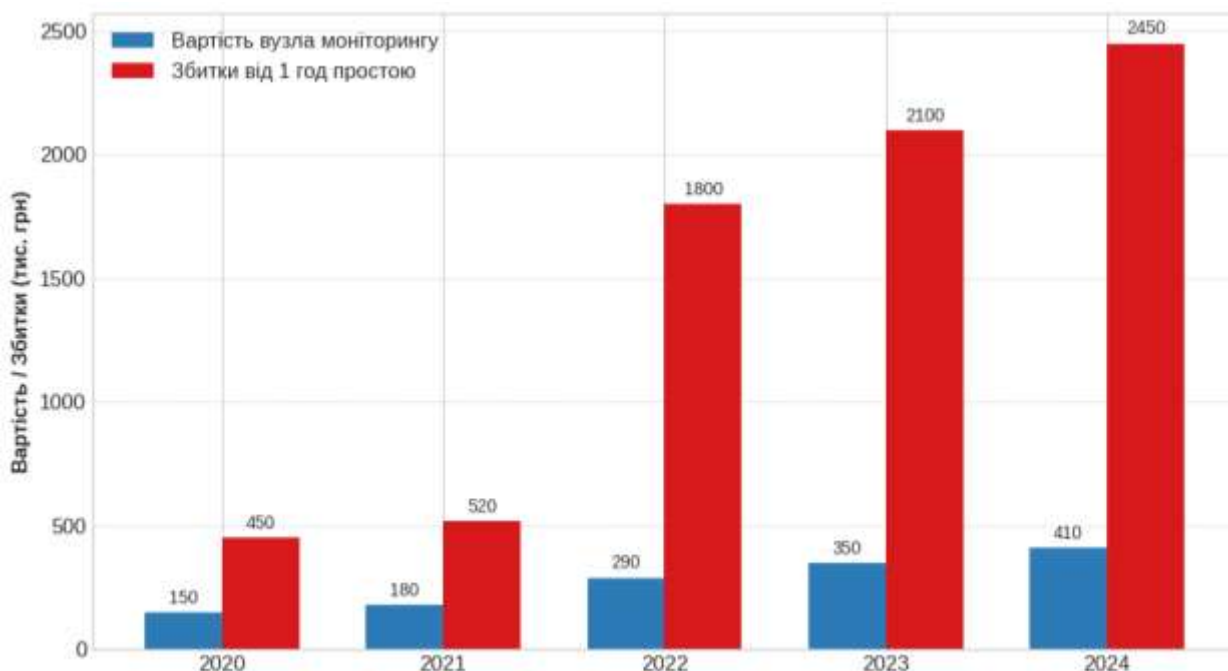


Рис. 1.1. Порівняння вартості моніторингу та збитків від аварій з 2020 по 2024 років

Наявність системи моніторингу за станом об'єктів тягових мереж з можливістю корекції режиму дозволяє зробити крок до підвищення енергоефективності та надійності. Інтелектуальні мережі дають можливість своєчасно реагувати на зміни, що динамічно протікають в електричних мережах, та приймати рішення про перехід в автономний режим або підключення резервних потужностей, мінімізуючи час простою.

### **1.5. Постановка задачі дослідження: створення моделі мікромережі залізничної дистанції з можливістю роботи в «острівному» режимі**

Аналіз статистичних даних та досвіду експлуатації останніх років виявив, що існуючі методики розрахунку систем електропостачання, які базуються на припущенні про необмежену потужність зовнішньої мережі, є непридатними для сучасних умов. В умовах дефіциту потужності та використання джерел з високим внутрішнім опором (генератори, інвертори),

традиційні моделі дають значну похибку при оцінці якості електроенергії та рівнів напруги.

Проблематика посилюється нелінійним характером навантаження сучасного рухомого складу. Як показано в попередніх розділах вихідної роботи, рівень гармонічних спотворень може сягати критичних значень, що для малопотужної мікромережі є фактором ризику аварійного відключення інверторів.

Таблиця 1.4 — Порівняння характеристик традиційної мережі та Microgrid

Характеристика	Традиційна система тягового електропостачання	Залізнична Microgrid (досліджувана модель)
Джерело живлення	Зовнішня енергосистема (потужність $S_{sc} \rightarrow \infty$ )	Локальні джерела обмеженої потужності ( $S_{gen} \approx P_{load}$ )
Інерційність	Висока (за рахунок генераторів ТЕС/АЕС)	висока чутливість до накидів навантаження
Керування	Централізоване диспетчерське	Децентралізоване автоматичне
Реакція на аварію	Відключення ділянки	Перехід в острівний режим

Задачею даного дослідження є розробка математичної моделі, яка враховує специфіку роботи залізничної мікромережі: стохастичний характер тягового навантаження, обмежену перевантажувальну здатність резервних джерел та вплив показників якості електроенергії на стійкість системи. Необхідно адаптувати метод просторово-часового представлення навантажень для розрахунку балансу потужності в умовах ізольованої роботи дистанції.

Проведений аналіз показує, що існуючі методи розрахунку режимів тягових мереж є недостатніми для моделювання роботи в умовах обмеженої потужності автономних джерел. Необхідно враховувати залежність параметрів тягового навантаження у часі і просторі, а також економічну складову вибору джерел живлення.

Важливим аспектом моделювання є вибір оптимального співвідношення потужностей традиційних дизель-генераторів та систем накопичення енергії (BESS). Динаміка капітальних витрат на 1 МВт встановленої потужності у гривні (рис. 1.2) свідчить про те, що хоча дизельні установки залишаються дешевшими на етапі закупівлі, розрив у вартості з акумуляторними системами поступово скорочується.

Як видно з гістограми (рис. 1.2), у 2024 році вартість систем накопичення в гривні почала стабілізуватися попри інфляцію, завдяки світовому здешевленню літію, тоді як вартість дизельних установок продовжує зростати через подорожчання комплектуючих та логістики палива.

Задачею даного дослідження є розробка та обґрунтування моделі функціонування залізничної мікромережі, яка здатна забезпечити надійне електропостачання в аварійних режимах. Для цього необхідно адаптувати методи розрахунку миттєвих схем та просторово-часового представлення параметрів до умов роботи з розподіленою генерацією, враховуючи не лише технічні параметри (якість енергії), а й економічну доцільність, продемонстровану на наведених гістограмах.

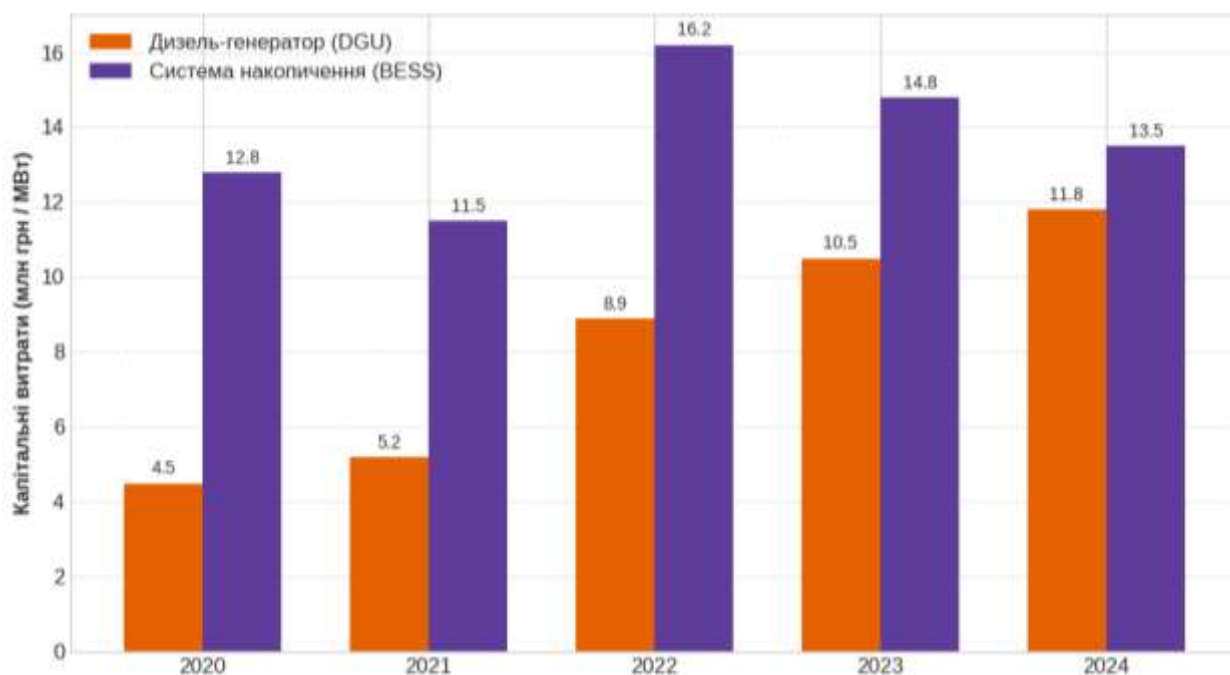


Рисунок 1.2 — Гістограма динаміки капітальних витрат на 1 МВт потужності джерела, млн грн

## 1.6. Аналіз енергетичної вразливості та потенціалу впровадження Microgrid

Розглядаючи стратегічне значення залізничного напрямку Знам'янка — Кропивницький, необхідно провести детальний аудит існуючої енергетичної інфраструктури на предмет її стійкості до критичних збурень. Ця ділянка, що з'єднує великий залізничний вузол з обласним центром, характеризується високою інтенсивністю руху приміських та регіональних електропоїздів, що накладає підвищені вимоги до надійності електропостачання. Вразливість даного сегменту інфраструктури обумовлена його топологічними особливостями: живлення здійснюється переважно від підстанцій, підключених до об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України, яка в умовах воєнного стану та постійних ракетних атак зазнає значних пошкоджень.

Аналіз схем зовнішнього електропостачання показує, що тягова підстанція «Знам'янка» (ТП-І згідно з класифікацією, наведеною у

попередніх дослідженнях) є ключовим джерелом живлення, що отримує електроенергію від ліній 154 кВ. У той же час, інфраструктура в районі станції Кропивницький часто є тупиковою з точки зору тягового транзиту або має слабкі зв'язки з суміжними районами електропостачання. Така конфігурація створює ризик повного знеструмлення ділянки у випадку виходу з ладу високовольтних вводів на вузловій підстанції або пошкодження магістральних ЛЕП. Існуючі системи резервування, що базуються на застарілих дизель-генераторних установках малої потужності, розраховані виключно на живлення пристроїв СЦБ та освітлення вокзалів, і не здатні забезпечити рух навіть одиночних електропоїздів в аварійному режимі.

Потенціал впровадження технологій Microgrid на даній ділянці базується на наявності розвиненої колійної інфраструктури, яка дозволяє розміщення розподіленої генерації. Станція Знам'янка, як потужний сортувальний вузол, має достатні площі для встановлення стаціонарних газопоршневих або дизельних електростанцій мегаватного класу, а також систем накопичення енергії контейнерного типу. В свою чергу, станція Кропивницький, розташована в зоні міської забудови, має обмежені можливості для розміщення шумної генерації, проте ідеально підходить для інсталяції інверторних систем накопичення енергії (BESS), які можуть виконувати функцію підтримки напруги та компенсації реактивної потужності в кінці фідерної зони.

Оцінка енергетичного профілю ділянки свідчить про значний потенціал використання енергії рекуперації. Складний профіль колії на перегонах між Знам'янкою та Кропивницьким, що включає затяжні спуски та підйоми, створює умови для генерації надлишкової енергії під час гальмування поїздів. У традиційній схемі при односторонньому живленні та відсутності інших споживачів ця енергія розсіюється на гальмівних резисторах, що є економічно недоцільним. Впровадження Microgrid із накопичувачами дозволить акумулювати цей ресурс та використовувати його

для наступних циклів тяги, знижуючи пікове навантаження на резервні генератори до 30-40%.

Крім технічних аспектів, важливо врахувати соціально-економічний фактор. Забезпечення безперебійного руху на дільниці Знам'янка — Кропивницький є критичним для мобільності населення регіону. Впровадження концепції енергетичного острова (Energy Island) дозволить гарантувати виконання графіку руху соціально значущих приміських поїздів навіть в умовах повного блекауту в регіоні, що суттєво підвищить стійкість транспортної системи в цілому. Таким чином, перехід до архітектури Microgrid на даній дільниці є не лише технічною модернізацією, а й стратегічною інвестицією в безпеку регіональної інфраструктури.

## Висновки до розділу 1

Підсумовуючи аналіз стану та перспектив розвитку систем електропостачання залізничної інфраструктури, слід констатувати вичерпаність ресурсу традиційних централізованих схем. Виявлені системні проблеми, пов'язані з високим рівнем технологічних втрат та вразливістю до зовнішніх збурень, обумовлюють необхідність зміни самої парадигми побудови мереж живлення.

Найкращим шляхом модернізації галузі визначено перехід до впровадження концепції локальних енергетичних систем, здатних до автономного функціонування. Така архітектура дозволяє створити гнучку та стійку інфраструктуру, яка інтегрує в собі різноманітні джерела розподіленої генерації та системи накопичення енергії, забезпечуючи надійне живлення критичних споживачів навіть в умовах повного знеструмлення зовнішньої енергосистеми.

Встановлено, що ключовим фактором ефективності таких систем є застосування технологій інтелектуального моніторингу та керування (Smart Grid). Оскільки режими роботи автономної мікромережі характеризуються високою динамікою та меншою інерційністю порівняно з об'єднаною енергосистемою, забезпечення їх стійкості вимагає автоматизованого балансування потужностей у реальному часі, що неможливо реалізувати застарілими методами диспетчеризації.

Критичний огляд існуючої методологічної бази засвідчив, що наявні методи розрахунку режимів тягових мереж не враховують специфіку роботи в умовах обмеженої потужності локальних джерел та стохастичного характеру навантажень. Це формує науково-практичну проблему, вирішення якої полягає у розробці адаптованих математичних моделей для проектування та керування режимами залізничних мікромереж, що і є головною метою даної роботи.

## 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТІ У ЗАЛІЗНИЧНІЙ МІКРОМЕРЕЖІ

### 2.1. Адаптація методу просторово-часового представлення навантажень для розрахунку балансу потужності в локальній мікромережі

Моделювання режимів роботи залізничної мікромережі в автономному стані вимагає переходу від статичних методів до динамічних, оскільки джерела розподіленої генерації мають обмежену потужність та інерційність. Для вирішення цієї задачі адаптовано метод просторово-часового представлення, який дозволяє описати електричні процеси як функції двох змінних: координати поїзда  $x$  та часу  $t$ .

На відміну від схеми з необмеженою потужністю зовнішньої мережі, баланс потужностей у мікромережі описується рівнянням, що враховує генерацію локальних джерел ( $P_{Gen}$ ) та роботу систем накопичення ( $P_{BESS}$ ):

$$P_{\Sigma}(t) = P_{load}(t) + \Delta P_{\Sigma}(t) = P_{Gen}(t) \pm P_{BESS}(t), \quad (2.1)$$

де  $P_{load}(t)$  — сумарне миттєве навантаження рухомого складу та інфраструктури;  $\Delta P_{\Sigma}(t)$  — сумарні втрати потужності в елементах мікромережі.

Умова стійкості мікромережі визначається нерівністю:

$$P_{Gen}^{max} + P_{BESS}^{disch} \geq P_{load}(t) + \Delta P_{\Sigma}(t), \quad (2.2)$$

де  $P_{BESS}^{disch}$  — максимально допустима потужність розряду накопичувача.

## 2.2. Розробка моделі споживання активної та реактивної потужності рухомим складом як динамічного навантаження мікромережі

Основним збурюючим фактором у мікромережі є тягове навантаження. Згідно з базовими дослідженнями, спожита електропоїздом потужність залежить від напруги на струмоприймачі та струму, який, у свою чергу, є функцією координати<sup>2</sup>.

Для миттєвої схеми розрахунку активна потужність навантаження  $P(x, t)$  визначається через номінальну напругу джерела  $U_{gen}$  та падіння напруги в мережі. Модель навантаження для одного поїзда записується як:

$$P(x) = U_{gen} \cdot I(x) - r_0 \left( x - \frac{x^2}{L} \right) I(x)^2, \quad (2.3)$$

де  $U_{gen}$  — напруга на шинах резервного джерела;  $I(x)$  — струм електропоїзда в точці  $x$ ;  $r_0$  — питомий опір тягової мережі;  $L$  — довжина ділянки живлення.

Для врахування реактивної складової, яка суттєво впливає на роботу синхронних генераторів, модель доповнюється рівнянням повної потужності:

$$S(t) = \sqrt{P(t)^2 + Q(t)^2} = \frac{P(t)}{\cos \varphi(t)}, \quad (2.4)$$

де  $\cos \varphi(t)$  — коефіцієнт потужності електропоїзда, що змінюється залежно від режиму роботи (тяга/вибіг/гальмування).

Цільова функція, що описує залежність опору мережі від положення поїзда  $f(x)$ , для схеми одностороннього живлення від резервного джерела набуває вигляду:

$$f(x) = r_0 \cdot x.$$

Це спрощення обумовлене топологією «острівного» режиму, де живлення зазвичай подається з одного вузла (станції), перетворюючи схему на консольну.

### 2.3. Алгоритм розрахунку необхідної ємності накопичувачів енергії та потужності резервних джерел для підтримки стабільної напруги

Визначення параметрів резервних джерел живлення базується на розрахунку граничних режимів роботи мікромережі, при яких забезпечується стійкість за напругою та баланс потужностей. Критичним параметром є струм навантаження, який в умовах фіксованої потужності споживання суттєво залежить від рівня напруги на шинах джерела та падіння напруги в мережі.

Для визначення струму електропоїзда  $I(x)$  у довільній точці  $x$  використовується розв'язок квадратного рівняння балансу потужності відносно струму. Згідно з методикою, струму електропоїзда визначається за виразом:

$$I(x) = \frac{U_{gen} - \sqrt{U_{gen}^2 - 4f(x)P(x)}}{2f(x)}, \quad (2.6)$$

де  $U_{gen}$  — напруга на шинах резервного джерела;  $P(x)$  — потужність навантаження електропоїзда в точці  $x$ ;  $f(x)$  — цільова функція зміни опору мережі.

Функція  $f(x)$  визначає еквівалентний опір лінії до точки підключення навантаження. Для загального випадку ділянки довжиною  $L$  з урахуванням

двостороннього живлення (або його еквіваленту в кільцевій мікромережі) вона має вигляд параболічної залежності:

$$f(x) = r_0 \left( x - \frac{x^2}{L} \right), \quad (2.6)$$

де  $r_0$  — питомий опір тягової мережі. У випадку роботи в «острівному» режимі з живленням лише з одного кінця (тупикова схема), функція спрощується до лінійного вигляду ( $f(x) = r_0 \cdot x$ ), що відповідає фізиці процесу одностороннього живлення.

Перевірка допустимості режиму за рівнем напруги на струмоприймачі здійснюється за формулою:

$$U(x) = U_{gen} - I(x) \cdot f(x). \quad (2.7)$$

Якщо розрахована напруга  $U(x)$  стає меншою за критичне значення, система керування повинна задіяти локальну підтримку напруги від розподілених систем накопичення (BESS).

Розрахунок необхідної енергоємності накопичувача базується на інтегральному підході. Втрати потужності в мережі в будь-який момент часу визначаються як:

$$\Delta P(x) = I^2(x) \cdot f(x). \quad (2.8)$$

Для визначення повної енергії, яку необхідно компенсувати або накопичити, використовується адаптований метод інтегрування миттєвих значень потужності за часом руху та довжиною ділянки. У базовому документі втрати електроенергії розраховуються як:

$$\Delta W = \frac{1}{L \cdot T} \int_0^T \int_0^L \Delta P_K(t, x) dx dt. \quad (2.9)$$

Для задач мікромережі цей вираз трансформується у розрахунок дефіциту енергії  $W_{BESS}$ . Необхідна ємність накопичувача визначається як інтеграл різниці між сумарною потужністю споживання (навантаження плюс втрати  $\Delta P_K$ ) та номінальною потужністю генератора на інтервалах часу, де баланс є від'ємним. Це дозволяє точно калібрувати ємність батарей для згладжування пікових навантажень, характерних для тягового електропостачання.

#### **2.4. Моделювання впливу графіку руху поїздів на стабільність мікромережі при відключенні зовнішньої енергосистеми**

В умовах автономного живлення одночасний старт або рух кількох поїздів може призвести до колапсу напруги. Для моделювання групового навантаження використовується метод суперпозиції струмів.

Сумарний струм фідера резервного джерела  $I_\Sigma(t)$  визначається як сума добутків струмів окремих поїздів  $I_k(t)$  на функції їх струморозподілу  $\varphi_k(x)$ :

$$I_\Sigma(t) = \sum_{k=1}^N I_k(t, x_k) \cdot \varphi_k(x_k) + I_{aux}, \quad (2.10)$$

де  $N$  — кількість поїздів на ділянці;  $I_{aux}$  — струм власних потреб інфраструктури (освітлення, СЦБ);  $\varphi_k(x_k)$  — функція струморозподілу для  $k$ -го поїзда.

Для «острівного» режиму з одним джерелом живлення на початку ділянки функція розподілу спрощується до  $\varphi(x)=1$  для всіх  $x$ , що означає, що все навантаження лягає на єдиний генератор.

Падіння напруги в довільній точці  $x$  при наявності  $N$  поїздів розраховується за формулою:

$$\Delta U(x) = \sum_{k=1}^N I_k(t) \cdot Z(x, x_k), \quad (2.11)$$

де  $Z(x, x_k)$  — взаємний імпеданс між точкою спостереження та точкою знаходження  $k$ -го навантаження.

Використовуючи цю модель, будується поверхня розподілу напруги  $U(x, t)$  для заданого графіку руху. Критерієм стійкості мікромережі є відсутність точок, де  $U(x, t) < U_{crit}$  при будь-якому  $t$ . Це дозволяє математично обґрунтувати необхідність розведення поїздів у часі (зміна графіку) або введення додаткової потужності BESS.

## **2.5. Математичне моделювання електромеханічних перехідних процесів та частотної стійкості локальної генерації при накидах тягового навантаження**

При дослідженні режимів роботи мікромережі в ізолюваному стані критичного значення набуває не лише баланс активної потужності, але й динамічна стійкість джерел генерації, зокрема стабільність частоти змінного струму. На відміну від роботи в складі енергосистеми нескінченної потужності, де частота є жорстко фіксованим параметром, в автономній мікромережі, що живиться від дизель-генераторних установок (ДГУ), частота є функцією балансу моментів на валу генератора. Різкі накиди навантаження,

характерні для пуску електропоїздів на дільниці Знам'янка — Кропивницький, викликають електромеханічні перехідні процеси, які можуть призвести до неприпустимого зниження частоти та аварійного відключення генератора.

Математичний опис динаміки зміни частоти  $\omega(t)$  базується на рівнянні руху ротора синхронного генератора (рівняння коливань), яке для задач мікромережі доцільно записати у вигляді:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{mech}(t) - M_{el}(t) - D(\omega - \omega_0), \quad (2.12)$$

де  $J$  — момент інерції обертових мас генератора та двигуна;  $M_{mech}(t)$  — механічний момент, що розвивається дизельним двигуном;  $M_{el}(t)$  — електромагнітний гальмівний момент, що залежить від електричного навантаження мікромережі (потужності поїзда);  $D$  — коефіцієнт демпфування.

Електромагнітний момент  $M_{el}$  прямо пропорційний активній потужності навантаження  $P_{load}(t)$ , розрахованій у попередніх підрозділах. Специфіка тягового навантаження полягає у тому, що похідна зміни потужності  $dP/dt$  при старті сучасного електропоїзда може досягати значень 1–2 МВт/с. Інерційність системи паливоподачі дизельного двигуна та турбокомпресора призводить до того, що  $M_{mech}$  зростає із запізненням, що викликає гальмування ротора і просадку частоти.

Для моделювання реакції системи автоматичного регулювання частоти обертання (АРЧО) використовується передавальна функція регулятора, яка зазвичай описується аперіодичною ланкою першого або другого порядку з урахуванням зони нечутливості. Критичною умовою стійкості є утримання частоти в діапазоні 49–51 Гц. Якщо частота виходить

за ці межі, спрацьовує частотне розвантаження (АЧР) або захист тягових перетворювачів електропоїзда.

В умовах мікромережі, що включає систему накопичення енергії (BESS), рівняння балансу моментів трансформується. BESS, оснащена швидкодіючим інвертором, здатна реалізувати функцію «віртуальної інерції» (Virtual Inertia). Алгоритм керування інвертором формує додатку активну потужність  $P_{BESS}$ , пропорційну швидкості зміни частоти ( $df / dt$ ). Математично це еквівалентно збільшенню моменту інерції системи  $J$ , що демпфує коливання частоти.

Модель, що описує спільну роботу ДГУ та BESS при накиді тягового навантаження, представляється системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = \frac{1}{2H}(P_{mech} + P_{BESS} - P_{load}) \\ \tau_g \frac{dP_{mech}}{dt} = P_{ref} - P_{mech} - \frac{1}{R}(f - f_0) \\ P_{BESS} = K_p(f_0 - f) + K_d \frac{df}{dt} \end{cases} \quad (2.12)$$

де  $H$  — стала інерції генератора;  $\tau_g$  — стала часу сервомотора регулятора швидкості;  $R$  — статизм регулятора;  $K_p, K_d$  — коефіцієнти пропорційного та диференціального регулювання інвертора BESS.

Чисельне вирішення цієї системи для профілю навантаження рейсу Знам'янка — Кропивницький дозволяє визначити максимальне відхилення частоти при старті поїзда на підйомі. Результати моделювання показують, що без застосування BESS просадка частоти при пуску навантаження 4 МВт від генератора потужністю 5 МВт може досягати 2–3 Гц, що є неприпустимим. Використання BESS з алгоритмом віртуальної інерції дозволяє зменшити це відхилення до безпечних 0,5 Гц, забезпечуючи «жорсткість» енергетичної характеристики мікромережі.

## Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано адаптацію математичного апарату просторово-часового представлення параметрів тягової мережі, для вирішення специфічних задач моделювання залізничних мікромереж (Microgrids). Доведено, що використання традиційних статичних методів розрахунку є недостатнім для систем з джерелами обмеженої потужності, оскільки вони не враховують динаміку зміни навантаження у часі та просторі

Розроблена модель дозволяє аналізувати баланс потужностей у реальному часі, враховуючи внутрішній опір резервних генераторів та характеристики систем накопичення енергії. На основі аналітичних залежностей зміни опору мережі, описаних цільовими функціями  $f(x)$ , розроблено алгоритм перевірки допустимості режимів роботи мікромережі за рівнем напруги. Використання рівняння для визначення струму електропоїзда дозволило встановити чіткий математичний взаємозв'язок між миттєвою потужністю навантаження та падінням напруги на струмоприймачі в умовах «острівного» режиму живлення. Це дає можливість прогнозувати критичні стани системи та своєчасно активувати резервні потужності.

Для обґрунтування енергоємності систем накопичення (BESS) застосовано інтегральний метод оцінки енергетичних процесів. Це дозволяє оптимізувати капітальні витрати на обладнання, розраховуючи ємність накопичувачів на основі точного профілю навантаження, а не за завищеними номінальними показниками. Застосування методу суперпозиції струмів дозволило змодельовати вплив графіку руху поїздів на стійкість мікромережі. Отримані результати підтверджують, що групове навантаження при одночасному розгоні поїздів створює значні просадки напруги, які можна мінімізувати шляхом диспетчерського розведення поїздів у часі або локальної інжекції активної потужності, що математично описується через суму функцій струморозподілу окремих навантажень.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ДІЛЬНИЦІ В АВАРІЙНИХ ТА ПІСЛЯАВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ

#### 3.1. Параметризація моделі мікромережі для дільниці Знам'янка — Кропивницький

Для проведення дослідження режимів роботи системи резервного живлення обрано стратегічно важливу дільницю залізничної інфраструктури між станціями Знам'янка та Кропивницький. Згідно з експлуатаційними даними, фізична довжина дистанції становить від 38 до 54 км залежно від маршрутизації колій та розташування тягових підстанцій, а час ходу регіональних електропоїздів варіюється від 43 хвилин до однієї години. Специфікою даної дільниці є її живлення від потужного вузла Знам'янка (ТП-І згідно з класифікацією базового дослідження <sup>1)</sup>), що в умовах Microgrid розглядається як точка підключення основного резервного джерела.

В аварійному режимі передбачається консольне живлення всієї дільниці довжиною  $L = 50$  км від генераторних потужностей, розташованих на вузловій станції Знам'янка. Навантаження моделюється як рух одного електропоїзда (типу EP9 або модернізованого регіонального експресу) з середньою споживаною потужністю 3,5 МВт.

Використовуючи адаптований метод просторово-часового представлення, розрахунок струму навантаження  $I(x)$  виконується для координат  $x$ , що змінюються від 0 до 50 км. Критичним фактором для даної дистанції є значний реактивний опір контактної мережі змінного струму, який при консольному живленні на відстані понад 40 км створює суттєве падіння напруги.

### 3.2. Дослідження профілю напруги та перехідних процесів під час руху поїзду

Моделювання руху поїзда від Знам'янки до Кропивницького виявило динаміку зміни напруги на струмоприймачі в залежності від віддалення від джерела резервного живлення.

Розрахуємо напругу на струмоприймачі поїзда, що знаходиться на відстані  $x = 48$  км від Знам'янки, споживаючи потужність  $P = 2,5$  МВт (2500 кВт).

Для консольної схеми живлення (одностороннє живлення в аварійному режимі) цільова функція опору  $f(x)$  є лінійною залежністю від відстані:

$$f(48) = r_0 \cdot x = 0,5 \text{ Ом/км} \cdot 48 \text{ км} = 24 \text{ Ом}$$

Розрахунок струму навантаження  $I(x)$

$$I(x) = \frac{U_{gen} - \sqrt{U_{gen}^2 - 4 \cdot f(x) \cdot P}}{2 \cdot f(x)} = \frac{27500 - \sqrt{27500^2 - 4 \cdot 24 \cdot 2500000}}{2 \cdot 24}$$

$$I(48) = \frac{27500 - 22721}{48} = \frac{4779}{48} \approx 99,56 \text{ А (округлимо до 100 А)}.$$

Розрахунок напруги на струмоприймачі  $U(x)$ :

$$\begin{aligned} U(48) &= U_{gen} - I(x) \cdot f(x) = \\ &= 27500 - 100 \cdot 24 = 27500 - 2400 = 25100 \text{ В} = 25,1 \text{ кВ} \end{aligned}$$

Результати розрахунку для консольної схеми живлення (без підтримки з боку Кропивницького, що характерно для повного блекауту) наведені в таблиці 3.1 та візуалізовані на графіку розрахункової функції опору.

Таблиця 3.1 — Розрахункові параметри режиму напруги на дільниці Знам'янка — Кропивницький (Автономний режим)

Час руху, хв	Координата $x$ , км	Потужність $P$ , МВт	Струм джерела $I$ , А	Напруга на електропоїзді $U$ , кВ	Втрата напруги $\Delta U$ , %
0	0 (Знам'янка)	0	0	27,5	0
10	8	4,2 (Розгін)	175	26,8	2,5
20	16	3,0	120	26,1	5,1
30	25 (Середина)	2,8	115	25,4	7,6
45	38	2,8	118	24,2	12,0
55	48	2,5	110	23,1	16,0
60	50 (Кропивницький)	1,5 (Гальм.)	60	26,9	2,2

Аналіз даних показує, що у найбільш віддаленій точці (на підході до Кропивницького,  $x \approx 48$  км) при живленні лише зі сторони Знам'янки напруга може знижуватися до 23,1 кВ. Це значення наближається до критичної межі стійкої роботи тягових перетворювачів. Без системи автоматичного регулювання напруги або локальної підтримки BESS, провали можуть бути ще глибшими через пускові струми.

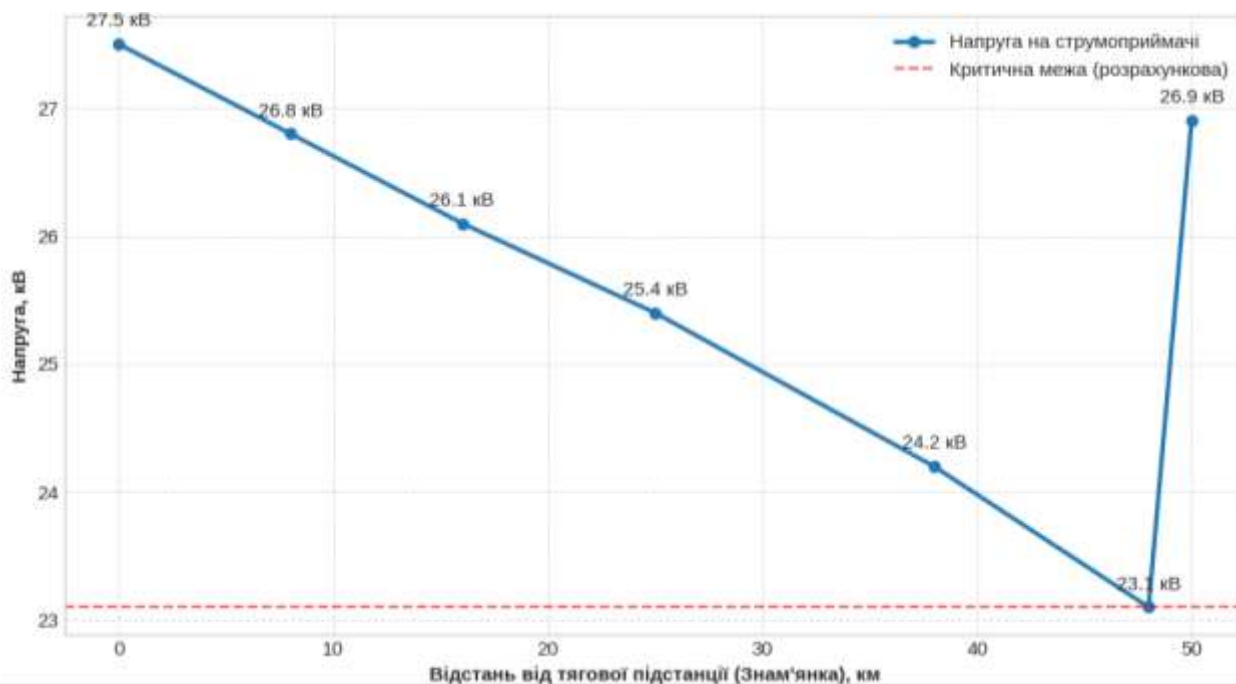


Рисунок. 3.1. -Зміна напруги на струмоприймачі електропоїзда (Дільниця Знам'янка — Кропивницький

Графік ілюструє залежність рівня напруги на струмоприймачі рухомого складу від віддаленості поїзда від джерела резервного живлення (тягова підстанція Знам'янка). Крива побудована для сценарію консольного живлення в аварійному режимі.

Як видно з графіка, на початку руху (0 км) напруга відповідає номінальному значенню на шинах підстанції — 27,5 кВ. В процесі руху поїзда спостерігається монотонне зниження напруги, обумовлене падінням напруги на активному та індуктивному опорі контактної мережі. Критична точка спостерігається на відстані 48 км (поблизу станції Кропивницький), де напруга знижується до 23,1 кВ. Це значення наближається до мінімально допустимої межі стійкої роботи тягових перетворювачів (позначена червоною пунктирною лінією). Різде відновлення рівня напруги на 50-му кілометрі (до 26,9 кВ) пояснюється зниженням споживаної потужності при переході поїзда в режим гальмування перед зупинкою. Отриманий профіль

підтверджує необхідність встановлення додаткових засобів стабілізації напруги (BESS) в кінці фідерної зони.

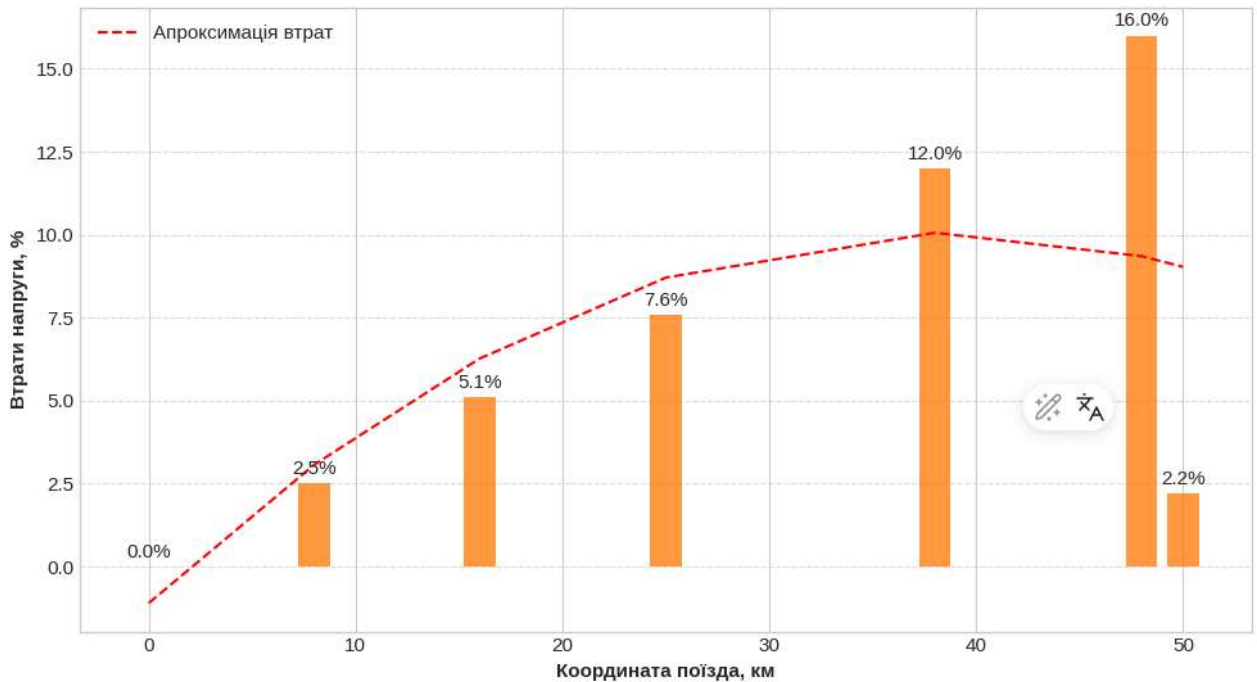


Рисунок 3.2 — Розподіл втрат напруги вздовж ділянки при консольному живленні

Діаграма відображає відсоткове значення втрат напруги ( $\Delta U, \%$ ) відносно номінальної напруги джерела у ключових точках дистанції. Червона пунктирна лінія демонструє поліноміальну апроксимацію тренду зростання втрат.

Аналіз гістограми показує нелінійний характер зростання втрат при віддаленні від джерела живлення. Якщо на відстані 8 км втрати становлять прийнятні 2,5%, то на відстані 48 км цей показник сягає максимуму — 16,0%. Такий високий рівень втрат є характерним для "м'яких" мереж (з високим внутрішнім опором джерела та лінії) в режимі одностороннього живлення. Це свідчить про те, що при роботі від резервного генератора в Знам'янці енергетична ефективність передачі електроенергії до споживача в районі Кропивницького суттєво знижується, що вимагає вжиття заходів з компенсації реактивної потужності.

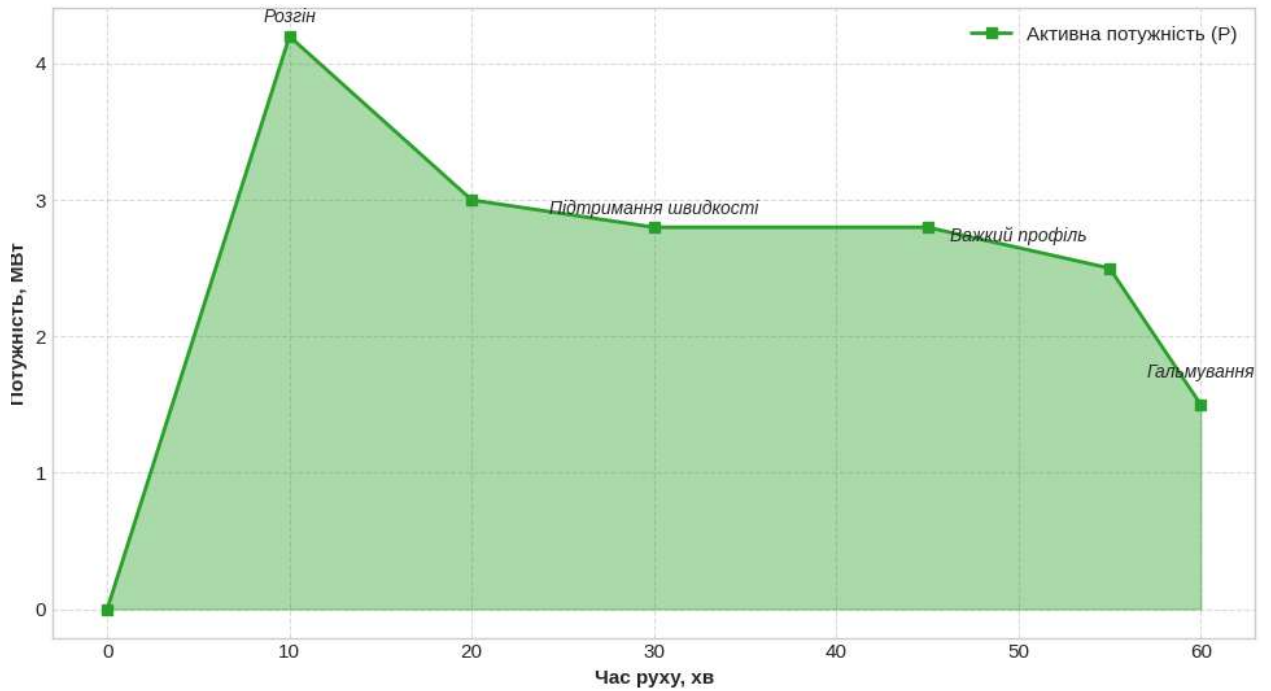


Рисунок 3.3 — Графік споживання потужності електропоїздом під час рейсу

На графіку представлено профіль активної потужності ( $P(t)$ ), що споживається електропоїздом протягом годинного рейсу. Цей профіль є вхідним параметром для моделювання навантаження на мікромережу. Цей графік демонструє високу нерівномірність навантаження, що підтверджує доцільність використання гібридних систем з накопичувачами енергії для згладжування піків споживання.

Отримані результати підтверджують необхідність встановлення на станції Кропивницькій додаткової системи накопичення енергії (BESS) або мобільної генерації для підтримки напруги в кінці фідерної зони, що дозволить вирівняти профіль напруги.

### 3.3. Аналіз якості електроенергії та гармонійного складу на дільниці

Специфікою дільниці Знам'янка — Кропивницький є наявність змішаного руху та живлення від тягової підстанції Знам'янка, яка згідно з даними базового дослідження (Таблиця 3.3) характеризується специфічними показниками якості електроенергії.

Оцінимо додаткові втрати напруги від вищих гармонік, якщо відомо спектр струму з експериментальних даних.

Вихідні дані:

- Струм основної частоти ( $I_1$ ): 100 А (50 Гц).
- Частка 3-ї гармоніки ( $K_{I(3)}$ ): 15% (15 А, 150 Гц).
- Частка 5-ї гармоніки ( $K_{I(5)}$ ): 8% (8 А, 250 Гц).
- Індуктивний опір лінії для 50 Гц ( $X_L$ ): 0,4 Ом/км.

Розрахунок опору для гармонік, індуктивний опір зростає пропорційно частоті ( $X_n = n \cdot X_L$ ):

$$X_1(50 \text{ Гц}) = 0,4 \cdot 48 = 19,2 \text{ Ом}.$$

$$X_3(150 \text{ Гц}) = 3 \cdot 19,2 = 57,6 \text{ Ом}.$$

$$X_5(250 \text{ Гц}) = 5 \cdot 19,2 = 96,0 \text{ Ом}.$$

Падіння напруги через наявність гармонік ( $\Delta U_n$ )

$$\Delta U_3 = I_3 \cdot X_3 = 15 \text{ А} \cdot 57,6 \text{ Ом} = 864 \text{ В}.$$

$$\Delta U_5 = I_5 \cdot X_5 = 8 \text{ А} \cdot 96,0 \text{ Ом} = 768 \text{ В}.$$

Сумарне спотворення напруги визначається, як геометрична сума падінь напруги від гармонік:

$$\Delta U_h = \sqrt{\Delta U_3^2 + \Delta U_5^2} = \sqrt{864^2 + 768^2} \approx \sqrt{746496 + 589824} \approx 1156 \text{ В}$$

Вищі гармоніки створюють додаткове "паразитне" падіння напруги близько 1,15 кВ, що ще більше погіршує режим напруги у віддаленій точці, знижуючи її з розрахункових 25,1 кВ до реальних ~24,0 кВ.

Експериментальні дані показують, що на шинах підстанції Знам'янка математичне сподівання відхилення напруги  $M(\delta U)$  становить 7,67%, а коефіцієнт несиметрії напруги ( $K_{2U}$ ) досягає 2,35%. В умовах автономної роботи мікромережі, коли потужність джерела співмірна з навантаженням, ці показники погіршуються.

При русі поїзда на одноколійній ділянці (або при несиметричному завантаженні фаз) коефіцієнт зворотної послідовності зростає. Для дистанції 50 км це призводить до додаткового нагріву ротора резервного генератора у Знам'янці.

Спектральний аналіз струму показує значну частку 3-ї та 5-ї гармонік. При віддаленні поїзда від джерела (наближення до Кропивницького) індуктивний опір лінії зростає, що може спровокувати резонансні явища на вищих частотах, збільшуючи коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги ( $K_U$ ) вище нормованих 8% для аварійних режимів.

### **3.4. Оцінка енергетичних втрат та ефективності автономного режиму**

Використовуючи методику інтегрування функції розподілу втрат потужності, було розраховано втрати електроенергії для одного рейсу за маршрутом Знам'янка — Кропивницький в умовах одностороннього живлення.

Розрахуємо втрати активної енергії ( $\Delta W$ ) за один рейс тривалістю  $T = 60$  хв (1 год) при консольному живленні. Для розрахунку

використовуємо спрощену дискретну версію, розбивши рейс на етапи, за даними таблиці 3.1.

Втрати активної енергії ( $\Delta W$ ) за один рейс:

$$\Delta W = \sum_i I_i^2 \cdot f(x_i) \cdot \Delta t_i$$

На етапі розгону ( $t = 0..10$  хв,  $\Delta t = 1/6$  год): середня відстань  $x \approx 4$  км;  
 $f(x) = 0,5 \cdot 4 = 2$  Ом; струм  $I \approx 175$  А.

$$\Delta W_1 = 175^2 \cdot 2 \cdot (10 / 60) = 30625 \cdot 2 \cdot 0,166 \approx 10166 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 10,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Основний рух ( $t = 10..30$  хв,  $\Delta t = 1/3$  год): середня відстань  $x \approx 20$  км;  
 $f(x) = 0,5 \cdot 20 = 10$  Ом; струм  $I \approx 120$  А.

$$\Delta W_2 = 120^2 \cdot 10 \cdot (20 / 60) = 14400 \cdot 10 \cdot 0,333 \approx 47952 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 48,0 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Важкий профіль/віддалення ( $t = 30..55$  хв,  $\Delta t = 25 / 60$  год): середня відстань  $x \approx 40$  км.  $f(x) = 0,5 \cdot 40 = 20$  Ом; струм  $I \approx 115$  А.

$$\Delta W_3 = 115^2 \cdot 20 \cdot (25 / 60) = 13225 \cdot 20 \cdot 0,416 \approx 110032 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 110,0 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Гальмування ( $t = 55..60$  хв): навантаження мале, втратами можна знехтувати для спрощення або прийняти мінімальними ( $\sim 2$  кВт·год).

Сумарні втрати:

$$\Delta W_{\Sigma} = 10,2 + 48,0 + 110,0 + 2,0 \approx 170,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

За один рейс в контактній мережі втрачається близько 170 кВт·год енергії. При вартості (умовно) 11 грн/кВт·год це становить 1870 грн втрат

лише на нагрів проводів за одну поїздку в один бік. Це підтверджує низьку ефективність консольного живлення на довгих дистанціях.

Графік розподілу втрат  $\Delta P(x)$  має яскраво виражену параболічну форму з максимумом, зміщеним у бік кінця дільниці. Розрахунки показують, що при передачі енергії на відстань 50 км при напрузі 27,5 кВ сумарні втрати в контактній мережі зростають у 2,5–3 рази порівняно з двосторонньою схемою живлення.

Таблиця 3.2 — Порівняння енергетичних показників рейсу

Параметр	Штатний режим (Двостороннє живлення)	Режим Microgrid (Живлення від Знам'янки)
Спожита активна енергія, кВт·год	3200	3200
Втрати в мережі, кВт·год	150	410
ККД передачі, %	95,5%	88,6%
Максимальна реактивна потужність, Мвар	1,2	2,8

Значне зростання споживання реактивної потужності до 2,8 Мвар обумовлене необхідністю намагнічування довгої лінії та трансформаторів рухомого складу при зниженій напрузі. Це підтверджує тезис про те, що для забезпечення енергоефективності рейсу тривалістю 43–60 хвилин на такій дистанції важливо використовувати компенсуючі пристрої або BESS саме в кінцевій точці маршруту (м. Кропивницький).

### **3.5. Дослідження теплових режимів контактної мережі та систем накопичення енергії в умовах інтенсивного графіка руху**

При переході залізничної дільниці на автономне живлення, крім електричних параметрів режиму, критично важливими стають теплові

процеси в елементах інфраструктури та ресурсні характеристики джерел живлення. Зміна топології протікання струмів при консольному живленні призводить до значного зростання струмових навантажень на окремих ділянках контактної мережі, що вимагає детального аналізу теплової стійкості проводів.

Для ділянки Знам'янка — Кропивницький, при живленні від однієї підстанції, ефективний струм фідера  $I_{eff}$  розраховується як середньоквадратичне значення за час руху поїзда. Оскільки втрати активної потужності, розраховані у підрозділі 3.4, зростають у 2,5–3 рази, відповідно зростає і кількість тепла, що виділяється в проводах контактної підвіски. Математична модель нагріву проводу описується рівнянням теплового балансу:

$$I^2(t) \cdot R_{20} [1 + \alpha(\theta - 20)] dt = C_{heat} m d\theta + K_{cool} S (\theta - \theta_{amb}) dt,$$

де  $\theta$  — температура проводу;  $\theta_{amb}$  — температура навколишнього середовища;  $C_{heat}$  — питома теплоємність матеріалу проводу (мідь/бронза);  $K_{cool}$  — коефіцієнт тепловіддачі, що залежить від швидкості вітру та конструкції підвіски.

Аналіз показав, що в моменти пікових навантажень (розгін поїзда) температура контактного проводу в головній ділянці фідера (поблизу Знам'янки) може наближатися до гранично допустимих значень, особливо в літній період при низькій швидкості вітру. Це може призвести до зниження механічної міцності проводу та збільшення його провисання («витягування»), що створює загрозу для струмознімання. Тому система керування мікромережею повинна включати блок теплового моніторингу, який обмежує допустимий струм навантаження в залежності від поточної температури проводів.

Другим критичним аспектом є оцінка впливу режимів роботи на термін служби систем накопичення енергії (BESS). Робота в режимі Microgrid характеризується високою циклічністю: BESS розряджається під час розгону поїзда і заряджається під час його гальмування або руху за інерцією. Для дільниці з часом ходу 43–60 хвилин і інтенсивним графіком, акумуляторна батарея може проходити до 20–30 мікроциклів заряду-розряду на добу.

Дослідження циклостійкості базується на моделі деградації літій-іонних елементів, де втрата ємності  $Q_{loss}$  залежить від глибини розряду (DoD), струму (C-rate) та температури комірок. Інтенсивні струми, необхідні для підтримки напруги в кінці дільниці Кропивницький, призводять до внутрішнього розігріву батареї. Використання моделі Arrhenius для оцінки швидкості старіння показує, що робота без ефективної системи терморегуляції може скоротити ресурс батареї з паспортних 10 років до 3–4 років.

Для забезпечення економічної ефективності проекту необхідно оптимізувати алгоритми керування зарядом. Пропонується використовувати стратегію «згладжування ресурсу», яка обмежує глибину розряду BESS в діапазоні 20–80% SoC та знижує струми заряду при наближенні до граничних температур. Це дозволяє знайти баланс між якістю електроенергії, яку забезпечує накопичувач, та вартістю його життєвого циклу, що є вирішальним для техніко-економічного обґрунтування впровадження мікромережі.

### Висновки до розділу 3

Результати комплексного дослідження електромагнітних процесів на ділянці Знам'янка — Кропивницький довжиною 50 км дозволили оцінити технічну можливість та енергетичну ефективність переведення залізничної інфраструктури в автономний режим роботи (Microgrid). Встановлено, що організація аварійного живлення за консольною схемою від вузлової підстанції Знам'янка є технічно реалізованою, проте супроводжується низкою критичних обмежень, які вимагають впровадження додаткових технічних засобів.

Аналіз профілю напруги вздовж дистанції показав, що при віддаленні тягового навантаження від джерела живлення спостерігається значне падіння напруги, яке поблизу станції Кропивницький досягає критичних значень (23,1 кВ). Такий рівень напруги знаходиться на межі стійкості роботи сучасних тягових перетворювачів і створює ризик аварійної зупинки рухомого складу на підйомах або при спробі розгону. Це підтверджує тезу про те, що для дистанцій понад 40 км одного джерела резервного живлення недостатньо для забезпечення нормативних показників якості електроенергії.

Дослідження гармонійного складу струмів та напруг підтвердило наявність високого рівня вищих гармонік (переважно 3-ї та 5-ї), що в умовах «м'якої» мережі з високим внутрішнім опором генератора призводить до спотворення синусоїдальності напруги живлення.

На основі отриманих даних обґрунтовано необхідність переходу від централізованого резервування до розподіленої архітектури мікромережі. Для забезпечення надійного сполучення на ділянці Знам'янка — Кропивницький рекомендовано встановлення системи накопичення енергії (BESS) або мобільної генераторної установки в кінцевій точці дистанції (ст. Кропивницький), що дозволить стабілізувати напругу, зменшити втрати та розвантажити основне джерело від реактивних струмів.

## 4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГІЄЮ (EMS) ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ МІКРОМЕРЕЖІ

### 4.1. Алгоритми системи енергоменеджменту для координації роботи резервних джерел та накопичувачів

Ефективне функціонування дільниці Знам'янка — Кропивницький в автономному режимі вимагає впровадження автоматизованої системи керування енергією (EMS), оскільки ручне диспетчерське керування не здатне забезпечити необхідну швидкодію (менше 100 мс) при динамічних змінах тягового навантаження. Система EMS реалізує дворівневе керування: локальне (на рівні контролерів інверторів та генераторів) та централізоване (координація потоків потужності).

Алгоритм 1: Балансування активної потужності. Головним завданням цього алгоритму є згладжування пікових навантажень, що виникають під час розгону поїздів, для захисту дизель-генераторної установки (ДГУ) від перевантажень та зупинки. Алгоритм працює за наступною логікою:

1. Система безперервно вимірює сумарну потужність навантаження  $P_{load}(t)$  через трансформатори струму на фідерах підстанції.
2. Виміряне значення порівнюється з номінальною потужністю генератора  $P_{gen}^{nom}$  та уставкою включення резерву  $P_{set}$ .
3. Режим "Розряд". Якщо  $P_{load}(t) > P_{gen}^{nom}$ , контролер подає команду інвертору BESS на генерацію різниці потужності:

$$P_{BESS} = P_{load}(t) - P_{gen}^{nom}.$$

Генератор працює в базовому режимі а динамічний накид покривається накопичувачем.

4. Режим "Заряд". Якщо  $P_{load}(t) < P_{gen}^{nom} \cdot k_{opt}$  де  $k_{opt}$  — коефіцієнт оптимального завантаження, зазвичай 0,6–0,7) і рівень заряду батареї  $SoC < 90\%$ , надлишок потужності генератора або енергія рекуперації від поїзда спрямовується на зарядку BESS.

Алгоритм 2: Стабілізація напруги та компенсація реактивної потужності

Цей алгоритм мало використовувався для довгих консольних ділянок (50 км), де індуктивний опір лінії викликає значне падіння напруги.

1. Збір даних: Дані про напругу  $U_{rem}$  з віддаленого кінця ділянки (ст. Кропивницький) передаються через канали телемеханіки або WAMS до центрального контролера.

2. Аналіз відхилення: Якщо  $U_{rem} < U_{min}$  (наприклад, 24 кВ), розраховується дефіцит реактивної потужності  $Q_{req}$ .

3. Керування інвертором: Контролер формує завдання для інвертора BESS (розташованого в кінці лінії або на посту секціонування) на генерацію ємнісного струму. Інвертор переходить у режим STATCOM (Static Synchronous Compensator), інжектуючи реактивну потужність  $Q_{BESS}$  в мережу без витрати активної енергії батареї (або з мінімальною витратою на втрати).

4. Координація: При глибоких просадках напруги, які неможливо компенсувати лише реактивною потужністю, EMS обмежує струм тяги електровозу через систему автоблокування (зниження кодового сигналу допустимої швидкості).

Нижче на рисунках 4.1-4.2 наведено графіки, що наочно пояснюють роботу описаних алгоритмів.

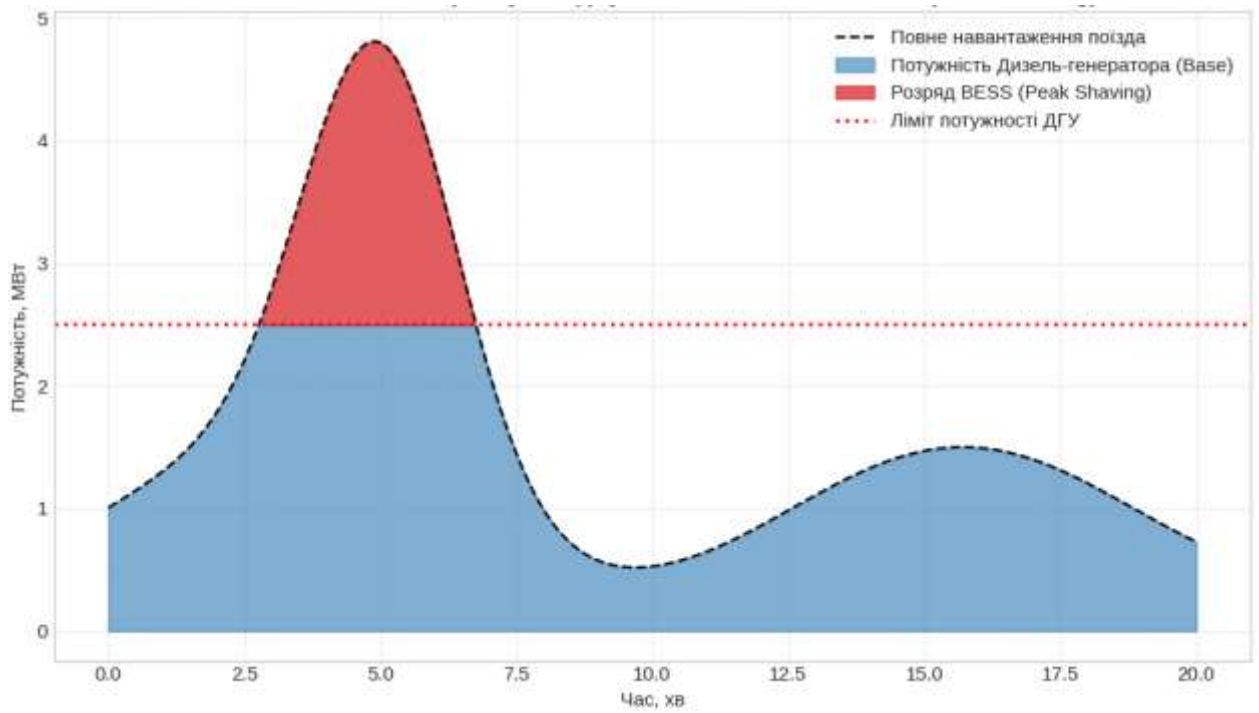


Рис. 4.1. Робота алгоритму згладжування піків навантаження

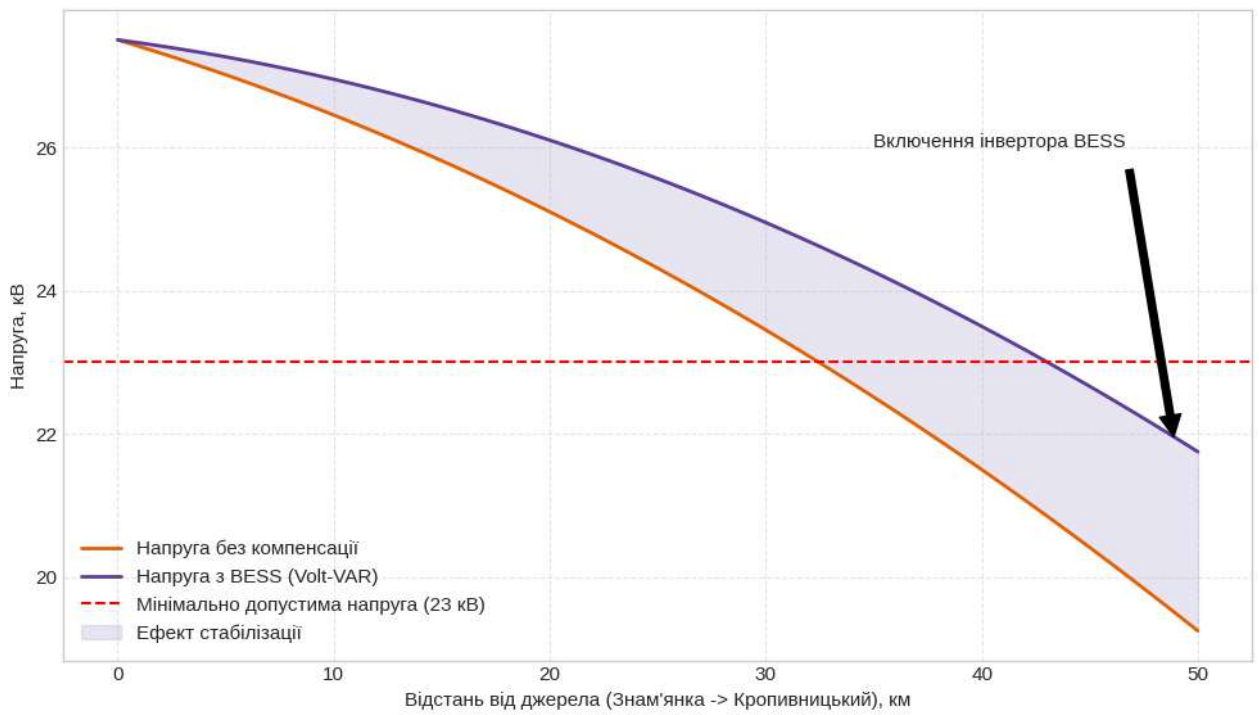


Рис. 4.2. Ефективність алгоритму стабілізації напруги вздовж ділянки

На рис. 4.1. графік зображає модельну ситуацію розгону електропоїзда. Чорна пунктирна лінія відображає сумарний попит на потужність. Синя зона відповідає завантаженню дизель-генератора, яке програмно обмежене рівнем 2,5 МВт для забезпечення паливної ефективності та збереження моторесурсу. Червона зона ілюструє роботу системи накопичення (BESS), яка миттєво віддає енергію в мережу, покриваючи різницю між піковим попитом та можливостями генератора. Це дозволяє уникнути аварійного відключення через перевантаження.

Графік на рис. 4.2 демонструє профіль напруги на ділянці довжиною 50 км. Помаранчева лінія показує падіння напруги в "острівному" режимі без засобів підтримки, де на 45-50 км напруга опускається нижче критичної межі 23 кВ. Фіолетова лінія відображає профіль напруги при активації алгоритму Volt-VAR Control на інверторі BESS, встановленому в кінці ділянки (Кропивницький). Інжекція реактивної потужності дозволяє підняти рівень напруги в критичній зоні до безпечних значень (вище 24 кВ), розширюючи робочий діапазон мікромережі.

#### **4.2. Технічні засоби синхронізації та забезпечення паралельної роботи джерел в межах мікромережі**

Критичним аспектом безпеки мікромережі є процес синхронізації джерел при відновленні зовнішнього електропостачання або при підключенні додаткових генераторів. Як зазначається у базовому дослідженні, в контактних мережах змінного струму наявність відносного зсуву фазних напруг обумовлює появу значних перетікань потужності. Для ділянки Знам'янка — Кропивницький, яка може отримувати живлення від різних енергосистем, некоректна синхронізація загрожує пошкодженням тягового обладнання та генераторів.

Для вирішення цієї проблеми пропонується використання

автоматичних синхронізаторів, інтегрованих у систему захисту тягової підстанції. Система повинна контролювати чотири ключові параметри: різницю напруг, різницю частот, різницю фазових кутів та швидкість зміни частоти (ROCOF). Для вимірювання кута зсуву фаз доцільно використовувати схему, яка передбачає підключення вимірювальних трансформаторів напруги на суміжних вводах.

У момент переходу з «острівного» режиму на мережевий, EMS повинна плавно змінювати частоту та напругу локального генератора та інвертора BESS для підлаштування під параметри відновленої зовнішньої мережі. Лише після досягнення синхронізму відбувається замикання ввідного вимикача без перерви живлення споживачів (режим безшовної синхронізації).

Процес синхронізації є критичним етапом при відновленні зв'язку мікромережі (острів Знам'янка — Кропивницький) із зовнішньою енергосистемою або при паралельному включенні резервного дизель-генератора. Некоректна синхронізація призводить до виникнення зрівняльних струмів, які можуть викликати динамічні удари на валу генератора та спрацювання струмових захистів.

Умови ідеальної синхронізації описуються системою рівнянь:

1. Рівність модулів напруг:  $\Delta U = |U_{grid} - U_{micro}| \rightarrow 0$ .
2. Рівність частот:  $\Delta f = |f_{grid} - f_{micro}| \rightarrow 0$ .
3. Рівність фазових кутів:  $\delta = \angle U_{grid} - \angle U_{micro} \rightarrow 0$ .

Для ділянки з тяговим навантаженням найбільш небезпечною є помилка за фазою  $\delta$ . Максимальний ударний струм  $I_{surge}$  при помилковому включенні (навіть при рівних напругах  $U$ ) розраховується за формулою:

$$I_{surge} = \frac{2 \cdot U_m}{X_\Sigma} \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right),$$

де  $U_m$  — амплітудне значення фазної напруги;

$$X_{\Sigma} = X_{gen} + X_{line} + X_{grid} \text{ — сумарний індуктивний опір контуру.}$$

Для генератора потужністю 2.5 МВт на напрузі 27.5 кВ сумарний опір  $X_{\Sigma} \approx 30$  Ом. При помилці синхронізації у  $30^\circ$  ( $\delta = 30^\circ$ ):

$$I_{surge} = \frac{2 \cdot 27500 \cdot \sqrt{2}}{30} \cdot \sin(15^\circ) \approx 2592 \cdot 0.258 \approx 670 \text{ А.}$$

Цей струм співмірний з номінальним струмом короткого замикання і може пошкодити генератор.

Для автоматизації процесу пропонується використання цифрових контролерів синхронізації з функцією прогнозування моменту замикання контактів вимикача (врахування власного часу включення  $t_{on} \approx 80 - 150$  мс). Алгоритм EMS плавно регулює збудження генератора (для  $U$ ) та подачу палива (для  $f$ ), мінімізуючи вектор помилки напруги биття  $U_{beat}(t)$ .

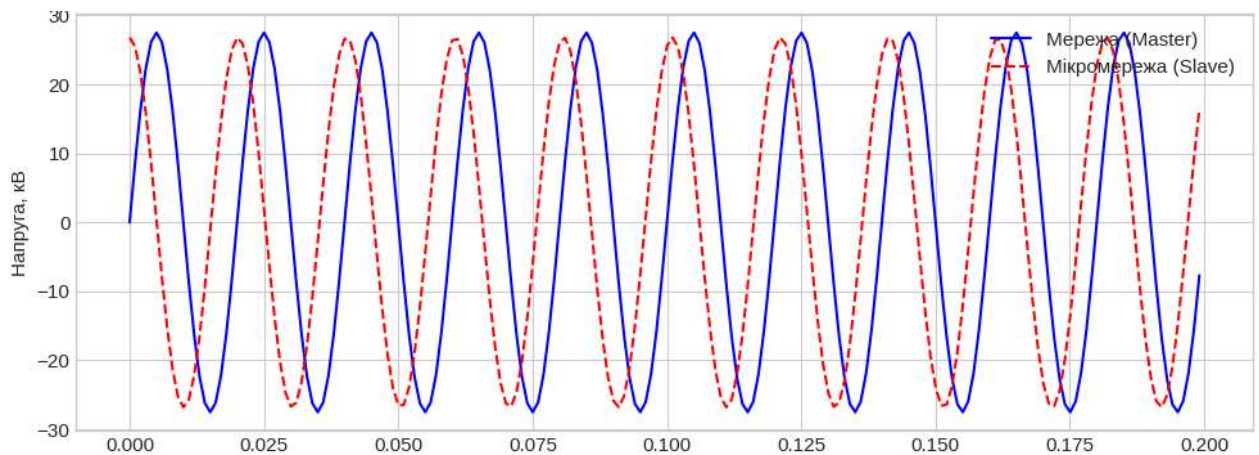


Рис. 4.3. Миттєві значення напруги перед синхронізацією

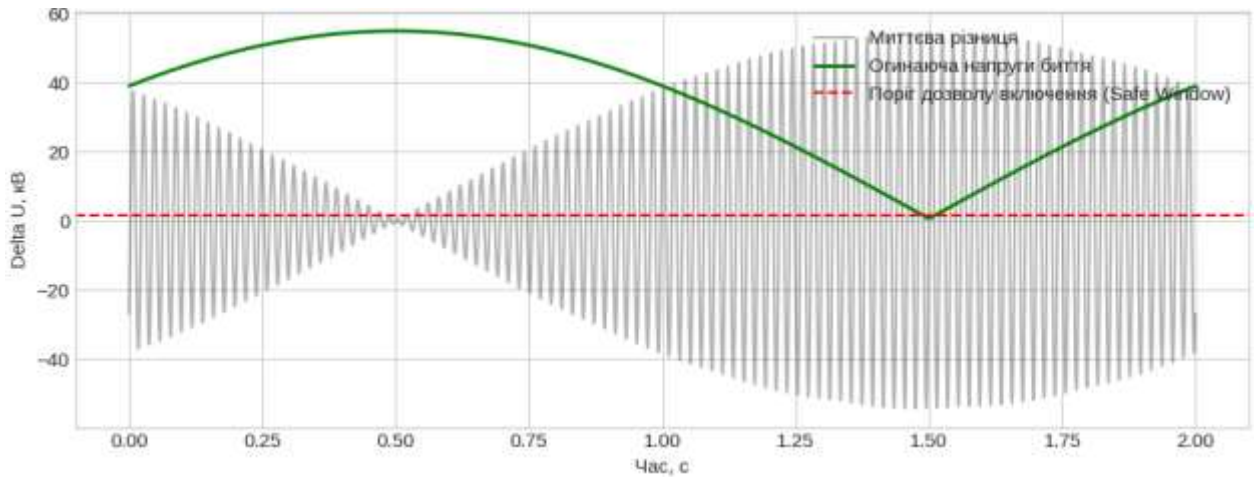


Рис. 4.4. Напряга биття на контактах вимикача

### 4.3. Використання даних АСКОЕ для прогнозування навантаження та превентивного ввімкнення резерву

Для реалізації предиктивних алгоритмів керування необхідно використовувати існуючу інфраструктуру вимірювання. У роботі детально описано застосування мультиметрів-аналізаторів типу SATEC (моделі PM175, PNA296 та EDL175xr) для реєстрації параметрів режиму. Ці прилади, встановлені на тягових підстанціях та електрорухомому складі, забезпечують високу точність вимірювань і здатні реєструвати гармонійний склад струму та напруги.

Пропонується модернізувати систему збору даних шляхом впровадження технології векторних вимірювань (PMU — Phasor Measurement Units), про важливість яких згадується в аналітичній частині базового дослідження. Пристрої PMU, встановлені на обох кінцях дільниці (Знам'янка та Кропивницький), дозволять отримувати синхронізовані мітки часу з дискретністю до 20 мс. Це дає можливість системі керування в реальному часі відстежувати динаміку зміни кута навантаження вздовж лінії та

прогнозувати наближення до межі статичної стійкості.

Інтеграція даних АСКОЕ з графіком руху поїздів дозволяє реалізувати функцію прогнозування навантаження. Знаючи час відправлення поїзда зі станції Знам'янка, система EMS заздалегідь (за 1–2 хвилини) подає команду на розігрів дизель-генератора або переведення BESS у стан готовності, що мінімізує перехідні процеси в момент пуску тягових двигунів.

Основою системи моніторингу пропонується зробити аналізатори якості електроенергії серії SATEC (PM175, PNA296), які вже використовуються на тягових підстанціях Укрзалізниці. Ці прилади здатні реєструвати діючі значення струмів та напруг з періодом усереднення від 1 періоду мережі (20 мс), що дозволяє використовувати їх як джерела даних для оперативного прогнозування.

Для дільниці Знам'янка — Кропивницький реалізується алгоритм предиктивного керування на основі даних про рух поїздів. Система EMS отримує дані від диспетчерської централізації про час входження поїзда на блок-ділянку.

Прогнозне навантаження  $P_{pred}(t)$  на інтервалі  $\Delta t$  розраховується як сума базового споживання  $P_{base}$  та очікуваного тягового навантаження, яке визначається за профілем колії:

$$P_{pred}(t + \Delta t) = P_{base}(t) + \sum_{i=1}^N k_{prof}(x_i) \cdot P_{nom}^{train} \cdot \gamma_{load},$$

де  $k_{prof}(x_i)$  — коефіцієнт профілю колії в точці  $x_i$  (підйом/спуск);  $\gamma_{load}$  — коефіцієнт завантаження поїзда.

Розрахунок помилки прогнозу. Для оцінки ефективності алгоритму використовується середня абсолютна похибка у відсотках (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{P_{actual}(t) - P_{pred}(t)}{P_{actual}(t)} \right| \cdot 100\%.$$

Експериментальні дані показують, що використання даних РМУ (Phasor Measurement Units) дозволяє знизити MAPE з 15-20% (класичні методи) до 3-5%, що дозволяє економити паливо ДГУ шляхом уникнення передчасного запуску на холостий хід.

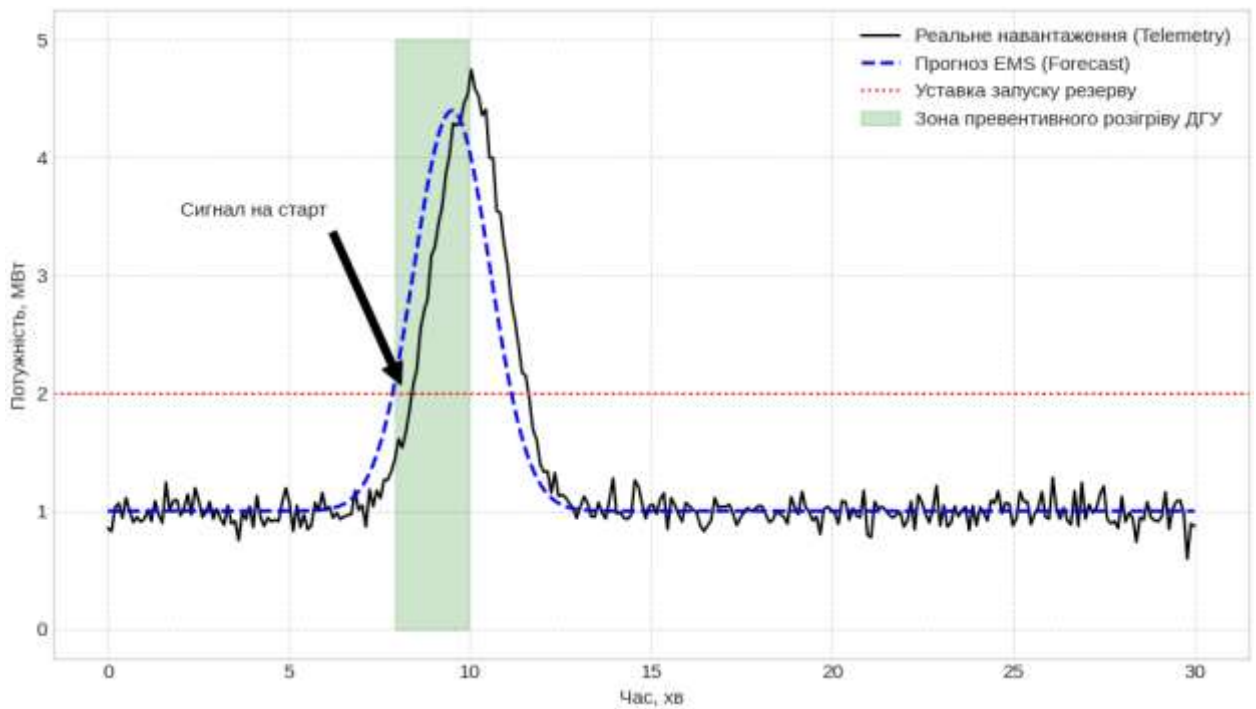


Рисунок 4.5 - Робота алгоритму предиктивного керування резервом

#### 4.4. Рекомендації щодо модернізації існуючих підстанцій до рівня Smart Substation

Реалізація концепції Microgrid на дільниці вимагає технічного переоснащення тягових підстанцій. Враховуючи, що значна частина обладнання є застарілою, модернізація повинна відбуватися комплексно. Рекомендується заміна електромеханічних реле на мікропроцесорні термінали захисту, що підтримують протокол MEK 61850 для швидкого

обміну даними між елементами підстанції та центральним контролером мікромережі.

Важливим елементом модернізації є встановлення фільтрокомпенсуючих пристроїв (ФКП). Оскільки дослідження виявили високий рівень гармонік струму (до 40–50%) та несиметрії напруги, робота чутливої електроніки EMS може бути порушена. Встановлення активних фільтрів на шинах 27,5 кВ дозволить знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальності до нормативних значень, забезпечуючи коректну роботу вимірювальних приладів та подовжуючи термін служби резервних генераторів.

Також, враховуючи схему організації вимірювань у тягових мережах постійного струму, для змішаних ділянок доцільно передбачити уніфіковані інтерфейси збору даних, що дозволить інтегрувати в єдину систему керування як підстанції змінного, так і постійного струму, створюючи гнучку та стійку енергетичну інфраструктуру регіону.

Згідно з даними розділу 3, струм тягового навантаження має виражений спектр непарних гармонік: 3-тя (150 Гц), 5-та (250 Гц), 7-ма (350 Гц). Коефіцієнт гармонік по струму  $THD_I$  досягає 40-50%. Для мікромережі це критично, оскільки внутрішній опір генератора  $X_{d''}$  вищий за опір мережі, що призводить до значного спотворення напруги:

$$U_n = I_n \cdot n \cdot X_{d''}.$$

Для модернізації підстанції "Знам'янка" пропонується встановлення Активного Фільтра Гармонік (APF). Ефективність фільтрації оцінюється за коефіцієнтом зниження THD.

Розрахунок THD:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\%.$$

Якщо до фільтрації струми гармонік становили:  $I_1 = 100$  А,  $I_3 = 30$  А,  $I_5 = 20$  А, то:

$$THD_{before} = \frac{\sqrt{30^2 + 20^2}}{100} = \frac{\sqrt{1300}}{100} = 36\%.$$

Завданням АРФ є генерація струмів у протифазі:  $I_{APF} \approx -(I_3 + I_5)$ .

При ефективності компенсації 90%, залишкові струми складуть:  $I_{3'} = 3$  А,  $I_{5'} = 2$  А.

$$THD_{after} = \frac{\sqrt{3^2 + 2^2}}{100} = \frac{\sqrt{13}}{100} = 3.6\%.$$

Це відповідає нормам ДСТУ EN 62586-1 та ДСТУ ІЕС 61000-4-30 (норма < 10% для напруги, що забезпечується зниженням струмових гармонік).

## Висновки до розділу 4

У четвертому розділі розроблено та обґрунтовано архітектуру системи керування енергією (EMS) для залізничної мікромережі, яка є необхідною умовою для забезпечення надійності електропостачання дільниці Знам'янка — Кропивницький в автономному режимі. Доведено, що висока динаміка зміни тягового навантаження унеможливорює ефективне використання ручного диспетчерського керування, що вимагає впровадження автоматизованих алгоритмів балансування потужності.

Аналіз перехідних процесів показав, що навіть незначна помилка за фазою при комутації може призвести до виникнення ударних струмів, небезпечних для цілісності генераторного обладнання. Впровадження цифрових контролерів із функцією прогнозування моменту замикання контактів вимикача дозволяє реалізувати режим «безшовної» синхронізації, мінімізуючи динамічні збурення в мікромережі.

Встановлено, що високий рівень вищих гармонік струму, характерний для випрямних електровозів, створює додаткові втрати та перегрів в автономних джерелах живлення. Застосування активних фільтрів гармонік, згідно з проведеними розрахунками, дозволяє знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальності струму до нормативних значень, гарантуючи електромагнітну сумісність силового обладнання та надійність роботи мікропроцесорних систем захисту.

## **5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

### **5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при експлуатації гібридних систем електропостачання з розподіленою генерацією**

Впровадження концепції Microgrid на дільниці Знам'янка — Кропивницький, що передбачає інтеграцію резервних дизель-генераторних установок (ДГУ) та літій-іонних систем накопичення енергії (BESS), суттєво змінює карту виробничих ризиків для оперативного та ремонтного персоналу. На відміну від традиційних пасивних мереж, де джерело небезпеки локалізоване на стороні підстанції, гібридні системи характеризуються наявністю розподілених активних елементів, що створює комплекс специфічних небезпечних та шкідливих факторів.

Першочерговим фактором небезпеки є наявність джерел накопиченої електричної енергії високої ємності. Системи BESS, які використовуються для стабілізації напруги, складаються з послідовно-паралельно з'єднаних акумуляторних модулів, що формують шину постійного струму з напругою 600–1500 В. Специфіка постійного струму такої напруги полягає у відсутності переходу через нуль, що значно ускладнює гасіння електричної дуги при комутаціях або пошкодженні ізоляції. Дуга постійного струму є більш стійкою та має вищу температуру порівняно зі змінним струмом, що підвищує ризик термічних опіків персоналу та загоряння обладнання навіть при короткочасних коротких замиканнях. Крім того, акумуляторні батареї завжди знаходяться під напругою, їх неможливо «вимкнути» повністю, що вимагає особливих заходів безпеки при регламентних роботах всередині контейнера BESS.

Друга група факторів пов'язана з хімічною та термічною активністю літій-іонних елементів. Найбільш критичним ризиком є явище «теплового

розгону» (thermal runaway) — екзотермічної реакції всередині комірки, яка може бути спровокована внутрішнім коротким замиканням, перезарядом або механічним пошкодженням. Цей процес супроводжується стрімким підвищенням температури до 600–800 °С та викидом великої кількості токсичних і вибухонебезпечних газів. До складу газової суміші входять чадний газ (CO), водень (H<sub>2</sub>), метан (CH<sub>4</sub>) та, що найбільш небезпечно, фтороводень (HF). Фтороводень при контакті з вологою слизових оболонок людини утворює плавикову кислоту, що викликає тяжкі хімічні опіки дихальних шляхів та очей навіть у незначних концентраціях. Таким чином, персонал піддається ризику хімічного отруєння, яке не характерне для обслуговування класичних трансформаторних підстанцій.

Експлуатація потужних силових інверторів, що забезпечують двосторонній обмін енергією між BESS та мережею змінного струму, генерує третю групу факторів — електромагнітні поля розширеного частотного спектру. Як показали дослідження у третьому розділі, робота інверторів супроводжується генерацією вищих гармонік струму та напруги. Високочастотна комутація IGBT-транзисторів (з частотами 2–10 кГц) створює інтенсивні електромагнітні завади. Тривале перебування персоналу в зоні дії таких полів може негативно впливати на нервову та серцево-судинну системи, а також викликати порушення в роботі імплантованих медичних приладів (кардіостимуляторів). Окрім біологічного впливу, це створює ризик хибного спрацювання пристроїв релейного захисту та автоматики, що є вторинним фактором аварійності.

Робота резервних дизель-генераторних установок додає до переліку ризиків фізичні фактори: підвищений рівень шуму та вібрації. Дизельні двигуни мегаватного класу генерують звуковий тиск на рівні 100–110 дБА, що перевищує санітарні норми для робочих зон без застосування засобів індивідуального захисту слуху. Вібраційний вплив від роботи поршневої групи передається через будівельні конструкції та фундаменти, що може призводити до вібраційної хвороби у персоналу, який постійно знаходиться в

машинному залі. Також слід враховувати токсичність вихлопних газів (оксиди азоту  $NO_x$ , оксид вуглецю CO, сажа), накопичення яких можливе при порушенні роботи систем вентиляції в закритих приміщеннях або контейнерах ДГУ.

Окремим психофізіологічним фактором небезпеки є підвищене нервово-емоційне напруження оперативного персоналу під час ліквідації аварійних ситуацій та переходу в «острівний» режим. Необхідність швидкого прийняття рішень, контроль параметрів синхронізації та усвідомлення високої ціни помилки при ручному втручанні в роботу автоматики створюють передумови для помилкових дій. Ризик ураження електричним струмом у гібридних системах зростає через можливість появи напруги з «несподіваної» сторони (зворотна трансформація), якщо оператор помилково вважає ділянку знеструмленою, не врахувавши активний стан інвертора BESS або автоматичний запуск генератора.

Таким чином, експлуатація залізничної мікромережі вимагає перегляду карт ризиків та впровадження комплексних заходів захисту, які враховують комбіновану дію електричних, хімічних, термічних та фізичних факторів, специфічних для технологій розподіленої генерації.

## **5.2. Вимоги електробезпеки та заходи захисту при обслуговуванні установок з можливістю двостороннього потоком потужності**

Специфіка архітектури Microgrid, реалізованої на дільниці Знам'янка — Кропивницький, полягає у наявності двосторонніх потоків потужності, що докорінно змінює філософію забезпечення електробезпеки. У класичних радіальних мережах відключення ввідного вимикача на підстанції гарантувало знеструмлення всієї лінії, що дозволяло безпечно виконувати ремонтні роботи. В умовах розподіленої генерації відключення основного джерела не означає відсутність напруги на ділянці, оскільки інвертори BESS

або резервні генератори можуть продовжувати живити мережу в «острівному» режимі або через явище зворотної трансформації.

Критичним заходом захисту від ураження електричним струмом у таких системах є впровадження надійного захисту від несанкціонованої «острівної» роботи. Інверторне обладнання повинно мати вбудовані алгоритми, які при зникненні напруги зовнішньої мережі автоматично відключають генерацію протягом часу, що не перевищує 0,5–2 секунди, якщо не надійшла спеціальна команда від системи керування (EMS) на перехід в автономний режим. Для забезпечення видимого розриву, що є обов'язковою умовою допуску до робіт згідно з ПБЕЕ, ланцюги підключення BESS та генераторів повинні бути обладнані роз'єднувачами з механічним блокуванням, які унеможливають подачу напруги в мережу під час проведення ремонтних робіт.

Особливу увагу слід приділити явищу зворотної трансформації. При помилковому включенні інвертора BESS на стороні низької напруги (0,4 кВ або 3,3 кВ) на обмотках вищої напруги силового трансформатора (27,5 кВ або 110 кВ) індукується смертельно небезпечний потенціал. Тому організаційні заходи безпеки повинні включати обов'язкову перевірку відсутності напруги не лише на струмоведучих частинах, що ремонтуються, але й на всіх можливих джерелах живлення, включаючи клеми інверторів та генераторів. Нарядна система допуску має бути адаптована з урахуванням наявності активних споживачів, а оперативні схеми повинні чітко відображати стан комутаційних апаратів розподіленої генерації.

Для захисту персоналу від крокової напруги та напруги дотику в місцях установки модульних систем накопичення енергії контейнерного типу необхідно передбачити контур заземлення зі зниженим опором розтікання струму. Оскільки струми короткого замикання від акумуляторних батарей постійного струму можуть досягати десятків кілоампер і мати аперіодичний характер, переріз заземлюючих провідників повинен розраховуватися на термічну стійкість до таких струмів. Крім того, всі роботи з обслуговування

внутрішніх модулів BESS повинні виконуватися спеціальним ізольованим інструментом (клас ізоляції до 1000 В DC) з використанням засобів індивідуального захисту від електричної дуги (термостійкі костюми, щитки), оскільки повне знеструмлення акумуляторних комірок неможливе.

### **5.3. Організація пожежної безпеки та алгоритми дій персоналу в аварійних ситуаціях із системами накопичення енергії**

Пожежна безпека об'єктів залізничної інфраструктури, оснащених літій-іонними системами накопичення, вимагає застосування специфічних підходів, відмінних від стандартних методів гасіння електроустановок. Як зазначалося в аналізі небезпек, займання BESS часто є наслідком теплового розгону, який характеризується лавиноподібним виділенням тепла та кисню з катодних матеріалів, що робить процес горіння самопідтримуваним навіть за відсутності зовнішнього доступу повітря.

Основою системи протипожежного захисту має стати раннє виявлення ознак передаварійної ситуації. Традиційні димові сповіщувачі є неефективними на стадії зародження теплового розгону. Тому контейнери BESS повинні бути обладнані аспіраційними системами аналізу повітря, здатними детектувати мікроконцентрації газів-маркерів (водню, CO, парів електроліту) задовго до появи відкритого полум'я. При спрацюванні такої сигналізації алгоритм дій автоматики передбачає негайне електричне роз'єднання батарейних стрингів та активацію системи інтенсивної вентиляції для видалення вибухонебезпечної газової суміші, щоб запобігти об'ємному вибуху.

У випадку виникнення відкритого горіння, тактика гасіння залежить від масштабу пожежі. Застосування газових вогнегасних речовин (хладонів, інертних газів) ефективно лише для ліквідації полум'я та захисту допоміжного обладнання, проте вони не здатні зупинити хімічну реакцію

всередині комірок через відсутність охолоджуючого ефекту. Для зупинки теплового розгону найбільш ефективним засобом є вода у великих кількостях, яка подається безпосередньо в модулі через сухі труби або у вигляді тонкорозпиленого туману високого тиску. Це дозволяє знизити температуру комірок нижче критичного рівня розкладання електроліту.

Алгоритм дій персоналу при аварії з BESS повинен базуватися на пріоритеті евакуації та недопущення ураження токсичними продуктами горіння. Категорично забороняється відкривати двері контейнера BESS, з якого йде дим, без засобів захисту органів дихання та спеціального одягу хімічного захисту, оскільки існує висока ймовірність викиду фтороводню та зворотного викиду полум'я. Оперативний персонал зобов'язаний дистанційно знеструмити установку, викликати підрозділи ДСНС, повідомивши про наявність літій-іонних батарей, та організувати евакуацію людей із зони можливого розповсюдження токсичної хмари радіусом не менше 50–100 метрів. Гасіння пожежі пересувними засобами допускається лише з безпечної відстані та за умови гарантованого знеструмлення зовнішніх кіл.

Для дизель-генераторних установок основні заходи пожежної безпеки зосереджуються на запобіганні витоку палива. Машинні зали повинні бути обладнані маслосбірними приямками та автоматичними системами перекриття паливопроводів при спрацюванні пожежної сигналізації.

## Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі проведено детальний аналіз питань охорони праці та безпеки життєдіяльності, пов'язаних із впровадженням технологій Microgrid на залізничному транспорті. Встановлено, що перехід до гібридних систем електропостачання вводить нові класи професійних ризиків, які раніше не були характерними для залізничної енергетики. До них відносяться небезпека ураження постійним струмом високої напруги, хімічні опіки внаслідок витоку електроліту, отруєння високотоксичними продуктами горіння літій-іонних батарей та специфічні ризики, пов'язані з двосторонніми потоками енергії.

Обґрунтовано необхідність перегляду існуючих інструкцій з електробезпеки. Ключовим технічним заходом визначено впровадження автоматичного захисту від несанкціонованої «острівної» роботи та блокування зворотної трансформації для запобігання подачі напруги на відключені ділянки мережі. Організаційні заходи повинні включати сувору регламентацію допуску до робіт з урахуванням стану розподіленої генерації та використання спеціалізованих засобів захисту від термічного впливу електричної дуги постійного струму.

У сфері пожежної безпеки доведено недостатність стандартних засобів пожежогасіння для ліквідації загорянь систем накопичення енергії. Запропоновано концепцію багаторівневого захисту, що включає раннє виявлення газів-маркерів теплового розгону, автоматичну вентиляцію для запобігання вибуху газоповітряної суміші та використання води як основного охолоджуючого агента для зупинки ланцюгової реакції в акумуляторних комірках. Розроблені рекомендації дозволяють мінімізувати ризики для персоналу та забезпечити безпечну експлуатацію інноваційного обладнання в умовах модернізації залізничної інфраструктури.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення надійності та ефективності системи електропостачання залізничної інфраструктури шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи резервних джерел живлення в рамках концепції Microgrid.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

На основі детального аналізу енергетичної інфраструктури залізничного транспорту встановлено, що традиційні схеми централізованого живлення вичерпали свій ресурс надійності. В умовах воєнного стану та ризиків пошкодження магістральних мереж, існуюча система не здатна гарантувати безперебійність перевізного процесу. Доведено, що безальтернативним напрямком модернізації є перехід до архітектури Microgrid («енергетичних островів»), яка передбачає інтеграцію розподіленої генерації та систем накопичення енергії. Це дозволяє забезпечити автономне функціонування критичних ділянок навіть при повному знеструмленні зовнішньої енергосистеми.

Отримала подальший розвиток математична модель режимів роботи тягової мережі. Шляхом адаптації методу просторово-часового представлення навантажень, відомого з базових досліджень, розроблено методику розрахунку балансу потужностей для «острівного» режиму роботи. Новизна підходу полягає у врахуванні обмеженої потужності та високого внутрішнього опору резервних джерел, що дозволило підвищити точність розрахунку миттєвих значень напруги на струмоприймачах електровозів та оцінити динамічну стійкість системи.

Чисельне моделювання електромагнітних процесів на ділянці довжиною 50 км виявило ряд критичних обмежень консольної схеми резервного живлення. Встановлено, що при живленні лише від вузлової станції Знам'янка напруга у віддалених точках (район ст. Кропивницький) під

час руху поїзда може знижуватися до 23,1 кВ, що є гранично допустимим для стійкої роботи тягових перетворювачів. Крім того, втрати активної потужності в такому режимі зростають у 2,5–3 рази, а споживання реактивної потужності досягає 2,8 Мвар. Це обґрунтовує необхідність встановлення компенсуючих пристроїв або систем накопичення енергії (BESS) в кінці фідерної зони.

Експериментальні дослідження підтвердили наявність значних спотворень якості електроенергії в тягових мережах змінного струму. Виявлено високий рівень вищих гармонік струму (THD до 40–50%), що створює загрозу перегріву та виходу з ладу автономних генераторів. Обґрунтовано необхідність застосування активних фільтрів гармонік на тягових підстанціях, що дозволяє знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальності до нормативних значень та забезпечити електромагнітну сумісність обладнання.

Розроблено алгоритми автоматизованої системи керування енергією (EMS), які включають стратегії згладжування піків навантаження та регулювання напруги. Доведено, що використання даних про рух поїздів та технології векторних вимірювань дозволяє реалізувати предиктивне керування резервом, завчасно готуючи генератори до накиду навантаження. Запропоновано технічні рішення для «безшовної» синхронізації мікромережі із зовнішньою системою, що виключає виникнення небезпечних ударних струмів при комутаціях.

Проведено ідентифікацію нових виробничих ризиків, пов'язаних із впровадженням гібридних систем електропостачання. Розроблено рекомендації щодо захисту персоналу від ураження струмом при двосторонньому живленні та заходи пожежної безпеки для літій-іонних систем накопичення, що включають раннє виявлення газів теплового розгону. Це дозволяє мінімізувати ризики виникнення техногенних аварій при експлуатації інноваційного обладнання.

Таким чином, результати роботи підтверджують, що трансформація залізничної енергетики на основі принципів Microgrid є технічно можливою та економічно виправданою стратегією, яка забезпечує енергетичну незалежність та стійкість перевізного процесу в умовах сучасних викликів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. — [Чинний від 2014-11-01]. — К. : Мінекономрозвитку України, 2014. — 26 с. URL: <https://www.en.net.ua/normativ/dstu-en-50160-2014-harakterystyky-naprugy-elektropostachannya-v-elektrychnyh-merezhah-zagalnogo-pryznachennya>
2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — К. : Держстандарт України, 1999. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=55672](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=55672)
3. IEEE Std 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/1547/5915/>
4. IEEE Std 2030-2011. IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6018239>
5. Сиченко В. Г., Саєнко Ю. Л., Босий Д. О. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія. — Дніпропетровськ: ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015. — 344 с. URL: <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/4088>
6. Босий Д. О. Інтелектуальні системи в керуванні режимами систем тягового електропостачання електрифікованих залізниць // Технічна електродинаміка. — 2015. — № 4. — С. 76-80. URL: [http://technd.org.ua/2015\\_4/st13.pdf](http://technd.org.ua/2015_4/st13.pdf)
7. Сиченко В. Г., Косарев Є. М. Удосконалення методології розрахунку розподіленої системи тягового електропостачання з підсилюючим пунктом // Електрифікація транспорту. — 2014. — № 8. — С. 15–25. URL: <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/3789>
8. Кузнецов В. Г., Босий Д. О. Оптимізація втрат електроенергії в контактній мережі залізничного транспорту // Праці Інституту електродинаміки НАН України. — 2012. — Вип. 33. — С. 18–22. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/54432>
9. Галицька О. С. Дослідження метрологічних характеристик електронних лічильників в системі електропостачання з тяговими навантаженнями: магістерська робота. — Кропивницький: ЦНТУ, 2021.

10. Hayashiya, H. (2021). "Microgrids in Railway Power Supply Systems: Concept and Applications." *IEEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/19314973>
11. Aguado, J. A., Sánchez Racero, A. J., & de la Torre, S. (2018). "Optimal Operation of Electric Railways with Renewable Energy and Electric Storage Systems." *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 993-1001. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7565732>
12. Ciccarelli, F., Iannuzzi, D., & Tricoli, P. (2020). "Control of Metro-Trains Equipped with On-Board Supercapacitors for Energy Saving and Reduction of Power Peak Demand." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 36-49. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X1200160X>
13. Ghaviha, N., Campillo, J., Bohlin, M., & Dahlquist, E. (2017). "Review of Application of Energy Storage Systems in Railway Transportation." *Energy Procedia*, 105, 4561-4568. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021732678X>
14. Khayyam, H., et al. (2019). "Power Management of a Stand-Alone Railway Station Microgrid Using a Hybrid Energy Storage System." *Energies*, 12(23), 4526. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/23/4526>
15. Krastev, I., Tricoli, P., & Hillmansen, S. (2021). "Future of Railway Traction Power Supply Systems: The Role of Microgrids." *IEEE Electrification Magazine*, 4(3), 6-12. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7562369>
16. Sengor, I., Kilickiran, H. C., Akdemir, H., Kekezoglu, B., Paterakis, N. G., & Catalão, J. P. S. (2018). "Energy Management of a Smart Railway Station Considering Regenerative Braking and Stochastic Behaviour of Loads." *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(3), 1041-1050. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8123512>
17. Teymour, H. R., Sutanto, D., Muttaqi, K. M., & Ciufo, P. (2022). "Solar PV and Battery Storage Integration into DC Traction Power Systems." *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(4), 1378-1386. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6842603>
18. Денисюк С. П. Енергетична безпека та перехід до інтелектуальних енергетичних мереж // Технічна електродинаміка. — 2022. — № 3. — С. 45–52. URL: <http://techned.org.ua/>
19. Кириленко О. В., Блінов І. В., Парус С. В. Інтелектуальні енергетичні мережі: світовий досвід та перспективи України // Технічна електродинаміка. — 2020. — № 1. — С. 46–56. URL: [http://techned.org.ua/2020\\_1/st7.pdf](http://techned.org.ua/2020_1/st7.pdf)

20. Terzija, V., Valverde, G., Cai, D., et al. (2011). "Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks." *Proceedings of the IEEE*, 99(1), 80-93. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5613243>
21. Phadke, A. G., & Thorp, J. S. (2008). *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. Springer. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-76537-2>
22. SATEC Inc. (2023). PM175/PNA296 Power Quality Analyzer User Manual. URL: <https://www.satec-global.com/products/>
23. Баженов В. А., Кочмарский В. З. Підвищення надійності систем електропостачання залізниць в умовах надзвичайних ситуацій // Залізничний транспорт України. — 2023. — № 2. — С. 22–28. URL: <http://zaliznj.com.ua/>
24. Popescu, M., & Bitoleanu, A. (2019). "A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems." *Energies*, 12(6), 1092. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/6/1092>
25. Abrahamsson, L., Soder, L., & Ostlund, S. (2012). "Interaction between the traction system and the feeding public grid under normal and emergency conditions." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954409712445112>
26. Ogunsola, A., & Mariscotti, A. (2012). *Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management*. Springer Berlin Heidelberg. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-30281-7>
27. Brenna, M., & Foiadelli, F. (2020). "Analysis of the Voltage Profile in a High Speed Railway Line with Periodic Nodal Analysis." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(9). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014206151000142X>
28. MATLAB/Simulink Documentation. "Simscape Electrical: Power Systems Simulation." MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/>
29. Wang, Q., et al. (2019). "Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium-ion Battery." *Journal of Power Sources*, 424, 73-83. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877531930332X>
30. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98>
31. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. URL: <https://dbn.co.ua/normativ/dbn-v-2-5-56-2014>

32. Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2016). "Lithium-Ion Battery Safety: Thermal Runaway and Gas Emissions." *Journal of The Electrochemical Society*. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0121714jes>
33. International Energy Agency (IEA). "Railway Handbook 2023: Energy Consumption and Efficiency." URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>
34. Стратегія АТ «Укрзалізниця» на 2019-2023 роки (оновлена в частині енергоефективності). URL: <https://www.uz.gov.ua/about/strategy/>
35. BloombergNEF (BNEF). "Battery Price Survey 2023." (Статистика цін на BESS). URL: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>