

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КОСАРЄВ ЄВГЕН МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 621.331

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

Спеціальність: 05.22.09 – електротранспорт

Галузь знань: 27 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

Науковий керівник Сиченко Віктор Григорович, доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2018

## АНОТАЦІЯ

Косарев Є. М. Покращення режиму напруги в системі тягового електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт (27 – транспорт). – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена науково-прикладній задачі покращення режиму напруги шляхом зменшення діапазону її зміни на струмоприймачах електрорухомого складу в децентралізованій системі живлення. У роботі проаналізовано режими напруги в системі живлення електричного транспорту постійного струму та встановлено, що сучасний стан тягового електропостачання постійного струму не в змозі забезпечити необхідний рівень питомої потужності тягової мережі. Розробки українських та закордонних вчених по підсиленню систем тягового електропостачання постійного струму, в основному, орієнтовані лише на технічне переоснащення. Тому необхідна розробка заходів з покращення режиму напруги в системі електропостачання залізничного транспорту, які б забезпечували перехід до нової енергоефективної схемотехніки живлення тягової мережі з децентралізацією генеруючих потужностей.

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

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

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

На основі розробленої моделі розрахунку розподіленої системи тягового електропостачання удосконалено сенсорний метод оптимізації визначення місця установки підсилюючого пункту, що дозволяє при забезпеченні заданого рівня напруги на струмоприймачі електрорухомого складу зменшити витрати електроенергії на тягу поїздів та втрати потужності в тяговій мережі при мінімізації встановленої потужності підсилюючих пунктів.

Визначено технічні параметри системи розподіленого електропостачання та визначено раціональний рівень обмеження мінімального значення напруги в контактній мережі, який обумовлений напругою на шинах суміжних тягових підстанцій і визначається за критерієм мінімуму втрат електроенергії в тяговій мережі. Техніко-економічні розрахунки показали, що запропонована модернізація системи електричної тяги постійного струму, маючи відносні капіталомісткі витрати, характеризується строком окупності до 4,5 років.

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

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

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

Розроблені методики та практичні підходи для зменшення діапазону зміни напруги на струмоприймачі електрорухомого складу прийнято до використання службами електропостачання регіональних філій «Львівська залізниця» та «Південна залізниця». Результати роботи у вигляді математичної моделі впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та використовуються при підготовці бакалаврів і магістрів зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Ключові слова:** режим напруги, система тягового електропостачання, постійний струм, розподілене електропостачання, пункт підсилення, рівень напруги, діапазон зміни напруги, втрати потужності, альтернативні джерела електроенергії.

## ABSTRACT

Kosariev Ye. M. Voltage mode improvement in the DC traction power supply system of the electrified railways – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

The dissertation for the PhD degree in specialty 05.22.09 - electric transport (27 - transport). - Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2018.

The dissertation studies the scientific and applied issues of supplying a particular range of voltage changes on the current collector of the electric motive power at the decentralized power system. The work analyzes the power supply system of the DC voltage mode of electric transport. The experiments show that the actual DC traction power supply is not capable of providing the sufficient traction network power while implementing the high-speed traffic. The researches of

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

The mathematical model allows performing calculations of the distributed traction power supply system with alternative sources of electric power. It involves using the regularities of the change in the traction network resistance with any number of traction substations and boost points. In combination with the functions of current distribution and the distribution of subsystem potentials make it possible to formalize electrotechnical calculations of electric traction systems and proceed from discrete to continuous representation.

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

The system of limiting the minimum voltage level on the current collector of the electric motive power is recommended to narrow the voltage variation range and reduce power losses in the traction network for 30 % depending on the density of the train table, it also ensures the saving of electric power consumption for the trains traction up to 30 %.

On the basis of the developed model for calculating the distributed traction power supply system, the sensory method was improved for optimization the location of the boost point installation. This method allows reducing the electric power consumption for trains traction and power losses in the traction network while minimizing the installed power of the boost points providing voltage level on the current collector of the electric motive power.

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

network. The feasibility and economic calculations have shown that the modernization of the DC electric traction system, having relative capital-intensive costs, is characterized by a payback period for 4.5 years.

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

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

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

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

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Основні положення і результати дисертації опубліковано

#### у виданнях, що індексуються *Scopus*:

1. E. M. Kosarev, V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, «Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current», *Archives of Transport*, vol. 35, iss. 3, pp. 63 - 70, 2015.

2. Ye. Kosariev, D. Bosiy, «Modeling of the controlled traction power supply system in the space-time coordinates», *Transport Problems*, vol. 12 (3), pp. 5 - 19, 2017.

3. Ye. Kosariev, D. Bosiy, O. Sablin, I. Khomenko, I. Kebal, S. Myamlin, «Intelligent technologies for efficient power supply in transport systems», *Transport Problems*, vol. 12 (SE), pp. 57 - 71, 2017.

#### у закордонних виданнях:

4. E. N. Косарев, Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, М. С. Пастушенко, «Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии», *Problemy Kolejnictwa*, iss. 162, pp. 65 - 82, 2014.

5. E. Kosarev, D. Bosiy, «Calculation of the Traction Power Supply Systems Using the Functions of Resistance», *Problemy Kolejnictwa*, iss. 168, pp. 7 - 14, 2015.

6. E. N. Косарев, Д. А. Босый, «Особенности выполнения автоматизированных расчетов систем тягового электроснабжения постоянного тока», *Вестник БелГУТа*, №1(34), с. 18 - 22, 2017.

#### у фахових виданнях:

7. E. N. Косарев, В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, «Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающим пунктом», *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, сп. вып., т. 2, с. 8 - 18, 2014.

8. Є. М. Косарєв, «Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму», *Електрифікація транспорту*, № 9, с. 37 - 43, 2015.

9. Є. М. Косарев, В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, «Оптимізація керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму з пунктами підсилення», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 95 - 103, 2015.

10. Е. Н. Косарев, Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, [и др.], «Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей», *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, № 30, т. 2, с. 98 - 108, 2015.

11. Є. М. Косарев, В. Г. Сиченко, П. В. Губський, [та ін.], «Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму», *Електрифікація транспорту*, № 11, с. 61 - 70, 2016.

12. Є. М. Косарев, О. І. Саблін, Д. О. Босий, [та ін.], «Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 73 - 79, 2016.

13. Є. М. Косарев, В. Г. Сиченко, А. М. Муха, К. О. Хань, «Розробка керованого підсилюючого пункту для розподіленої системи тягового електропостачання», *Електротехніка і електромеханіка*, № 4 (1), с. 89 – 94, 2016.

14. Є. М. Косарев, В. В. Замаруєв, Б. О. Стисло, «Покращення якості електричної енергії в системі електроживлення залізничного транспорту шляхом застосування накопичувачів електричної енергії.» *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, № 27 (1249), с. 360 - 364, 2017.

15. Є. М. Косарев, «Математична модель керованої розподіленої системи тягового електропостачання постійного струму», *Електрифікація транспорту*, № 14, с. 15 - 27, 2017.

#### **Додаткові праці**

**тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій:**

16. Є. М. Косарев, Д. О. Босий, «Необхідність застосування керованих підсилюючих пунктів для стабілізації напруги уздовж електрифікованої ділянки постійного струму», на *74 Міжнар. науково-практ. конф. Проблеми*



*та перспективи розвитку залізничного транспорту*, Дніпропетровськ, 2014, с. 150 - 151.

17. Є. М. Косарев, Д. О. Босий, «Проблеми ефективного використання сонячної енергії в системах тягового електропостачання постійного струму», на *V міжнар. науково-практ. конф. Енергозбереження на залізничному транспорті та у промисловості*, Воловець, 2014, с. 31 - 32.

18. Є. М. Косарев, «Стабілізація напруги на заданому рівні в тяговій мережі електрифікованих залізниць постійного струму», на *VI міжнар. науково-практ. конф. Енергозбереження на залізничному транспорті та у промисловості*, Воловець, 2015, с. 66 - 67.

19. E. M. Kosarev, V. G. Sychenko, D. O. Bosyy, «Analysis the indicators of the electric energy quality in the electric traction systems» in *Advanced rail technologies*, Warszawa, 2015, pp. 125.

20. E. M. Kosarev, D. O. Bosiy, «Modeling of the traction power supply system in the space-time coordinates» на *VIII міжнар. науково-практ. конф. Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2015»*, Одеса, 2015, с. 13.

21. E. N. Kosarev, «Распределенная система тягового электроснабжения для электрифицированных участков постоянного тока», на *VII междунар. научно-практ. конф. Проблемы безопасности на транспорте*, Гомель, 2015, с. 46.

22. E. N. Kosarev, Д. А. Босый, «Автоматизация расчетов системы тягового электроснабжения постоянного тока», на *I міжнар. науково-практ. конф. Енергооптимальні технології перевізного процесу*, Моршин, 2016, с. 74.

23. Є. М. Косарев, А. С. Чумаченко, «Інтеграція фотоелектричних джерел енергії з накопичувачами в мережі електрифікованого залізничного транспорту», на *IX міжнар. науково-практ. конф. Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2016»*, Дніпро, 2016, с. 13.

24. Ye. Kosariev, «Advantages of wayside energy storage systems for dc traction applications», на *II міжнар. науково-практ. конф. Енергооптимальні технології перевізного процесу*, Львів, 2017, с. 21.

25. Ye. Kosariyev, V. Sychenko, M. Pulin, «Simulation model of the distributed system of DC traction power supply with solar generation» in *Advanced rail technologies*, Warszawa, 2017, p. 119.

**охоронні документи:**

26. Є. М. Косарєв, В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, «Спосіб стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму», *МПК H02J 1/00, H02J 13/00. № U201412905*, Квіт. 27, 2015.

27. Є. М. Косарєв, Д. О. Босий, «Комп'ютерна програма «Інтелектуальна система електропостачання транспорту» (Intelligence System of Electrified Transport)», *№ 60711*, Лип. 20, 2015.

## ЗМІСТ

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

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

## ВСТУП

### Актуальність обраної теми

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

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

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

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

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

при впровадженні швидкісного руху. При цьому коефіцієнт використання режимної потужності та обладнання тягових підстанцій при забезпеченні графіка інтенсивного руху поїздів не перевищує 25 %, а втрати енергії в тяговій мережі при пікових навантаженнях збільшуються і досягають 10-15 % від споживаної енергії [4]. Великі значення струмових навантажень в СТЕ постійного струму призводять до більш суттєвих втрат напруги в контактній мережі і, в свою чергу, до неможливості забезпечення заданого рівня напруги на струмоприймачі ЕРС. Моральний та технічний знос пристроїв тягового електропостачання призводить до неможливості збереження параметрів напруги та струму живлячої мережі. Головним обмежуючим фактором цього є централізована система електропостачання, яка передбачає зосередження потужності на тягових підстанціях, розташованих на певній відстані, та живлення електрорухомого складу за двосторонньою схемою. Таким чином, при русі тягового навантаження, втрати напруги набувають значної ваги в залежності від питомого опору тягової мережі, струмового навантаження, схеми живлення контактної мережі та довжини міжпідстанційної зони [5].

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

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

електропостачання залізничного транспорту, яка б забезпечувала перехід до нової енергоефективної схемотехніки живлення з децентралізацією генеруючих потужностей. В сучасних умовах експлуатації електрифікованих залізниць це є актуальною задачею і потребує наукового вирішення.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Робота виконана відповідно до таких державних програм:

1) Державна Програма енергонезалежності, ухвалена указом Президента України № 5/2015 Про стратегію сталого розвитку «Україна – 2020» від 12.01.2015 р., в частині забезпечення енергетичної безпеки і переходу до енергоефективного та енергоощадного використання та споживання енергоресурсів із впровадженням інноваційних технологій;

2) Енергетична стратегія України на період до 2030 р., схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 24.07.2013, в частині:

- розвитку електроенергетичної галузі;
- розширення пропускної спроможності залізничних коридорів.

3) Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, ухвалена Постановою Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р. (із змінами, внесеними згідно з Постанови № 970), в частині

- підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту на внутрішньому і зовнішньому ринку транспортних послуг;
- зменшення обсягу питомих витрат енергоресурсів на тягу поїздів;

4) Постанова Верховної Ради України «Про програму діяльності Кабінету Міністрів України» № 26-VIII від 11.12.2014 р. стосовно:

розділу 6 «Нова продовольча політика», а саме розвиток портової та залізничної інфраструктури для нарощування експорту (2015-2019 роки);

розділу 7 «Нова політика енергетичної незалежності», а саме інтеграція української енергосистеми в мережу європейських енергосистем ENTSO-E та підвищення енергоефективності за рахунок реалізації проектів з використанням альтернативних джерел енергії (Clean Energy).



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

- «Проведення досліджень та розробка рекомендацій щодо особливостей приєднання сонячних та вітрових електростанцій до тягових підстанцій електрифікованих залізниць» (№ 0113U007948);
- «Дослідження раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії та дослідження балансу електричної енергії в умовах спотворення її якості на тягових підстанціях постійного та змінного струму» (№ 0113U007949);
- «Дослідження раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії» (№ 0115U003918);
- «Дослідження режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій постійного струму та в тяговій мережі в умовах гірського перевалу» (№ 0115U003921)
- «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту» (№ 0115U002311)
- «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем» (№ 0116U006982).
- «Розробка енергоефективної технології сумісної роботи системи централізованого тягового електропостачання та системи розподілених альтернативних джерел електроенергії» (№ 0117U004481)

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

### **Мета і завдання дослідження**

Покращення режиму напруги в системі тягового електропостачання постійного струму шляхом зменшення її діапазону зміни на струмоприймачі електрорухомого складу в децентралізованій системі живлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові задачі:

1. дослідити режими напруги в системі тягового електропостачання постійного струму;
2. удосконалити метод розрахунку напруги на струмоприймачі електрорухомого складу при розподіленій системі тягового електропостачання;
3. розробити теоретичні та практичні підходи до побудови енергоефективної системи тягового електропостачання з поліпшеним режимом напруги;
4. провести техніко-економічне обґрунтування розробленої системи розподіленого живлення для покращення режиму напруги.

**Об'єкт дослідження** – процес передачі електричної енергії електрорухомому складу електрифікованих залізниць.

**Предмет дослідження** – режими напруги на струмоприймачі електрорухомого складу.

**Методи дослідження.** В роботі використано: аналіз літературних та електронних джерел для визначення стану енергоефективності електропостачання електрифікованих залізниць; експериментальні вимірювання та статистичний аналіз для оцінки режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму; теоретичні та практичні дослідження, чисельні методи розрахунку та імітаційне моделювання для розвитку методів розрахунку режимів систем тягового електропостачання; техніко-економічний аналіз для обґрунтування застосування розробленої системи. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана на ЕОМ з використанням прикладних програмних засобів MS Excel, MathCad, LabView та Matlab. Імітаційне моделювання виконувалось у програмному середовищі iSET та Matlab.

## **Наукова новизна одержаних результатів роботи**

1. Вперше встановлено вплив обмеження напруги в тяговій мережі на втрати електроенергії в системі тягового електропостачання та визначено рівні напруги, які дозволяють при паралельній роботі тягових підстанцій і підсилюючих пунктів забезпечити енергооптимальний режим роботи електрифікованої ділянки.

2. Отримав подальший розвиток метод розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання оснований на функціях опору, що відрізняється можливістю врахування паралельної роботи ряду тягових підстанцій і підсилюючих пунктів в складі децентралізованої системи електропостачання, врахуванням споживання і генерації потужності на сусідніх міжпідстанційних зонах та можливістю розрахунку більшої кількості джерел живлення з різними внутрішніми опорами, що дозволяє проводити розрахунки при примусовому розподілі потужності;

3. Отримав подальший розвиток сенсорний метод пошуку в застосуванні до визначення раціонального розташування підсилюючих пунктів, що дозволяє визначити найбільш слабку точку тягової мережі, розташування підсилюючого пункту в якій дозволяє зменшити втрати потужності при забезпеченні заданого рівня обмеження напруги та максимізувати ефективність використання підсилюючих пунктів.

## **Практичне значення одержаних результатів**

Отримані в дисертації результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили створити передумови для:

1. звуження діапазону зміни напруги на струмоприймачах електрорухомого складу з 793 В до 241 В завдяки встановленню на міжпідстанційній зоні підсилюючих пунктів, які забезпечують раціональний перерозподіл потоків потужності в тяговій мережі;

2. досягнення максимально можливого зменшення добових втрат електроенергії в тяговій мережі з 12,1 до 7,97 МВт·год за рахунок обмеження

напруги в контактній мережі на рівні, який складає на 7 % нижче рівня напруги холостого ходу тягових підстанцій.

3. визначення оптимального місця розташування підсилюючих пунктів вздовж міжпідстанційної зони, що дозволило зменшити їх встановлену потужність до 14 % в порівнянні з розташуванням на існуючих постах секціонування;

4. зменшення споживання електричної енергії з системи зовнішнього електропостачання до 33 % за рахунок живлення підсилюючих пунктів від джерел альтернативної енергії та використання батарейної системи накопичення.

Розроблені методики та практичні підходи для звуження діапазону зміни напруги на струмоприймачі електрорухомого складу прийнято до використання службою електропостачання регіональної філії «Львівська залізниця». Результати роботи впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та використовуються при підготовці бакалаврів і магістрів зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

### **Особистий внесок здобувача**

Постановка мети та задачі дослідження виконані спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, виконані в дисертаційній роботі, отримано дисертантом самостійно. У роботах, які написані в співавторстві, автору належать [1] – постановка задач для синтезу системи, методологія виконання розрахунків; [2] – принцип розрахунку розподілу втрат напруги в тяговій мережі, принцип генерації додаткового струму підсилюючим пунктом; [3] – теоретичні підходи до впровадження накопичувачів та альтернативних джерел живлення на залізничному транспорті; [4] – отримання виразів для розрахунків потужності підсилюючих пунктів різних варіантів підсилення тягової мережі; [5] – постановка задачі, проведення розрахунків; [6] – методологія виконання розрахунків, виведення формул та їх узагальнення; [7] – розробка алгоритму визначення струму

підсилюючого пункту та його граничних значень, оптимізація розташування підсилюючого пункту; [9] – проведення варіантних розрахунків, аналіз та узагальнення результатів; [10] – аналіз попередніх досліджень та отриманих результатів; [11] – аналіз результатів вимірювання режимів напруги; [12] – аналіз результатів вимірювань на тягових підстанціях; [13] – розробка топології підсилюючого пункту та визначення його параметрів, проведення імітаційного моделювання; [14] – постановка задачі дослідження, розрахунок струмів підсилюючих пунктів, [16] – розробка керованого підсилюючого пункту; [17] – аналіз проблеми узгодження режимів роботи сонячної електростанції та системи тягового електропостачання; [19] – проведення варіантних розрахунків; [20] – побудова структури моделі, виведення розрахункових формул; [22] – аналіз існуючих методів розрахунку систем тягового електропостачання; [23] – аналіз існуючих систем накопичення електричної енергії; [25] – розробка імітаційної моделі; [26] – формування ідеї способу, проведення розрахунків; [27] – побудова розрахункових алгоритмів.

Роботи [8, 15, 18, 21, 24] – написані самостійно, без співавторів.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і одержали схвалення на наступних вітчизняних та міжнародних конференціях:

74 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ 2014); V, VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості» (Воловець 2014, 2015); VIII, IX Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро» (Одеса 2015, Дніпро 2016); IV, VI Міжнародна науково-практична конференція «Advanced rail technologies» (Warsaw 2015, 2017); VII Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми безпеки на транспорті» (Гомель 2015); I, II Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології перевізного процесу» (Моршин, 2016, Львів 2017); XXII Міжнародна науково-практична конференція

«Силова електроніка та енергоефективність» (Одеса 2016); XIII науково-технічна конференція «Підвищення енергоефективності та надійності енергосистем і електромереж України» (Харків 2016); VI International Symposium of Young Researchers (Katowice 2017).

### **Публікації**

Основний зміст дисертації опублікований у 27 наукових працях і матеріалах конференцій: 15 основних праць, з них: 3 – статті у журналах, що індексуються Scopus, 3 – статті в закордонних виданнях, 9 – статей у фахових виданнях; і 12 додаткових, з них: з них 1 – патент на корисну модель, 1 – свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерна програма), 10 – тези доповідей та матеріали конференцій.

### **Структура й обсяг роботи**

Дисертація складається із анотації українською і англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний текст роботи викладений на 138 сторінках, містить 82 рисунки за текстом і 21 таблицю. Список літературних джерел із 155 найменувань займає 16 сторінок. Додатки займають 33 сторінки. Повний обсяг дисертації складає 188 сторінок.

## 1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Режими напруги в системі тягового електропостачання постійного струму

Визначення режиму напруги в системі тягового електропостачання і оцінка його впливу на роботу електрорухомого складу і пристроїв електропостачання є одним з найбільш важливих завдань при побудові сучасної системи електроживлення залізничного транспорту. Від режиму напруги залежать такі параметри, як швидкість руху поїзда, зміна струму і тягового зусилля електровоза, можливість подолання інерційних підйомів, навантаження і робота окремих пристроїв електропостачання [6, 7, 8]. Режим напруги залежить від великої кількості взаємопов'язаних і взаємовпливаючих факторів. Насамперед, це якість напруги, режими роботи системи зовнішнього електропостачання, кількість електрорухомого складу на фідерній зоні, параметри системи тягового електропостачання та режим ведення кожного електровоза [9, 10]. У свою чергу, кожний із зазначених факторів залежить від певних чинників. Так, наприклад, режим ведення електровозу залежить від кваліфікації і досвіду машиніста, профілю ділянки, ваги поїзда, його складу і типу електровозу. Нормований рівень напруги в тяговій мережі електрифікованої ділянки забезпечує рух поїздів з необхідною економічно доцільною швидкістю, встановленою умовами пропускну здатності. Такий режим забезпечує регламентовані витрати енергії на тягу з урахуванням втрат в системі електропостачання, необхідну надійність роботи електрорухомого складу (ЕРС) та пристроїв електропостачання [6]. Робота ділянки при вимушеному режимі напруги призводить до необхідності використання резервної потужності і перевантаження обладнання тягових підстанцій. При цьому напруга на струмоприймачах стає нижчою допустимого рівня і виникає необхідність у зниженні розмірів руху та збільшенні інтервалу між поїздами.

Таким чином, режим напруги є важливим показником режиму роботи системи тягового електропостачання, що відображає якість електричної

енергії і впливає на надійність електропостачання споживачів, енергоефективність та економічність роботи СТЕ.

Великий внесок в дослідження режимів напруги в енергетичних системах зробили: П. Д. Андрієнко, Б. О. Аржанніков, М. П. Бадьор, В. Д. Бардушко, В. А. Веніков, С. В. Власьєвський, Л. А. Герман, Г. К. Гетьман, Ю. П. Гончаров, О. Г. Гриб, С. П. Денисюк, А. Ф. Жаркін, І. В. Жежеленко, В. П. Закарюкін, І. І. Карташов, О. В. Кириленко, М. О. Костін, В. Г. Кузнецов, П. Д. Лежнюк, Р. Р. Мамошин, А. М. Марикін, К. Г. Марквардт, Р. І. Мірошніченко, М. В. Панасенко, Е. С. Почаєвець, Ю. Л. Саєнко, М. С. Сегеда, О. М. Сінчук, О. І. Стасюк, В.Т. Черемісін, Akagi H., A. D. Graham, R. Lamedica, A. Mariscotti, A. Rojek, A. Szelag, V. Calderaro, V. Galdi, Zheng Xu та інші.

Режим напруги на шинах тягової підстанції визначається рівнями напруги, регламентованими [11, 12, 13], та впливає на експлуатаційні характеристики функціонування електрифікованих залізниць і залежить як від навантаження, так і від коливань напруги системи зовнішнього електропостачання, але різкозмінний характер навантаження призводить до умовності застосування нормованих рівнів. Покращення режиму напруги системи тягового електропостачання можливе за рахунок впровадження пристроїв регулювання (стабілізації) напруги на шинах тягових підстанцій. Застосування на тягових підстанціях пристроїв автоматичного регулювання та керованих перетворювальних агрегатів зі стабілізацією вихідної напруги дозволяє ліквідувати вплив коливань живлячої енергосистеми та падіння напруги на внутрішньому опорі тягових підстанцій [14]. Проведені електричні розрахунки системи тягового електропостачання постійного струму на двоколіній ділянці довжиною 134 км з 8-тяговими підстанціями (7 МПЗ) [15] показали наступне. При пропуску у парному напрямку поїздів масою 5000 т з міжпоїзним інтервалом 10 хв та в непарному напрямку пакету поїздів з 10-ти хвилинним інтервалом в пакеті 6300 т – 6300 т – 6300 т з електровозами 1,5×ВЛ11– 1,5×ВЛ11 – 1,5×ВЛ11, 2×2ЭС6 – 2×2ЭС6 – 2×2ЭС6, 2×2ЭС10 –



2×2ЭС10 – 2×2ЭС10 з напругою тягових підстанцій  $U_{ХХ} = 3500$  В (без регулювання) напруга на струмоприймачах ЕРС опускалась нижче нормованого рівня ( $U_{КМ} < 2700$  В). При стабілізації напруги на тягових підстанціях на рівні  $U_{СТ} = 3500$  В всі поїзди проходять ділянку з напругою  $U_{КМ} > 2700$  В. При проходженні на цій ділянці швидкісного поїзда Velaro зі швидкістю 300 км/год напруга на струмоприймачах ЕРС опускалась нижче нормованого рівня ( $U_{КМ} < 2900$  В) при напрузі тягових підстанцій  $U_{ХХ} = 3500$  В без регулювання, при стабілізації напруги на тягових підстанціях  $U_{СТ} = 3500$  В поїзд проходив ділянку з мінімальною напругою 2922 В. У вимушеному режимі роботи ділянки при п'яти тягових підстанціях швидкісний поїзд не проходить ділянку зі швидкістю 200 км/год навіть при підвищенні стабілізованої напруги до максимального рівня 3800 В.

Впровадження швидкісного руху, збільшення вагових норм потягів обумовлює необхідність нарощування провізної здатності залізниць, але застосовувані системи тягового електропостачання постійного струму не завжди в змозі забезпечити передачу електроенергії необхідної потужності і високої якості для цих потягів. До числа основних обмежень відноситься зниження напруги на струмоприймачі електровоза нижче допустимого для нормальної експлуатації значення 2700 В (для швидкісного руху 2900 В) і нагрівання проводів контактної мережі, що сприяє втраті їх механічної міцності [16].

На багатьох ділянках перетин проводів контактної мережі наближується до значення 600 мм<sup>2</sup> у мідному еквіваленті. В умовах зростання пікових електричних навантажень неможливо забезпечити термічну стійкість контактної мережі та знизити втрати напруги за рахунок підвішування додаткових проводів. Необхідне будівництво нових тягових підстанцій, яке призведе до значних матеріальних витрат. При цьому відстані між сусідніми тяговими підстанціями будуть скорочені до 10 – 15 км, а декуди навіть до 6 – 8 км.

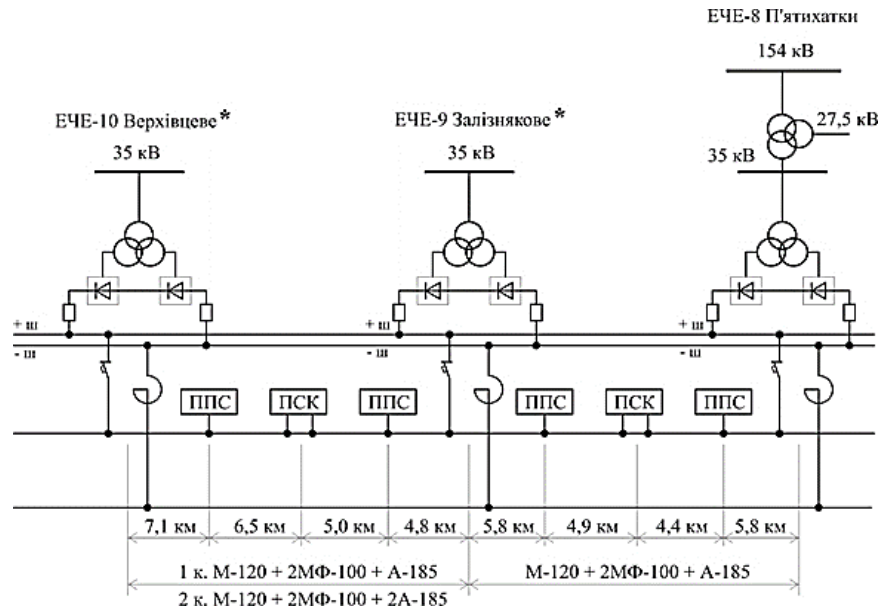
Розрахунки електрифікованих ділянок постійного струму, проведені на кафедрі Інтелектуальні системи електропостачання [17 – 18], показали неможливість пропуску сучасних швидкісних поїздів [20 – 22] як при виконанні графіка руху, так і при проходженні одного поїзда. Максимальне відхилення напруги на струмоприймачах ЕРС сягало 800 – 900 В при значеннях напруги на шинах тягових підстанцій 3300 – 3500 В. Експериментальні вимірювання проведені на Придніпровській залізниці [23] показали, що навіть в режимі вибігу розмах зміни напруги на струмоприймачі вантажного поїзду становив більш ніж 600 В. На ділянках з можливістю рекуперації цей показник може бути вдвічі більшим. Дослідженнями на Львівській залізниці [24] було зафіксовано максимальний розмах зміни напруги 1177 В. В умовах різкозмінного характеру енергоспоживання традиційні схеми живлення тягової мережі постійного струму виявляються неефективними та неекономічними. Напруга на струмоприймачах виходить за межі допустимих значень, а добове завантаження тягових підстанцій при умові забезпечення графіка руху поїздів не перевищує 15 % [23], втрати енергії в тяговій мережі при пікових навантаженнях збільшуються та можуть сягати 10 – 15 % від споживання [4, 25]. Централізована система електричної тяги постійного струму 3 кВ за витратами міді на контактну підвіску, мінімальній відстані між тяговими підстанціями, величиною питомої потужності тягової мережі на кілометр досягла своєї межі досконалості.

## **1.2 Експериментальні дослідження режимів напруги**

Проведення експериментальних вимірювань в системах електропостачання електрифікованих залізниць є досить складною та багатокритеріальною задачею. Безпосередньому проведенню електричних вимірювань передують організаційна робота стосовно постановки задачі досліджень, розробки програми та її подальше узгодження. Експериментальні вимірювання проводились відповідно до методології розробленої кафедрою ІСЕ [30].

### 1.2.1 Дослідження режиму напруги на шинах тягових підстанцій

На Придніпровській залізниці проведено дослідження режимів напруги при різних режимах роботи електрифікованої ділянки Верхівцеве – П'ятихатки (рис. 1.1).



\* позначені дослідні тягові підстанції

Рис. 1.1. Схема ділянки Верхівцеве – П'ятихатки

Особливість даного експерименту полягає у тому, що під час проведення дослідних вимірювань ТП Ерастівка була переведена в режим поста секціонування. Таким чином ділянка Верхівцеве – П'ятихатки працювала у вимушеному режимі. Внаслідок збільшення міжпідстанційної зони на ТП Ерастівка було зафіксовано значне зниження напруги при встановленому розмірі руху (рис. 1.2)

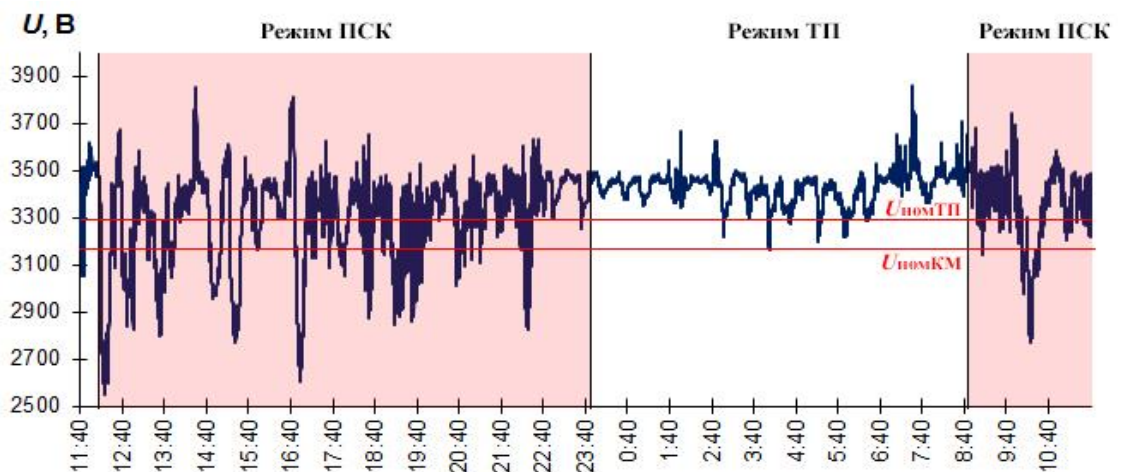


Рис. 1.2. Напруга на шинах 3,3 кВ ТП Ерастівка

З аналізу кривих імовірності розподілу напруги у різних режимах (рис. 1.3) видно значну різницю у діапазоні зміни напруги: 3185 – 3600 В в режимі тягової підстанції, 2600 – 3780 В в режимі поста секціонування.

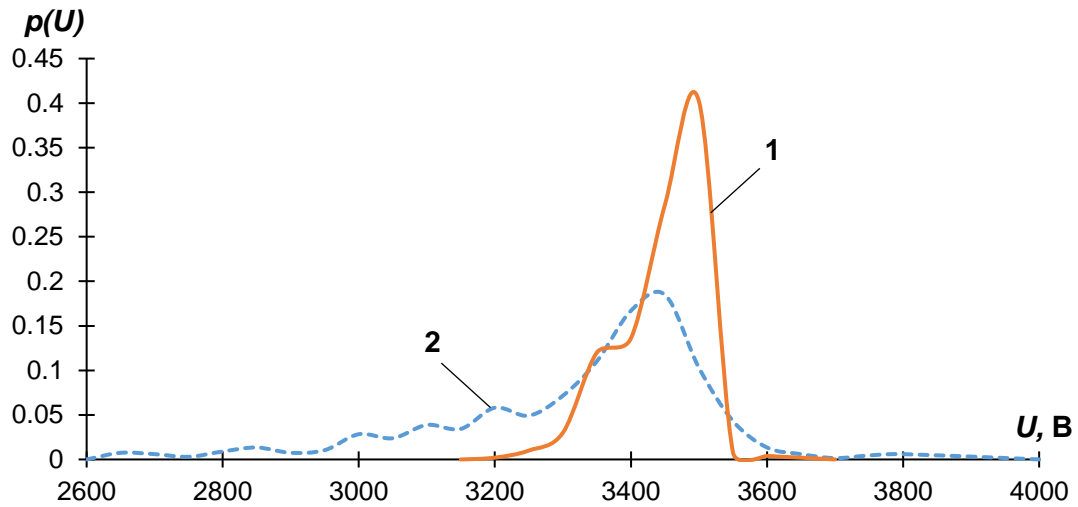


Рис. 1.3. Щільність розподілу імовірності напруги  
1 – режим тягової підстанції; 2 – режим ПСК

Дослідження коливань напруги на ТП Ерастівка в обох режимах роботи показали наступні результати (рис. 1.4, рис. 1.5). В режимі тягової підстанції максимальне значення розмаху зміни напруги склало 4,8 % при дискретизації вимірювань 5 с (рис. 1.4 а) і 4 % при дискретизації вимірювань 60 с (рис. 1.4 б).

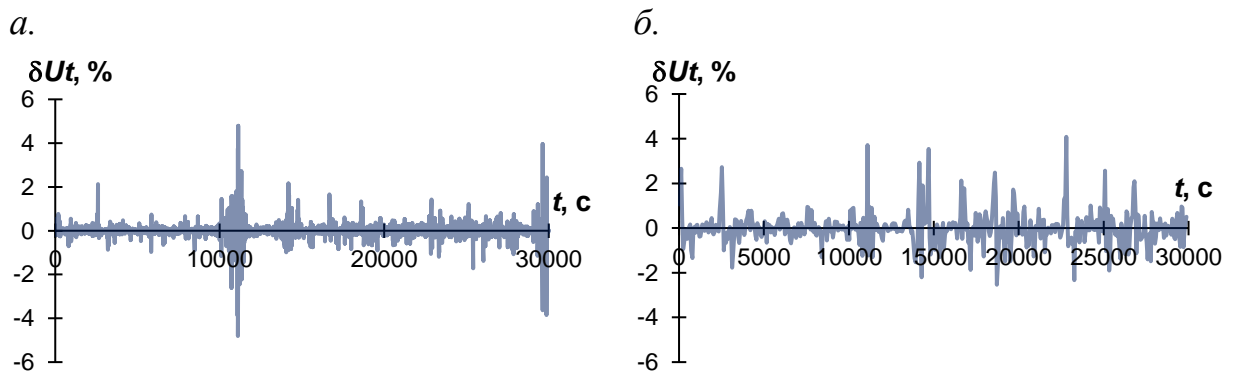


Рис. 1.4. Розмах зміни напруги на шинах 3,3 кВ Ерастівка  
в режимі тягової підстанції:  
а – інтервал дискретизації 5 с; б – інтервал дискретизації 60 с

Навіть при значних струмових навантаженнях розмах зміни напруги на ТП Ерастівка в середньому складав 140 В, що обумовлено демпфуванням коливань відповідним режимом роботи. У вимушеному режимі роботи розмах зміни напруги в середньому становив 420 В. При дискретизації 5 с (рис. 1.5 а)

максимальна різниця між двома послідовними значеннями реєстрації даних становить 13,9 %, а при дискретизації 60 с (рис. 1.5 б) – 14,5 %.

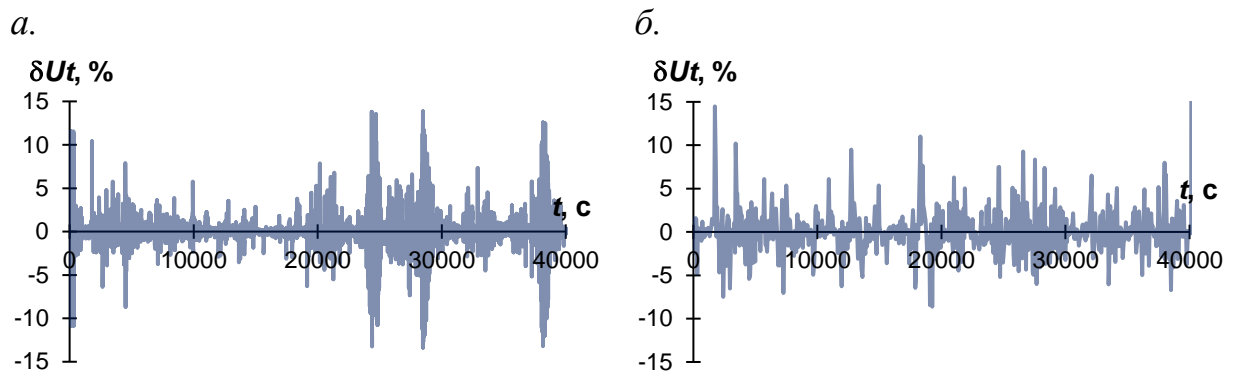


Рис. 1.5. Розмах зміни напруги на шинах 3,3 кВ Ерастівка  
в режимі поста секціонування:

*a* – інтервал дискретизації 5 с; *б* – інтервал дискретизації 60 с

Такий розкид значень розмаху зміни напруги обумовлений роботою електрифікованої ділянки при неможливості забезпечення розрахункової питомої потужності на кілометр її довжини.

Статистичні характеристики напруги на шинах 3,3 кВ ТП Ерастівка у різних режимах роботи приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Статистичні характеристики напруги ТП Ерастівка

Параметри напруги	Режим тягової підстанції	Режим поста секціонування
$M(U)$	3418.72	3305.3
$M_0(U)$	3450	3500
$M_e(U)$	3438.65	3356.39
$D(U)$	3651.88	37113.64
$\sigma(U)$	60.43	192.64
$As(U)$	-0.96	-1.13
$Ex(U)$	0.82	1.59
$\min(U)$	3185.37	2605.91
$\max(U)$	3600.03	3780.16

Напруга на шинах тягової підстанції Верхівцеве під час проведення експерименту залишалась в межах нормованих значень (рис. 1.6), діапазон зміни напруги становить 215 В. Статистичні характеристики приведені в таблиці 1.2.

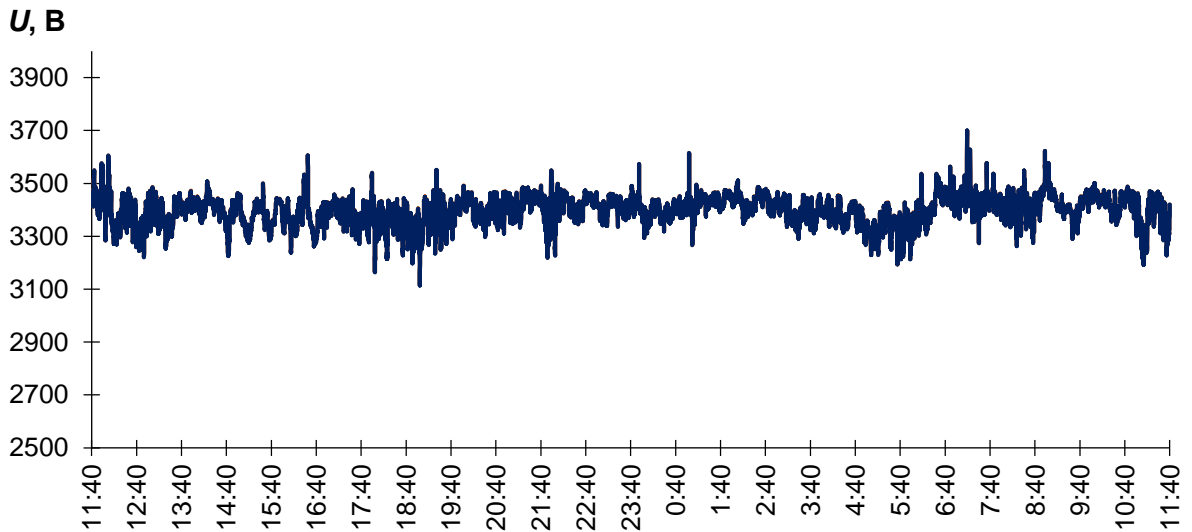


Рис. 1.6. Напряга на шинах 3,3 кВ ТП Верхівцеве

Таблиця 1.2 – Статистичні характеристики напруги ТП Верхівцеве

$M(U)$	$Mo(U)$	$Me(U)$	$D(U)$	$\sigma(U)$	$As(U)$	$Ex(U)$	$\min(U)$	$\max(U)$	$U(0.95)$
3399.4	3427.1	3407.1	2695.3	51.916	-0.62	0.8707	3113.5	3700.3	3485.3

Результати вимірювань напруги на шинах тягових підстанцій Варварівка та Самойлівка (рис. 1.7) наведені на рисунку 1.8. Статистичні характеристики зведені в таблицю 1.3.

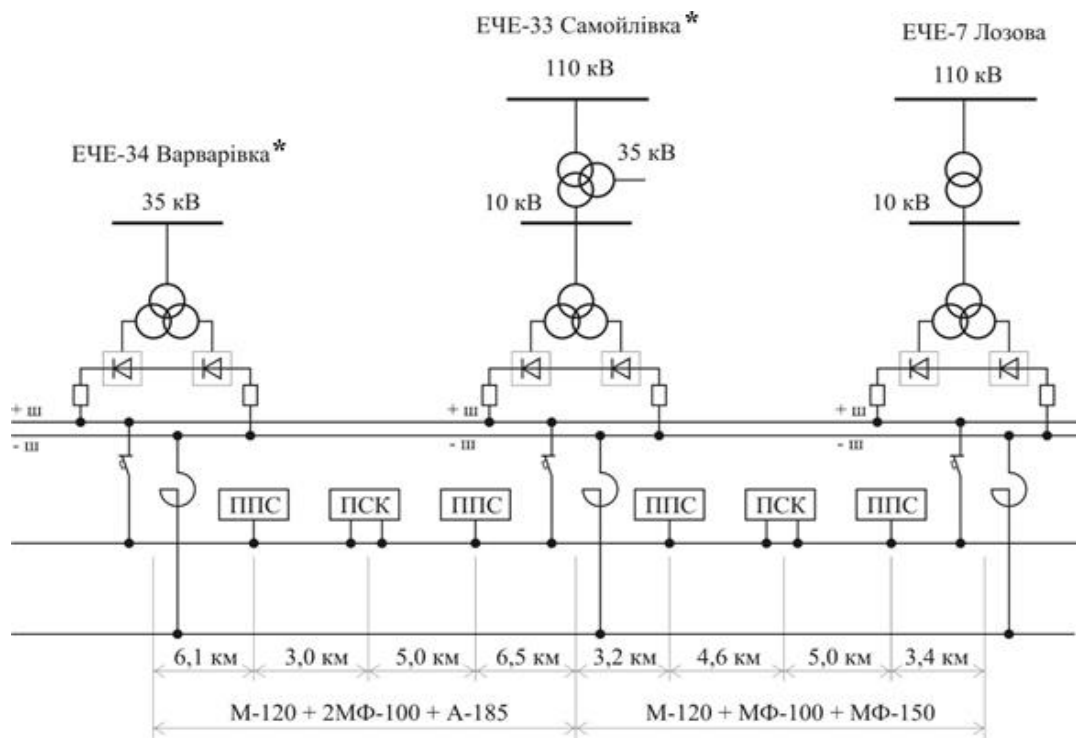


Рис. 1.7. Схема ділянки Варварівка – Лозова

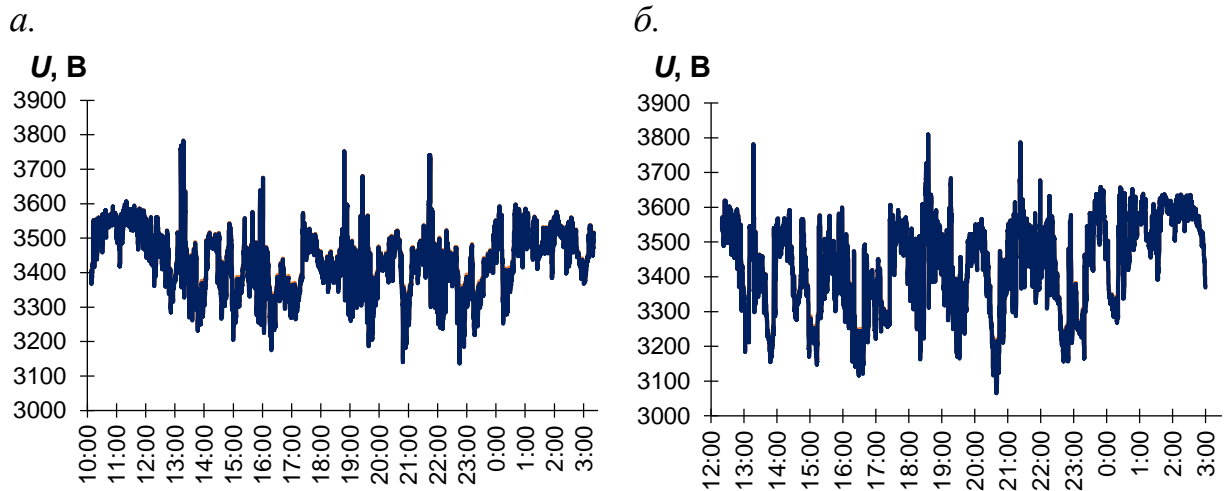


Рис. 1.8. Напряга на шинах 3,3 кВ:  
 а – ТП Варварівка; б – ТП Самойлівка

Таблиця 1.3 – Статистичні характеристики напруги

Показник	ТП Варварівка	ТП Самойлівка
$M(U)$	3432.12	3438.24
$M_0(U)$	3479.90	3266.11
$Me(U)$	3437.93	3463.76
$D(U)$	6906.09	16153.59
$\sigma(U)$	83.10	127.10
$As(U)$	-0.27	-0.45
$Ex(U)$	-0.16	-0.70
$\min(U)$	3136.25	3065.33
$\max(U)$	3782.94	3809.52
$U(0.95)$	3567.72	3615.92

На ТП Самойлівка спостерігався більший діапазон зміни рівня напруги (744 В) ніж на ТП Варварівка (646 В) через нетиповий режим роботи ТП Самойлівка, який виникав внаслідок перевищення напруги суміжної підстанції Лозова. В даному режимі відбувалось запирання випрямляча ТП Самойлівка і, як наслідок, її перехід в режим поста секціонування.

В рамках даного експерименту на також було досліджено рівень завантаження тягових підстанцій при експлуатації. За результатами проведених розрахунків та аналізу отриманих даних встановлено, що в умовах сучасного стану тягового електропостачання постійного струму коефіцієнт використання режимної потужності не перевищує 15 % при повній встановленій потужності тягових підстанцій 20 МВт. Результати проведеного експерименту приведені в табл. 1.4 та на рис. 1.9.

Таблиця 1.4. Результати дослідження завантаження тягових підстанцій

Тягова підстанція	Встановлена потужність $P_B$ , кВт	Середня реалізована потужність $P_P$ , кВт	Коефіцієнт завантаження $K_3$ , %
ТП 1	20800	2868	13,7
ТП 2	20800	1080	5,2
ТП 3	19800	956	4,8
ТП 4	19800	422	2,1

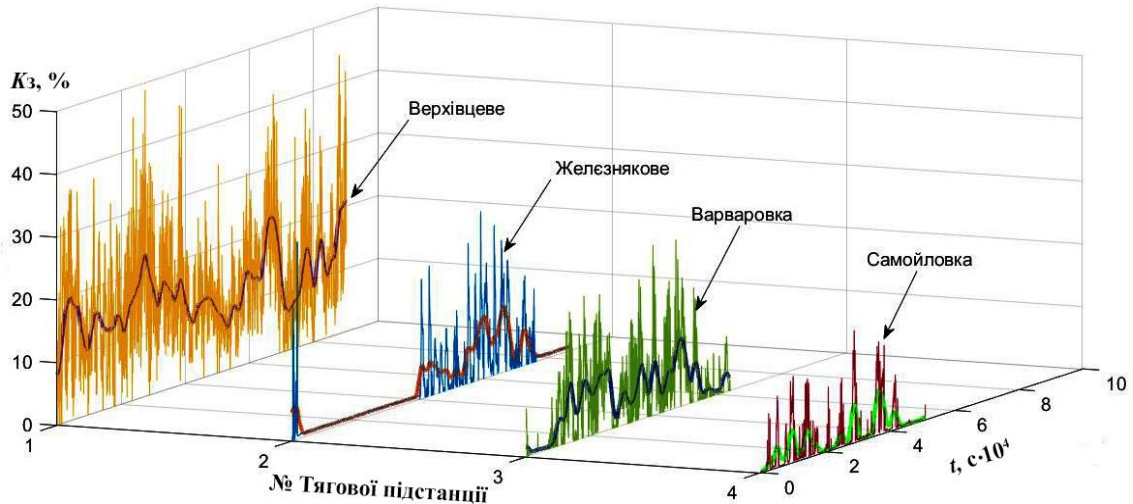


Рис. 1.9. Коефіцієнт завантаження (з усередненим значенням за 15 хв) тягових підстанцій на стороні випрямленої напруги

Дослідження режиму напруги в умовах гірського перевалу на ділянці постійного струму Лавочне – Тухля Львівської залізниці (рис. 1.10) проводились за наступних умов: під час досліджень ділянка отримувала живлення за вузловою схемою, реєстрація напруги велась синхронно на шинах 3,3 кВ ТП Тухля та ТП Лавочне, також вимірювалась напруга на посту секціонування.

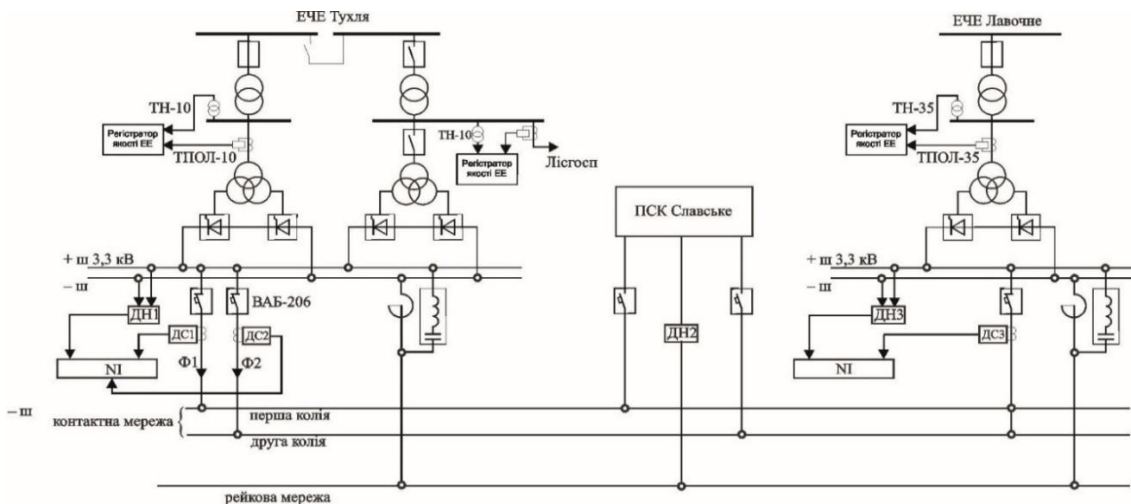


Рис. 1.10. Схема дослідної ділянки Лавочне – Тухля



Результати вимірювань показують, що значення напруги на шинах 3,3 кВ тягових підстанцій завищені відносно номінального рівня, але не перевищують нормованого значення. Розмах зміни напруги на тягових підстанціях знаходився в межах 250 В.

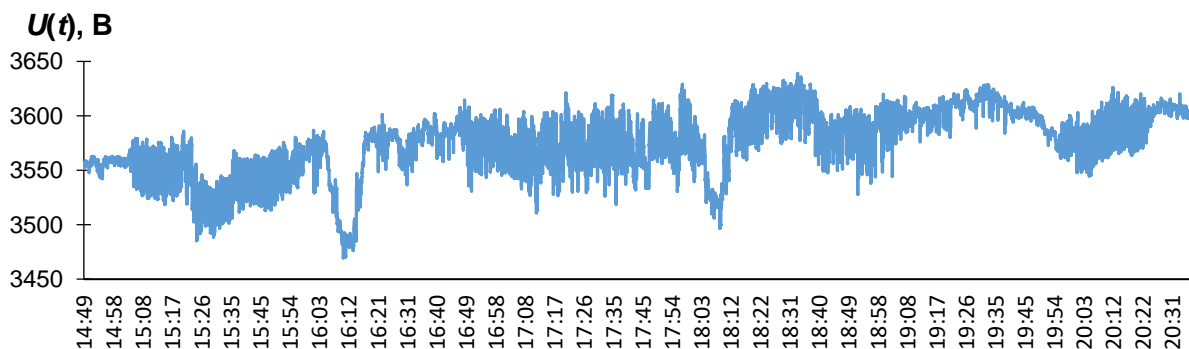


Рис. 1.11. Напруга на шині 3,3 кВ тягової підстанції Тухля

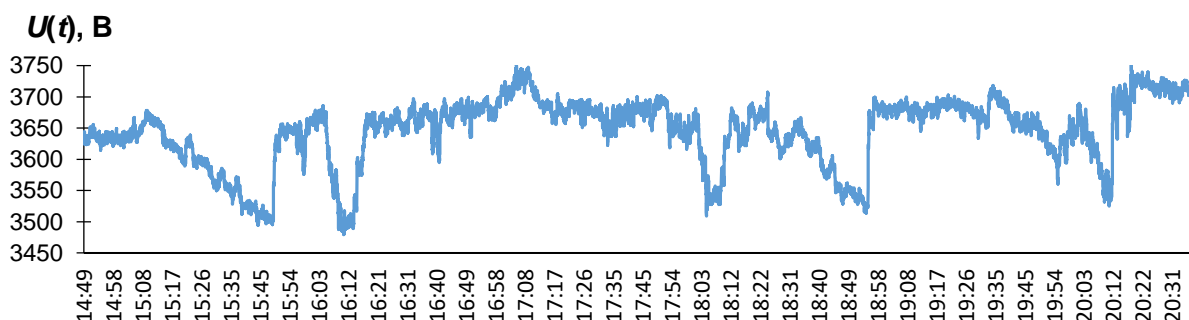


Рис. 1.12. Напруга на шині 3,3 кВ тягової підстанції Лавочне

Напруга на посту секціонування (рис. 1.13) також знаходилась в межах допустимих значень навіть при значних струмових навантаженнях. Це обумовлено невеликою відстанню між тяговими підстанціями та завищеним рівнем напруги на їх шинах. Також на дослідній ділянці був значно збільшений перетин контактної мережі (864 мм<sup>2</sup> в мідному еквіваленті).

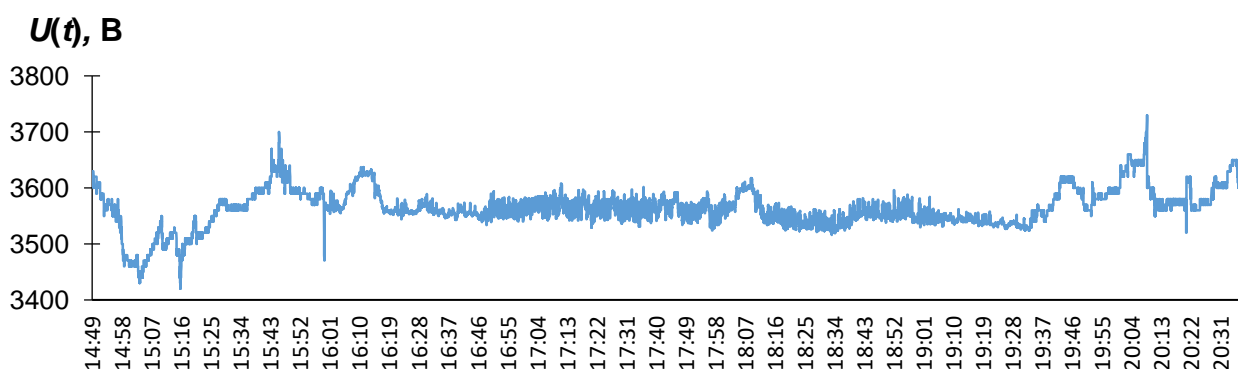


Рис. 1.13 Напруга на посту секціонування

## 1.2.2 Дослідження режиму напруги на струмоприймачах ЕРС

Використання нових, більш потужних електровозів або збільшення їх числа чи секцій для пропуску поїздів великої маси, супроводжується значним зростанням потужності та струму, що споживається з тягової мережі. Так, наприклад, на Придніпровській залізниці на ділянці К–Н при масі поїзда 6004 т два електровози ВЛ11 встановленою потужністю 4,6 МВт кожен, споживали сумарний тяговий струм до 3 кА (рис. 1.14). При цьому, в режимі тяги, напруга на струмоприймачах виходила за межі допустимих значень (рис. 1.15).

В режимі вибігу також мали місце рівні напруги, які не відповідали нормованим значенням (рис. 1.16). Вони можуть бути обумовлені або коливаннями напруги на шинах тягових підстанцій, або короткочасними піками тягових навантажень, які представляють собою наслідок співпадання пускових струмів окремих електровозів або їх накладання на тягові струми, що споживаються іншими поїздами, які знаходяться на міжпідстанційній зоні.

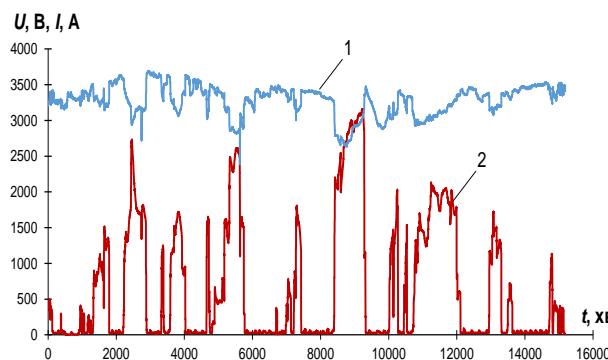


Рис. 1.14. Реалізація струму і напруги зведеного поїзда на дослідній ділянці:  
1 – напруга на струмоприймачах;  
2 – споживаний струм

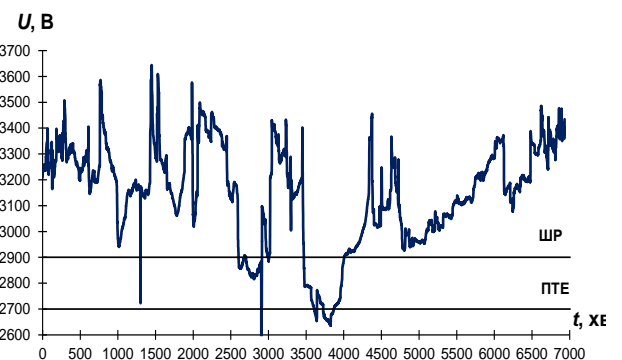


Рис. 1.15. Напруга на струмоприймачах в режимі тяги: ШР – норма напруги для швидкісного руху; ПТЕ – норма напруги за ПТЕ

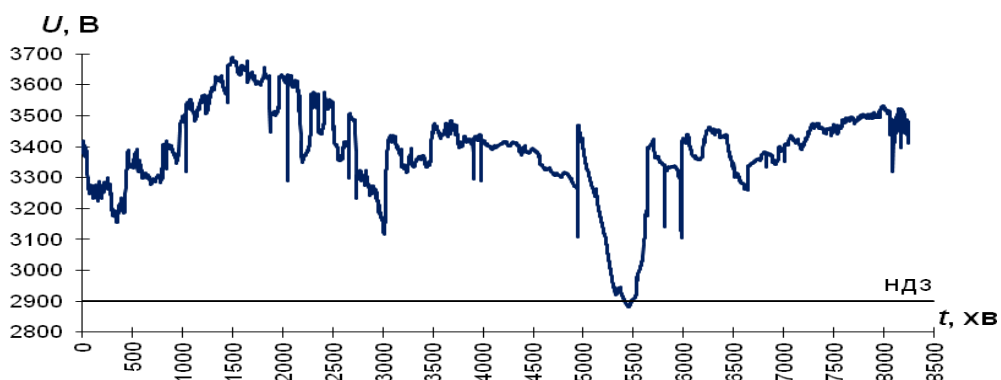


Рис. 1.16. Напруга на струмоприймачах в режимі вибігу

При проведенні експериментальних досліджень на ділянці З-С2 Придніпровської залізниці значне споживання тягового струму електровозом призвело до значного зниження напруги на струмоприймачеві. Мали місце значення рівнів напруги, як в режимі тяги (рис. 1.17), так і в режимі вибігу (рис. 1.18), які не відповідали встановленим нормам. Обробка дослідних даних показала, що крива щільності розподілу імовірностей значень напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 1.19) має двомодальний характер, представлений суперпозицією двох законів, близьких до нормального. Це пояснюється чергуванням двох режимів роботи ЕРС – тяги та вибігу. При аналізі змін напруги на струмоприймачах електровозів доцільно розглядати ці два режими окремо (рис. 1.20). Такий підхід дає можливість оцінити статистичні характеристики напруги без їх взаємного впливу.



Рис. 1.17. Напруга на струмоприймачі в режимі тяги

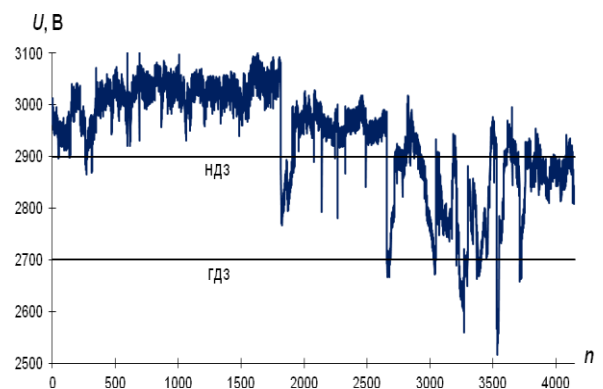


Рис. 1.18. Напруга на струмоприймачі в режимі вибігу

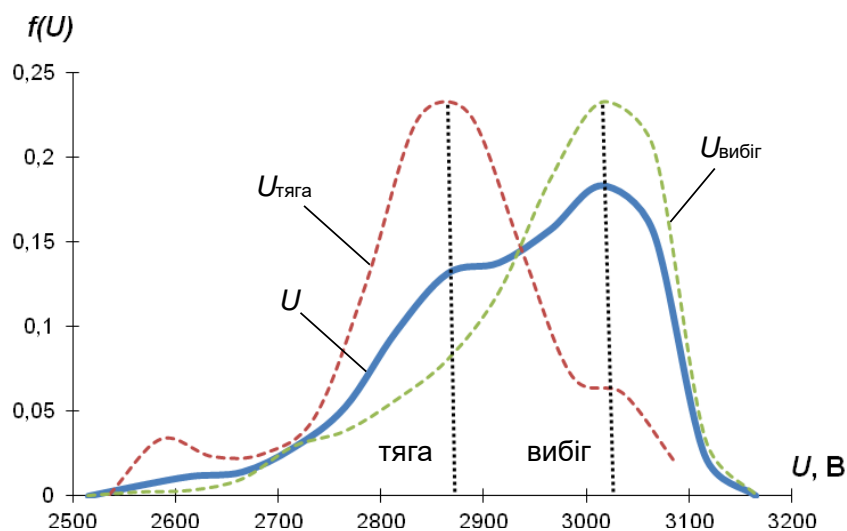


Рис. 1.19 – Емпіричні функції розподілу імовірностей напруги на струмоприймачі

Функція розподілу імовірностей напруги на струмоприймачі в режимі тяги має тримодальний характер, що є результатом перегрупування тягових двигунів електровозу в з'єднання «С», «СП» та «П».

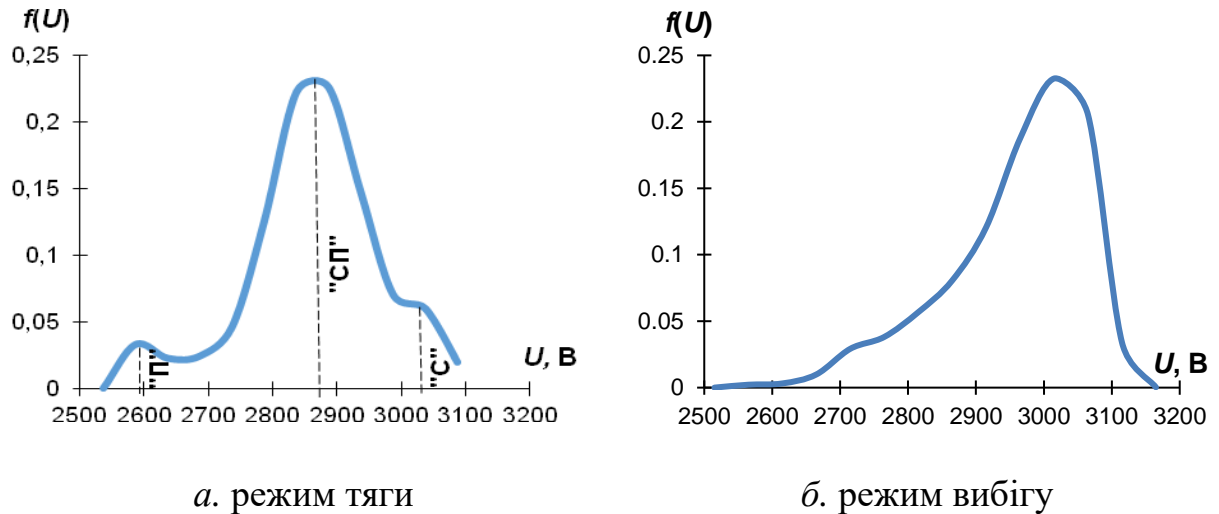


Рис. 1.20 – Емпіричні функції розподілу імовірностей напруги на струмоприймачі в різних режимах

Чітке вираження мод в функції розподілу може свідчити про відсутність іншого тягового навантаження на ділянці, окрім дослідного поїзда, або незначний вплив інших споживачів на рівень напруги на струмоприймачеві даного електровоза. Таким чином, повертаючись до графіка напруги в режимі вибігу (рис. 1.18), можна сказати, що в цьому випадку недотримання нормованих значень відбувається за рахунок коливань напруги на шинах тягових підстанцій.

Числові характеристики режиму напруги в різних режимах роботи електровозу приведені в таблиці 1.5. Їх аналіз показує, що на струмоприймачі електровоза напруга також має різкозмінний характер. Максимальні коливання в режимі тяги можуть досягати значення 545 В, а в режимі вибігу – 618 В. Отримані результати обумовлюють необхідність зменшення коливань напруги в тяговій мережі та забезпечення сталості його ймовірнісних характеристик в межах, передбачених нормативними документами для швидкісного транспорту [4]. При цьому для забезпечення більш високих енергетичних показників функціонування ЕРС необхідно ставити задачу

зменшення діапазону зміни напруги на струмоприймачах протягом всього часу руху поїзда по перегону.

Таблиця 1.5 – Числові характеристики напруги

Показник	Напруга на струмоприймачі ЕРС		
	Загалом	Тяга	Вибіг
$M(U)$	2906.11	2835.91	2935.63
$M_o(U)$	3013.00	2845.00	3036.00
$M_e(U)$	2923.50	2840.00	2958.00
$D(U)$	12712.14864	10767.09	10633.96
$\sigma(U)$	112.7482	103.7646	103.1211
$As(U)$	-0.70	-0.46	-0.98
$Ex(U)$	0.10	0.60	0.58
$\min(U)$	2516.00	2536.00	2516.00
$\max(U)$	3134.00	3081.00	3134.00
$M(\Delta U)$	-93.9	-164	-64.4
$U(0,95)$	3056.84	3011.21	3061.17

Проведені спільно з тягово-енергетичною вагон-лабораторією Придніпровської залізниці дослідні вимірюваннями показали, що рухаючись ділянкою Ерастівка – П'ятикатки електровоз ВЛ-8 з поїздом масою 3776 т споживав тяговий струм 2800 А, що призвело до зниження напруги на струмоприймачі до 2600 В (рис. 1.21). Слід зауважити, що при проведенні досліджень ділянка працювала в нормальному режимі.

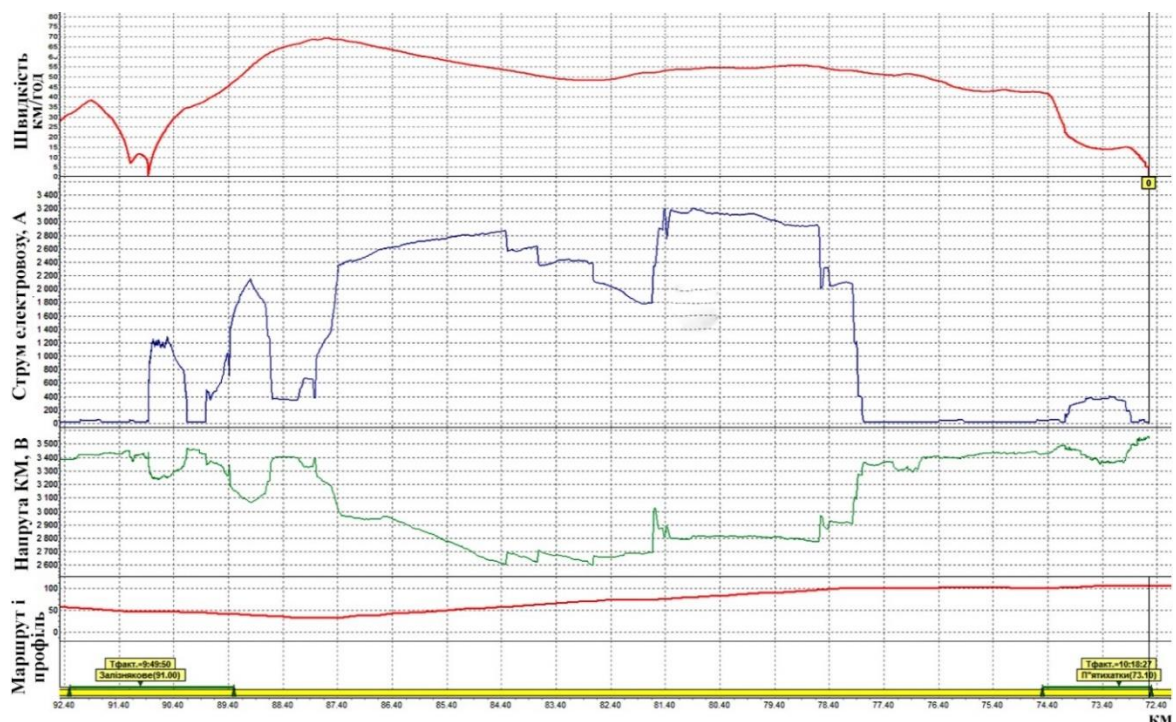


Рис. 1.21. Регістрограма даних дослідної поїздки дистанції Ерастівка – П'ятикатки

Під час інших дослідних вимірювань на перегоні Ерастівка – Вільногірськ було зафіксоване різке зростання тягового струму, що призвело до вимкнення живлячого фідера та зняття напруги з контактної мережі (рис. 1.22).

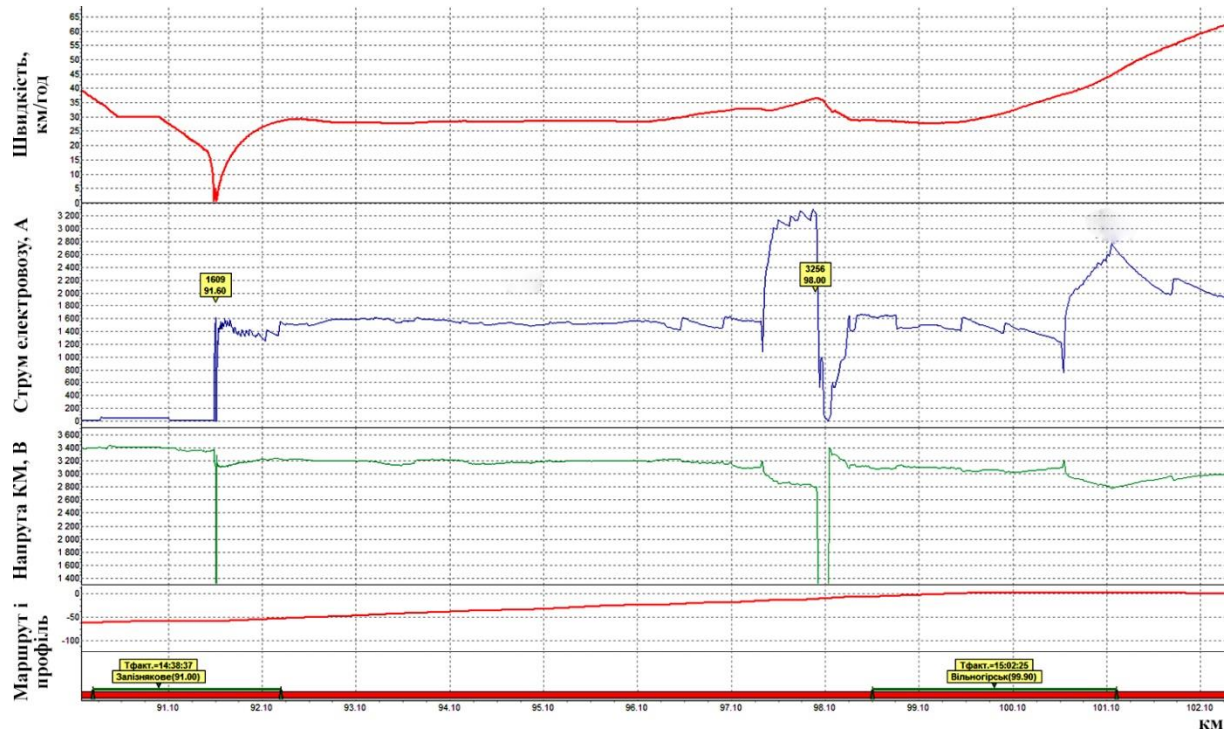


Рис. 1.22. Регістрограма даних дослідної поїздки дистанції Ерастівка – Вільногірськ

Статистична обробка вимірних даних напруги на струмоприймачах 13 ЕРС на ділянці НД Вузол – П'ятихатки (рис. 1.23, табл 1.6) показала, що при середньому значенні напруги на ділянці 3048 В інтервал її зміни становить більше 1000 В: від 2524 В до 3572 В, що виходить за межі нормованих значень.

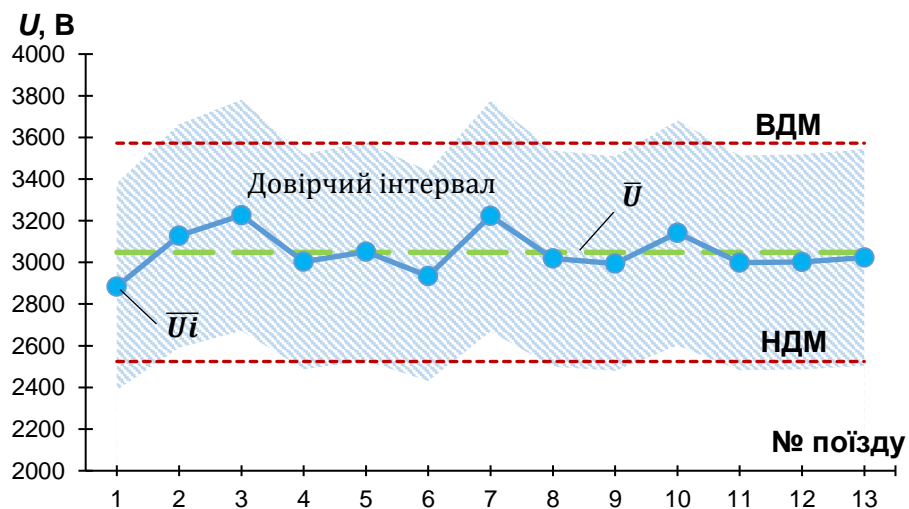


Рис. 1.23. Діапазон зміни напруги на ділянці НД Вузол – П'ятихатки

Таблиця 1.6 – Числові характеристики напруги на ділянці

№ поїзду	Статистичний показник напруги на струмоприймачі ЕРС						
	$M(U)$	$Mo(U)$	$Me(U)$	$D(U)$	$\sigma(U)$	$\min(U)$	$\max(U)$
1	2883.75	3015	2970	129486.9	359.84	2400	3600
2	3127.44	2970	3400	168465.2	410.44	2400	3550
3	3197.2	3400	3450	248387.1	498.38	2265	3800
4	3004.17	3410	3015	145333.4	381.22	2400	3500
5	3049.68	3400	3015	148184.1	384.94	2300	3800
6	2934.73	2970	2970	110882.1	332.98	2440	3590
7	3219.6	2970	3400	144833.9	380.57	2210	3700
8	3018.6	2970	2988	145434.3	381.35	2472	3580
9	2992.2	2560	2970	202993.7	450.54	2220	3750
10	3139.78	3450	3400	204943.4	452.70	2293	3820
11	2998.77	3400	2970	153145.2	391.33	2400	3580
12	2967.47	2970	2970	273015.7	522.51	2230	3600
13	3002.82	3400	3015	229182.6	478.73	2283	3610

Проведені дослідження показали неспроможність централізованої системи тягового електропостачання забезпечити потрібний рівень потужності на кілометр.

### 1.2.3 Дослідження режиму напруги в системі тягового електропостачання при рекуперації енергії

Для аналізу режиму напруги при рекуперації енергії на Львівській залізниці були проведені синхронізовані вимірювання на двох суміжних ТП і рухомому по ділянці між ними поїзді в режимі рекуперації (інших споживачів на дослідній ділянці не було). Для дослідження була обрана двоколійна міжпідстанційна зона Скотарське – Воловець, оскільки в напрямку ст. Воловець на ділянці ухил (спуск) сягає 28,4 ‰ і з метою обмеження швидкості поїздів є обов'язковим використання електричного гальмування. Загальна схема проведення вимірювань приведена на рис. 1.24.

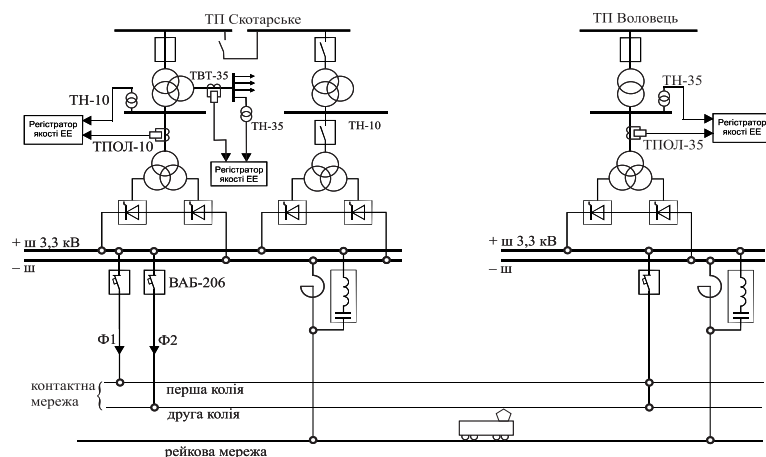


Рис. 1.24. Загальна схема проведення експериментальних вимірювань

Напередодні проведення основного експерименту проведені пробні вимірювання на ділянці Клепарів – Стрий – Ходорів та у зворотному напрямку (рис. 1.25).

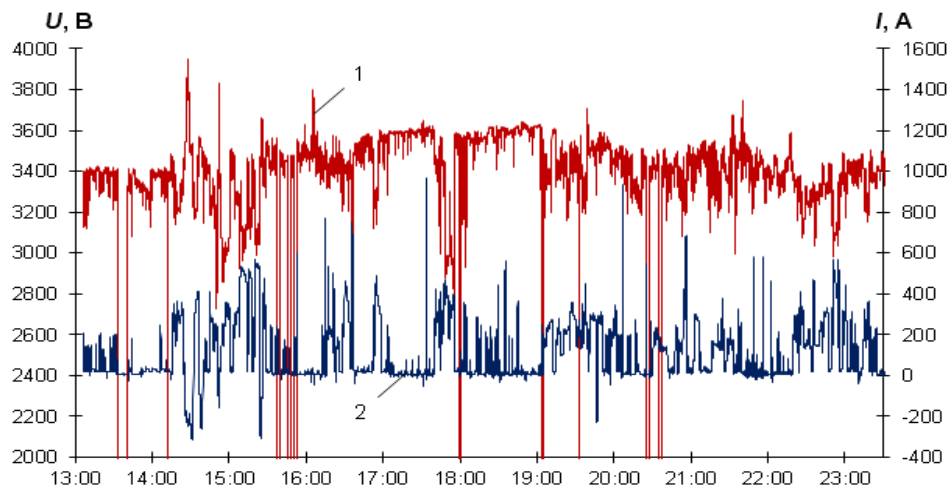


Рис. 1.25. Параметри електроспоживання електровоза ВЛ11М в напрямку Клепарів – Стрий – Ходорів: 1 – напруга на струмоприймачі; 2 –тяговий струм (рекуперація при струмі  $I < 0$ )

Дана ділянка особлива консольним живленням тягової мережі у одноколійному напрямку ст. Ходорів, при русі якою спостерігались зниження напруги нижче 3,0 кВ. Для цього випадку зафіксоване значення напруги величиною 2727 В при загальному струмі електровозу 506 А. Результати вимірювань параметрів електроспоживання (напруги на струмоприймачі і струму в режимах тяги, вибігу і рекуперації) електровоза ВЛ11М на дослідній ділянці Клепарів – Стрий – Воловець приведені на рис. 1.26.

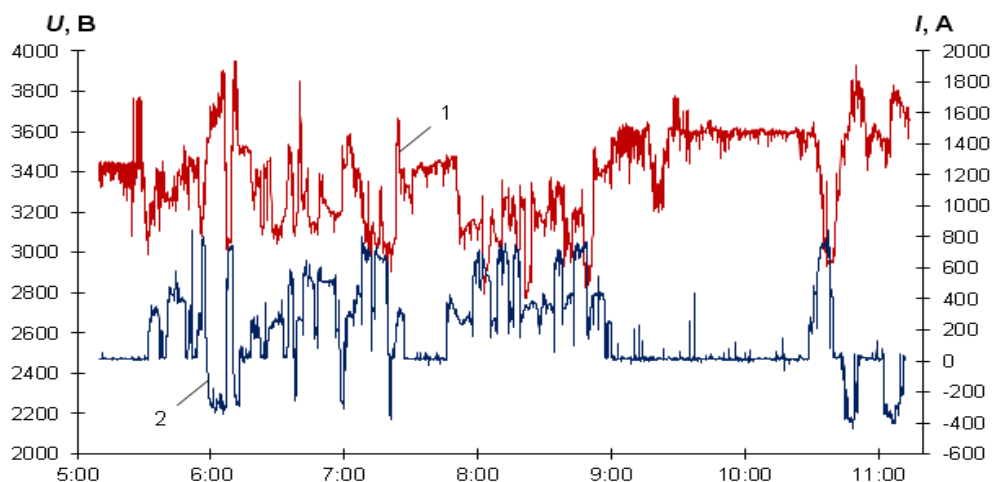


Рис. 1.26. Параметри електроспоживання електровоза ВЛ11М на ділянці Клепарів – Стрий – Воловець:  
1 – напруга; 2 – струм (рекуперація при струмі  $I < 0$ )



Аналіз отриманих результатів (табл. 1.7) показав, що для нормально встановленої схеми живлення режим напруги в тяговій мережі хоча і відповідав встановленим вимогам, але були наявні значні розмахи зміни напруги. Мінімальне значення напруги для двосторонньої схеми складало 2770 В у режимі тяги при загальному струмі електровозу 1220 А. Найвище значення напруги на струмоприймачі зафіксоване в режимі рекуперації, яке складає 3947,7 при загальному струмі рекуперації електровозу 760 А. Таким чином, розмах зміни рівня напруги на струмоприймачі ЕРС сягав 1177,2 В. Проблеми, пов'язані з якістю електроенергії при застосуванні режиму рекуперації висвітлені в [32 – 36].

Таблиця 1.7 – Числові характеристики напруги електровоза ВЛ11М на ділянці Клепарів – Стрий – Воловець

Параметр	Напруга
Середнє значення	3388,039
Медіана	3418,466
Мода	3606,605
Стандартне відхилення	222,2468
Дисперсія	49393,66
Ексцес	-0,66284
Асиметричність	-0,26951
Мінімум	2770,48
Максимум	3947,699

### 1.3 Якість напруги у тяговій мережі постійного струму

Якість електроенергії у загальному понятті електромагнітної сумісності споживачів у системах електропостачання належить до найважливіших проблем сучасної електроенергетики. Від її вирішення багато в чому залежить підвищення ефективності використання електроенергії, а також режимна безпека електроенергетичної системи і надійність енергозабезпечення споживачів [37].

Забезпечення нормального режиму напруги будь-якої електроенергетичної системи, передбачає забезпечення заданих рівнів якості електроенергії та електромагнітної сумісності [38]. Це пов'язане з тим, що зниження якості напруги в системі призводить до порушення технологічних режимів, зростання рівнів споживання активної і реактивної потужностей, додатковим втратам активної енергії, скороченню терміну служби і зниженню

коефіцієнта потужності системи і, відповідно, продуктивності електричного устаткування [30].

В електричних мережах систем електропостачання загального призначення змінного трифазного і однофазного струму частотою 50 Гц чітко встановлені норми якості електроенергії (ЯЕ) та регламентуються стандартами [39 – 41]. В той же час, показники енергообмінних процесів та рівні електромагнітної сумісності в системах електроживлення постійного струму фактично не регламентуються [30, 31].

У тягових мережах постійного струму 3 кВ найважливішими показниками якості електроенергії є рівень, відхилення та коливання напруги. Згідно з нормативними документами [11] та [12], в СТЕ постійного струму відповідність електроенергії нормам якості визначають лише за двома рівнями напруг: найбільший та найменший. Відхилення та коливання напруги в [6] визначають, відповідно, як тривалі зміни напруги, що призводять до зміни швидкості руху електрорухомого складу та короткочасні, що до такої зміни не призводять.

Коливання напруги негативно відображаються на динаміці ведення поїздів [42]. Кидки струму та тягового зусилля, викликані коливанням напруги, знижують надійність роботи контакторів, небезпечні з точки зору виникнення боксування і можуть призвести до зламу шестерні та пошкодження автозчеплення. Різке зростання струму небезпечне через можливість появи кругового вогню на колекторах двигунів. При постійній зміні напруги в тяговій мережі погіршуються умови для застосування рекуперативного гальмування. Для електрорухомого складу небезпечні коливання порядку 4 – 5 % [43].

При різних середніх напругах на струмоприймачеві за рахунок відповідного підбору режиму ведення поїздів можна одержати однаковий час ходу по ділянці (однакову криву швидкості руху), якому відповідає та ж сама корисна механічна робота по переміщенню поїзда. Дослідженнями [9, 4444] роботи тягових допоміжних машин за умовами обмежень по зчепленню, за типом навантаження, по нагріванню обмоток, обмежень по потенційних

умовах на колекторі і по комутації під шітками рекомендуються тривала найбільша напруга 3,6 кВ і тривала найменша 2,8 кВ. Цей діапазон зміни напруг стосовно регламентованого ПТЕ  $3,85 \div 2,7$  кВ хоча й зменшений, але від номінальної напруги на струмоприймачі електровоза 3 кВ відрізняється на +20 % і - 6,67 %. Для забезпечення швидкісного руху нижній діапазон ще менший - 3,33 %.

Система тягового електропостачання повинна забезпечувати рівень напруги на струмоприймачі електрорухомого складу який би гарантував досягнення заданої швидкості, обумовленої графіком руху, та забезпечував надійну та справну роботу всіх елементів ЕРС.

Вплив зміни напруги на зміну швидкості руху електровозів постійного струму становить  $0,01 \dots 0,03 \frac{\text{км/год}}{\text{В}}$  [45]. З цього випливає, що в усталеному режимі роботи ЕРС залежність зміни швидкості від зміни напруги невелика, що обумовлено великою інерційністю поїзда. Але при зниженій напрузі збільшується час розгону поїзда для досягнення встановленої швидкості та час ходу електровоза під струмом для її збереження. Таким чином, збільшується загальний час ходу електровоза під струмом, що призводить до додаткових втрат електроенергії.

При слідуванні поїзда розрахунковим підйомом зниження напруги на струмоприймачі призводить до зростання температури обмоток електродвигунів та зниженню пропускної спроможності ділянки через збільшення часу ходу поїзда. Також зниження напруги зменшує продуктивність роботи допоміжного обладнання, а саме мотор-вентиляторів та мотор-компресорів. Внаслідок цього погіршуються умови охолодження тягових двигунів та іншого електрообладнання, збільшується час відпуску пневматичних гальм поїзда.

За умовам надійності роботи ЕРС з одного боку повинен забезпечуватись рівень напруги не нижчий за мінімально допустимий з умов нагрівання тягових двигунів та двигунів допоміжного обладнання. З іншого – не перевищувати максимально допустимого значення за потенційним умовам

на колекторі для запобігання виникнення кругового вогню. На ділянках з можливістю рекуперації рівень напруги в тяговій мережі повинен забезпечувати умови для сталого режиму гальмування.

Таким чином, напруга в тяговій мережі повинна задовольняти вимогам (1.1) для забезпечення сталої швидкості поїзда та умов для режиму рекуперації. Також значення напруги в контактній мережі повинне забезпечувати мінімальні витрати та втрати електроенергії при реалізації графіка руху поїздів.

$$U_{\min} < U_{e\text{тяг}} \leq U_{\text{тм}} < U_{e\text{рекуп}} \leq U_{\max} \quad (1.1)$$

де  $U_{\min}$  – мінімально допустиме значення напруги в контактній мережі, В;

$U_{e\text{тяг}}$  – значення напруги на струмоприймачі електровозу, якій знаходиться в режимі тяги, В;

$U_{\text{тм}}$  – напруга в тяговій мережі, В;

$U_{e\text{рекуп}}$  – значення напруги на струмоприймачі електровозу, якій знаходиться в режимі рекуперації, В;

$U_{\max}$  – максимальне значення напруги в контактній мережі, В.

Але чітке дотримання поставлених вимог неможливе, оскільки на величину розмаху і тривалість змін напруги діє багато чинників, тому даний процес можна розглядати як стохастичний. Серед впливаючих факторів, можна відзначити рівень напруги на шинах тягових підстанцій, який характеризується досить великим розкидом значень, викликаних коливаннями напруги в живлячій енергосистемі та змінами тягового навантаження. Не менш важливими є втрати напруги в тяговій мережі, які, в свою чергу, залежать від опору тягової мережі, струму електровозу, його місцезнаходження та взаємного розташування інших потягів на фідерній зоні та їх режимів роботи. Очевидно, доцільним було б забезпечення такого режиму напруги в тяговій мережі, який би найбільшою мірою задовольняв поставленій умові (1.1), але відомо, що напруга на струмоприймачах

електровозів, що перебувають на фідерній зоні, не може бути постійною і рівною встановленому значенню навіть при наявності на фідерній зоні пристроїв регулювання. Тому прагнення до звуження діапазону відхилення напруги на струмоприймачеві електровоза є умовою забезпечення номінального режиму роботи тягових і допоміжних машин електровоза. При цьому необхідно пам'ятати, що підвищення рівня напруги на струмоприймачі електровоза сприяє підвищенню технічної швидкості руху поїзда, а при збереженні споживаної потужності веде до зниження струму електровоза [44]. У протилежному випадку, зміна напруги на струмоприймачі призведе до одночасної зміни споживаного струму. За умови тривалого зниження напруги значне споживання тягового струму призведе до перегріву проводів контактної мережі, збільшення втрат в тяговій мережі та можливості спрацювання струмового захисту. Отже, належне функціонування пристроїв ЕРС та контактної мережі, забезпечення нормованих втрат електроенергії в тяговій мережі обумовлене звуженням діапазону відхилення напруги на струмоприймачеві електровоза та дотриманням вимог [11, 12, 46, 13].

#### **1.4 Шляхи покращення режимів напруги у системі тягового електропостачання постійного струму**

Створення транспортних коридорів з організацією руху швидкісних та високошвидкісних пасажирських поїздів і вантажних поїздів підвищеної маси потребують підсилення існуючої системи тягового електропостачання постійного струму 3,0 кВ для забезпечення відповідних режимів напруги на струмоприймачах ЕРС. Існуючі і перспективні способи підсилення системи тягового електропостачання постійного струму відповідно до [26] і [15] можна розділити на способи, що зберігають рівень напруги 3,0 кВ в тяговій мережі і способи, що потребують підвищення рівня напруги; способи, що зберігають рівень споживаної потужності з системи зовнішнього електропостачання та способи, що потребують підвищення споживання потужності (рис. 1.27).

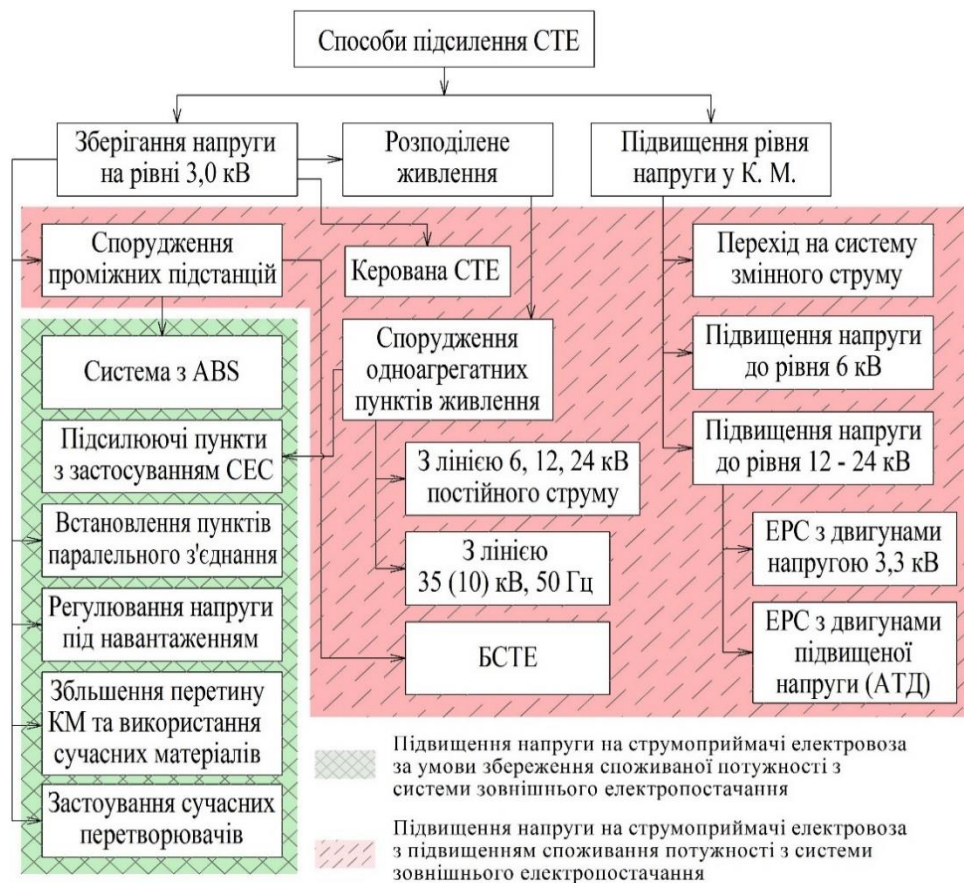


Рис. 1.27. Способи підсилення системи тягового електропостачання постійного струму

Основні концепції і принципи підсилення системи тяги постійного струму 3,0 кВ описані ще в 60 – 80 роках минулого сторіччя [25 – 29]. Сучасне підсилення СТЕ 3,0 кВ не зазнало значних структурних змін, а змінювалась лише елементна база обумовлена розвитком науки, техніки та технологій. В [30, 15, 47 – 50], проведені порівняльні розрахунки різних систем тягового електропостачання, запропоновані способи підсилення СТЕ постійного струму побудовані на основі сучасних досягнень, повною мірою висвітлені їх переваги та недоліки, наведені результати досвіду експлуатації.

Потрібно відзначити, що на залізницях України підсилення СТЕ 3,0 кВ зводиться до переведення ділянок на паралельну схему живлення, збільшення перетину контактної мережі, заміни 6-ти пульсних випрямних агрегатів на 12-ти пульсні та підвищення напруги холостого ходу тягових підстанціях. Але навіть при комплексному застосуванні цих способів система електропостачання 3,0 кВ залишається недостатньо ефективною і економічною та не в змозі забезпечити відповідну якість напруги в тяговій

мережі. Справа в тому, що при централізованому живленні потужність зосереджена на тягових підстанціях не використовується повною мірою. В середньому їх добове завантаження при забезпеченні графіку інтенсивного руху потягів не перевищує 20-25 %, при цьому втрати енергії в тяговій мережі при пікових навантаженнях збільшуються і досягають 10-15 % від спожитої енергії. Аналіз результатів розрахунків [51] дозволяє зробити наступні висновки: по-перше, жодна з застосовуваних схем живлення не забезпечує нормованого рівня напруги в тяговій мережі при здійсненні швидкісного руху електрорухомим складом потужністю 10 МВт за номінальної напруги на шинах тягових підстанцій (3300 В); по-друге, підвищення напруги на шинах тягових підстанцій до 3800 В дозволить реалізувати швидкісний рух на ділянках постійного струму тільки при вузловій та паралельній схемах живлення, при цьому, фактично, буде неможливим здійснення рекуперації. Необхідно приймати до уваги також той факт, що на шинах тягових підстанцій України, в основному, підтримується напруга на рівні 3500-3600 В [30], що обмежує регульовальні можливості при впровадженні швидкісного руху.

В той же час регулювання напруги на шинах тягових підстанцій не вирішує існуючу проблему повною мірою, через збільшення втрат потужності на міжпідстанційній зоні та відповідних експлуатаційних витрат [9, 15, 25]. Тому для покращення режимів напруги в тяговій мережі та техніко-економічних показників існуючих ділянок електричних залізниць постійного струму застосовується низка технічних та організаційних заходів: використання пунктів паралельного з'єднання; збільшення перерізу проводів контактної мережі; будівництво додаткових тягових підстанцій; застосування блоків розподіленого живлення; повна заміна шестипульсних випрямлячів на дванадцятипульсні; розробка і випуск випрямлячів з оптимальною шкалою номінальних потужностей; розширення сфери рекуперативного гальмування і експлуатаційне освоєння дванадцятипульсних випрямно-інверторних перетворювачів; освоєння ефективних схем згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму; встановлення на фідерній зоні вольтододаткових пристроїв ВДП з регулюванням напруги; збільшення потужності тягових

підстанцій і зменшення відстані міжподстанційних зон; підсилення системи зовнішнього електропостачання і обмеження відхилення рівня напруги на вводах тягових підстанцій.

Ефект від застосування окремих заходів різний і, як правило, є недостатнім. Для підсилення тягового електропостачання конкретної лінії з метою досягнення необхідних показників якості напруги для швидкісних поїздів потрібно здійснювати комплекс заходів з обмеження діапазону зміни напруги на струмоприймачах ЕРС. Тому в [15] і [47] автори пропонують на сьогодні найбільш перспективну систему підсилення, яка побудована на основі керованої системи тягового електропостачання, розробленої професором Аржанніковим Б. О. Така система отримала назву «Буферна система тягового електропостачання (БСТЕ)» і поєднує безконтактне автоматичне регулювання напруги (БАРН) на шинах ТП і «буфери» – додаткові одноагрегатні тягові підстанції, споруджені в середині МПЗ. Але, хоча запропонована система і забезпечує пакетний пропуск важковагових поїздів з мінімальною напругою на струмоприймачі 2700 В та зменшує питомі втрати електроенергії на 0,44 ... 3,71 %, в той же час вона зменшує можливість застосування рекуперації на 0,79 ... 11,52 %. Тому в умовах підвищення енергоефективності залізниць, використання буферної системи тягового електропостачання (БСТЕ) на напрямках з активним використанням енергії рекуперації не буде раціональним. Доцільність використання вказаної БСТЕ необхідно оцінювати за умовами забезпечення пропуску швидкісних та важковагових поїздів, техніко-економічних умов та умов забезпечення введення рекуперативного режиму на ділянці. Також слід відзначити, що впровадження додаткових пунктів живлення призводить до збільшення споживання потужності з системи зовнішнього електропостачання. Тим паче, спорудження додаткових буферних підстанцій з живленням від ліній електропередач високої напруги обходиться досить дорого, особливо якщо їх приєднання до енергосистеми складне і тягне за собою зміну схеми зовнішнього енергопостачання з перебудовою деяких проміжних тягових підстанцій в опорні з усіма пов'язаними з цим додатковими витратами.



Забезпечення належного режиму напруги на струмоприймачах ЕРС при швидкісному русі, підвищення енергоефективності та зниження енергоємності залізничної галузі згідно з [3] можливе за рахунок впровадження систем електричної тяги з використанням накопичувачів (ESS – energy storage system) призначених для запасання енергії рекуперації та компенсації піків струму і втрат напруги при поверненні її в контактну мережу [52].

Така система не є новою і експлуатується з 1988 р [53]. Але поява нікель метал-гідридних (Ni-MH) батарей та двошарових конденсаторів створили основу для побудови високоефективних батарейних підстанцій (ABS – auxiliary battery substation), які широко використовуються для підвищення якості напруги та енергоефективності електрифікованого рейкового транспорту США та Японії. Дослідницька діяльність в області накопичувачів для залізничних систем спрямована в основному на метро та легкорейкові мережі [54 – 56]. Але в [57] представлено дослідження роботи ділянки постійного струму 3,0 кВ довжиною 15,8 км з консольним живленням контактної мережі та застосуванням ABS. В порівнянні з базовим розрахунком (без застосування ABS) при проходженні ділянкою поїзда ETR 1000 з встановленою швидкістю 125 км/год включення батарейної підстанції потужністю 2 та 4 МВт зменшило втрати напруги на 15 та 20,16 % і втрати потужності на 3,75 та 4,89 % відповідно. Недоліком такої системи є можливість її ефективного застосування лише в мережах рейкового транспорту з активним використанням режиму рекуперації.

Значно підсилити тягове електропостачання може не лише впровадження новітніх технологій і сучасного устаткування, а й застосування систем розподіленого живлення, тобто, перехід до нової схематехніки мережі електротяги. Актуальним варіантом підсилення системи 3,0 кВ є установка підсилюючих пунктів (ПП) на міжпідстанційній зоні, які будуть працювати за принципом децентралізованої системи. Перевагою цієї системи є потреба лише в підживленні контактної мережі, що не вимагає значної агрегатної потужності, а при використанні альтернативної енергії дозволяє значно знизити споживання електричної енергії з системи зовнішнього

електропостачання. На сьогодні опрацьовано декілька варіантів побудови такої системи [58, 59], у тому числі і з застосуванням змінного струму підвищеної частоти з напівхвильовим налаштуванням для живлення пунктів підсилення тягової мережі [60].

Економічний ефект досягається за рахунок зменшення перетину проводів контактної мережі, зменшення втрат енергії, підтримки необхідного рівня напруги в контактній мережі і збільшення коефіцієнта використання потужності основного енергетичного обладнання при зниженні його встановленої потужності. А окреме управління кожним ПП в режимі реального часу надасть можливість перерозподіляти згенеровану потужність вздовж тягової мережі та створить підґрунтя для побудови системи інтелектуального живлення. Необхідно зазначити, що ефективність системи розподіленого типу, особливо при застосуванні альтернативних джерел живлення, буде значно вищою при застосуванні накопичувачів енергії (ESS). Використання ESS в системі тягового електропостачання дозволяє частково або повністю усунути нерівномірності енергоспоживання, приймати надлишкову енергію рекуперації, підтримувати на певному рівні потужність тягової підстанції під час експлуатації та зменшити втрати енергії в зовнішній системі електропостачання. Окрім цього, накопичення і зберігання цієї енергії для повторного використання приведе до зменшення первинного енергоспоживання від зовнішньої системи електропостачання, що може привести до зниження встановленої потужності усіх агрегатів тягових підстанцій [61 – 65].

### **Висновки до розділу 1**

Одним із пріоритетних напрямків розвитку залізничного транспорту України є підвищення пропускної спроможності залізничних ліній і збільшення маси поїздів та їх швидкостей, подальше впровадження швидкісного, а в середньостроковій перспективі і високошвидкісного руху при використанні енергозберігаючих та енергоефективних технологій.

Однією з основних вимог для збільшення швидкості руху поїздів до 250 км/год є забезпечення режиму напруги в тяговій мережі який відповідає вимогам якості напруги, забезпечує нормальне функціонування всіх вузлів електрорухомого складу та виконання встановленого графіка руху.

Аналіз режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму показав неможливість забезпечення належної якості напруги в контактній мережі при проходженні рухомого складу. Рівень напруги на струмоприймачах ЕРС не відповідає встановленим вимогам навіть при підвищенні напруги на шинах тягових підстанцій на 200 – 300 В відносно номінального значення. Значні амплітуди коливань напруги та розмаху зміни напруги в контактній мережі призводять до обмеження експлуатаційних характеристик електрорухомого складу, призводячи до недотримання встановлених швидкостей руху та зростання часу ходу ділянкою. Дослідженнями встановлено, що в СТЕ постійного струму коливання напруги на шинах тягових підстанцій сягають 500 В, а рівень напруги на струмоприймачі ЕРС може змінюватись в діапазоні 1500 В. Тому для належного функціонування швидкісного руху та його подальшого розвитку необхідно впровадження заходів з підвищення якості напруги в тяговій мережі для забезпечення нормованого рівня напруги з обмеженим діапазоном відхилення.

Українські та закордонні вчені розробили значну кількість способів підсилення системи тягового електропостачання постійного струму для підвищення якості напруги, але, в основному, вони орієнтовані лише на технічне переоснащення апаратного забезпечення, що не вирішує суть проблеми – централізоване живлення системи. Тому необхідна розробка нових заходів з підсилення системи електропостачання залізничного транспорту, які б забезпечували перехід до нової енергоефективної схемотехніки живлення тягової мережі з децентралізацією генеруючих потужностей.

Для забезпечення заданого діапазону зміни рівня напруги на струмоприймачі електрорухомого складу в децентралізованій системі живлення необхідно вирішити низку завдань:

- дослідити режими напруги в системі тягового електропостачання постійного струму;
- удосконалити метод розрахунку напруги на струмоприймачі електрорухомого складу при розподіленій системі тягового електропостачання;
- розробити енергоефективну систему тягового електропостачання з поліпшеним режимом напруги та живленням контактної мережі від альтернативних джерел;
- провести техніко-економічне обґрунтування розробленої системи розподіленого живлення.

Основні положення розділу опубліковані в роботах [5, 14, 17, 18, 23, 24, 58, 59]

## 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КЕРОВАНОЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### 2.1 Аналіз методів розрахунку систем тягового електропостачання

Задачі розрахунку режимів роботи і визначення навантажувальної здатності систем тягового електропостачання вкрай актуальні при їх проектуванні та експлуатації. Однак, на відміну від розрахунку систем зі стаціонарними споживачами електричної енергії, розрахунок СТЕ має певні особливості. На режим тягового навантаження впливає багато факторів, які мають детермінований і стохастичний характер. Тому розрахунок системи електропостачання електрифікованих залізниць повинен проводитись особливими методами, які враховують специфіку тягового навантаження. Проведений аналіз (рис. 2.1) дозволяє розбити всі методи розрахунку системи тягового електропостачання на три групи [6, 66 – 77]: на основі тягових розрахунків, на основі заданих розмірів руху і спільний електричний розрахунок ЕРС і СТЕ.

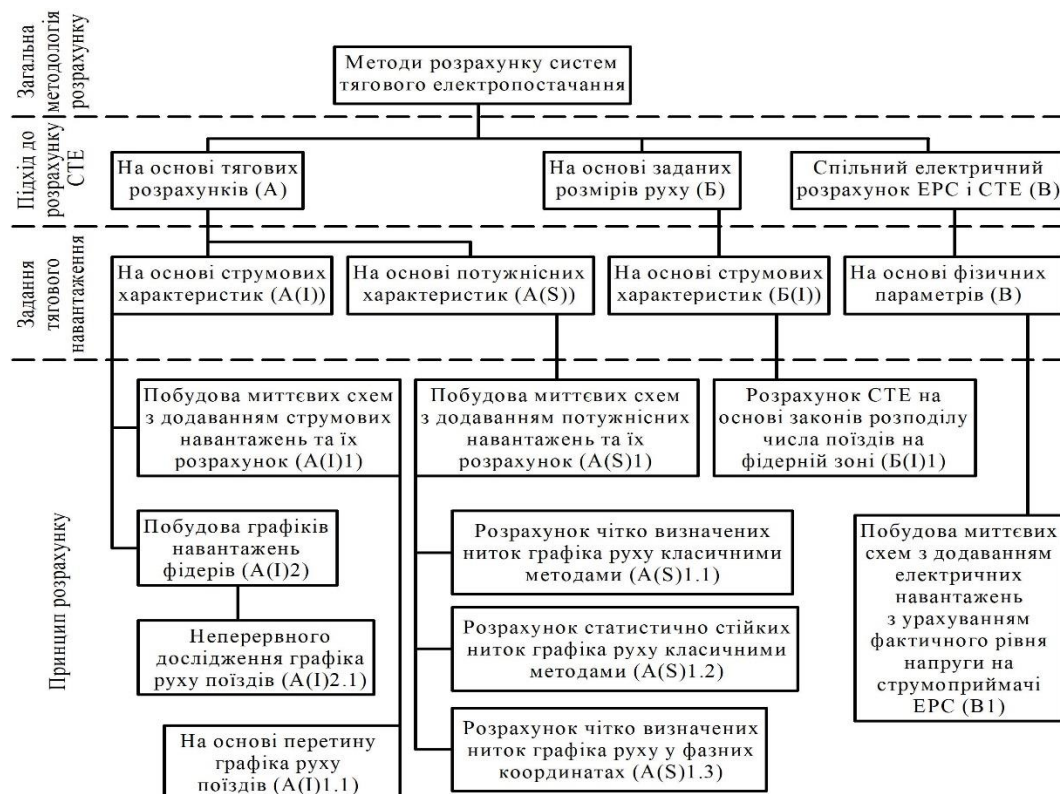


Рис. 2.1. Методи розрахунку систем тягового електропостачання

У методах на основі тягових розрахунків навантаження може бути задане у вигляді потужності або струму. До методів, де тягове навантаження задається у вигляді струму, відносяться принципи розрахунку на основі перетину графіка руху поїздів і неперервного дослідження графіка руху. Принципами розрахунку, де тягове навантаження задається у вигляді потужності, є розрахунок чітко визначених ниток графіка руху класичними методами, розрахунок статистично стійких ниток графіка руху класичними методами і розрахунок чітко визначених ниток графіка руху в фазних координатах. До другої групи методів відноситься розрахунок СТЕ на основі законів розподілу числа поїздів на фідерній зоні. До третьої групи належить побудова миттєвих схем додаванням електричних навантажень з урахуванням фактичного рівня напруги на струмоприймачі.

Всі наведені методи розрахунку системи тягового електропостачання були оцінені за двома критеріями: повнота врахування факторів та ступінь адекватності розрахунку [78]. Результати оцінки представлені в формі тривимірного графіка (рис. 2.2).

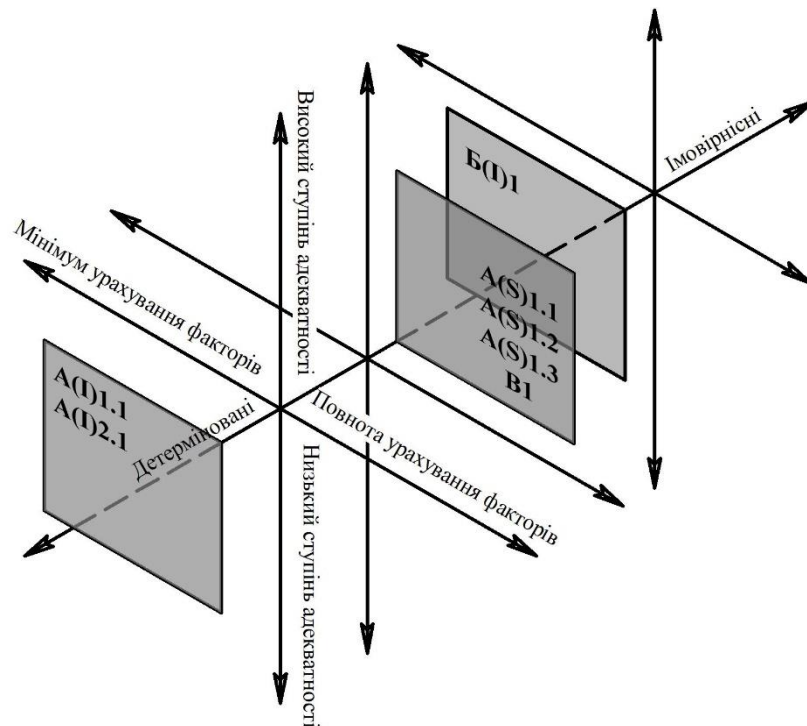


Рис. 2.2. Графік оцінки методів розрахунку системи тягового електропостачання

З графіка видно, що найбільш досконалими методами розрахунку СТЕ є: розрахунок чітко визначених ниток графіка руху класичними методами, розрахунок статистично стійких ниток графіка руху класичними методами, розрахунок чітко визначених ниток графіка руху в фазних координатах і побудова миттєвих схем з додаванням електричних навантажень з урахуванням фактичного рівня напруги на струмоприймачі ЕРС.

В результаті постійного вдосконалення та ускладнення систем тягового електропостачання, їх структурної зміни, необхідності врахування багатьох випадкових факторів і загального підвищення вимог до точності розрахунків, науковці розвивають та удосконалюють існуючі методи або звертаються до засобів моделювання [79 – 88]. В [89] знайшов подальший розвиток метод розрахунку СТЕ на основі потоків відновлення в частині доповнення його визначенням втрат потужності та енергії в елементах тягових підстанцій.

На основі існуючих методів розрахунку побудовані програмні засоби для моделювання режимів роботи електрифікованої ділянки, які орієнтовані на використання ЕОМ та дозволяють відмовитись від усереднення струмоспоживання по довжині міжпідстанційної зони. Програмні комплекси Flow 3, Fazonord, «Fazonord – качество» [90 – 92] реалізовані для програмного вирішення проблем при проектуванні та експлуатації систем тягового електропостачання. Багатоцільові інформаційно-аналітичні комплекси «ИСКРА» та «ЭРА», призначені для вирішення широкого кола завдань проектування, експлуатації та утримання залізниць [93 – 96]. Програма спільного розрахунку систем тягового і зовнішнього електропостачання РАСТ-05К [97], програма для розрахунків пропускної спроможності залізниць і струмів короткого замикання КОРТЭС [98]. Програмне забезпечення для моделювання систем тягового електропостачання OpenPowerNet [100].

Алгоритм вирішення задач на основі моделювання зазвичай включає в себе наступні етапи: обробка графіка руху поїздів, формування миттєвих схем, визначення поточкорозподілу для кожної схеми і розрахунок інтегральних показників моделювання.

Для складних систем, якою є система розподіленого електропостачання з автономними перетворювальними пунктами живлення і накопичувачами електричної енергії, існуючі аналітичні методи розрахунку систем тягового електропостачання не в змозі описати всі явища і процеси перетворення енергії. Тому для вирішення даної проблеми є актуальним застосування математичного моделювання [99].

## **2.2 Задачі для математичної моделі розподіленої системи тягового електропостачання**

Розробка математичної моделі керованої розподіленої СТЕ повинна передбачати розташування на міжпідстанційній зоні ряду підсилюючих пунктів (ПП) з можливістю регулювання їх вихідної потужності в режимі реального часу. Вочевидь, зміна схеми електропостачання призведе до додаткових ускладнень при моделюванні [101, 102]. Такі ускладнення будуть пов'язані з урахуванням впливу сусідніх фідерних зон та раціональним примусовим розподілом потужності паралельно працюючих тягових підстанцій і підсилюючих пунктів для забезпечення мінімуму втрат електричної енергії в тяговій мережі [48]. Апріорі концепція розподіленого живлення з керованими (некерованими) тяговими підстанціями та керованими підсилюючими пунктами передбачає збільшення явища впливу вирівнюючих струмів і, як наслідок, ускладнення розрахунку цих струмів через наявність більшої кількості джерел з різною напругою на шинах [103 – 105].

Моделювання тягових навантажень, що переміщуються, базується на графіку руху, який зв'язує координату положення поїзда з часом. Величини цих навантажень визначаються на основі тягових розрахунків або експериментально. Як зазначалось, зазвичай тягові навантаження задаються величинами струмів, однак такий підхід недостатньо точно описує фізику процесів, що протікають. Машиніст поїзда повинен дотримуватися заданої швидкості руху, тому зміна напруги на струмоприймачі призводить до необхідності регулювання струму електровоза для дотримання необхідної



механічної потужності. Отже, задання тягового навантаження споживаною потужністю є більш раціональним підходом, що відображає закон збереження енергії [106, 108]. Систему тягового електропостачання необхідно задавати параметрами, які б повною мірою описували взаємозв'язок енергетичних процесів, що протікають в системі. В якості таких параметрів можна обрати: схеми живлення тягової мережі, тип контактної підвіски, кількість і координати тягових підстанцій, їх внутрішній опір, напруга холостого ходу (положення анцапф РПН), кількість підсилюючих пунктів на міжпідстанційній зоні, відстань між ними, їх потужність, точки підключення живлячих фідерів до контактної мережі [18].

Деяка вихідна інформація для моделювання може задаватись не аналітично, а у вигляді кінцевої множини вузлових точок, тобто дискретно. У той же час для реалізації обчислювальних алгоритмів математичної моделі потрібно перетворити функцію з дискретної множини точок на неперервну. В цьому випадку можна скористатись апаратом інтерполяції даних [109 – 111]. Але дане завдання для складних залежностей переслідує дві протилежні цілі – точність і швидкодію [112]. У такому випадку можливі дві постановки: 1 - досягнення максимальної швидкодії при заданій величині похибки і 2 - забезпечення мінімальної похибки при заданому максимальному часі обчислення. При розробці математичної моделі СТЕ буде достатнім вирішення першого завдання. Для того щоб підвищити швидкодію математичної моделі в якості інтерполянтів можна використовувати сплайн-функцію, яка проходить через вузли інтерполяції [113].

Мета побудови математичної моделі СТЕ полягає у визначенні витрати електричної енергії при русі поїздів і втрат електроенергії в елементах системи тягового електропостачання, контролю напруги на струмоприймачах електровозів і струмів в елементах розподіленої СТЕ.

## 2.3 Розробка математичної моделі системи тягового електропостачання постійного струму

### 2.3.1 Побудова «Матриці схеми»

Матриця схеми визначає топологію розрахункової ділянки на координатній сітці, напругу холостого ходу тягових підстанцій та підсилюючих пунктів, їх внутрішній опір, вузли підключення живлячих фідерів до контактної мережі та вузли з'єднання контактних підвісок.

Стовпчики матриці визначають координату кожного підключення, а рядки – тип підключення та параметр джерела живлення. Для ділянки рис. 2.3, матриця схеми матиме вигляд (2.1).

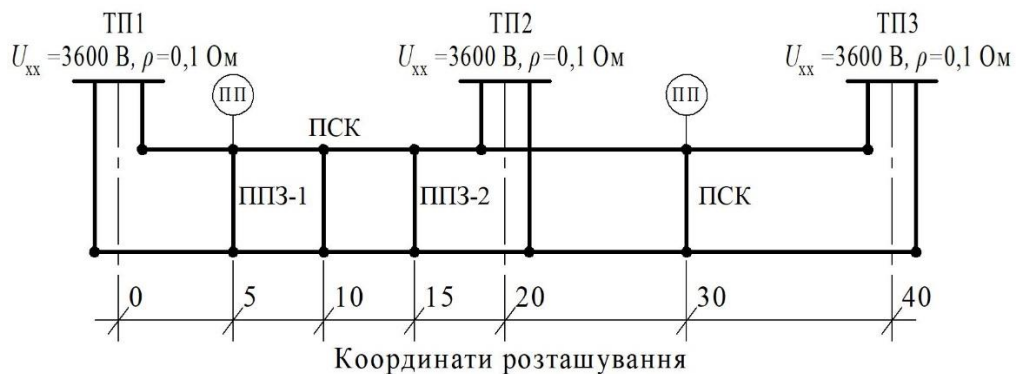


Рис. 2.3. Схема розрахункової ділянки

$$S = \begin{array}{c|cccccc|l} & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 30 & 40 & \text{Координата, км} \\ & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & \text{Підключення ТП/ПП до першої колії} \\ & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \text{Підключення ПСК/ППЗ} \\ & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & \text{Підключення ТП/ПП до другої колії} \\ U_{\text{ххТП}} & U_{\text{ххПП}} & 0 & 0 & U_{\text{ххТП}} & U_{\text{ххПП}} & U_{\text{ххТП}} & & \text{Напруга холостого ходу ТП/ПП, В} \\ \rho_{\text{ТП}} & \rho_{\text{ПП}} & 0 & 0 & \rho_{\text{ТП}} & \rho_{\text{ПП}} & \rho_{\text{ТП}} & & \text{Внутрішній опір ТП/ПП, Ом} \end{array} \quad (2.1)$$

Визначення напруги холостого ходу та внутрішнього опору тягових підстанцій і підсилюючих пунктів відбувається відповідно до [6, 114] з урахуванням двонаправленості перетворювальних агрегатів.

В подальших розрахунках матриця схеми використовується в якості аргументу різних функцій.

### 2.3.2 Визначення струморозподілу в системі без навантаження за умови розміщення на міжпідстанційній зоні підсилюючих пунктів з двонаправленими перетворювачами

Зважаючи на те, що на залізницях України тягові підстанції обладнані некерованими випрямлячами, доцільно розглядати ділянку саме з такими тяговими підстанціями та з підсилюючими пунктами, що обладнані випрямно-інверторними агрегатами. У випадку нерівності напруги тягових підстанцій та підсилюючих пунктів ( $U_{ТП} > U_{ПП}$ ) починає протікати вирівнювальний струм, який, завдяки двонаправленому перетворювачу, споживається підсилюючими пунктами для заряду накопичувача. Слід відзначити, що при відсутності навантаження на міжпідстанційній зоні доцільно навмисно занижувати вихідну напругу ПП для додаткового заряду накопичувача. Встановлення зворотної нерівності напруги ( $U_{ПП} > U_{ТП}$ ) буде доцільним лише у випадку, коли тягові підстанції обладнані випрямно-інверторними агрегатами, а накопичувачі підсилюючих пунктів повністю заряджені. Тоді енергія, згенерована сонячною електростанцією, перетікаючи від підсилюючих пунктів до тягових підстанцій, далі буде спрямована в систему зовнішнього електропостачання. Таким чином, в даній системі, за умови розміщення на міжпідстанційній зоні підсилюючих пунктів з двонаправленими перетворювачами, можуть протікати вирівнювальні струми без наявності електрорухомого складу на ділянці.

Для розрахунку струмів в СТЕ без навантаження за умови розміщення на міжпідстанційній зоні підсилюючих пунктів з двонаправленими перетворювачами необхідно визначити, які струми протікають від кожної тягової підстанції при заданій конфігурації системи тягового електропостачання та значенні напруги холостого ходу відповідної ТП. Для вирішення цього завдання скористаємося методом накладання. Суть методу накладання полягає в тому, що струм у будь-якій вітці кола, створений кількома джерелами, які діють у даному колі, дорівнює алгебраїчній сумі струмів, створених кожним з цих джерел окремо.

Для реалізації розрахунку розглянемо схему ділянки, яка зображена на рис. 2.4. В даній схемі міжпідстанційна зона задається еквівалентним опором

тягової мережі, який враховує схему живлення та кількість колій. Розрахункова ділянка може складатись з будь-якої кількості тягових підстанцій, підсилюючих пунктів та міжпідстанційних зон. Для прикладу будемо використовувати еквівалентну схему заміщення електрифікованої ділянки (рис. 2.3) обмежену  $i-2$  та  $i+2$  тяговими підстанціями, яка має два підсилюючих пункти  $i-1$  та  $i+1$  (рис. 2.4).

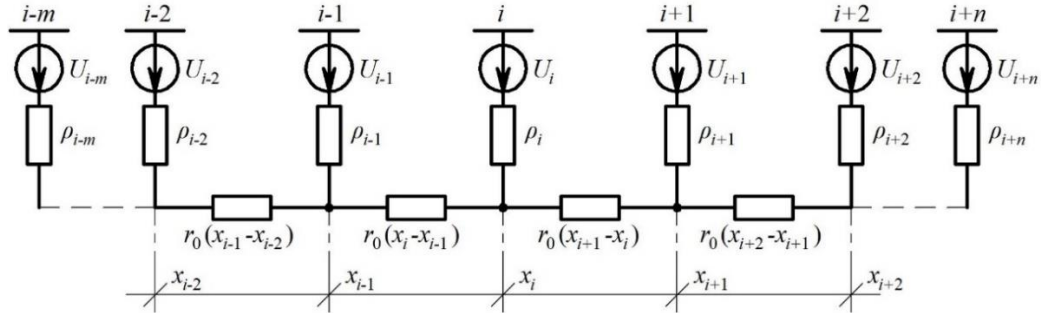


Рис. 2.4. Еквівалентна схема заміщення електрифікованої ділянки

Для використання методу накладання, на розрахунковій ділянці необхідно вибрати деяку  $i$ -ту тягову підстанцію з кількістю  $m$  тягових підстанцій та підсилюючих пунктів ліворуч від обраної та з  $n$  тяговими підстанціями та підсилюючими пунктами праворуч. Тоді розрахункова схема буде мати вигляд рис. 2.5.

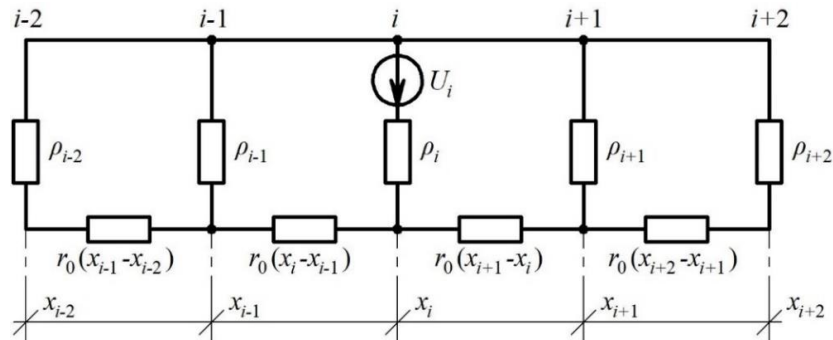


Рис. 2.5. Розрахункова схема для  $i$ -тої тягової підстанції:

$\rho$  – внутрішній опір відповідної тягової підстанції / підсилюючого пункту;  
 $U$  – напруга холостого ходу відповідної тягової підстанції / підсилюючого пункту;  
 $r_0$  – опір 1 км контактної мережі;  $x$  - координата відповідної тягової підстанції / підсилюючого пункту

Для визначення струму  $I_i$  від  $i$ -тої тягової підстанції або підсилюючого пункту за умови відсутності навантаження на дослідній ділянці скористаємось законом Ома:

$$I_i = \frac{U_i}{R_{\text{екв}}}, \quad (2.2)$$

де  $R_{\text{екв}}$  – еквівалентний опір стуму  $i$ -тої тягової підстанції, Ом.

Для визначення еквівалентного опору  $R_{\text{екв}}$  необхідно ліву та праву частину розрахункової схеми відносно  $i$ -тої тягової підстанції звести до єдиного опору. Запишемо ці величини як  $R_L$  та  $R_R$  відповідно. В такому випадку розрахункова схема матиме вигляд рис. 2.6.

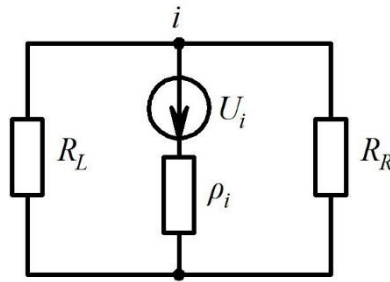


Рис. 2.6. Розрахункова схема для визначення еквівалентного опору:

$R_L$  – еквівалентний опір тягової мережі з урахуванням внутрішнього опору тягових підстанцій та підсилюючих пунктів зліва від  $i$ -тої ТП;

$R_R$  – еквівалентний опір тягової мережі з урахуванням внутрішнього опору тягових підстанцій та підсилюючих пунктів справа від  $i$ -тої ТП

Розрахунок  $R_L$  та  $R_R$  проводиться циклічно для послідовних та паралельних з'єднань. Загальна формула для визначення опору зліва та справа від  $i$ -тої тягової підстанції при загальній кількості тягових підстанцій та підсилюючих пунктів  $N$  має вигляд:

$$R_L(i) = \begin{cases} \emptyset & i = 1 \\ \rho_1 + r_1 & i = 2 \\ \frac{R_L(i-1) \cdot \rho_{i-1} \cdot r_{i-1}}{R_L(i-1) + \rho_{i-1}} & i > 2 \end{cases} \quad R_R(i) = \begin{cases} \emptyset & i = N \\ \rho_N + r_{N-1} & i = N-1 \\ \frac{R_R(N-1) \cdot \rho_{N-1} \cdot r_i}{R_R(N-1) + \rho_{N-1}} & i < N-1 \end{cases} \quad (2.3)$$

де  $i$  – номер розрахункової тягової підстанції;

$\rho$  – внутрішній опір тягової підстанції;

$r$  – опір ділянки тягової мережі між тяговими підстанціями;

$N$  – загальна кількість тягових підстанцій та підсилюючих пунктів на розрахунковій ділянці.

Тоді опір для визначення складової струму  $i$ -тої тягової підстанції:

$$R_{\text{екв}} = \begin{cases} \rho_i + R_R(i), & R_L(i) = \emptyset \\ \rho_i + R_L(i), & R_R(i) = \emptyset \\ \rho_i + \frac{1}{\frac{1}{R_L(i)} + \frac{1}{R_R(i)}}, & R_L(i) \neq \emptyset \wedge R_R(i) \neq \emptyset \end{cases} \quad (2.4)$$

### 2.3.3 Розрахунок вирівнюючих струмів

При наявності електрорухомого складу на розрахунковій ділянці визначення вирівнюючих струмів проводиться шляхом розділення на ліву та праву складові струму від кожної тягової підстанції або підсилюючого пункту (рис. 2.7).

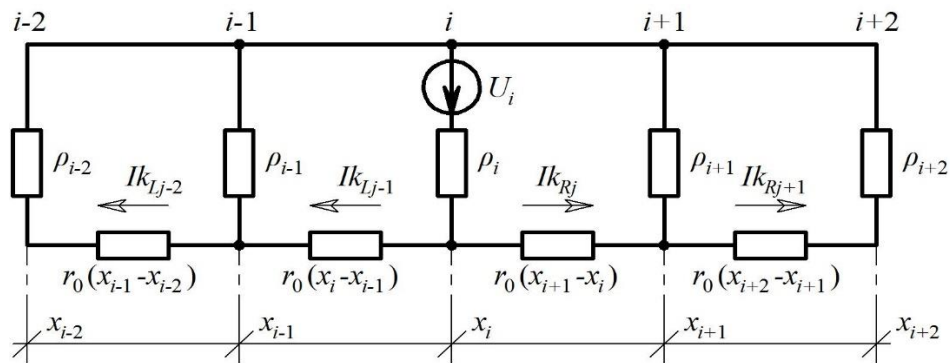


Рис. 2.7. Розподіл струмів на ділянці від  $i$ -тої тягової підстанції

Струми ліворуч визначаються, починаючи з останньої тягової підстанції (підсилюючого пункту), для цього використовується принцип розподілу струмів між декількома паралельними вітками. Якщо розраховується ділянка безпосередньо зліва від тягової підстанції (підсилюючого пункту), що розглядається, то струм визначається за формулою:

$$I_k = I_i \cdot \frac{R_R(i)}{R_R(i) + R_L(i)}. \quad (2.5)$$

Якщо розглядається ділянка, яка у даних умовах накладання не містить праворуч джерела живлення (тягової підстанції або підсилюючого пункту), то

струми на цій ділянці визначаються згідно з розподілом струмів на попередній ділянці:

$$I_k = I_{k-1} \cdot \frac{\rho_{i-1}}{R_L(i-1) + \rho_{i-1}}. \quad (2.6)$$

Якщо обрано крайню тягову підстанцію, то струм на ділянці повністю рівний складовій  $I_k = I_i$ .

Для струмів, що протікають праворуч від тягової підстанції, що розглядається, умови розрахунку будуть аналогічними. Відповідно, формули для визначення струмів на ділянках:

$$I_k = I_i \cdot \frac{R_L(i)}{R_R(i) + R_L(i)}, \quad (2.7)$$

$$I_k = I_{k-1} \cdot \frac{\rho_i}{R_L(i) + \rho_i}, \quad (2.8)$$

$$I_k = I_i \quad (2.9)$$

Для зручності, проміжні результати розрахунків лівих та правих частин струмів записуються у матриці розмірністю  $N \times K$ , де  $K$  – кількість міжпідстанційних зон,  $K = N - 1$ .

$$I_{k_{Lij}} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_{k_{L21}} & 0 & 0 & 0 \\ I_{k_{L31}} & I_{k_{L32}} & 0 & 0 \\ I_{k_{L41}} & I_{k_{L42}} & I_{k_{L43}} & 0 \\ I_{k_{L51}} & I_{k_{L52}} & I_{k_{L53}} & I_{k_{L54}} \end{vmatrix} \quad I_{k_{Rij}} = \begin{vmatrix} I_{k_{R11}} & I_{k_{R12}} & I_{k_{R13}} & I_{k_{R14}} \\ 0 & I_{k_{R22}} & I_{k_{R23}} & I_{k_{R24}} \\ 0 & 0 & I_{k_{R33}} & I_{k_{R34}} \\ 0 & 0 & 0 & I_{k_{R44}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Приймаючи правило знаків при протіканні струмів по ділянках: +1 – напрямом протікання струму зліва направо, -1 – напрямом протікання струму справа на ліво, та складаючи їх за стовпчиками отримаємо вектор результуючого розподілу струму.

$$I_{k_j} = I_{k_{Rj}} - I_{k_{Lj}} \quad (2.10)$$

$$Ik_{Rj} = \left| \sum_{i=1}^N Ik_{Ri1} \quad \sum_{i=1}^N Ik_{Ri2} \quad \sum_{i=1}^N Ik_{Ri3} \quad \sum_{i=1}^N Ik_{Ri4} \right| \quad (2.11)$$

$$Ik_{Lj} = \left| \sum_{i=1}^N Ik_{Li1} \quad \sum_{i=1}^N Ik_{Li2} \quad \sum_{i=1}^N Ik_{Li3} \quad \sum_{i=1}^N Ik_{Li4} \right| \quad (2.12)$$

### 2.3.4 Розрахунок функції опору

Для різних схем живлення контактної мережі закономірність зміни опору тягової мережі відносно рухомого навантаження (функція опору  $f_R(x)$ ) різна, тому доцільно розглянути закон зміни опору для основних схем живлення. З [115] відомо, що для двосторонньої роздільної схеми живлення (рис. 2.8) функція опору буде мати параболічний характер, а саме:

$$f_R(x) = r_0 \left( x - \frac{x^2}{L} \right), \quad (2.13)$$

де  $r_0$  – опір 1 км тягової мережі, Ом/км;

$L$  – довжина міжпідстанційної зони, км;

$x$  – координата місцеположення навантаження, км.

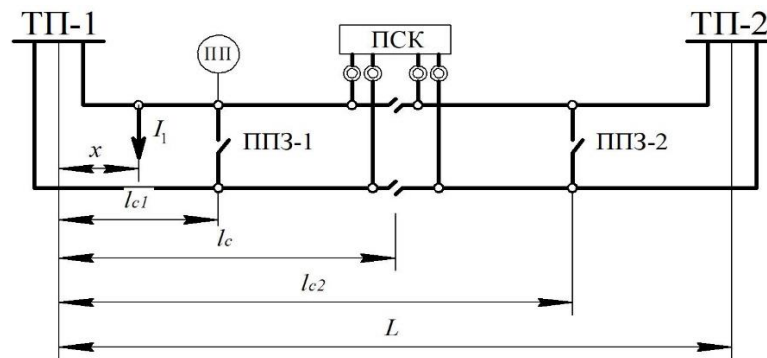


Рис. 2.8. Узагальнена розрахункова схема міжпідстанційної зони

Функція опору для вузлової схеми живлення (рис. 2.8)

$$f_R(x) = r_0 \times \begin{cases} x - \left( \frac{L+l_c}{2Ll_c} \right) x^2, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{L \left( x - \frac{l_c}{2} \right)}{L-l_c} - \frac{\left( L - \frac{l_c}{2} \right) x^2}{L(L-l_c)}, & l_c \leq x \leq L, \end{cases}, \quad (2.14)$$

де  $l_c$  – координата поста секціонування, км.



Паралельна схема живлення (рис. 2.8) буде характеризуватись функцією опору:

$$f_R(x) = r_0 \times \begin{cases} x - \frac{x^2}{2L} - \frac{x^2}{2l_{c1}}, 0 \leq x \leq l_{c1}; \\ -\frac{x^2 - 2l_c x + l_c l_{c1}}{2l_c - 2l_{c1}} - \frac{l_c x^2 - l_{c1} x^2}{2L(l_c - l_{c1})}, l_{c1} \leq x \leq l_c; \\ \frac{x^2 - 2l_{c2} x + l_c l_{c2}}{2l_c - 2l_{c2}} - \frac{l_c x^2 - l_{c2} x^2}{2L(l_c - l_{c2})}, l_c \leq x \leq l_{c2}; \\ -\frac{(L-x) \cdot (Ll_{c2} - 2Lx + l_{c2}x)}{2L(L-l_{c2})}, l_{c2} \leq x \leq L, \end{cases} \quad (2.15)$$

де  $l_{c1}, l_{c2}$  – координати першого та другого пунктів з'єднання контактних підвісок, км.

Графічно отримані функції опору тягової мережі представляють собою параболічні залежності (рис. 2.9), які за допомогою корекції вихідних даних  $l_c, l_{c1}, l_{c2}$  можуть бути адаптовані до будь-яких реальних умов, наприклад для розрахунку несиметричних схем живлення.

а.

б.

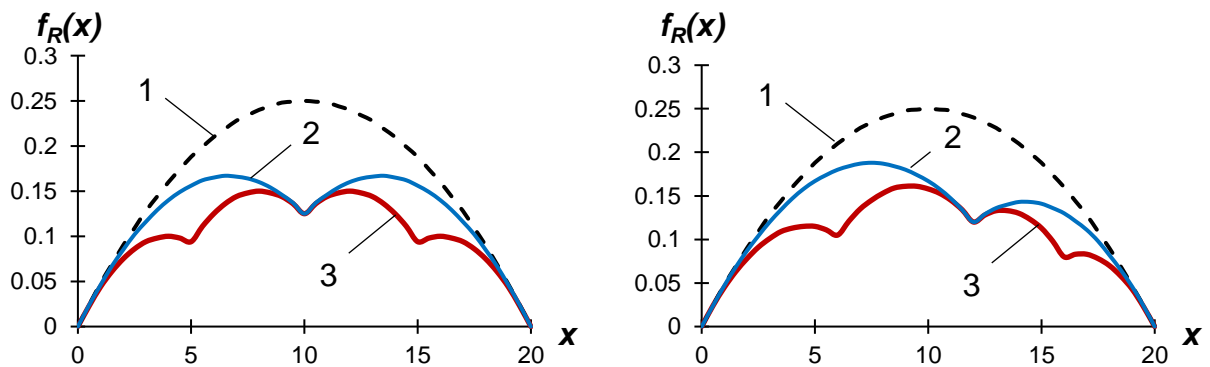


Рис. 2.9. Графічне представлення функцій опору для симетричних (а) та несиметричних (б) схем живлення: 1 – двостороння; 2 – вузлова; 3 – паралельна

Розрахунок функції опору  $f_R(x)$  для електрифікованої ділянки з кількістю тягових підстанцій і підсилюючих пунктів  $N$  та  $N-1$  міжпідстанційних зон виконується з урахуванням всіх тягових підстанцій і підсилюючих пунктів, їх внутрішнього опору та опору тягової мережі [116]. У разі розрахунку двоколійної ділянки необхідно враховувати схеми роздільного, вузлового,

паралельного, а в деяких випадках, неповного паралельного живлення. Для цих випадків визначення функції опору, базуючись на погонних параметрах схеми, враховує місце розташування електровоза відносно вузлів паралельного з'єднання контактних підвісок [117]. Узагальнена схема заміщення зображена на рис. 2.10.

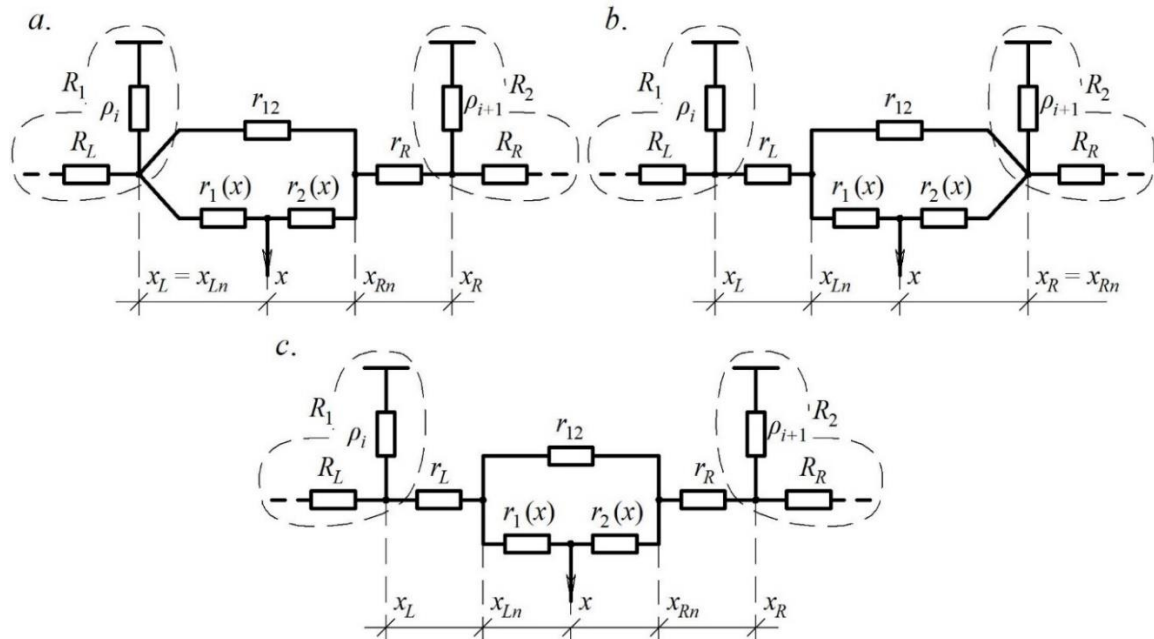


Рис. 2.10. Узагальнена схема заміщення двоколіїної ділянки тягової мережі  
*a* – при знаходженні ЕРС між *i*-тою тяговою підстанцією/підсилюючим пунктом та першим ППЗ;  
*b* – при знаходженні ЕРС між другим ППЗ та *i*+1 тяговою підстанцією/підсилюючим пунктом;  
*c* – при знаходженні ЕРС між першим ППЗ та ПСК або ПСК та другим ППЗ

Найближчі вузли паралельного з'єднання контактних підвісок  $x_{Ln}$  та  $x_{Rn}$  і координати тягових підстанцій/підсилюючих пунктів  $x_L$ ,  $x_R$  визначаються за допомогою матриці схеми  $S$ . Далі знаходяться складові схеми (рис. 2.10) за формулами (2.16 – 2.22).

Складові, що враховують внутрішній опір відповідної тягової підстанції/підсилюючого пункту та опір ділянки зліва / справа від неї:

$$R_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_L(i)} + \frac{1}{\rho_i}} \quad (2.16)$$

$$R_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_R(i+1)} + \frac{1}{\rho_{i+1}}} \quad (2.17)$$

Опір ділянки між тяговою підстанцією/підсилюючим пунктом та найближчим вузлом паралельного з'єднання контактних підвісок:

$$r_L = \frac{1}{2}(x_{Ln} - x_L) \cdot r_0 \quad (2.18)$$

$$r_R = \frac{1}{2}(x_R - x_{Rn}) \cdot r_0 \quad (2.19)$$

Опір ділянки між вузлами паралельного з'єднання контактних підвісок:

$$r_{12} = (x_{Rn} - x_{Ln}) \cdot r_0 \quad (2.20)$$

Опір ділянки між тяговим навантаженням та найближчим вузлом паралельного з'єднання контактних підвісок:

$$r_1(x) = (x - x_{Ln}) \cdot r_0 \quad (2.21)$$

$$r_2(x) = (x_{Rn} - x) \cdot r_0 \quad (2.22)$$

Відповідно до рис. 2.11 опори ділянок  $r_1(x)$ ,  $r_2(x)$ ,  $r_{12}$  перетворюються зі схеми з'єднання «трикутник» в схему «зірка» [7] з опорами в променях  $r_a(x)$ ,  $r_b(x)$ ,  $r_c(x)$ :

$$r_a(x) = \frac{r_1(x) \cdot r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}}, \quad (2.23)$$

$$r_b(x) = \frac{r_2(x) \cdot r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}}, \quad (2.24)$$

$$r_c(x) = \frac{r_1(x) \cdot r_2(x)}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}}. \quad (2.25)$$

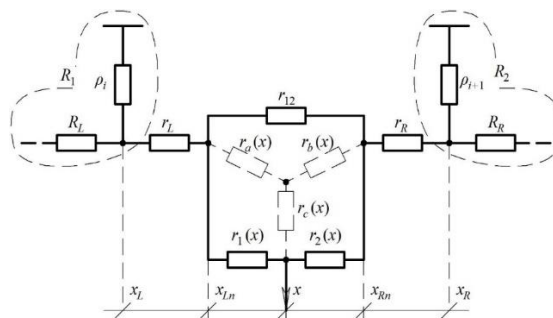


Рис. 2.11. Розрахункова схема заміщення

В результаті функція опору матиме вигляд:

$$f_R(x) = \begin{cases} r_c(x) + \frac{1}{\frac{1}{r_a(x) + R_1 + r_L} + \frac{1}{r_b(x) + R_2 + r_R}}, & x_{Ln} \neq x_{Rn} \\ \frac{1}{\frac{1}{R_1 + r_L} + \frac{1}{R_2 + r_R}}, & x_{Ln} = x_{Rn} \end{cases} \quad (2.26)$$

### 2.3.5 Розрахунок напруги на струмоприймачі електрорухомого складу

Визначення напруги на струмоприймачі електрорухомого складу при русі розрахунковою ділянкою базується на функції струморозподілу тягових підстанцій (2.27). Результатом розрахунку даної функції  $\bar{F}(x, S)$  є вектор, який складається з потенціалів у вузлах розрахункової схеми в місцях підключення фідерів тягових підстанцій, точок з'єднання контактних підвісок колій та ЕРС, що знаходиться на міжпідстанційних зонах.

$$\bar{F}(x, S) = |G| \cdot |A(S)|^{-1} \cdot \bar{B} \quad (2.27)$$

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

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

$\bar{B}$  – вектор задаючих струмів в вузлах.

Розрахунок функції струморозподілу виконується за допомогою методу вузлових потенціалів у матричному вигляді. Слід зауважити, що розмірність матриць залежить від кількості вузлів у розрахунковій схемі. Для розрахункової ділянки зображеної на рис. 2.12 еквівалентна схема заміщення без врахування навантажень матиме вигляд рис. 2.13.

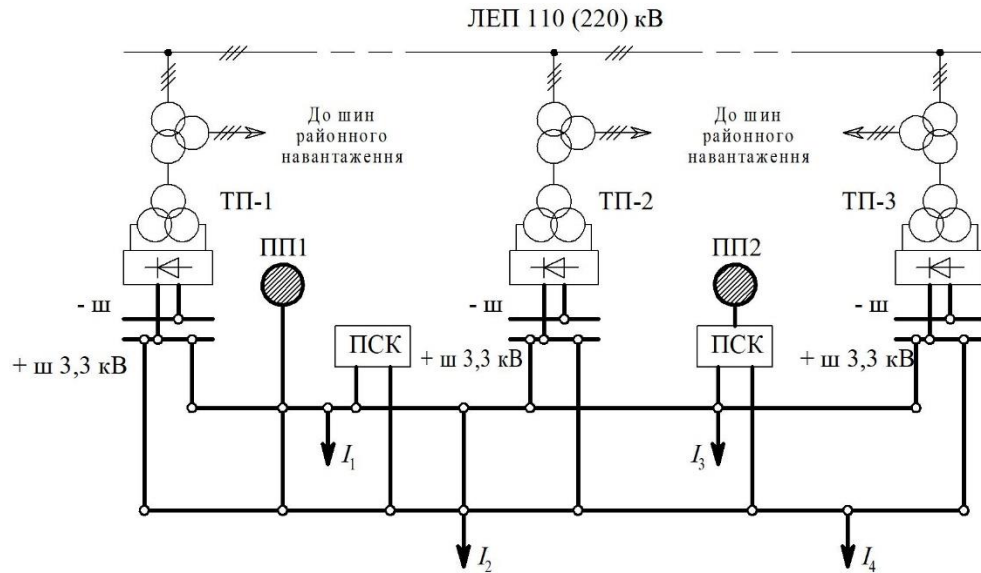


Рис. 2.12. Схема ділянки для визначення потенціалів у вузлах

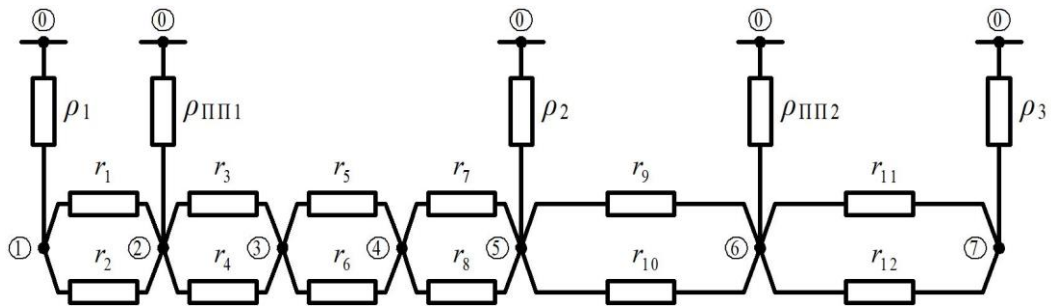


Рис. 2.13. Схема заміщення дослідної ділянки без навантажень

У випадку, коли на розрахунковій ділянці відсутні навантаження (рис. 2.13), схема заміщення може бути описана квадратною базисною матрицею  $|A(S)|$  (2.28) по головній діагоналі якої записані власні результуючі провідності віток, решта елементів матриці представляє собою провідності зв'язків між попереднім та наступним вузлом [118, 119].

$$A(S) = \begin{vmatrix} \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} & -\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} & \frac{1}{\rho_{ПП1}} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} & -\frac{1}{r_5} - \frac{1}{r_6} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} & \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6} & -\frac{1}{r_7} - \frac{1}{r_8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{r_5} - \frac{1}{r_6} & \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6} + \frac{1}{r_7} + \frac{1}{r_8} & -\frac{1}{r_9} - \frac{1}{r_{10}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_7} - \frac{1}{r_8} & \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{r_7} + \frac{1}{r_8} + \frac{1}{r_9} + \frac{1}{r_{10}} & -\frac{1}{r_9} - \frac{1}{r_{10}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_9} - \frac{1}{r_{10}} & \frac{1}{\rho_{ПП2}} + \frac{1}{r_9} + \frac{1}{r_{10}} + \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} & -\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} & \frac{1}{\rho_3} + \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} \end{vmatrix} \quad (2.28)$$

Матриця провідностей тягових підстанцій та підсилюючих пунктів  $|G|$  також є квадратною по головній діагоналі котрої, відповідно до вузла підключення, записані власні провідності тягових підстанцій/підсилюючих пунктів (2.29). Для схеми без навантажень вектор задаючих струмів  $\bar{B}$  буде заповнений нулями (2.30).

$$G = \begin{vmatrix} \frac{1}{\rho_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_{ПП1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_{ПП2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_3} \end{vmatrix} \quad (2.29)$$

$$\bar{B}^T = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0| \quad (2.30)$$

У момент часу, коли навантаження на розрахунковій ділянці знаходиться у вузлах (навантаження  $I_2, I_3$  рис. 2.12) схема заміщення залишається майже незмінною, додатково будуть вказані лише дані навантаження (рис. 2.14).

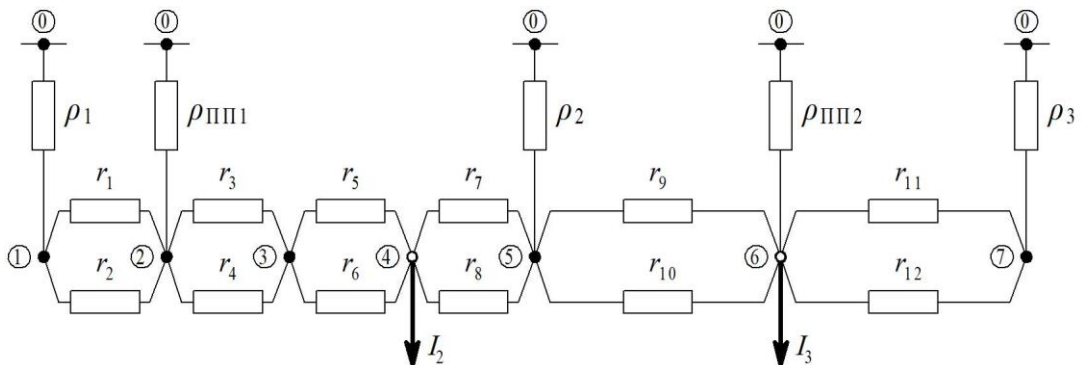


Рис. 2.14. Схема заміщення з навантаженням у вузлах

Базисна матриця схеми та матриця провідностей залишаться незмінними (2.28, 2.29). У векторі задаючих струмів, відповідно до вузла, будуть вказані значення струмів навантаження (2.31).

$$\bar{B}^T = [0 \ 0 \ 0 \ I_2 \ 0 \ I_3 \ 0] \quad (2.31)$$

У момент часу, коли навантаження на розрахунковій ділянці знаходиться між вузлами (наприклад навантаження  $I_4$  рис. 2.12) схема заміщення набуває наступного вигляду (рис. 2.15).

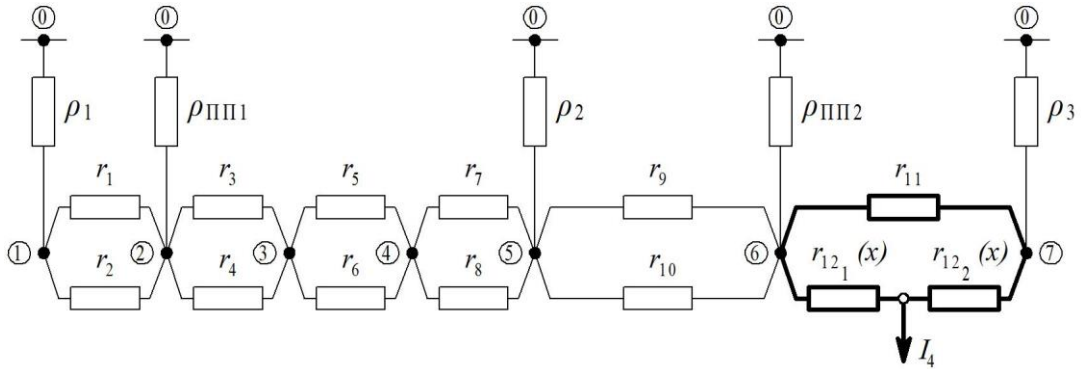


Рис. 2.15. Схема заміщення з навантаженням між вузлами

При цьому величини опорів  $r_{12_1}(x)$ ,  $r_{12_2}(x)$ , що з'являються між ЕРС та суміжними вузлами, будуть функціонально залежними від місцезнаходження ЕРС. Додатково відбувається перетворення «трикутник – зірка» опорів  $r_{11}$ ,  $r_{12_1}(x)$ ,  $r_{12_2}(x)$  в результаті чого буде отримано нові опори  $r_a(x)$ ,  $r_b(x)$ ,  $r_c(x)$ , один додатковий вузол та, як результат, нову схему заміщення (рис. 2.16).

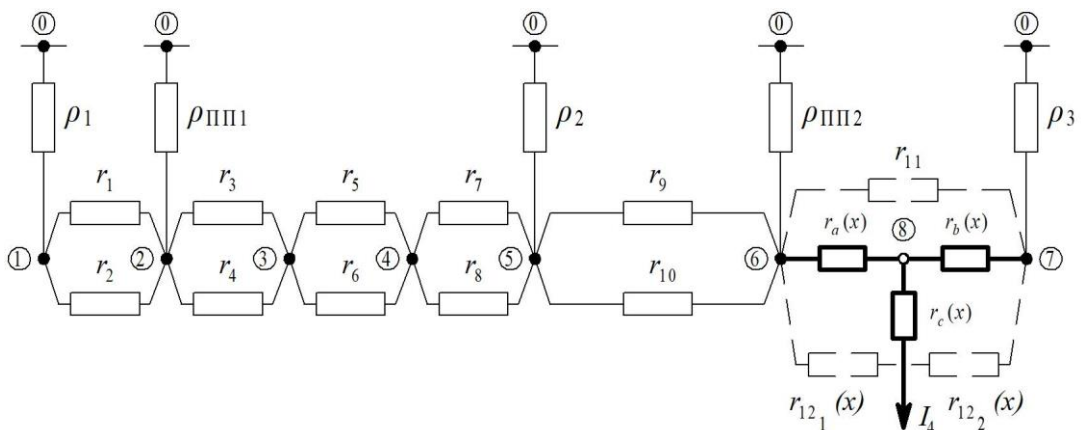


Рис. 2.16. Схема заміщення з перетворенням «трикутник – зірка»

У такому випадку, побудова базисної матриці схеми передбачає розрив існуючих зв'язків між 6 і 7 вузлом (рис. 2.13), (2.28) та їх заміну на нові, з урахуванням додаткового вузла та нових опорів, отриманих в результаті

перетворення. Таким чином базисна матриця схеми  $|A(S)|$  змінить свою розмірність з  $7 \times 7$  (2.28) на  $8 \times 8$  (2.32). Відповідно також збільшиться матриця провідностей тягових підстанцій та підсилюючих пунктів  $|G|$  (2.33) та вектор задаючих струмів  $\bar{B}$  (2.34).

$$A(S) = \begin{vmatrix} \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} & -\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} & \frac{1}{\rho_{\text{III1}}} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} & -\frac{1}{r_5} - \frac{1}{r_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_5} - \frac{1}{r_6} & \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6} & -\frac{1}{r_4} - \frac{1}{r_5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{r_4} - \frac{1}{r_5} & \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6} + \frac{1}{r_7} + \frac{1}{r_8} & -\frac{1}{r_7} - \frac{1}{r_8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_7} - \frac{1}{r_8} & \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{r_7} + \frac{1}{r_8} + \frac{1}{r_9} + \frac{1}{r_{10}} & -\frac{1}{r_9} - \frac{1}{r_{10}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_9} - \frac{1}{r_{10}} & \frac{1}{\rho_{\text{III2}}} + \frac{1}{r_9} + \frac{1}{r_{10}} + \frac{1}{r_a(x)} & 0 & -\frac{1}{r_a(x)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_3} + \frac{1}{r_b(x)} & -\frac{1}{r_b(x)} & -\frac{1}{r_a(x)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_a(x)} & -\frac{1}{r_b(x)} & \frac{1}{r_a(x)} + \frac{1}{r_b(x)} & 0 \end{vmatrix} \quad (2.32)$$

$$G = \begin{vmatrix} \frac{1}{\rho_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_{\text{III1}}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_{\text{III2}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (2.33)$$

$$\bar{B}^T = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ I_4| \quad (2.34)$$

Для заданої миттєвої схеми (рис. 2.12) схема заміщення з урахуванням перетворень матиме вигляд (рис. 2.17), базисна матриця схеми матиме розмірність  $|A(S)| 9 \times 9$ , матриця провідностей –  $|G| 9 \times 9$ , вектор задаючих струмів –  $\bar{B} 1 \times 9$ .



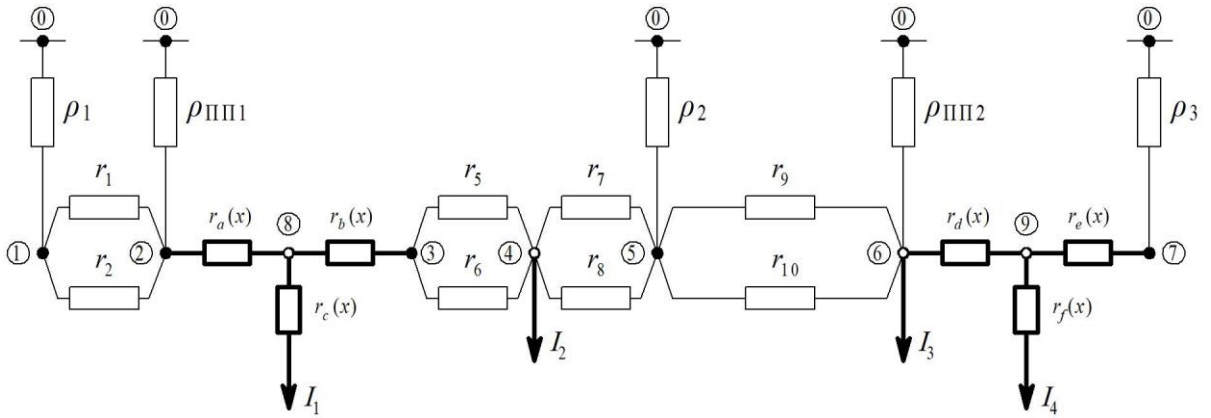


Рис. 2.17. Схема заміщення до рис. 2.12

Таким чином, описані матриці  $|A(S)|$ ,  $|G|$  та  $\bar{B}$  є динамічними та змінюють свій розмір в залежності від поїзної ситуації на розрахунковій ділянці та місцеположення окремого навантаження.

На рис. 2.18 зображено графічне представлення функцій струморозподілу тягових підстанцій та підсилюючих пунктів відповідно до рис. 2.12 отриманих за допомогою описаного методу при русі першого навантаження розрахунковою ділянкою.

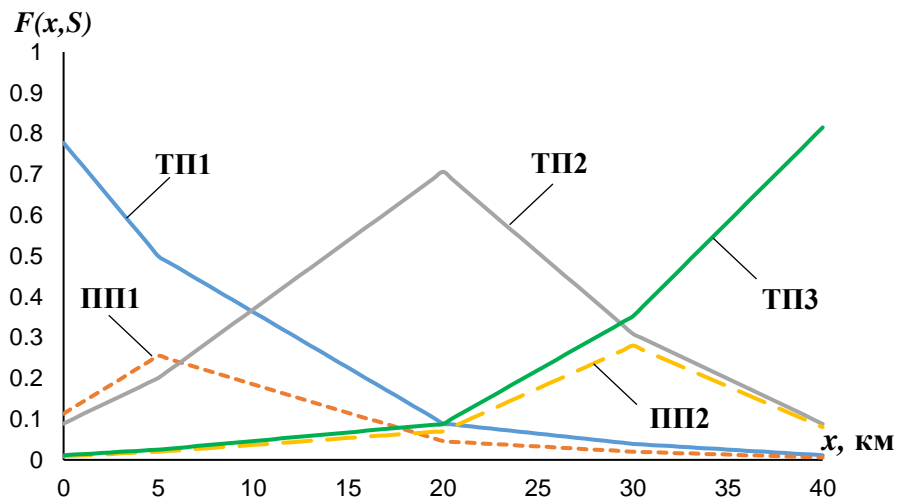


Рис. 2.18. Функції струморозподілу тягових підстанцій та підсилюючих пунктів

За допомогою отриманих потенціалів у вузлах схеми, опорів віток між ними та графіка руху поїздів визначається розподіл струмів в контактній мережі. Для цього спочатку визначається струморозподіл у заданій схемі живлення від одного навантаження, наприклад для ділянки між першим та

другим вузлом (рис. 2.17) струм, що протікає в контактній мережі першої колії буде визначатись:

$$i_{K1} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{r_1}, \quad (2.35)$$

де  $\Phi_1, \Phi_2$  – потенціали відповідно першого та другого вузла, В;

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

Далі за допомогою принципу суперпозиції визначається розподіл струмів в контактній мережі від усіх поїздів та з урахуванням вирівнювальних струмів. Наприклад, для контактної мережі першої колії вузлової схеми живлення:

$$I_{K1}(x) = \sum_{i=1}^{n_1} I_{K1}(2i-1, x) + \sum_{i=1}^{n_2} I_{K1}(2i, x) + I_{\text{вир}}. \quad (2.36)$$

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

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

Функція розподілу струмів в контактній мережі в місці розташування ЕРС (рис. 2.19) має розрив першого роду  $\lim_{x \rightarrow x_{tt}-0} I_K(x) \neq \lim_{x \rightarrow x_{tt}+0} I_K(x)$  [120] та в точці  $x_{tt}$  набуває значення  $\lim_{x \rightarrow x_{tt}-0} I_K(x) = A$  і  $\lim_{x \rightarrow x_{tt}+0} I_K(x) = B$ . Дане обумовлено тим, що навантаження отримує живлення з двох сторін, тобто струми в тяговій мережі можуть мати різні напрями протікання.

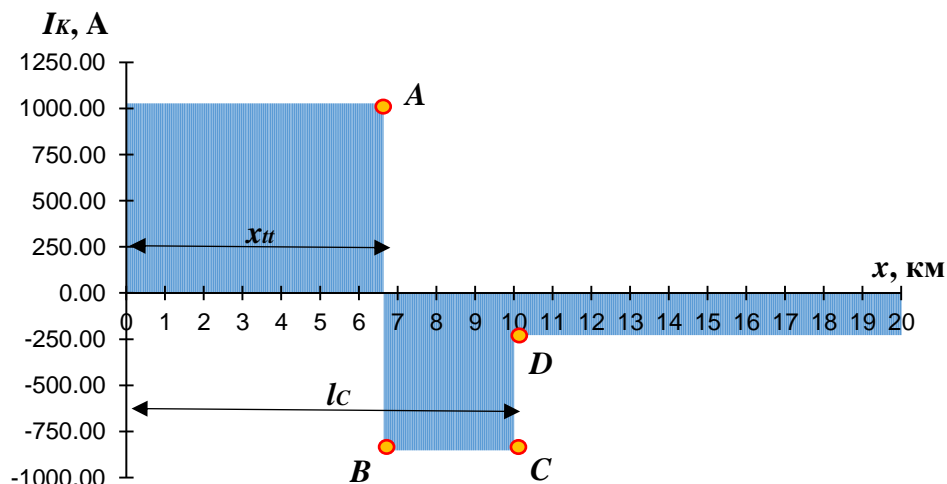


Рис. 2.19. Розподіл струму в контактній мережі

Визначення функції розподілу втрат напруги передбачає використання функції розподілу струмів в контактній мережі з накопичуючим домноженням на відповідну відстань та питомий опір мережі. При накопиченні використовується рекурсивний підхід, тобто визначення розподілу втрат напруги наступного інтервалу використовує втрату напруги попереднього рис. 2.20. Оскільки функція розподілу струму має розрив першого роду, а падіння напруги розраховується з лівої частини схеми, в подальших розрахунках втрат напруги використовується лівий ліміт.

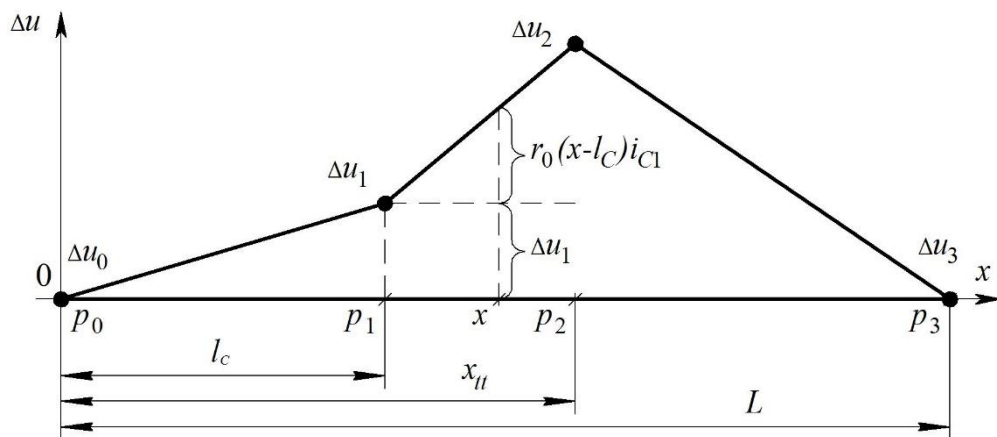


Рис. 2.20. Розподіл втрат напруги вздовж міжпідстанційної зони  
 $p_0 - p_3$  – точки перегину кривої втрат напруги;  $l_c$  – відстань від тягової підстанції до ПСК;  $x_{tt}$  – відстань від тягової підстанції до місця розташування ЕРС;  $L$  – довжина міжпідстанційної зони

Формалізований запис функції розподілу втрат напруги в контактній мережі першої колії матиме вигляд

$$\Delta u_{K1}(n, x) = \Delta u_i(n, x) + r_0 \lambda(n, x) i_{K1}(n, x) \quad (2.37)$$

Де  $\Delta u_i(n, x)$  – значення втрати напруги у вузлі лівіше від навантаження, яке для  $i > 0$  визначається як:

$$\Delta u_i(n, x) = r_0 \sum_{j=0}^i (\bar{p}(n)_j - \bar{p}(n)_{j-1}) \lim_{x \rightarrow \bar{p}(n)_{j-0}} i_{K1}(n, x) \quad (2.38)$$

$i$  – кількість перегинів функції розподілу втрат напруги, починаючи від 0.

У випадку коли  $i = 0$  втрати напруги  $\Delta u_i(n, x) = 0$ .

У формулі (2.37) індекс  $i$  може бути обраним відповідно до умов:

$$i = \begin{cases} 0, p_0 \leq x < p_1; \\ 1, p_1 \leq x < p_2; \\ 2, p_2 \leq x < p_3; \\ \dots \end{cases}$$

$\bar{p}(n)$  – відсортований вектор координат, що складається з вузлів з'єднання контактних підвісок першої та другої колії ліворуч і праворуч від навантаження, позиції навантаження  $x_{tt}(n)$  та точок початку (0) та кінця розрахункової ділянки ( $L$ ). Для вузлової схеми цей вектор може бути записаний як

$$\bar{p}(n) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \{0; l_C; L\}, x_{tt}(n) = 0 \vee x_{tt}(n) = l_C \vee x_{tt}(n) = L; \\ \{0; x_{tt}(n); l_C; L\}, 0 < x_{tt}(n) < l_C; \\ \{0; l_C; x_{tt}(n); L\}, l_C < x_{tt}(n) < L; \end{array} \right. & , n = 2i - 1; \\ \left\{ \begin{array}{l} \{0; l_C; L\}, 0 < x_{tt}(n) < L, n = 2i. \end{array} \right. & \end{cases} \quad (2.39)$$

У формулі (2.37)  $\lambda(n, x)$  визначається відстань від лівого краю до навантаження, тому схема з ПСК може бути описана наступною системою рівнянь:

$$\lambda(n, x) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} (x-0), 0 \leq x \leq x_{tt}(n); \\ (x-x_{tt}(n)), x_{tt}(n) < x \leq l_C; \\ (x-l_C), l_C < x \leq L; \end{array} \right. & , 0 \leq x_{tt}(n) \leq l_C; \\ \left\{ \begin{array}{l} (x-0), 0 \leq x \leq l_C; \\ (x-l_C), l_C < x \leq x_{tt}(n); \\ (x-x_{tt}(n)), x_{tt}(n) < x \leq L; \end{array} \right. & , l_C < x_{tt}(n) \leq L; \end{array} \right. & , n = 2i - 1; \\ \left\{ \begin{array}{l} (x-0), 0 \leq x \leq l_C; \\ (x-l_C), l_C < x \leq L; \end{array} \right. & , n = 2i. \end{cases} \quad (2.40)$$

Наприклад, для рис. 2.20

$$\Delta u_0(n, x) = 0;$$

$$\Delta u_1(n, x) = r_0(l_C - 0) \lim_{x \rightarrow l_C - 0} i_{K1}(n, x);$$

$$\Delta u_2(n, x) = r_0(l_C - 0) \lim_{x \rightarrow l_C - 0} i_{K1}(n, x) + r_0(x_{tt}(n) - l_C) \lim_{x \rightarrow x_{tt}(n) - 0} i_{K1}(n, x);$$

$$\Delta u_3(n, x) = r_0(l_C - 0) \lim_{x \rightarrow l_C - 0} i_{K1}(n, x) + r_0(x_{tt}(n) - l_C) \lim_{x \rightarrow x_{tt}(n) - 0} i_{K1}(n, x) + r_0(L - x_{tt}(n)) \lim_{x \rightarrow L - 0} i_{K1}(n, x).$$

За аналогією з функцією розподілу струмів в контактній мережі визначається розподіл втрат напруги в контактній мережі від усіх поїздів та з врахуванням впливу вирівнювальних струмів, а саме:

$$\Delta U_{K1}(x) = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta U_{K1}(2i-1, x) + \sum_{i=1}^{n_2} \Delta U_{K1}(2i, x) + I_{\text{вир}} \cdot r_0 \cdot x \quad (2.41)$$

Величина напруги на струмоприймачі електровоза з урахуванням взаємного впливу кожного навантаження на попутній та, залежно від схеми живлення, на суміжній коліях визначається

$$U_j(x) = U_{\text{ш}} - I_j(x) \cdot f_R(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n_1} \Delta U'_k(x, x_k) - \sum_{k=n_1}^{n_1+n_2} \Delta U''_k(x, x_k), \quad (2.42)$$

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

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

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

Різниця потужності, що згенерована тяговими підстанціями та пунктами підсилення і потужності, яку споживає ЕРС в кожній точці схеми визначає розподіл втрат потужності вздовж дослідної ділянки. Інтегрування втрат потужності за часом визначає втрати електроенергії при русі ЕРС дослідною ділянкою.

Приведені математичні викладки реалізовані у вигляді алгоритму в середовищі MathCAD (додаток А) та в окремому програмному продукті *iSET* [121].

## 2.4 Перевірка математичної моделі на адекватність

При створенні математичної моделі дуже важливо досягти необхідної відповідності між поведінкою реальної системи і поведінкою моделі. Формалізацією оцінки цієї відповідності слугує механізм визначення адекватності моделі. Модель вважається адекватною, якщо відображає задані властивості об'єкта з прийнятною точністю (для інженерно-технічних розрахунків  $\delta \leq 5\%$ ) [122, 123].

Для дослідження розробленої математичної моделі проводились розрахунки ділянки НД Вузол – П'ятихатки Придніпровської залізниці. Вихідні дані для проведення розрахунків були отримані експериментальним шляхом та за рахунок аналізу технічної документації ділянок електропостачання. Таким чином було отримано часові залежності споживаного струму та напруги на струмоприймачі поїзду масою 4532 т протягом руху дослідною ділянкою. Споживаний струм ЕРС зображено на рис. 2.21.

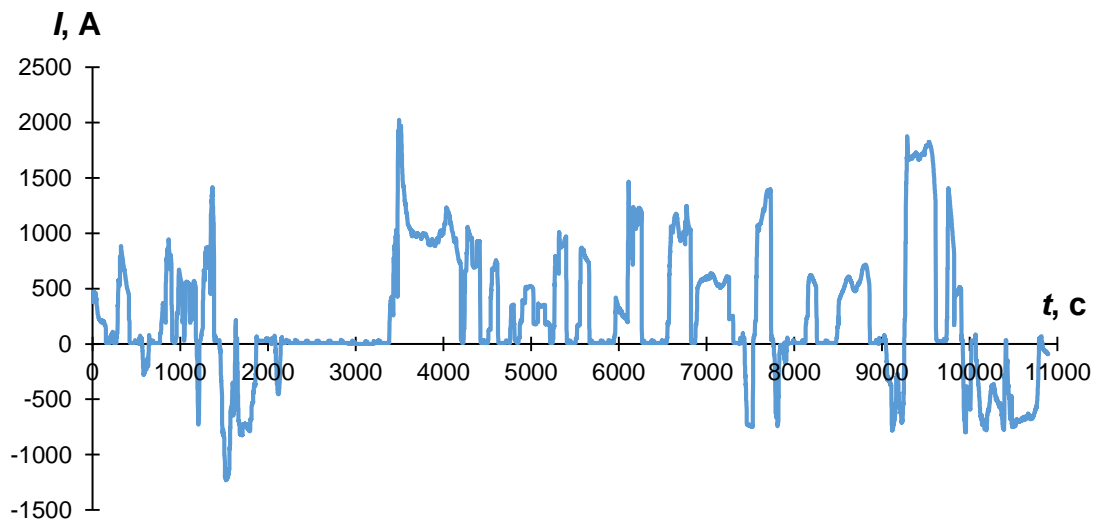


Рис. 2.21. Споживаний струм ЕРС

Результати розрахунку та дослідних вимірювань напруги на струмоприймачі ЕРС зображені на рис. 2.22.

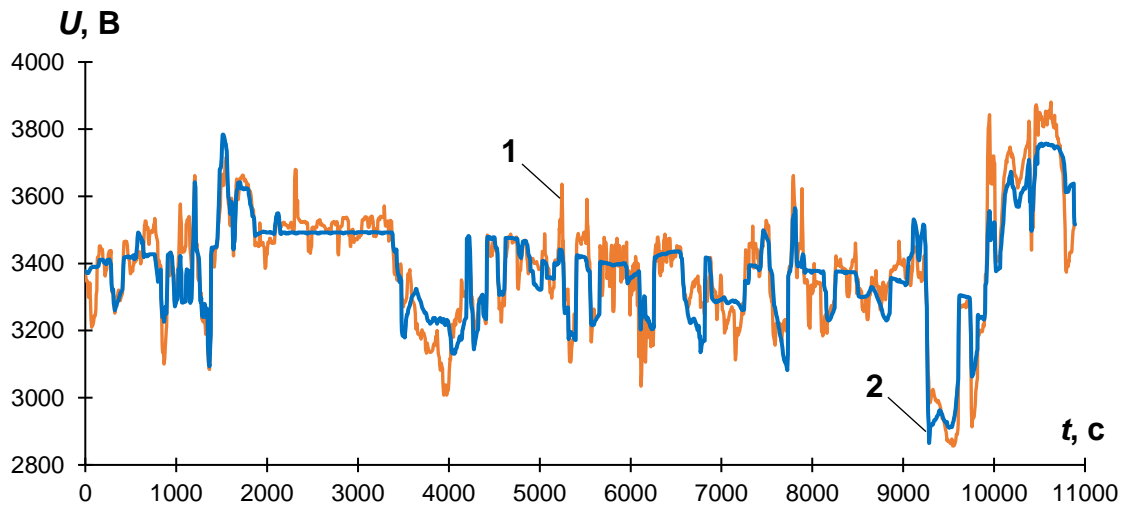


Рис. 2.22. Напряга на струмоприймачі ЕРС:  
1 – експеримент; 2 – розрахунок на моделі

Також отримано розподіл втрат потужності в тяговій мережі при русі ЕРС дослідною ділянкою, що зображені на рис. 2.23.

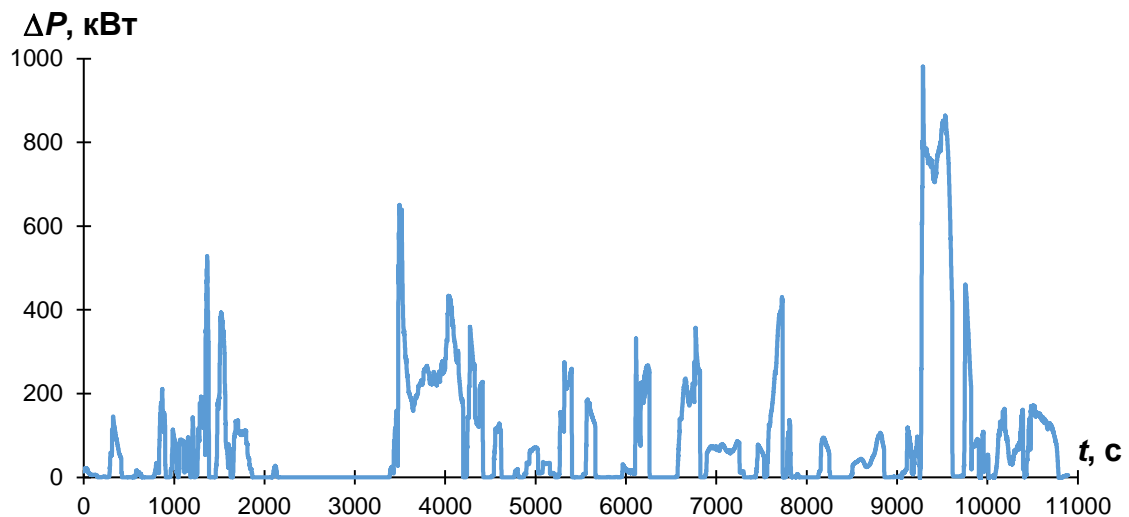


Рис. 2.23. Втрати потужності в тяговій мережі

В ході дослідження розробленої математичної моделі, середнє значення абсолютної та відносної похибки по відношенню до експериментальних даних склало 1,58 % та -0,075 %, що становить 53,07 та -4,18 В відповідно, 95 % значень абсолютної та відносної похибки на кумулятивній кривій імовірності знаходяться в межах до 4,5 та 3,78 % (рис. 2.24).

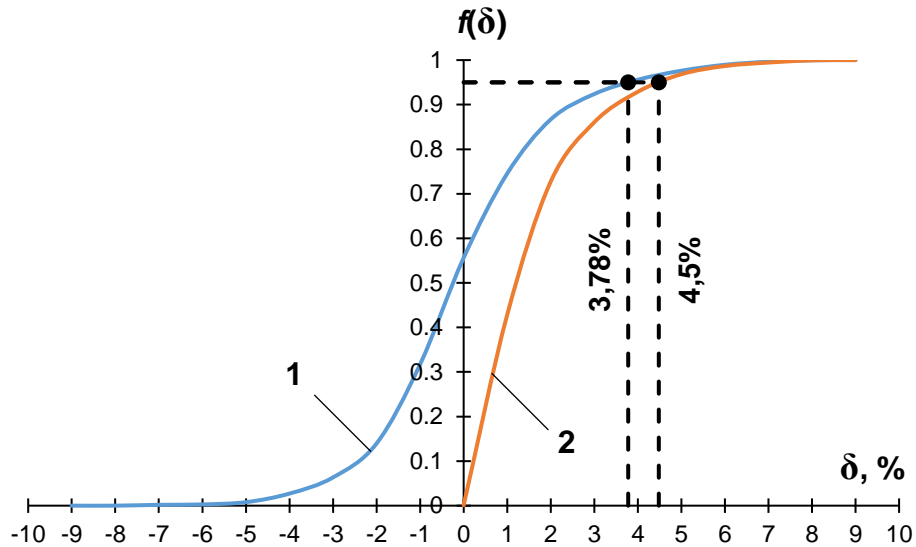


Рис. 2.24. Статистична функція розподілу похибок;  
1 – відносна похибка, 2 – абсолютна похибка

Відповідно до правила  $3\sigma$  [124], 95 % значень похибки, при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ , повинні знаходитись в межах  $\mu - 1,96\sigma \dots \mu + 1,96\sigma$ . На полігоні частот відносної похибки (рис. 2.25) ці значення знаходяться в межах  $-141,37 \dots 133$  В.

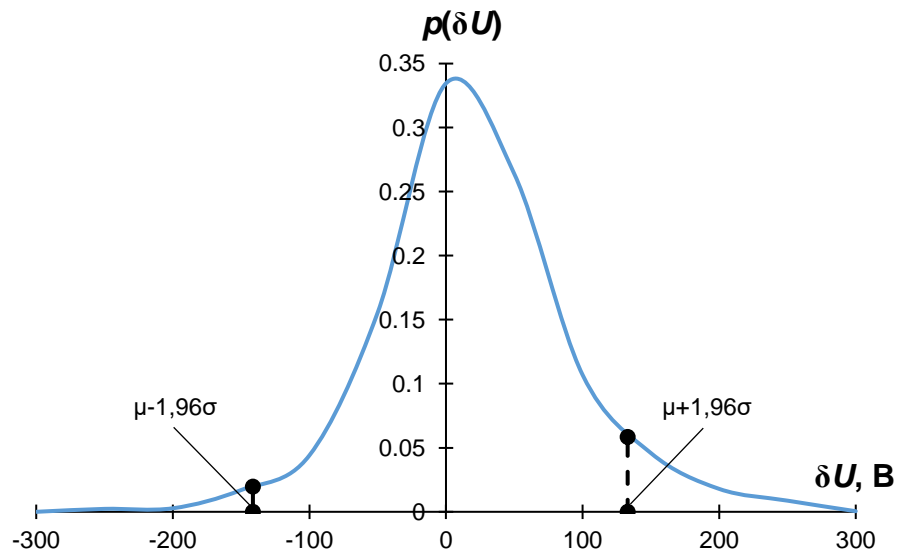


Рис. 2.25. Полігон частот відносної похибки

В цілому точність розрахунків на математичній моделі відповідає умові  $\delta \leq 5$  %. Значний діапазон похибки  $-141,37 \dots 133$  В обумовлений величиною стандартного відхилення ( $\sigma = 69,99$  В).



Для перевірки відповідності між поведінкою реальної системи і поведінкою моделі застосовувався критерій узгодження Пірсона. Даний критерій відноситься до непараметричних критеріїв, основним завданням якого є порівняння двох сукупностей результатів у випадку невідомого їх закону розподілу[154].

Оскільки закон розподілу напруги на струмоприймачі ЕРС відрізняється від теоретичних (стандартних чи відомих) [30] (рис. 2.26) параметричні критерії не можуть дати відповіді на питання про справедливість статистичних гіпотез, тому доцільно застосовувати непараметричні критерії [126].

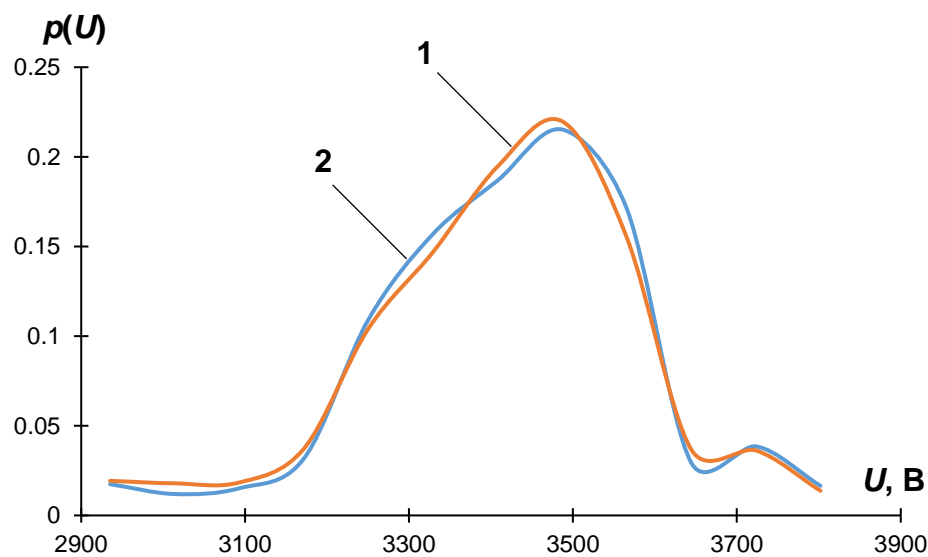


Рис. 2.26. Закон розподілу напруги на струмоприймачі ЕРС;  
1 – експериментальна крива, 2 – розрахункова крива

Критерій узгодження Пірсона дозволяє здійснювати перевірку емпіричного і теоретичного (або іншого емпіричного) розподілів однієї ознаки [127]. Суть критерію полягає в тому, що він порівнює очікувані частоти появи якихось подій і фактичні частоти появи цих подій.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(f_{o_i} - f_{e_i})^2}{f_{e_i}} \quad (2.43)$$

де  $n$  – кількість інтервалів,

$f_o$  – фактична частота,

$f_e$  – очікувана частота.

Для перевірки відповідності експериментальному закону розподілу розрахункових даних була висунута нульова гіпотеза  $H_0$ : «Експериментальні та розрахункові дані мають однакові закони розподілу», та альтернативна –  $H_1$ : «Експериментальні та розрахункові дані мають різні закони розподілу» при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ .

Розрахунки для перевірки  $H_0$  виконувались відповідно до виразу 2.43 (табл. 2.1). При цьому встановлено, що емпіричне значення  $\chi^2$  менше за критичне ( $\chi^2_c = 18,99$  (табл. 2.1),  $\chi^2_{кр} = 19,68$  при кількості ступенів свободи  $(n-1)$  та рівні значимості  $\alpha = 0,05$  [128]). Таким чином, оскільки  $\chi^2_c < \chi^2_{кр}$  то немає підстав для відхилення нульової гіпотези.

Таблиця 2.1 – Згрупований статистичний ряд даних

Інтервал	Фактична частота спостереження	Фактична імовірність спостереження	Очікувана частота спостереження	Очікувана імовірність спостереження	Значення $\chi^2$
$-\infty \dots 2935$	38	0.017439	42	0.019275	0.380952
2935...3014	26	0.011932	39	0.017898	4.333333
3014...3092	33	0.015145	40	0.018357	1.225
3092...3171	69	0.031666	81	0.037173	1.777778
3171...3250	238	0.109224	227	0.104176	0.53304
3250...3329	342	0.156953	320	0.146856	1.5125
3329...3408	407	0.186783	424	0.194585	0.681604
3408...3487	469	0.215236	479	0.219826	0.208768
3487...3566	373	0.171179	338	0.155117	3.62426
3566...3645	64	0.029371	80	0.036714	3.2
3645...3724	84	0.03855	79	0.036255	0.316456
3724... $+\infty$	36	0.016521	30	0.013768	1.2
<b>Сума</b>	<b>2179</b>	<b>1</b>	<b>2179</b>	<b>1</b>	<b>18,99</b>

В результаті перевірки встановлено, що математична модель адекватно відображає поведінку реальної системи з абсолютною похибкою  $\delta = 1,58$  %.

## Висновки до розділу 2

Запропонована математична модель дозволяє виконати електричні розрахунки системи тягового електропостачання ділянки з будь-якою кількістю тягових підстанцій та міжпідстанційних зон, враховувати різні значення напруги холостого ходу тягових підстанцій та їх внутрішній опір, різні схеми підключення генеруючих потужностей до тягової мережі. Математична модель базується на визначенні закономірності зміни опору

тягової мережі з  $N$  тяговими підстанціями / підсилюючими пунктами та  $N-1$  міжпідстанційними зонами аналітичними функціями, які в сукупності з функціями струморозподілу та розподілу потенціалів у вузлах системи, дозволяють формалізувати розрахунки електротягових систем та перейти від дискретного до неперервного уявлення. Визначення основних показників системи тягового електропостачання  $U_{\min}$ ,  $\Delta P$ ,  $\Delta W$  запропоновано виконувати за допомогою функції струморозподілу, розрахунок якої здійснюється у матричному вигляді, що дозволяє без проблем описати будь-яку конфігурацію системи з її відповідними параметрами. Результатом розрахунку даної функції є вектор, який складається з потенціалів у вузлах розрахункової схеми в місцях підключення фідерів тягових підстанцій, точок з'єднання контактних підвісок колій та ЕРС, що знаходиться на міжпідстанційних зонах. Результати розрахунків свідчать про те, що точність розрахунків на математичній моделі відповідає умові  $\delta \leq 5\%$ .

Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

Основні положення розділу опубліковані в роботах [18, 101, 102, 116, 121]

## **3 ПОБУДОВА РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

### **3.1 Визначення місця розташування підсилюючих пунктів**

При побудові розподіленої системи тягового електропостачання важливими задачами є оптимальне розміщення підсилюючих пунктів та визначення їх потужності. Включення підсилюючих пунктів в мережу без виконання попереднього аналізу її параметрів може призвести до збільшення втрат енергії в тяговій мережі, збільшення витрат і, як наслідок, до негативного ефекту. Установка підсилюючого пункту у зоні частого застосування рекуперативного гальмування зможе забезпечити йому достатній рівень заряду його накопичувача, але, у той же час, може бути не ефективною з точки зору реалізації акумульованої енергії. Через замалу встановлену потужність підсилюючого пункту можна не досягти бажаного результату підсилення і, навпаки, надмірна його потужність призведе до низького коефіцієнта використання. Тому при розвитку СТЕ за допомогою децентралізації генеруючих потужностей буде доцільним використання оптимізаційного методу. Одним з основних критеріїв при виборі потужності підсилюючого пункту є мінімум втрат потужності в тяговій мережі при його приєднанні до  $i$ -ї точки розподіленої системи, а місце установки визначається як точка, на якій підсилюючий пункт зможе повною мірою реалізувати встановлену потужність. При пошуку оптимального рішення враховується діапазон зміни напруги в тяговій мережі.

Визначення місця підключення підсилюючого пункту виконується за допомогою методу сенсорних вузлів [129]. Дослідження сенсорності вузлів – це один з напрямків структурного аналізу електроенергетичних систем, які використовують оцінку реакції напруги вузлів на зміну навантажень у них [130]. Вузли зі значними змінами напруги на одиницю потужності навантаження називають сенсорними, а вузли з найменшими змінами напруги – жорсткими. Саме сенсорні вузли для задачі розміщення підсилюючих

пунктів в СТЕ є найбільш інформативними, а їх реакція на зміну навантаження – показовою.

Реалізацію даного методу доцільно розглянути на прикладі реальної електрифікованої ділянки Придніпровської залізниці рис. 3.1.

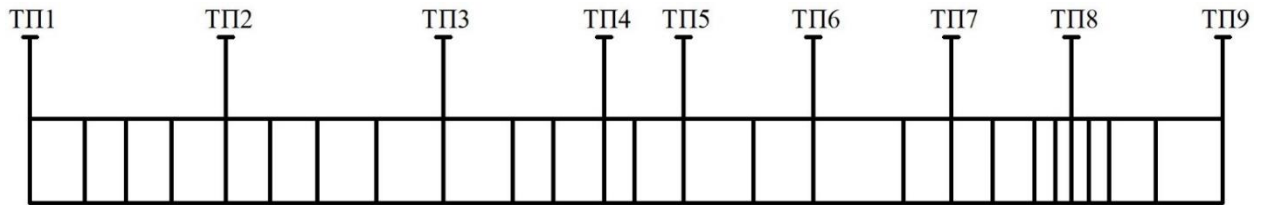


Рис. 3.1. Розрахункова ділянка

Розрахункова ділянка двоколійна, довжиною 128 км, має 8 міжпідстанційних зон та отримує живлення від 9-ти тягових підстанцій за заданими схемами живлення (рис. 3.1). Напруги холостого ходу та внутрішні опори тягових підстанцій визначені на основі їх паспортних даних. Тягова мережа електрифікованої ділянки – М120+2МФ100+А185+Р65. Можливі місця установки підсилюючих пунктів обрані з дискретністю 1 км. Визначення реакції можливих місць установки ПП відбувається внаслідок виконання заданих графіків руху поїздів.

На ділянці графіки руху реалізовані наступним чином:

1. почергово здійснювався пропуск поїздів у парному та непарному напрямках таким чином, щоб в кожен момент часу на розрахунковій ділянці знаходився лише один поїзд (рис. 3.2 а);
2. пропуск поїздів здійснювався лише у парному напрямку з міжпоїзним інтервалом 20 хв (рис. 3.2 б);
3. пропуск поїздів здійснювався лише у непарному напрямку з міжпоїзним інтервалом 20 хв (рис. 3.2 в);
4. пропуск поїздів здійснювався у парному та непарному напрямку з міжпоїзним інтервалом 20 хв (рис. 3.2 г);

На ділянці графіки руху реалізовані таким чином, що реакції можливих місць установки ПП визначались спочатку окремо від кожного навантаження, потім з урахуванням впливу від поїздів, що рухаються в однаковому напрямку, та від графіка руху, що відображає реальну поїзну ситуацію на ділянці.

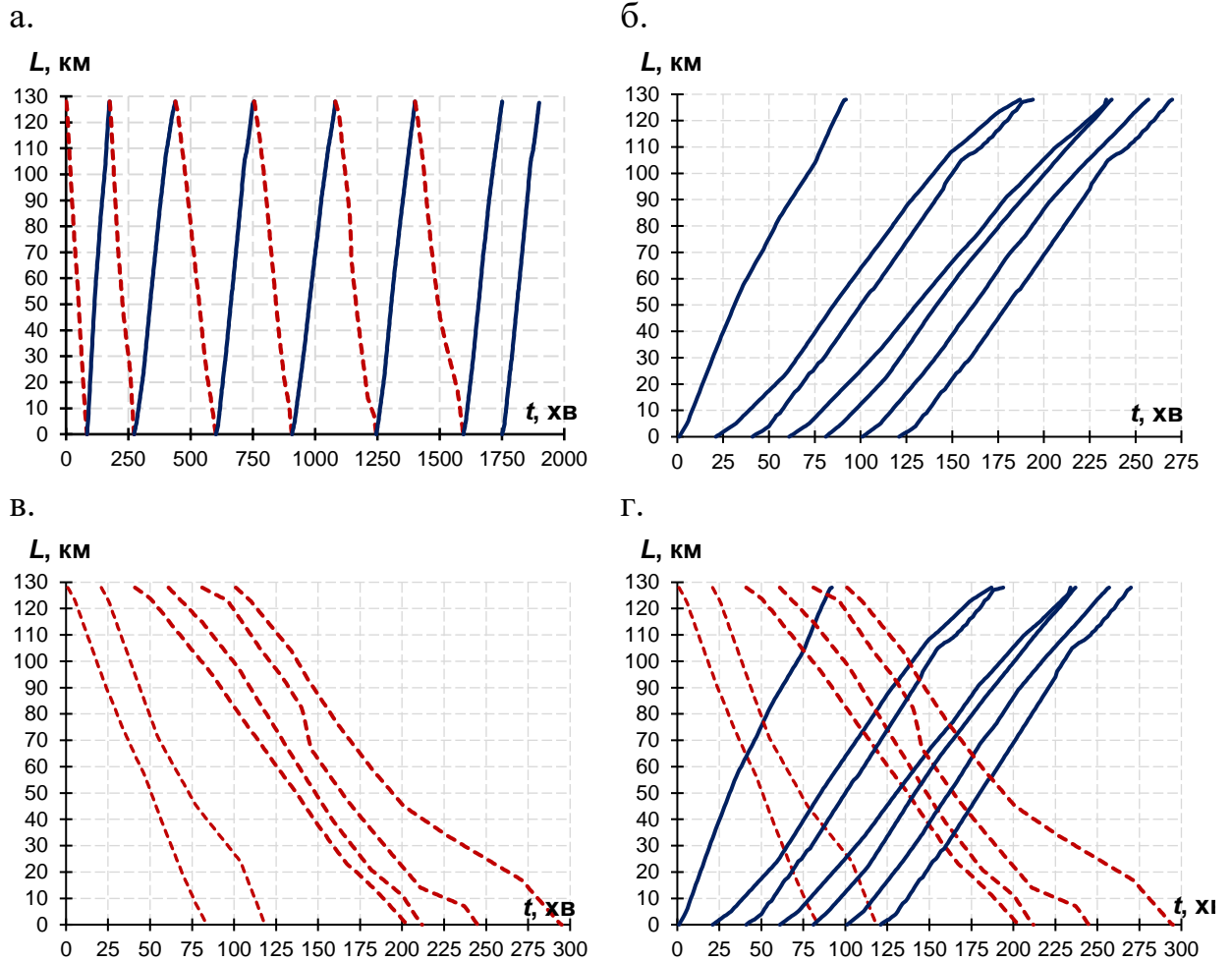


Рис. 3.2. Графік руху поїздів ділянкою:  
а – ГРП № 1; б – ГРП № 2; в – ГРП № 3; г – ГРП № 4;

Визначення сенсорних вузлів в системі здійснювалось наступним чином:

1. для кожного графіка руху, для кожного вакантного місця установки підсилюючого пункту розраховувалась зміна напруги (інтервал 1 хв) впродовж реалізації графіка руху поїздів;

2. в кожній точці визначалось максимальне та мінімальне значення напруги (рис. 3.3);

3. точка з максимальною амплітудою коридору зміни напруги, тобто точка, яка відповідає умові (3.1), визначалась, як найчутливіший сенсорний вузол для заданої ділянки схеми (для кожної МПЗ).

$$s = \max_{[a;b]} (U_{\max j} - U_{\min j}) \quad (3.1)$$

де  $a$  – координата початку ділянки;

$b$  – координата кінця ділянки;

$j$  – номер досліджуваного вузла;

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

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

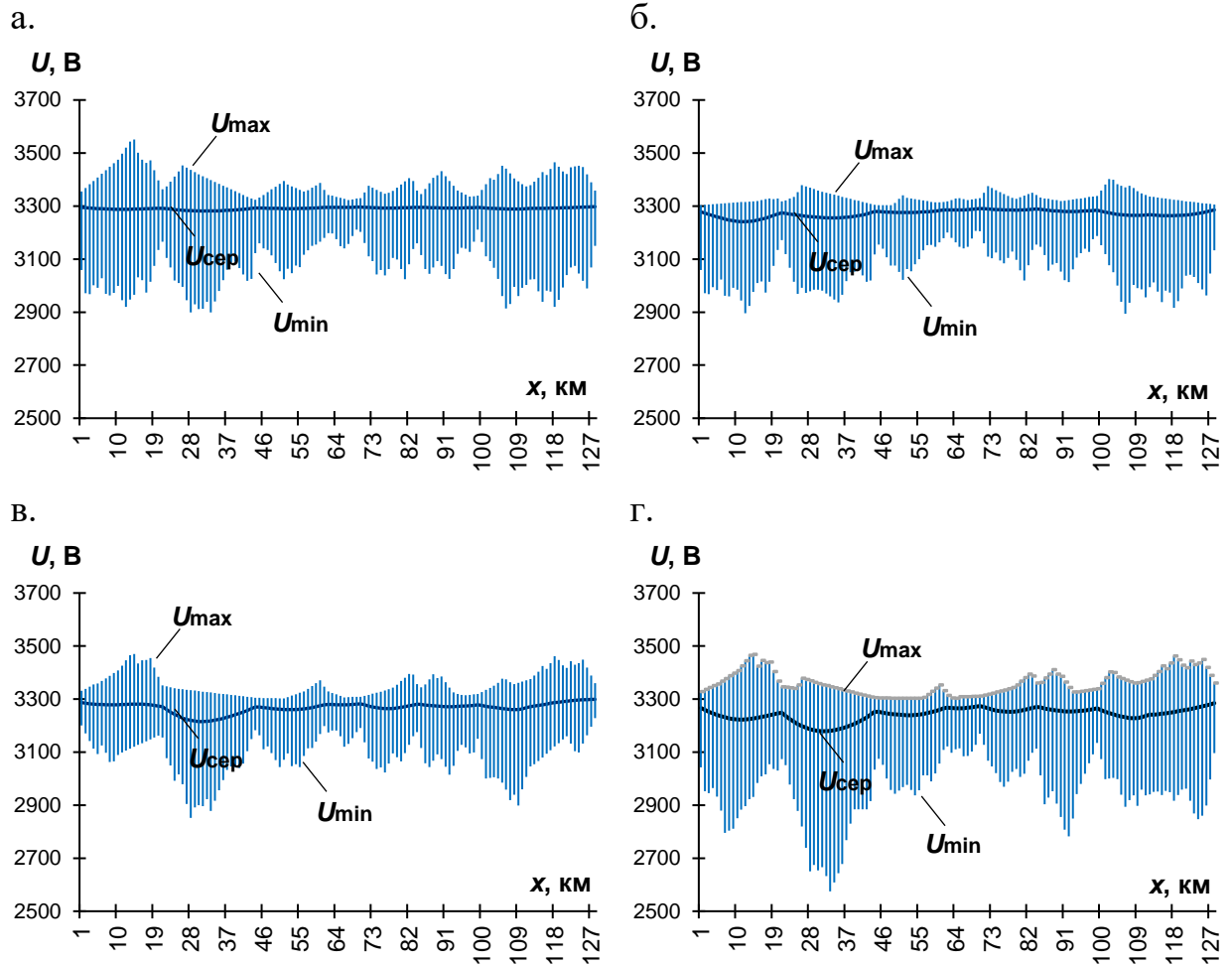


Рис. 3.3. Коридор зміни напруги для ГРП:  
а – ГРП № 1; б – ГРП № 2; в – ГРП № 3; г – ГРП № 4;

Результати розрахунку найчутливіших вузлів для дослідної ділянки відповідно до отриманих результатів наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Сенсорні вузли розрахункової ділянки

Графік руху поїздів	Координата найчутливішого вузла для кожної МПЗ							
ГРП № 1	12	28	51	71	81	91	106	118
ГРП № 2	12	35	51	71	81	92	106	118
ГРП № 3	13	28	55	66	76	87	109	115
ГРП № 4	9	33	54	66	76	92	106	125

За результатом визначення максимального коридору зміни напруги, для кожного графіка руху поїздів при подальших розрахунках прийняті наступні місця установки підсилюючих пунктів: 9 км, 33 км, 51 км, 66 км, 76 км, 91 км, 109 км, 125 км.

### 3.2 Розрахунок потужності підсилюючих пунктів

Потужності підсилюючих пунктів визначались, як добуток середнього значення струму за час роботи окремого ПП та середнього значення напруги в точці його підключення (3.2).

$$P_{\text{ПП}} = I_{\text{сєрПП}} \cdot U_{\text{сєрПП}} \quad (3.2)$$

Визначення струмів підсилюючих пунктів відбувалось за рахунок вирішення задачі оптимізації з мінімізацією цільової функції по зменшенню втрат електричної енергії в тяговій мережі:

$$\Delta W_{\text{ТМ}}(\vec{I}_{\text{ПП}}) \rightarrow \min \quad (3.3)$$

Оскільки втрати електроенергії визначались, як сума втрат потужності на певному інтервалі часу, то можна перейти до наступних умов оптимізації: у кожний момент часу, при зниженні напруги на струмоприймачі ЕРС нижче нормованого рівня необхідно визначити струми підсилюючих пунктів які б забезпечували при даних умовах напругу рівну або вище  $U_3$  з мінімально можливим рівнем миттєвих втрат потужності в системі тягового електропостачання при обмеженнях  $U_3 \leq U_{e_i} \leq U_{\text{max}}$  (3.4).

$$\begin{cases} \Delta P(t_1, \vec{I}_{\text{ПП}}) \rightarrow \min, U_{t_1} \leq U_3 \\ \Delta P(t_2, \vec{I}_{\text{ПП}}) \rightarrow \min, U_{t_2} \leq U_3 \\ \dots \\ \Delta P(t_n, \vec{I}_{\text{ПП}}) \rightarrow \min, U_{t_n} \leq U_3 \end{cases} \quad (3.4)$$

Виконані варіантні розрахунки показали, що при прямуванні поїздів міжпідстанційною зоною залежно від графіка руху (рис. 3.2), втрати електроенергії знижуються в межах 1-3 % від споживання електроенергії на тягу.



Слід відзначити, що при такому підході, хоча і зменшувались втрати електроенергії та забезпечувався заданий рівень напруги (2900 В) на струмоприймачах ЕРС (рис. 3.5, рис. 3.6), розрахункова пікова потужність підсилюючих пунктів набувала великих значень (6 МВт) та перевищувала розрахункову середню потужність у 3-5 разів, що свідчить про низький коефіцієнт її використання.

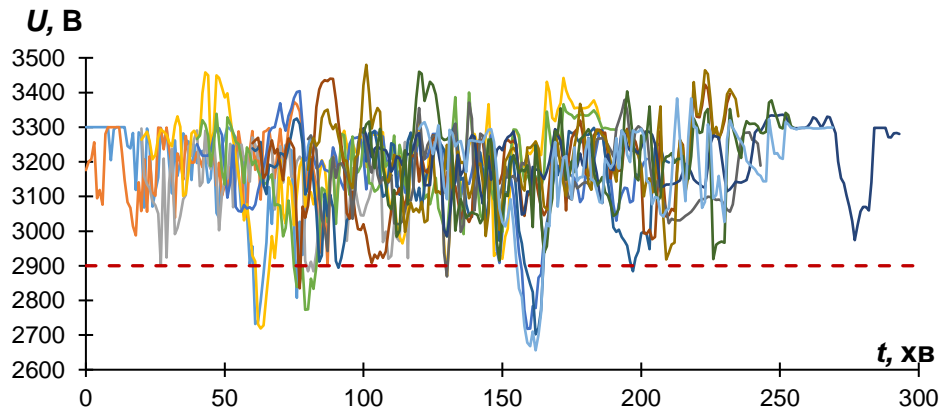


Рис. 3.5. Напруга на струмоприймачах ЕРС для ГРП № 4 до використання підсилюючих пунктів

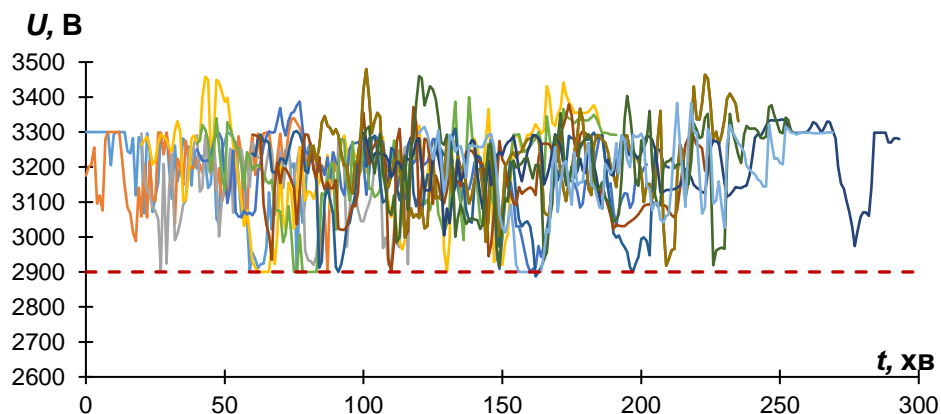


Рис. 3.6. Напруга на струмоприймачах ЕРС для ГРП № 4 після використання підсилюючих пунктів

Таким чином, для зменшення встановленої потужності підсилюючих пунктів та більш повного її використання в роботі було прийняте рішення з підвищення напруги на шинах тягових підстанцій, з цією ж метою були введені додаткові обмеження за максимальним струмом підсилення  $I_{ПП} \leq I_{\max}$ .

Отримані в результаті розрахунку струми підсилюючих пунктів та їх потужності зображені на рис. 3.7 та зведені в табл. 3.2.

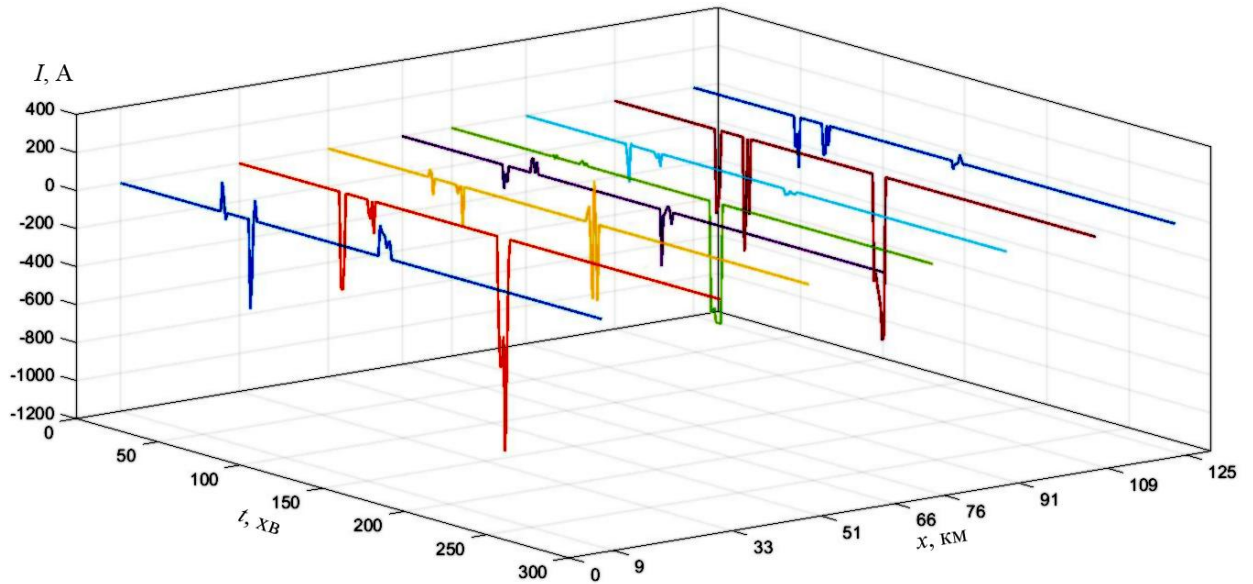


Рис. 3.7. Струми підсилюючих пунктів

Таблиця 3.2 – Параметри підсилюючих пунктів

№ ПП	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6	ПП7	ПП8
Середній струм підсилюючого пункту, А	146	458	134	71	332	40	555	83
Установлена потужність, кВт	500	1600	400	250	1000	160	2000	250
Струм обмеження, А	470	1150	400	300	630	200	860	350

Результати дослідження для розрахункової ділянки (рис. 3.1) з параметрами підсилюючих пунктів (табл. 3.3) для графіка руху відповідно до рис. 3.2 г приведені на рис. 3.8, 3.9.

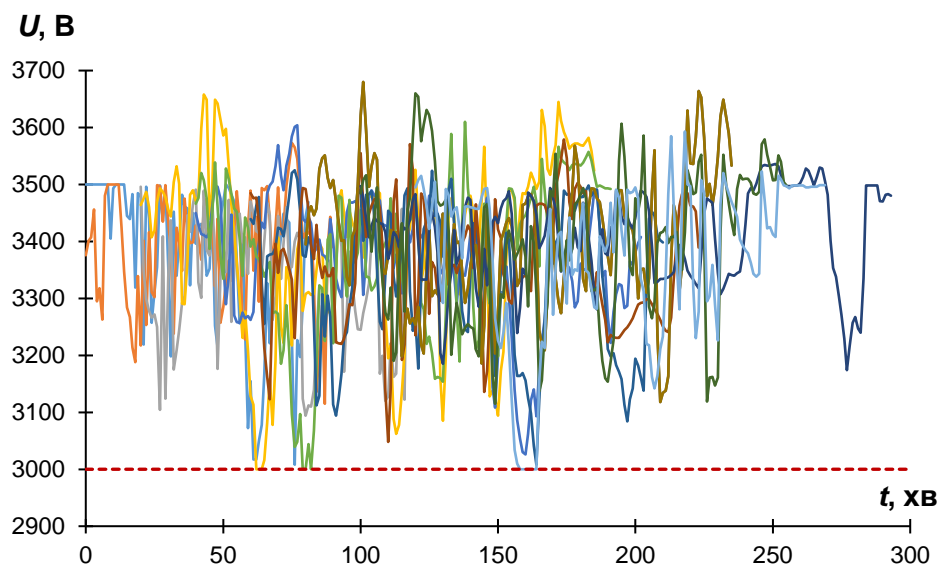


Рис. 3.8. Напруга на струмоприймачах ЕРС після використання підсилюючих пунктів

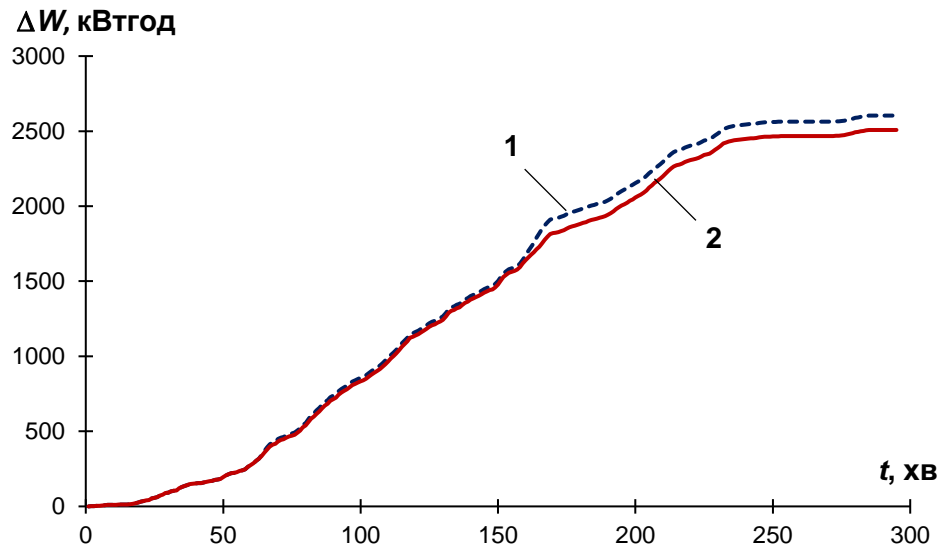


Рис. 3.9. Втрати електроенергії в тяговій мережі:

1 – до використання підсилюючих пунктів; 2 – після використання підсилюючих пунктів

Досліджуючи варіантні розрахунки отримано результати, які показують, що в залежності від щільності графіка руху поїздів, економія на втратах електроенергії може складати до 4 % в порівнянні з базовим варіантом.

### 3.3 Визначення рівня обмеження мінімального значення напруги на струмоприймчі ЕРС

Як слідує з рис. 3.8 за допомогою запропонованої системи стає можливим обмеження нижнього рівня напруги, але залишається не вирішеним питання про оптимальне значення рівня напруги для забезпечення найбільш раціонального енергетичного режиму роботи системи тягового електропостачання.

При дослідженні даного питання проводились варіантні розрахунки для визначення впливу обмеження напруги в тяговій мережі на втрати електричної енергії при русі навантаження розрахунковою ділянкою [14] (рис. 3.10).

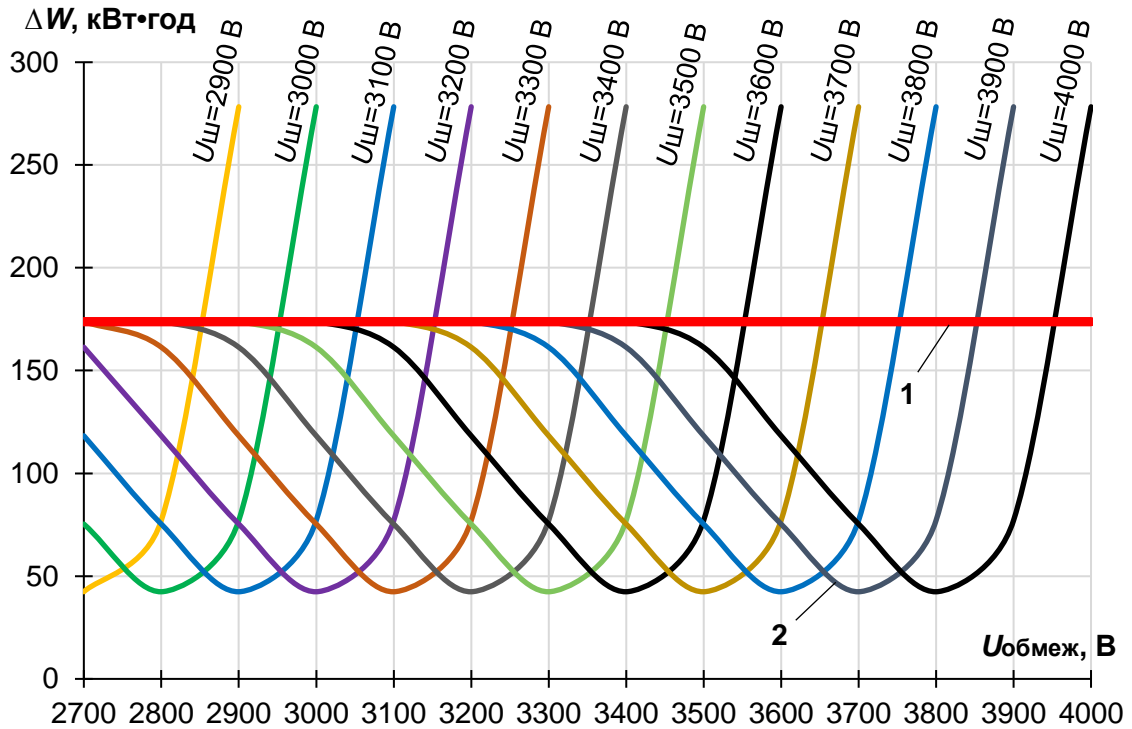


Рис. 3.10. Розрахункові криві втрат електричної енергії:

1 – базовий розрахунок без підсилення;

2 – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

Для ділянки рис. 3.1 також були проведені варіантні розрахунки при реалізації графіка руху ГРП № 4 (рис. 3.2 г). Для визначення оптимальних рівнів напруги проводились розрахунки на математичній моделі при поступовому підвищенні напруги одночасно на шинах всіх тягових підстанцій від 3300 до 3600 В. При цьому змінювалась задана межа мінімального значення напруги на струмоприймачах ЕРС в діапазоні від 2900 В до значення напруги на шинах тягових підстанцій. Час реалізації графіка руху становив 300 хв.

В результаті виконаних досліджень, для ряду напруг на шинах тягових підстанцій отримано відсоток зміни втрат електроенергії в тяговій мережі в залежності від рівня обмеження напруги (рис. 3.11). На графіку, по осі абсцис відкладено рівень обмеження напруги в тяговій мережі у відсотках по відношенню до напруги на шинах тягових підстанцій, по осі ординат – відсоток зменшення втрат електроенергії по відношенню до базового розрахунку без підсилення системи (за 100 % прийнято рівень втрат електроенергії при базовому розрахунку без підсилення).

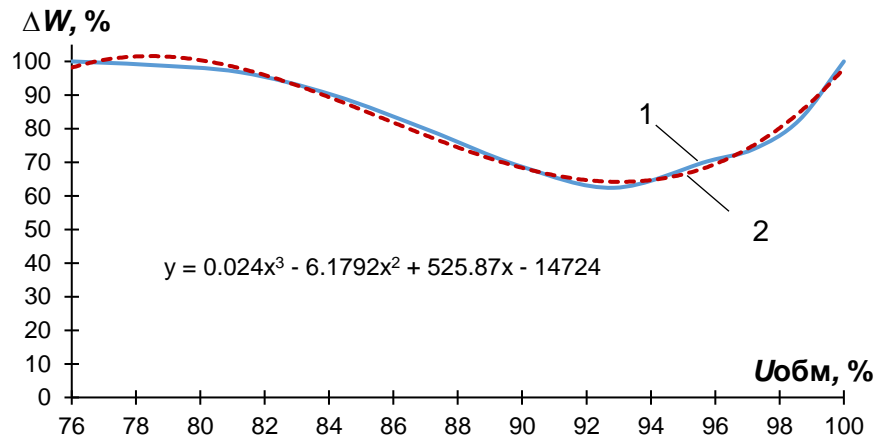


Рис. 3.11. Залежність рівня втрат потужності в тяговій мережі від рівня обмеження напруги:  
1 – розрахункова крива; 2 – апроксимована крива

Для визначення раціонального рівня обмеження напруги, отриману залежність було апроксимовано поліномом третього ступеня (3.5) та визначено точки екстремуму відсотка втрат електроенергії, як функції від рівня обмеження напруги.

$$\Delta W(U_{\text{обм}}) = -A \cdot U_{\text{обм}}^3 + B \cdot U_{\text{обм}}^2 - C \cdot U_{\text{обм}} + D \quad (3.5)$$

де  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  – поліноміальні коефіцієнти:  $A = 0,024$ ;  $B = 6,1792$ ;  $C = 525,87$ ;  $D = 14724$ .

Максимальному зменшенню втрат електроенергії відповідає напруга обмеження на рівні 93 % від напруги на шинах тягових підстанцій. Таким чином, залежність раціонального рівня обмеження напруги в тяговій мережі від значення напруги холостого ходу тягових підстанцій має вигляд (3.6).

$$U_{\text{обм}} = 0,93 \cdot U_{\text{хх}} \quad (3.6)$$

де  $U_{\text{обм}}$  – рівень обмеження напруги в тяговій мережі;

$U_{\text{хх}}$  – значення напруги холостого ходу тягових підстанцій.

Отримані результати розрахунків показують, що при нарузі холостого ходу тягових підстанцій 3500 В та за інших рівних обставин, обмеження нижнього рівня напруги на значенні 3000 В дозволяє зекономити на втратах електроенергії до 4 % в порівнянні з базовим розрахунком без підсилення, а при обмеженні нижнього рівня напруги

на значенні  $0,93U_{xx}$  (3255 В) економія на втратах електроенергії зростає до 33%.

Проаналізувавши отриману залежність (рис. 3.11) можна відзначити, що доцільно підтримувати напругу на струмоприймачах на рівні, що відповідає інтервалу спаду кривої втрат електроенергії від вихідного до мінімального значення. Забезпечення рівня напруги близького до значення на шинах ТП недоцільне через зростання втрат енергії в результаті надлишкового регулювання та значного збільшення встановленої потужності підсилюючого пункту. Раціональний рівень напруги в контактній мережі можна визначити із співставлення величини втрат електроенергії та потужності підсилюючих пункту, необхідної для його забезпечення. Однак оптимальний рівень напруги в контактній мережі буде також залежати від строку окупності підсилюючого пункту, розрахованого на необхідну потужність. Остаточне визначення заданого рівня напруги повинно також враховувати потреби локомотивного господарства в неперервному та енергоефективному виконанні експлуатаційної роботи.

#### **3.4 Результати розрахунку енергетичних показників розподіленої системи**

На рис. 3.12 – 3.16 показано результати розрахунку розробленої системи тягового електропостачання для реальної ділянки. Розглянута ділянка «НД Вузол – П'ятихатки» Придніпровської залізниці має вісім мжпідстанційних зон, та дев'ять тягових підстанцій. При розрахунках враховувалось реальне, струмоспоживання, в залежності від профілю ділянки, внутрішні опори тягових підстанцій та параметри схем живлення. Напруга холостого ходу тягових підстанцій становить 3500 В, при цьому, відповідно до (3.6), напруга обмеження встановлена на рівні 3255 В.

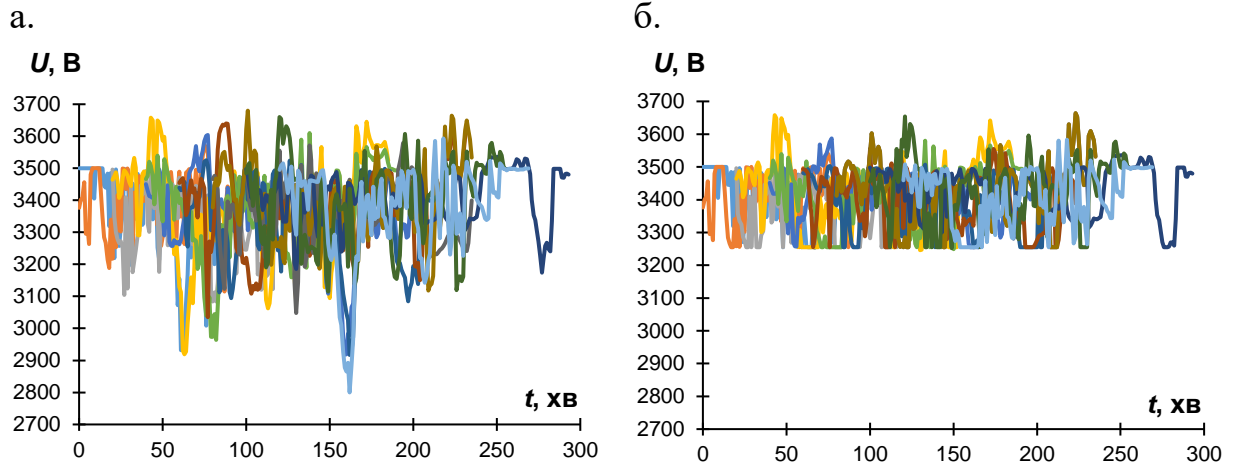


Рис. 3.12. Напряга на струмоприймачах ЕРС:

а – базовий розрахунок без підсилення;

б – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

Оцінка напруги на струмоприймачах електрорухомого складу показала, що при підсиленні системи тягового електропостачання усереднене значення математичного очікування напруги 13 електровозів зросло на 47 В при цьому 95 % довірчий інтервал його зміни звужився вдвічі (рис. 3.13). Значення математичного очікування напруги на струмоприймачі окремого ЕРС зросло на 25 – 90 В при звуженні 95 % довірчого інтервалу на 30 % (рис. 3.14).

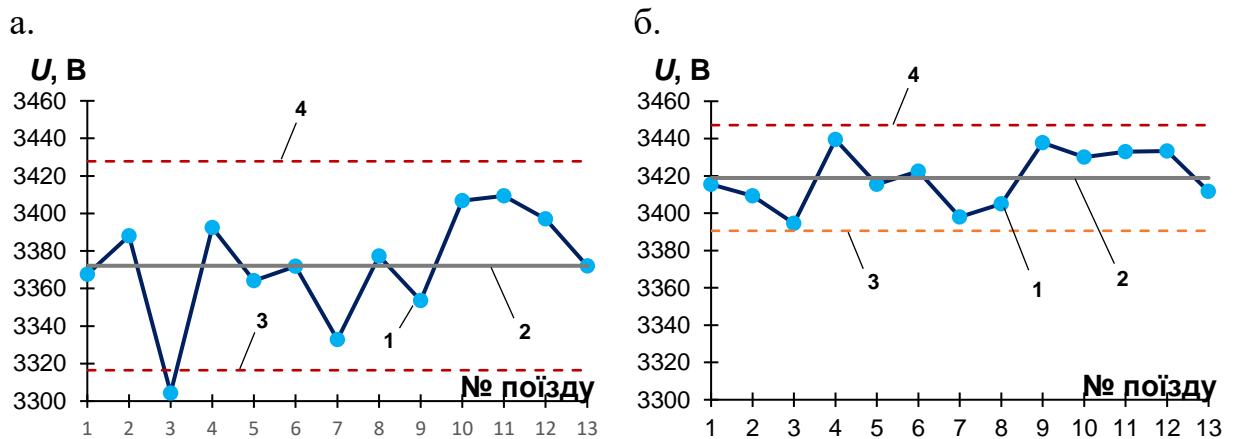


Рис. 3.13. Математичне очікування напруги на струмоприймачах ЕРС:

а – базовий розрахунок без підсилення;

б – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами;

1 – математичне очікування напруги на струмоприймачі окремого ЕРС;

2 – усереднене значення математичного очікування; 3 – нижня довірча

межа; 4 – верхня довірча межа

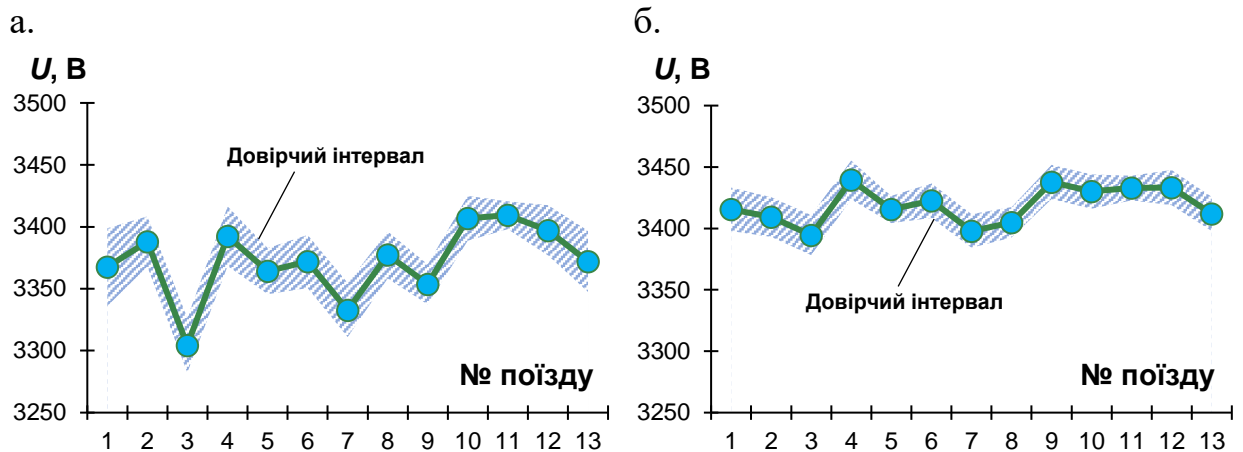


Рис. 3.14. Математичне очікування напруги та її довірчий інтервал зміни на струмоприймачах ЕРС:  
 а – базовий розрахунок без підсилення;  
 б – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

Числові значення статистичних показників напруги на струмоприймачах 13 ЕРС зведені в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Числові характеристики напруги на ділянці

№ поїзду	Статистичний показник напруги на струмоприймачі ЕРС							
	До підсилення				Після підсилення			
	$M(U)$	$\sigma(U)$	$\min(U)$	$\max(U)$	$M(U)$	$\sigma(U)$	$\min(U)$	$\max(U)$
1	3367.5	145.2	2932	3500	3415.5	82.2	3253	3500
2	3388.1	98.2	3115	3573	3409.3	78.6	3255	3540
3	3304.3	111.7	3064	3476	3394.5	82.7	3275	3516
4	3392.4	158.5	2919	3658	3439.4	103.9	3246	3658
5	3364.2	121.0	2918	3604	3415.4	72.3	3255	3587
6	3371.9	135.2	2964	3610	3422.6	88.3	3249	3580
7	3332.7	136.8	2917	3525	3397.9	85.4	3255	3522
8	3377.3	128.1	3035	3640	3404.9	82.6	3255	3556
9	3353.5	103.1	3048	3579	3437.8	88.7	3255	3664
10	3406.9	115.1	3118	3680	3430.0	88.7	3255	3655
11	3409.4	80.2	3174	3536	3432.9	71.1	3255	3536
12	3397.1	129.6	3115	3660	3433.2	92.1	3252	3654
13	3372.1	153.7	2800	3593	3411.7	86.4	3255	3583

Обмеження нижнього рівня напруги на струмоприймачах, підвищення її середнього значення та звуження діапазону зміни при децентралізованій системі живлення дозволило зменшити миттєві втрати потужності в тяговій мережі до 75 %. За час виконання заданого графіка руху поїздів (рис. 3.2 г) зменшення миттєвих втрат потужності забезпечило економію електричної енергії в межах 33 % в порівнянні з розрахунком без підсилення (рис. 3.15).



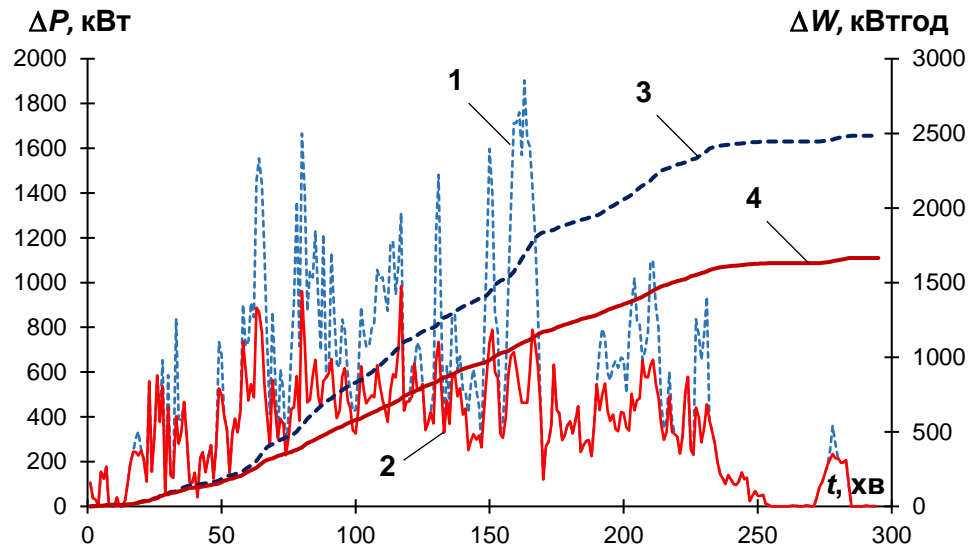


Рис. 3.15. Втрати в тяговій мережі:

- 1 – миттєві втрати потужності при розрахунку без підсилення; 2 – миттєві втрати потужності при підсиленні тягової мережі підсилюючими пунктами;  
 3 – втрати електроенергії при розрахунку без підсилення; 4 – втрати електроенергії при підсиленні тягової мережі підсилюючими пунктами

Для забезпечення заданого рівня обмеження напруги та максимального зменшення втрат електричної енергії в розрахунках були використані наступні параметри пунктів підсилення для кожної міжпідстанційної зони (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Параметри підсилюючих пунктів розподіленої системи

№ ПП	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6	ПП7	ПП8
Середній струм ПП, А	300.1	515.2	239.3	165.7	267.8	193.3	422.1	180.4
Установлена потужність, кВт	1000	1600	800	630	1000	630	1600	630
Струм обмеження, А	2000							

Підвищення рівня обмеження напруги на струмоприймачах ЕРС призвело до необхідності збільшення встановленої потужності підсилюючих пунктів, але, в свою чергу, це також сприяє зменшенню споживання електричної енергії тяговими підстанціями з системи зовнішнього електропостачання (рис. 3.16).

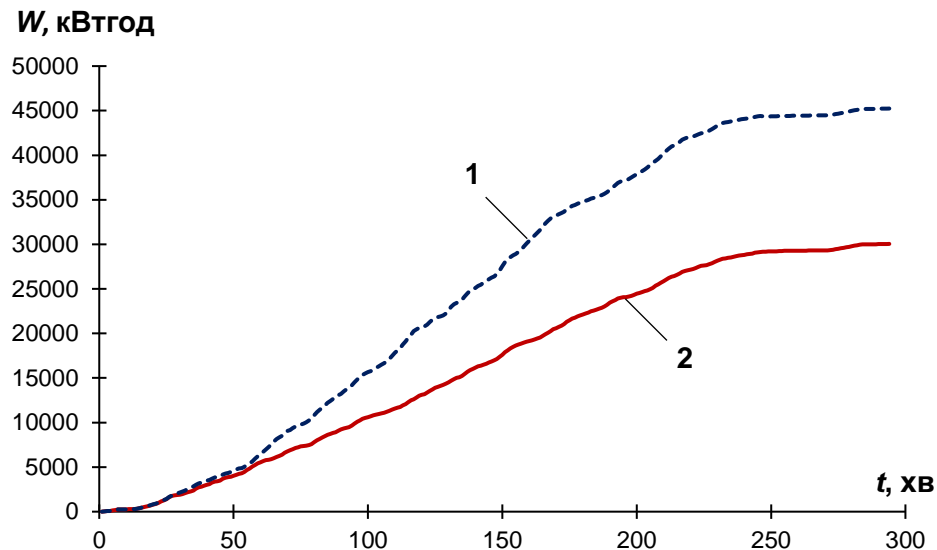


Рис. 3.16. Витрати електричної енергії тяговими підстанціями на тягу поїздів:

- 1 – базовий розрахунок без підсилення;  
2 – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

В результаті виконання поставлених розрахунків на дослідній ділянці втрати електроенергії при виконанні заданого графіка руху поїздів склали 2,5 МВт·год. За допомогою розподіленого електропостачання можливо зменшити ці втрати до значення 1,66 МВт·год. Крім того, при децентралізованому електропостачанні забезпечується заданий рівень обмеження напруги на струмоприймачах ЕРС, підвищується її середнє значення та звужується діапазон зміни, що позитивно впливає на безпеку руху та експлуатацію електрорухомого складу.

### Висновки до розділу 3

Запропоновано систему обмеження мінімального рівня напруги на струмоприймачі ЕРС для покращення якості напруги в тяговій мережі та, як наслідок, досягнення високих енергетичних показників системи тягового електропостачання постійного струму та підвищення енергоефективності ЕРС при високих швидкостях руху.

Розроблено наукові принципи для забезпечення заданого рівня обмеження напруги в тяговій мережі та зменшення втрат потужності за рахунок

раціонального розташування підсилюючих пунктів та вибору їх потужності, що базуються на застосуванні сенсорного методу.

Розроблена система дозволяє звузити діапазон зміни напруги на струмоприймачі ЕРС до 30 % та забезпечує рівномірний розподіл втрат напруги на міжпідстанційній зоні за рахунок генерації підсилюючим пунктом додаткової потужності.

Для розподіленої системи тягового електропостачання визначено раціональний рівень обмеження мінімального значення напруги в контактній мережі, який становить на 7 % нижче рівня напруги холостого ходу тягових підстанцій, та обумовлений напругою на шинах суміжних тягових підстанцій і визначається за критерієм мінімуму втрат електроенергії в тяговій мережі. Забезпечення раціонального рівня напруги в тяговій мережі дозволило, при виконанні однакової поїзної роботи на ділянці, зменшити втрати електроенергії на 29 % в порівнянні з обмеженням напруги в тяговій мережі на рівні 3000 В та на 64 % в порівнянні з обмеженням напруги в тяговій мережі на рівні 2900 В.

Проведені розрахунки для електрифікованої ділянки Придніпровської залізниці показали, що при виконанні заданого графіка руху, використання розробленої системи забезпечує задане значення нижнього рівня напруги в тяговій мережі, тим самим зменшуючи втрати електричної енергії на 30 % в порівнянні з базовим розрахунком без підсилення та звужуючи діапазон зміни напруги на 30 %. Живлення підсилюючих пунктів від альтернативних джерел робить їх автономними та забезпечує зменшення споживання електроенергії з системи зовнішнього електропостачання на 33 %.

Основні положення розділу опубліковані в роботі [14]

## **4 СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

### **4.1 Загальна структура системи, визначення топології перетворювачів та частоти їх проміжних ланок**

В останні роки в енергетиці простежується тенденція до децентралізації виробництва електроенергії, що обумовлено вичерпанням традиційних енергоносіїв і збільшенням частки генераторів відновлюваної енергії, з усіх видів якої Україна найбільш багата на сонячну [131]. Для умов України з її високою щільністю населення найбільш перспективні не великі геліостанції, що займають спеціально виділену велику площу, а розподілені генератори, розміщені вздовж існуючих об'єктів з лінійним розташуванням в просторі. До числа таких об'єктів належать і залізниці з їх земельними смугами відчуження, які приписані до доріг. На цих смугах можна розміщувати розподілені фотоелектричні генератори.

Інтеграція джерел розподіленої генерації (ДРГ) в систему тягового електропостачання постійного струму вимагає розробки нових принципів проектування, функціонування і управління режимами роботи тягового електропостачання [132]. Необхідність їх розробки обумовлена наступними чинниками: змінюється структура електричної системи, потужність генерації ДРГ визначається зовнішніми чинниками (в першу чергу інтенсивністю сонячного випромінювання і вітрового потоку) і мало залежить від режиму роботи електричної мережі, до якої вони приєднані. Установки ДРГ можуть мати коливальний або переривчастий характер генерації потужності, яка може привести до сильних коливань потужності в системі і впливати на режими її роботи, більшість ДРГ приєднані до мережі за допомогою силових електронних перетворювачів (інверторів), які дуже чутливі до рівнів напруги. Звідси, необхідно вирішувати низку запитань: визначення впливу ДРГ на стабільність роботи тягових підстанцій, тягових і інших споживачів, які приєднані до шин тягової підстанції з урахуванням допустимих режимів роботи споживачів, розробка рекомендацій відносно особливостей приєднання цього типу генерації

до електричних мереж залізниць, функціонування пристроїв релейного захисту і автоматики, забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання споживачів з необхідними якісними характеристиками, типу вживаного накопичувача і місця його установки. На сьогоднішній день вирішення вказаних завдань здійснюється з застосуванням смарт-технологій, одним із завдань яких є, тому числі, забезпечення якості електричної енергії [133].

Електроенергію, що генерується розподіленими джерелами можна або безпосередньо використовувати для тяги поїздів, або акумулювати на тягових підстанціях (або пунктах підживлення) разом з енергією рекуперативного гальмування. Загальні застосування акумульованої енергії в тягових енергосистемах включають наступне:

- регенерація енергії;
- регулювання напруги;
- згладження піків навантаження;
- зсув навантаження.

Провали напруги в тяговій мережі, що обумовлені тимчасовим перевантаженням енергосистеми, як правило, за рахунок багатьох поїздів, що працюють в безпосередній близькості один від одного, або за рахунок одночасного прискорення кількох поїздів в одній зоні, можуть бути згладжені за рахунок накопиченої енергії. У системах регулювання напруги накопичення енергії використовується для зменшення рівня флуктуації в тяговій мережі та збереження коливань напруги в робочому діапазоні. Пристрої акумулювання енергії також можуть забезпечити наявність достатнього електричного навантаження для пом'якшення перенапруг, обумовлених регенеративним гальмуванням поїздів у місцях, де є недостатнє електричне навантаження.

Для згладження піків споживання електроенергії накопичувачі використовуються для акумулювання та відпуску електроенергії з метою скорочення короткострокових коливань у споживанні потужності. Метою пікового згладження є зменшення пікових потреб енергії для мінімізації розміру електрообладнання та / або для здійснення фінансової вигоди шляхом зменшення витрат на споживання електроенергії.

Зсув навантаження аналогічний застосуванню згладження піків споживання електроенергії, але з наміром перемістити велику кількість електричної енергії від одного періоду часу до іншого. Мета переміщення навантаження полягає в тому, щоб реалізувати фінансову вигоду шляхом зменшення витрат на споживання електроенергії та / або енергопостачання, акумулюючи енергію в періоди її недорогої вартості, а потім повертаючи її назад у систему в періоди підвищення вартості.

#### 4.1.1 Структура системи та вибір топології узгоджувача перетворювача

У даному розділі запропонована структура з поздовжньою лінією постійного струму, яка пов'язує фотогенератори в послідовний електричний ланцюг, та напівпровідниковими перетворювачами для її підключення до приймача електроенергії, в якості якого може виступати контактна мережа залізниці постійного струму [134].

Загальна структура системи наведена на рис. 4.1. Сонячні панелі встановлюються в смузі відчуження і з'єднуються один з одним паралельно-послідовно в фотомодулі. Кожен фотомодуль приєднаний до узгоджувача (УП), який використовується для максимізації енергії, отриманої від фотомодуля, а також для гальванічної розв'язки від подальших частин системи.

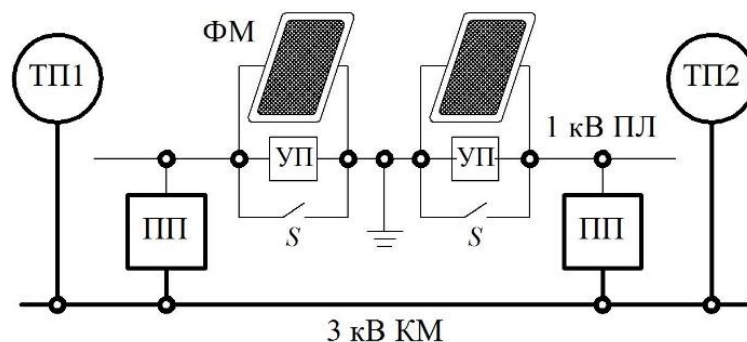


Рис. 4.1. Структурна схема розподіленої СТЕ з АДЖ  
 ФМ – фотомодулі; ПЛ – поздовжня лінія; УП – узгоджувач перетворювач;  
 S – шунтуючий ключ; ПП – перехідний перетворювач;  
 КМ – контактна мережа

Вихід УП виповнюється на постійному струмі при низькій напрузі, допустимій за умовами електробезпеки. Безпосереднє підключення

фотомодуля з УП безпосередньо до контактної мережі (КМ) є недоцільним і вимагало б застосування індивідуального розв'язуючого трансформатора з високовольтною ізоляцією вторинної обмотки. Тому, паралельно КМ на її опорах або окремо в смузі відчуження прокладається поздовжня лінія (ПЛ) постійного струму, яка з'єднує окремі фотомодулі в єдиний послідовний ланцюг.

Поздовжня лінія розбивається на секції, які через перехідні перетворювачі (підсилюючі пункти (ПП) з підвищуючими трансформаторами і випрямлячами приєднані до КМ. В якості зворотного (заземленого) проводу для ПЛ можуть використовуватися рейки. Середня точка між сусідніми секціями ПЛ заземлюється, тому напруга ПП відносно землі дорівнює напрузі однієї секції.

Принцип послідовного підключення фотомодулів, використаний в структурі рис. 4.1, природним чином узгоджується з тим фактом, що кожен фотомодуль, як електричний генератор, є джерелом струму, що залежать від інтенсивності сонячного випромінювання. На рис. 4.2 приведена ідеалізована еквівалентна схема фотомодуля, яка містить джерело внутрішнього струму  $i$ , ідеальний діод  $VD$ , що враховує наявність р-п переходу, і джерело порогової напруги  $u$ , що враховує граничну напругу вольт-амперної характеристики р-п переходу (рис. 4.3, а).

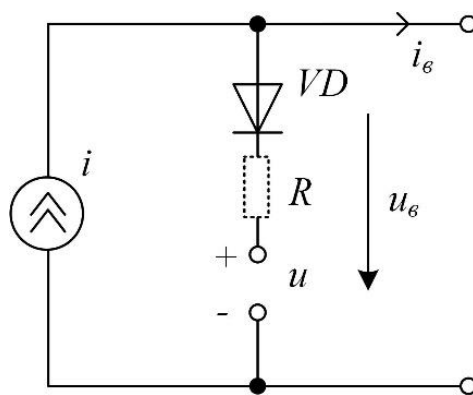


Рис. 4.2. Електрична еквівалентна схема фотомодуля

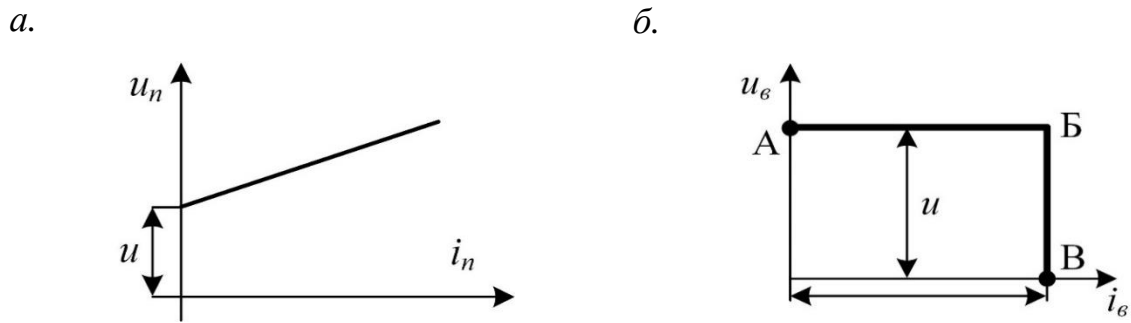


Рис. 4.3. Лінеаризована вольт-амперна характеристика  $p$ - $n$  переходу (а) та зовнішня характеристика фотомодуля як генератора (б)

На рис. 4.3, б показана ідеалізована характеристика фотомодуля як генератора. Зовнішня характеристика як залежність вихідної напруги  $u_B$  від вихідного струму  $i_B$  містить ділянку обмеження напруги АБ і ділянку обмеження струму БВ. Іноді враховують також внутрішній опір  $R$ , показаний на рис.4.2 пунктиром. Опір відображає нахил лінеаризованої вольт-амперної характеристики  $p$ - $n$  переходу (рис. 4. 3 а).

Шунтуючий ключ  $S$  необхідний для запобігання аварійного режиму при обриві ланцюга фотомодуля. Обрив ланцюга будь-якого фотомодуля при послідовній організації системи веде до відмови всієї системи, аналогічно тому, як при паралельній організації системи до відмови системи призводить коротке замикання в будь-якому з її елементів. У разі обриву ланцюга пошкоджений модуль шунтується ключем  $S$ , а частина системи, що залишається продовжує нормальну роботу при декілька зниженій вихідній напрузі.

На рис. 4.4 показано можливе виконання шунтуючого ключа. У разі обриву в колі фотомодуля напруга  $u_M$  підвищується до пробивної напруги стабілітрона  $VD_C$  і тиристор  $VS$  включається струмом  $i_y$ , який починає протікати в ланцюзі керуючого електрода.

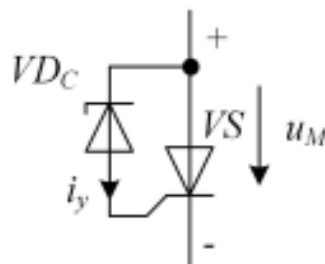


Рис. 4.4. Приклад виконання шунтуючого ключа  $S$



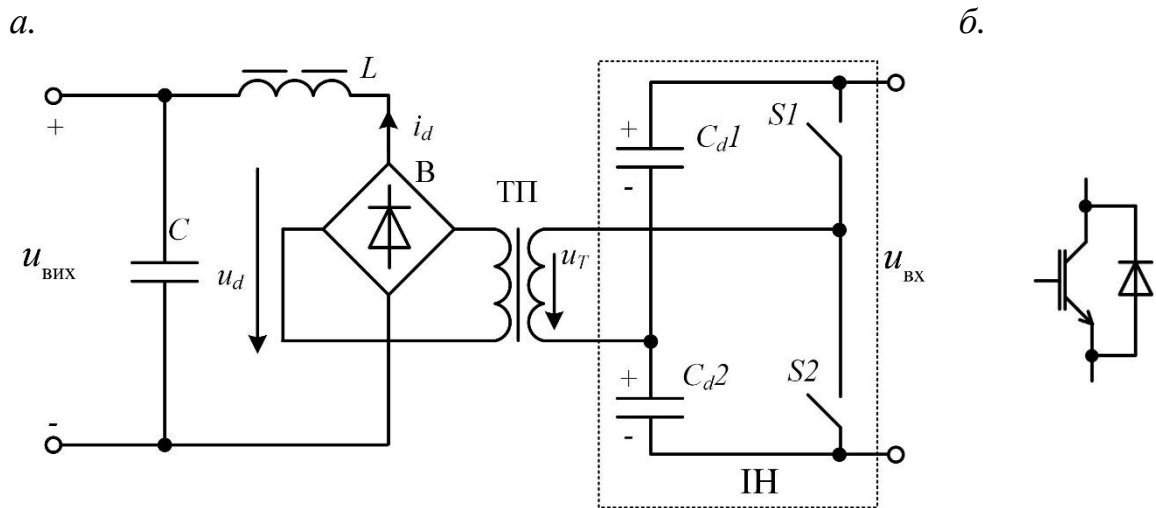


Рис. 4.5. Узгоджувачий перетворювач прямоходової топології:  
 а – принципова схема; б – ключ інвертора

УП підключається паралельно до фотомодуля, що створює на вході постійну напругу з величиною близько 50 В, і містить: вхідний фільтр (ємнісний діляк напруги) на двох конденсаторах  $C_d$ , напівмостовий інвертор напруги (ІН), перехідний трансформатор (ТП), випрямляч В, вихідний  $LC$  фільтр.

Вихід УП підключається до комірки поздовжньої лінії. Як видно, сукупність елементів УП відповідає виконанню традиційного прямоходового перетворювача, що широко використовується, наприклад, в джерелах живлення електронної апаратури [135].

Інвертор напруги формує на первинній обмотці трансформатора змінну напругу квазіпрямокутної форми з амплітудою  $U_H/2$  (рис. 4.6, а). Після випрямлення отримуємо імпульсну напругу з регульованою паузою (рис. 4.6, б). На рис. 4.6, в показаний струм в обмотці дроселя вихідного фільтра.

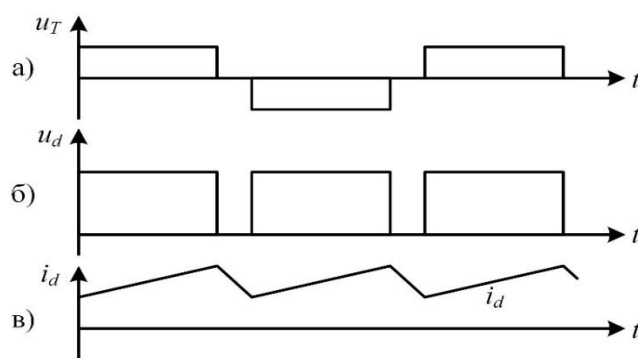


Рис.4.6. Діаграми напруг та струмів в узгоджувачому перетворювачі

Регулювання тривалості паузи в напрузі  $u_d$  тут використовується для максимізації одержуваної енергії, для чого необхідний екстремальний регулятор вихідної напруги. Загальна ідеологія побудови екстремального регулятора відома з ряду опублікованих робіт, наприклад, [136]. Конкретна схема УП може відрізнятися від запропонованої. Так, для УП, як більш низьковольтного перетворювача, може бути доцільне використання нульових, або однотоктних схем в інверторі та випрямлячі.

#### 4.1.2 Вибір топології перехідного перетворювача

Схема перехідного перетворювача повинна забезпечувати високий рівень вихідної потужності та коефіцієнт корисної дії (ККД), здійснювати гальванічну розв'язку первинних і вторинних кіл, забезпечувати двосторонній напрямок передачі електроенергії. Найбільш повно даним умовам відповідають напівмостові та повномостові схеми DC/DC перетворювачів.

У напівмостових та повномостових топологіях DC/DC перетворювачів первинні інверторні транзистори у вимкненому стані піддаються напрузі, рівній вхідній напрузі постійного струму, а не вдвічі більшій, як у випадку з двотоктними одно- або багаторівневими перетворювачами прямоходової топології. Різниця між повно- та напівмостовим перетворювачами полягає в тому, що в останньому замінено два інверторні транзистори двома конденсаторами і, отже, останній є дещо більш економічним.

На рис. 4.7 показано загальне розташування силових секцій для топологій напівмостового та повномостового перетворювачів. У порівнянні з повним мостом, у напівмостовій топології транзистори ВТ (верхній транзистор) і НТ (нижній транзистор) утворюють лише одну половину мосту, що підключена до контуру, інша половина утворюється двома конденсаторами  $C1$  і  $C2$ .

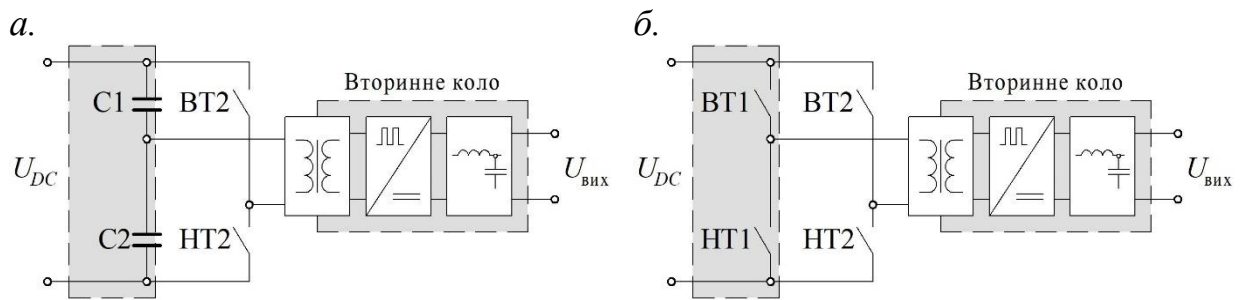


Рис. 4.7. Топології DC/DC перетворювачів:  
 а. – напівмостова; б. – повномостова

Топології повномостового та напівмостового перетворювачів проаналізовані на основі наступних припущень:

1. транзистори, що використовуються в первинних інверторах, вибрані з сімейства IGBT;

2. компоненти вихідного фільтра є ідеальними (відсутнє розсіювання потужності), їх значення, а також значення вихідної напруги для обох топологій рівні;

3. коефіцієнт трансформації ізолюючого трансформатора рівний 1;

4. номінальна вхідна напруга постійного струму  $U_{DC} = 1,0$  в. о.

5. максимальна вхідна напруга постійного струму  $U_{DC(max)} = 1,2$  в. о. (допустиме 20% відхилення робочої напруги);

6. номінальна вихідна потужність перетворювача  $P_{ВИХ} = 1,0$  в. о.

Основна відмінність між напівмостовою та повномостовою топологіями полягає в тому, що амплітудна величина напруги живлення ізолюючого трансформатора буде становити лише половину напруги живлення і, отже, струм в первинній обмотці та струми колекторів первинних транзисторів  $I_{Сpeak,НМ}$  будуть вдвічі більшими (4.1) ніж в топології повного мосту  $I_{Сpeak,ПМ}$  (4.2) для однакової вихідної потужності.

$$I_{Сpeak,НМ} = \frac{2 \cdot P_{ВИХ}}{U_{DC}} = 2,0 \text{ в. о.} \quad (4.1)$$

$$I_{Сpeak,ПМ} = \frac{P_{ВИХ}}{U_{DC}} = 1,0 \text{ в. о.} \quad (4.2)$$

У однофазному інверторі максимальний цикл роботи перемикаючих транзисторів при номінальному навантаженні та номінальній вхідній напрузі становитиме 0,5 (50%). Середній струм через відповідний інверторний перемикач у напівмостовій топології:

$$I_{Cav,НМ} = \int_0^{0,5} I_{Cpeak,НМ} dt = 1,0 \text{ в. о.} \quad (4.3)$$

Середній струм через відповідний інверторний перемикач для топології повного мосту:

$$I_{Cav,ПМ} = \int_0^{0,5} I_{Cpeak,ПМ} dt = 0,5 \text{ в. о.} \quad (4.4)$$

Середньоквадратичний струм через інверторний перемикач у топології напівмосту та повного мосту (4.5) та (4.6) відповідно:

$$I_{Crms,НМ} = \left( \int_0^{0,5} I_{Cpeak,НМ} dt \right)^{\frac{1}{2}} = 1,414 \text{ в. о.} \quad (4.5)$$

$$I_{Crms,ПМ} = \left( \int_0^{0,5} I_{Cpeak,ПМ} dt \right)^{\frac{1}{2}} = 0,707 \text{ в. о.} \quad (4.6)$$

Пікова пряма напруга через інверторний комутатор  $U_{peak}$  буде дорівнювати 1,2 в. о. Отже, з наведених вище визначень, загальна потужність інвертора напруги  $S_{НМ}$  для напівмостової топології буде (4.7), для повного мосту (4.8).

$$S_{НМ} = \sum_{k=1}^2 (I_{Crms,НМ,k} \cdot U_{peak,k}) = 3,394 \text{ в. о.} \quad (4.7)$$

$$S_{ПМ} = \sum_{k=1}^4 (I_{Crms,ПМ,k} \cdot U_{peak,k}) = 3,394 \text{ в. о.} \quad (4.8)$$

Коефіцієнт використання комутаторів (вихідна потужність перетворювача, отримана на одиницю активної потужності комутатора) для топології напівмосту та повного мосту:

$$N_{\text{НМ}} = \frac{P_{\text{Вих}}}{S_{\text{НМ}}} = 0,295 \quad (4.9)$$

$$N_{\text{ПМ}} = \frac{P_{\text{Вих}}}{S_{\text{ПМ}}} = 0,295 \quad (4.10)$$

Основні ключові моменти, отримані в результаті топологічного аналізу представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняльний аналіз топологій DC/DC перетворювача

Параметр	Напівмостова топологія	Повномостова топологія
Вхідна напруга $U_{DC}$ , в. о.	1,0	1,0
Вихідна потужність $P_{\text{Вих}}$ , в. о.	1,0	1,0
Струм колектора $I_{Cpeak}$ , в. о.	2,0	<b>1,0</b>
Середній струм колектора $I_{Cav}$ , в. о.	1,0	<b>0,5</b>
Середньоквадратичний струм колектора $I_{Crms}$ , в. о.	1,414	<b>0,707</b>
Загальна потужність інвертора $S$ , в.о.	3,394	3,394
Коефіцієнт використання комутаторів $N$	0,295	0,295

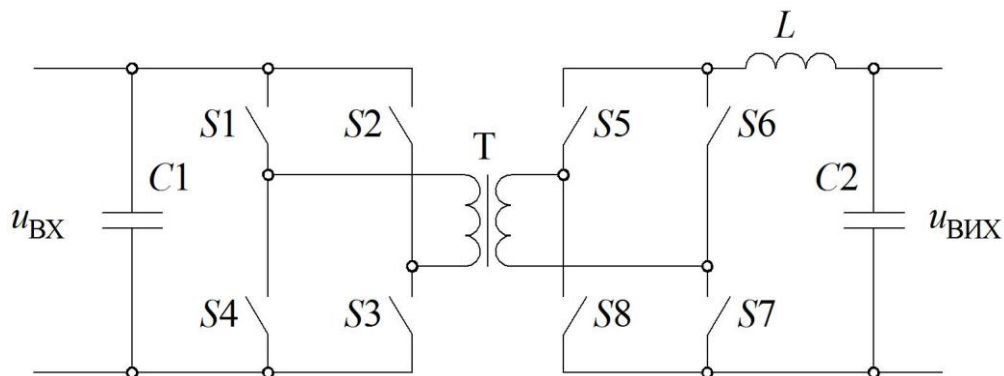


Рис. 4.8. Схема перехідного перетворювача

### 4.1.3 Визначення частоти проміжних ланок змінного струму в DC-DC перетворювачах

Зважаючи на те, що підсилюючий пункт буде розміщуватись на опорах контактної мережі, необхідно досягти якомога менших масогабаритних показників пристрою. В перетворювальних ланцюгах джерел живлення трансформатор є найбільш громіздким елементом, і тому доцільним є зменшення його об'єму [137]. Існує три основні способи підвищення компактності трансформатора:

1. застосування надпровідних обмоток;
2. застосування для магнітопроводу нових матеріалів з більшою індукцією насичення;
3. підвищення робочої частоти напруги.

На практиці найбільшого застосування отримав останній спосіб. Однак, збільшення робочої частоти призводить до збільшення динамічних втрат в ключах імпульсного перетворювача та може призвести до зростання сумарних втрат, що перевищують допустиме значення. Сумарна потужність втрат в IGBT обмежена максимально допустимим значенням температури напівпровідникової структури та значенням теплового опору потоку тепла в охолоджуюче середовище. Так, наприклад, для силового IGBT модуля *FZ3600R17HP4* фірми *Infineon* [138] допустима потужність розсіювання становить 21 кВт. Відповідно до методики, запропонованої в [139], максимально допустиме значення частоти комутації модуля IGBT, відповідаюче такій потужності розсіювання, при амплітуді струму на виході інвертора майже 800 А становить 8341 Гц. Робота силових модулів на такій частоті може призвести до недопустимого перевищення температури. Для запобігання перегріву розроблені і розробляються високоефективні системи охолодження повітряного, водяного і випарного типів. Використання сучасних високоефективних систем охолодження забезпечить номінальний температурний режим роботи модуля, але й значно підніме вартість всієї установки в цілому. Тому критична частота перемикання силових ключів не є

оптимальною. Доцільніше обирати значення частоти комутації зі співвідношення «потужність теплових втрат/вартість системи охолодження».

Критична частота роботи імпульсного перетворювача також може бути обмежена властивостями матеріалу магнітопроводу трансформатора та вимогами з охолодження та ізоляції. Відповідно до критерія подібності оптимальних за масогабаритними показниками трансформаторів [140, 141], з підвищенням робочої частоти габарити і маса трансформатора можуть бути зменшені до певної межі, що відповідає значенню критичної частоти. Це викликане дією низки фізичних факторів, наприклад: зменшення коефіцієнта передачі трансформатора, падіння напруги на індуктивності розсіювання, обмеження можливості розміщення обмотки в вікні магнітопроводу і т. і. Допустима робоча частота трансформатора визначається, головним чином, магнітними та електричними властивостями матеріалу магнітопроводу. Підвищення частоти призводить до зростання нагріву сердечника, що зумовлено, з одного боку, дією вихрових струмів, а з іншого – зменшенням площі поверхні охолодження (внаслідок зменшення габаритів трансформатора). Тому для зменшення температури нагріву необхідно знижувати вихрові струми в сердечнику. Для цього потрібно застосовувати магнітом'які матеріали з питомим опором більшим, ніж у електротехнічних сталях. Останнім часом, в області силового трансформаторобудування широке розповсюдження отримали аморфні сплави, які мають випадкову (некристалічну) структуру. У традиційних вторинних джерелах електроживлення невеликої потужності використовуються трансформатори з сердечниками з порошкових магнітних матеріалів (феритів) при величині частоти порядку десятків кілогерц і більше [142]. В даному застосуванні (енергетичному) трансформатори матимуть досить велику потужність. Тому доцільна зміна конструкції розв'язуючих трансформаторів і перехід від порошкових магнітних матеріалів до стрічкових при зниженні робочої частоти до значень порядку декількох кГц.

Для зменшення втрат від вихрових струмів, низьковольтні обмотки доцільно виготовляти з тонкої провідникової стрічки з шириною, рівній висоті

катушки. Для слабкострумівих (високовольтних) обмоток можна зберегти традиційне намотування провідником з круглим поперечним перерізом.

Основними факторами, що впливають на вибір частоти, є енергетичні і масогабаритні характеристики силових трансформаторів як найбільш дорогих елементів даної системи.

Для отримання характеристик трансформаторів було використано методику роботи [143]. Прийнято, що сумарна потужність вторинних обмоток в трансформаторі дорівнює потужності  $S$ , що передається. Геометричні характеристики представлено згідно [143] в відносних одиницях, прийнявши в якості базисного лінійного розміру ширину  $a$  несучого обмотки стержня сердечника, в якості базисної площі  $a^2$  і в якості базисного об'єму  $a^3$ . Відносні геометричні характеристики позначено зірочкою.

Допустимі значення електромагнітних навантажень визначаються, перш за все, умовами нагріву, які записано у вигляді рівнянь теплової рівноваги, що прирівнюють тепловиділення і тепловіддачу:

$$P_K = \rho \cdot j^2 \cdot V_K^* \cdot \kappa_K \cdot a^3 = \alpha \cdot \tau_n \cdot \Pi_K^* \cdot a^2 \quad (4.11)$$

$$P_C = P_y \cdot \gamma_c \cdot B_m^2 \cdot V_C^* \cdot \kappa_C \cdot a^3 = \alpha \cdot \tau_n \cdot \Pi_C^* \cdot a^2 \quad (4.12)$$

де  $P_K$  і  $P_C$  – втрати активної потужності в катушці і сердечнику;

$\rho$  – питомий електричний опір провідникового матеріалу;

$B_m$  і  $j$  – електромагнітні навантаження: амплітуда індукції в осерді і діюче значення щільності струму в обмотці;

$V_K$  і  $V_C$  – об'єми катушки і сердечника;

$\Pi_K$  і  $\Pi_C$  – поверхні охолодження катушки та сердечника;

$\kappa_C$  і  $\kappa_K$  – коефіцієнти заповнення сердечника магнітним і катушки провідниковим матеріалом;

$\tau_n$  і  $\alpha$  – допустимий перегрів поверхні, який прийнято для сердечника і катушки однаковим, і коефіцієнт тепловіддачі з одиниці поверхні;



$P_y$  і  $\gamma_c$  – питомі втрати в магнітному матеріалі, Вт/кг і щільність магнітного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>.

З рівнянь теплової рівноваги знаходимо:

$$j = \frac{k_j}{\sqrt{a}}, \quad B_m = \frac{k_\theta}{\sqrt{a}}, \quad k_j = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \tau_n \cdot \Pi_K^*}{\rho \cdot V_K^* \cdot \kappa_K}}, \quad k_\theta = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \tau_n \cdot \Pi_C^*}{P_y \cdot \gamma_c \cdot V_C^* \cdot \kappa_C}} \quad (4.13)$$

і отримуємо рівняння для визначення базисного розміру (4.14) і маси активних матеріалів (4.15):

$$a^3 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{S}{f \cdot k_j \cdot k_\theta \cdot k_C \cdot k_K \cdot F_C^* \cdot F_{OK}^*}, \quad (4.14)$$

$$m = (\gamma_C \cdot V_C^* \cdot \kappa_C + \gamma_K \cdot V_K^* \cdot \kappa_K) \cdot a^3 \quad (4.15)$$

де  $\gamma_K$  – щільність провідникового матеріалу котушки;

$F_C$  і  $F_{OK}$  – поперечні перерізи сердечника і його вікна з котушкою.

Слід врахувати так само можливе обмеження за умовами насичення магнітного матеріалу, при якому допустима індукція і базисний розмір  $a$  знаходяться з рівності:

$$B_m \leq \frac{B_s}{1,2 \div 1,3}, \quad a = \left( \frac{\sqrt{2} \cdot s}{\pi \cdot f \cdot B_m \cdot j \cdot \kappa_C \cdot \kappa_K \cdot F_C^* \cdot F_{OK}^*} \right)^{2/7} \quad (4.16)$$

де  $B_s$  – індукція насичення.

Визначальний вплив на характеристики трансформаторів надає вибір типу магнітного матеріалу. Для енергетичних застосувань при підвищеній частоті представляється найбільш перспективним використання нових магнітних матеріалів типу аморфних сплавів. Вони випускаються у вигляді тонких стрічок, що в поєднанні з більш високим, ніж у електротехнічних сталей, питомим електричним опором дозволяє отримати менші втрати на вихрові струми.

Аморфні сплави рекомендуються для застосування при частотах приблизно до 20 кГц, що в принципі дозволяє позбутися від звукового

засмічення навколишнього середовища. Однак енергетична ефективність переходу в надзвукову область частот не очевидна, що пояснюється при записі співвідношення для питомих втрат потужності в магнітному матеріалі в залежності від частоти:

$$P_{\Pi} = P_{Гс} + P_{Вх} = \kappa_1 \cdot f + \kappa_2 \cdot f^2 \quad (4.17)$$

де  $P_{Гс}$  і  $P_{Вх}$  – питомі втрати на гістерезис і вихрові струми;

$\kappa_1$  і  $\kappa_2$  – коефіцієнти, які не залежать від частоти.

На відміну від порошкових магнітних матеріалів типу фериту, в аморфних сплавах при частотах порядку одиниць кГц істотно переважають втрати на вихрові струми. А це призводить до зниження ефекту, що досягається від підвищення частоти. Дійсно, при нехтуванні втратами на гістерезис ( $\kappa_1 \rightarrow 0$ ) має місце пропорція,  $P_y \sim f^2$ , а тоді з (4.13) видно, що  $\kappa_B \sim f^{-1}$ , а з рівності (4.14) випливає, що базисний розмір і зовсім не залежить від частоти. Останнє означає, що від частоти не залежить ні маса активних матеріалів, ні складові втрати  $P_K$  і  $P_C$ . Навпаки того, при переважанні втрат на гістерезис ( $\kappa_2 \rightarrow 0$ ) маємо

$$P_y \sim f, \quad \kappa_B \sim f^{-0,5}, \quad a^3 \sim f^{-0,5}, \quad (4.18)$$

тобто, при підвищенні частоти досягається істотна економія як по масі так і по складовим втрат.

Таким чином, при використанні стрічкових феромагнітних матеріалів велику роль відіграє гранична частота

$$f_2 = \frac{\kappa_1}{\kappa_2} \quad (4.19)$$

при якій має місце рівність питомих втрат на гістерезис і вихрові струми; при її досягненні починається швидке скорочення ефекту, одержуваного від підвищення частоти і в межі, при  $f \rightarrow \infty$ , ефект зовсім зникає.

Критична частота для обраного матеріалу магнітопроводу визначається за формулою:

$$f_{кр} = \frac{3,98 \cdot 10^7}{A} \cdot \sqrt{\frac{\Delta T}{P}} \quad (4.20)$$

де  $A$  – коефіцієнт питомих втрат магнітного матеріалу (коефіцієнт Штейнметца);

$\Delta T$  – температура перегріву магнітопроводу.

Об'єм магнітопроводу імпульсного трансформатора на якому може бути реалізована задана потужність при заданій частоті, можна розрахувати за виразом:

$$V_M = 1,5 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot k_d \cdot k_T \cdot \gamma_U \cdot \gamma_I}{k_M}} \cdot \frac{P_I}{f^{\frac{1}{4}} \cdot \Delta T} \quad (4.21)$$

де  $k_d$  – коефіцієнт додаткових втрат;

$k_T$  – коефіцієнт нагріву трансформатора;

$\gamma_U$  – коефіцієнт збільшення втрат потужності в магнітопроводі при несинусоїдальній напрузі;

$\gamma_I$  – коефіцієнт оціночного значення збільшення потужності втрат в магнітопроводі при несинусоїдальному струмі;

$k_M$  – коефіцієнт заповнення вікна міддю;

$P_I$  – потужність першої гармоніки.

Для порівняння в табл. 1 показані розрахунки критичної частоти аморфного сплаву ММ11-Н товщиною стрічки 0,02 мм та сталі 3424 товщиною стрічки 0,08 мм при потужності трансформатора 500 кВА.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку критичної частоти

	За допустимою потужністю розсіювання IGBT	Аморфний сплав ММ11-Н товщиною стрічки 0,02 мм	Сталь 3424 товщиною стрічки 0,08 мм
Критична частота, Гц	8341	7386	928

Для порівняння масогабаритних показників магнітопроводу трансформатора, подальший розрахунок параметрів проводився для аморфного сплаву ММ11-Н товщиною стрічки 0,02 мм на частоті 5000 Гц, сталі 3424 товщиною стрічки 0,08 мм на частоті 900 Гц та сталі 3424 товщиною стрічки 0,08 мм на частоті 50 Гц. Результати розрахунку зведені в табл. 2.

Таблиця 4.3 – Параметри магнітопроводу з різних матеріалів

Матеріал	Аморфний сплав ММ11-Н товщиною стрічки 0,02мм, $f = 5000$ Гц	Сталь 3424 товщиною стрічки 0,08 мм, $f = 900$ Гц	Сталь 3424 товщиною стрічки 0,08 мм, $f = 50$ Гц
Питомі втрати в магнітопроводі, Вт/кг	0,572	13,381	0,417
Об'єм магнітопроводу, м <sup>3</sup>	0,028	0,173	0,357
Маса магнітопроводу, кг	200	1300	2677
Втрати в магнітопроводі, Вт	114	17395	1116

З урахуванням результатів розрахунку масогабаритних показників та втрат в магнітопроводі очевидним є доцільність використання в якості матеріалу магнітопроводу аморфного сплаву ММ11-Н. Заміна кристалічних сплавів аморфними в серійних виробках дозволить досягти значного економічного ефекту за рахунок спрощення технологічного процесу виготовлення магнітопроводів, зниження трудоемності, матеріалоємності та енергоемності процесу.

#### **4.2 Розрахунок потужності сонячної електростанції та ємності накопичувача, необхідної для живлення підсилюючого пункту**

При спорудженні великих сонячних електростанцій (СЕС) велике значення має розмір площі, яка потрібна для розміщення сонячної електростанції та є одним з важливих параметрів для проектування СЕС. При цьому слід розуміти, що розмір площі знаходиться практично в прямій залежності від максимальної потужності сонячної станції – чим більше фотоелектричних модулів (сонячних батарей) буде змонтовано, тим більше буде потужність, але і тим більша площа буде потрібна для їх установки. Крім того, до загальної площі фотомодулів доведеться додати технологічні проходи та відстань між окремими модулями, щоб запобігти взаємного затінення панелей.

Для мінімізації площі сонячної стації та уникнення спорудження допоміжних ліній, що будуть передавати енергію від станції до споживача, більш доцільним варіантом є розташування сонячних батарей рівномірно вздовж міжпідстанційних зон на окремих опорах.

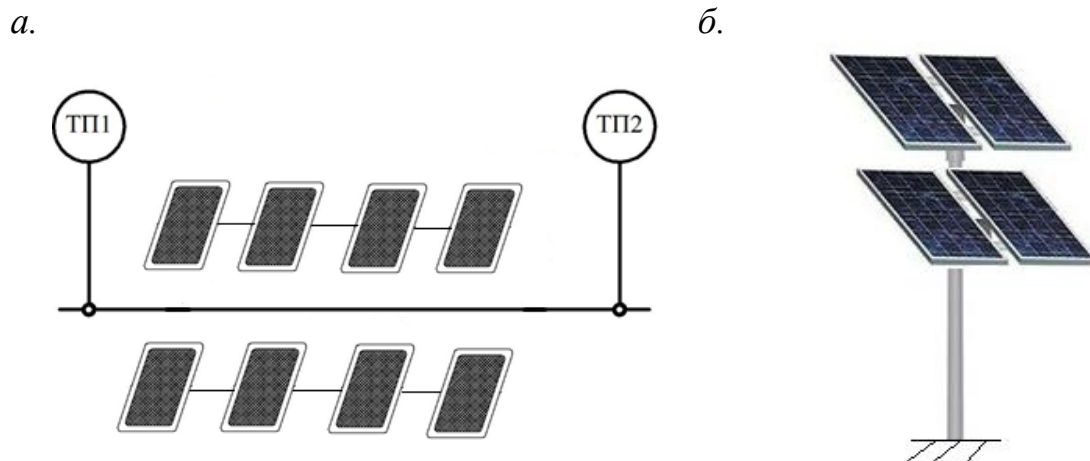


Рис. 4.9. Розташування сонячних панелей вздовж МПЗ:  
*а* – структурна схема; *б* – варіант розміщення сонячних панелей на опорі

Сумарна потужність сонячних панелей для системи розраховується виходячи з встановленої потужності підсилюючого пункту та залежить від пори року та географічного розташування. При розрахунках необхідно також враховувати втрати на перетворення постійної напруги в постійну або змінну, заряд-розряд акумуляторів та втрати в провідниках.

Сонячне випромінювання величина непостійна та залежить від багатьох факторів – від пори року, добового періоду, погодних умов та географічного положення. Ці фактори також повинні враховуватись при розрахунках кількості сонячних панелей. У разі використання системи на протязі всього року, розрахунок повинен виконуватись для найнесприятливіших місяців з точки зору сонячного випромінювання.

Переважає більшість сонячних панелей встановлюється на нерухому опорі та орієнтується рівно на південь, кут нахилу обирається оптимальним для отримання максимальної потужності. Таке встановлення найбільш надійне, має мінімальну вартість та прискорює монтаж. Але значно збільшити виробництво електроенергії в порівнянні з нерухомо закріпленими сонячними панелями можливо за рахунок використання

сонячних трекерів. Встановлення фотопанелі на сонячний трекер дає змогу підвищити рівень генерації електроенергії на 30-40 %.

Потужність сонячної електростанції для живлення підсилюючого пункту визначається за формулою:

$$P_{cn} = \frac{E_c \cdot k \cdot P_{inc}}{E_{inc}} \quad (4.22)$$

де:  $P_{cn}$  – потужність сонячної електростанції, Вт;

$E_c$  – споживана енергія, Вт·год на добу;

$E_{inc}$  – середньомісячна інсоляція кВт·год/м<sup>2</sup>/день;

$P_{inc}$  – потужність інсоляції на земній поверхні на м<sup>2</sup>;

$k$  – коефіцієнт втрат на заряд-розряд акумулятора, перетворення напруги.

Для розрахунку сонячної станцій в роботі було створено програму для автоматичного підрахунку всіх необхідних даних. В залежності від вихідних даних таких як: напруга на виході однієї панелі, номінальний струм панелі, кількість панелей на одній опорі програма розраховує всі вихідні параметри сонячної станції. Необхідна потужність сонячної електростанції для живлення кожного підсилюючого пункту у відповідності до його потужності (табл. 3.4) наведено в табл. 4.4, алгоритм роботи представлено на рис. 4.10

Таблиця 4.4 – Потужність сонячних електростанцій

№ ПП	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6	ПП7	ПП8
Потужність СЕС, МВт	1,22	1,95	0,97	0,77	1,22	0,77	1,95	0,77

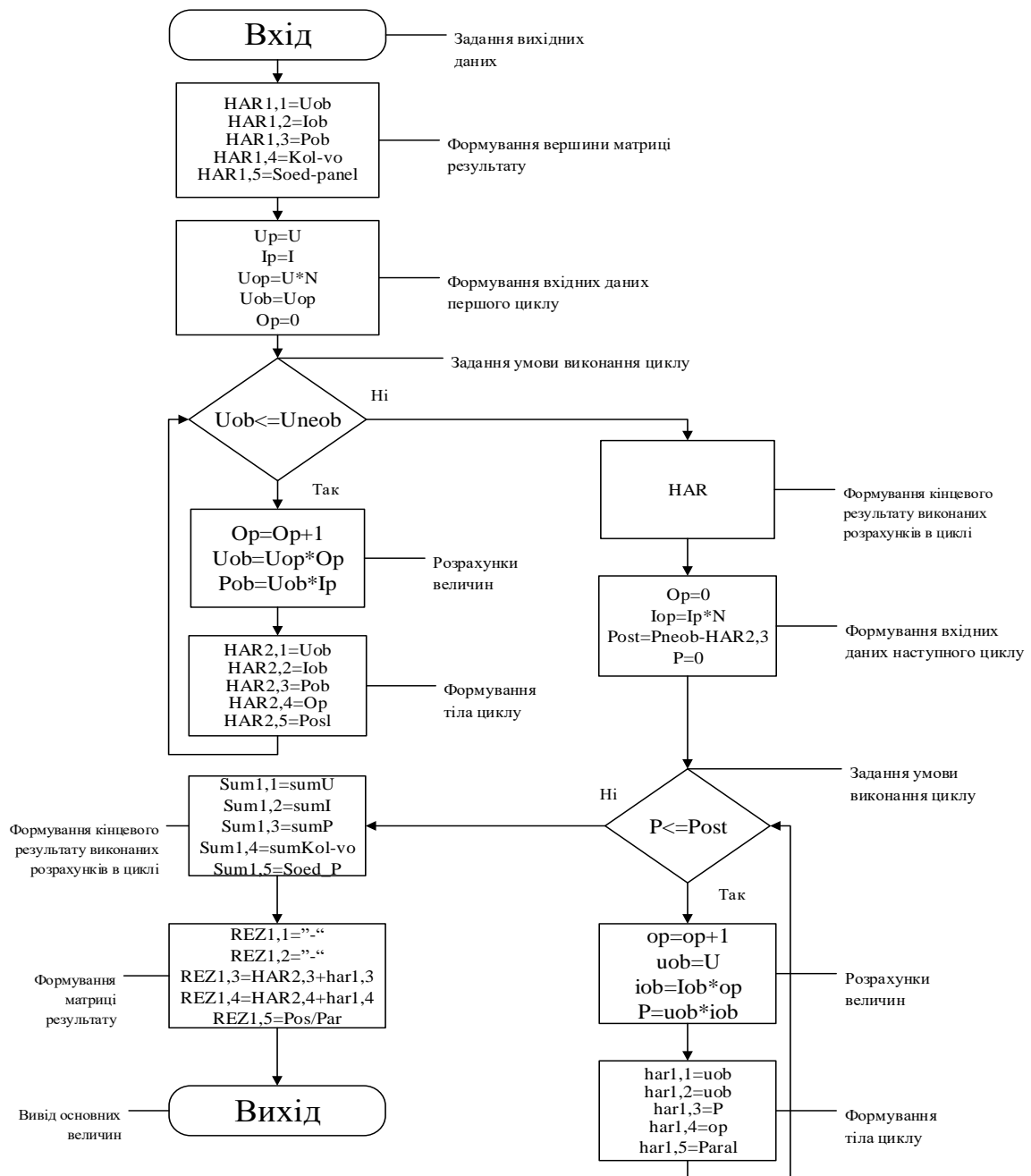


Рис. 4.10. Алгоритм визначення кількості панелей для живлення підсилюючого пункту

На сьогоднішній день в пристроях СТЕ пропонуються до використання різні типи накопичувачів [144 – 148], але доцільність застосування того чи іншого типу накопичувача до цього часу не обґрунтована в повній мірі. Для застосування в системі розподіленого живлення, накопичувач енергії повинен функціонувати в умовах різкої зміни навантаження та компенсувати коливання напруги при мінімальному часі відновлення. Як показує аналіз доступних джерел [149], на сьогоднішній день найбільш перспективним напрямком є застосування батарейних систем накопичення електричної енергії (БСНЕ), дозволяючих

зменшити коливання споживаної потужності і рознести в часі фази накопичення та віддачі електроенергії. Імпульсний характер струму, що споживається ЕРС може бути скомпенсований батареєюною системою до отримання бажаного режиму напруги. Крім того, застосування електрохімічних накопичувачів енергії дозволяє вирішити цілий ряд завдань: поліпшити якість електричної енергії і знизити витрати на виробництво електроенергії, згладити профіль завантаження генеруючих потужностей, збільшити ресурс електромережевого устаткування, знижуючи пікове навантаження на підстанції, дозволяє інтегрувати в існуючу систему електропостачання сонячні і вітрові генератори електричної енергії, збільшити надійність енергосистем в цілому [23].

Незважаючи на наявність великої кількості типів електрохімічних накопичувачів електричної енергії, вибір конкретного типу акумулятора для енергетичних задач обмежується певними вимогами [23]. При виборі конкретного типу накопичувача необхідно враховувати як технічні, так і економічні характеристики. До технічних характеристик можна віднести: ККД, кількість зарядно-розрядних циклів, час заряду, здатність до перевантажень (можливість віддачі імпульсних струмів), частотні характеристики (здатність швидко віддавати енергію). До факторів, що впливають на економічні показники, варто віднести загальну вартість батареї, її час життя. На залізниці БСНЕ може бути розміщено як на ТП так і, бажано, між ними на ПП. Оскільки застосування БСНЕ на залізниці забезпечує якість електричної енергії, визначальними факторами є перевантажувальна здатність, частотні характеристики і час заряду.

На підставі проведеного аналізу можливості застосування різних типів акумуляторних накопичувачів у складі БСНЕ (табл. 4.5), перевагу слід віддати LiFePO<sub>4</sub> батареям: вони мають найкращі енергетичні характеристики при задовільних частотних характеристиках. Однак, їх використання накладає серйозні вимоги до системи керування батареєю (СКБ). Для забезпечення нормальної роботи акумуляторної батареї, в процесі її експлуатації потрібно постійно відслідковувати рівень заряду кожного з елементів батареї, запобігаючи його виходу за допустимі межі. Крім того, необхідно вирівнювати



значення напруги кожного з послідовно включених елементів між собою (балансувати рівень заряду).

Таблиця 4.5 – Характеристики найбільш поширених типів АКБ

Тип батареї	Lead-acid	NiCad	NiMH	LiCoO <sub>2</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	LiFePO <sub>4</sub>
Номінальна напруга, В	2	1,2	1,2	3,7	3,7	3,3
Відносна вартість	1	2	2,4	4	6	>10
Безпечність використання	Висока	Висока	Висока	Низька	Середня	Висока
Екологічність використання	Низька	Низька	Висока	Висока	Висока	Висока
Ефект пам'яті	-	+	+	-	-	-
Енергоефективність	60%	75%	70%	90%	90%	95%
Час життя (год.)	400	500	500	>500	>500	>2000
Час зарядження, год	12	1.5	4	2-4	2-4	<2
Саморозрядження, % / міс.	20	30	35	10	10	8

На рис. 4.11 *а*, представлена структурна схема БСНЕ до складу якої входить накопичувач, узгоджуючий DC/DC перетворювач та контролер заряду. DC/DC перетворювач заряджає або розряджає накопичувач, використовуючи стратегію керування, відповідно до напруги в контактній мережі та заряду накопичувача (SoC). На рис. 4.11 *б* показана еквівалентна схема батарейних модулів, що складається з чотирьох елементів [150].

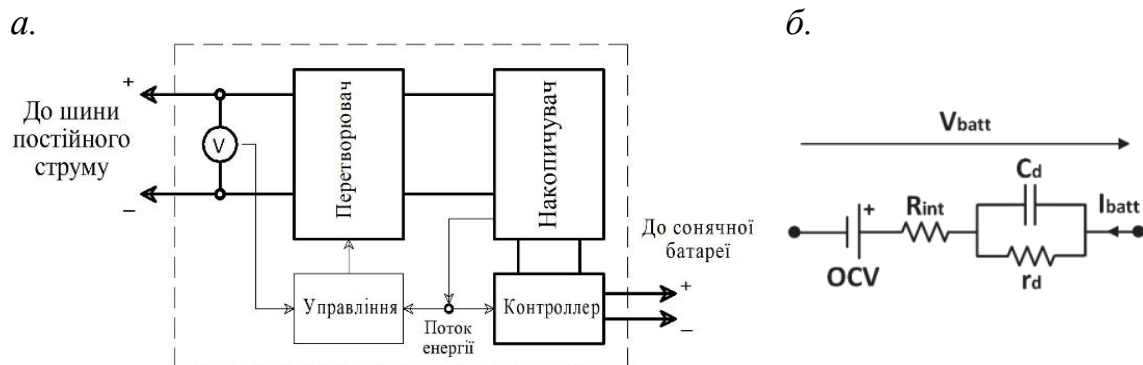


Рис. 4.11. Батарейна система накопичення енергії:

*а* – структурна схема; *б* – еквівалентна схема заміщення

Ідеальне джерело напруги являє собою напругу холостого ходу (OCV), на яку впливає рівень заряду накопичувача (SoC); послідовний резистор  $R_{\text{вн}}$  являє собою внутрішній опір накопичувача, в той час як паралельна  $RC$  ланка ( $r_d$  і  $C_d$ ) описує передачу заряду та ємність відповідно.

Електричну модель накопичувача можна описати виразами 4.23 – 4.26, де перший вираз представляє закон Кірхгофа для схеми заміщення (рис. 4.11 *б*), другий – поліном  $n$ -го ступеня відношення між напругою

холостого ходу та рівнем заряду накопичувача. Третє рівняння моделює закон зміни рівня заряду, відповідно до величини зарядного струму, і четвертий вираз – диференційне рівняння, що описує роботу паралельної  $RC$  ланки.

$$U_H(t + dt) = OCV(t) - R_{BH} I_H(t) - u_d(t + dt) \quad (4.23)$$

$$OCV(SoC) = \alpha_n SoC^n + \alpha_{n-1} SoC^{n-1} + \dots + \alpha_0 \quad (4.24)$$

$$SoC(t + dt) = SoC(t) + \frac{U_H(t + dt) I_H(t) dt}{3600 \cdot C_H} \quad (4.25)$$

$$u_d(t + dt) + r_d C_d \left( \frac{u_d(t + dt) - u_d(t)}{dt} \right) = \begin{cases} r_d I_H(t) \\ 0 \end{cases} \quad (4.26)$$

де  $u_d$  – напруга паралельної  $RC$  ланки;

$dt$  – крок дискретизації за часом;

$\alpha_n \dots \alpha_0$  – коефіцієнти інтерполяції;

$C_H$  – ємність накопичувача.

Ємності БСНЕ для кожного ПП визначаються в залежності від величини струму підсилюючого струму на протязі всього часу проходження ЕРС. Знехтувавши величиною енергії рекуперації (припустивши що до БСНЕ не надходила енергія, а лише споживалася на протязі всього інтервалу руху), для дискретних вимірів струму споживання, ємність накопичувача визначається [151]:

$$C_H = \int_0^T \sum_0^{n-1} |i_n| dt, \quad (4.27)$$

де  $C$  – ємність БСНЕ, А·год;

$n$  – порядковий номер дискретного виміру;

$i$  – миттєве значення струму споживання БСНЕ, А;

На основі струмів підсилення (рис. 4.12), отриманих в результаті проведених розрахунків у пункті 3.4, визначено ємності накопичувачів (табл. 4.6).

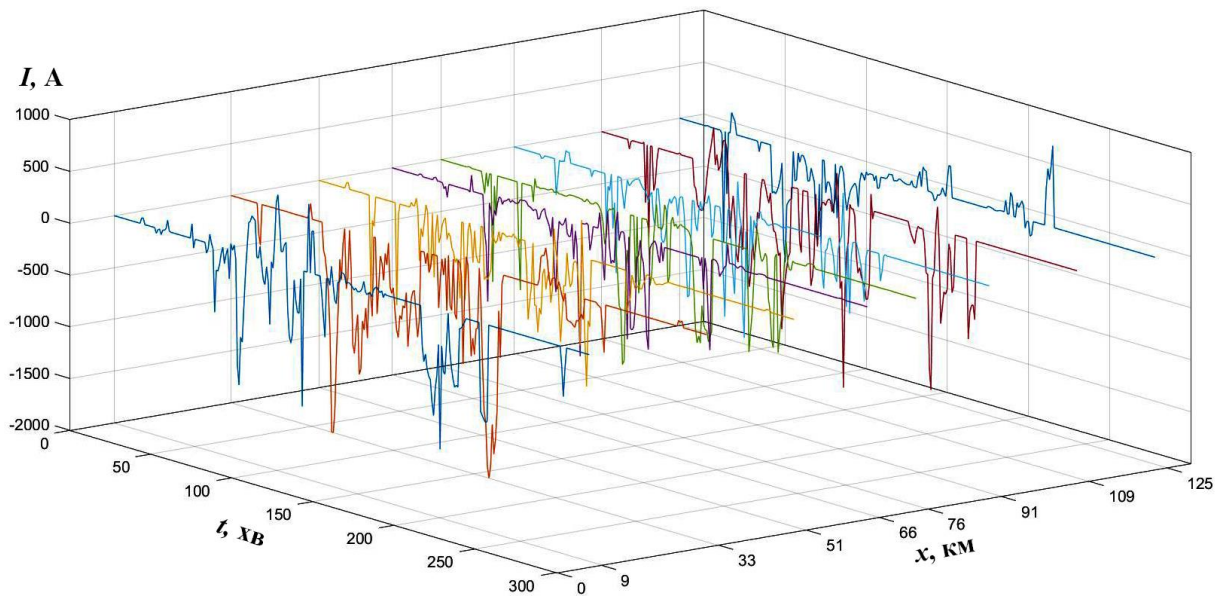


Рис. 4.12. Струми підсилюючих пунктів

Таблиця 4.6 – Ємності накопичувачів підсилюючих пунктів

№ ПП	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6	ПП7	ПП8
Ємність, А·год	705	1210	565	390	630	455	990	425

Внутрішній опір акумуляторної батареї  $R_{BH}$  нелінійний і залежить від струму навантаження  $i_a$  опору електроліту  $R_{ел}$ , а також від опору електродів  $R_e$  [152]:

$$R_{BH}(i_a, \tau_e, C) = R_{ел}(\tau_e, C) + R_e(C) + bE(i_a, \tau_e, C)I_a^{-1} \quad (4.28)$$

Опір електроліту  $R_{ел}$  обернено пропорційний його температурі  $\tau_e$ . Залежність  $R_{ел}$  від ступеня заряду нелінійна, причому вона зменшується, коли накопичена в акумуляторі енергія збільшується. Опір електродів обернено пропорційний активній поверхні електрода, і таким чином обернено пропорційний миттєвій енергоємності  $C$  акумулятора. Останній член у формулі (4.34) визначає опір поляризації, а величина, що входить в його склад  $b$  – коефіцієнт, що позначає відносну зміну ЕРС поляризації на затискачах гальванічного елемента, пов'язаний з протіканням струму  $i_a$  в співвідношенні до ЕРС  $E$  для номінальної енергоємності.

Для будь-якої температури  $\tau$  з діапазону робочих температур акумулятора його номінальну ємність можна визначити як:

$$C_\tau = \frac{C_{\tau n}}{1 + \alpha |(\tau_{en} - \tau_e)|} \quad (4.29)$$

де  $\alpha$  – температурний коефіцієнт ємності, [153];

$C_{\tau n}$  – номінальна ємність накопичувача при температурі  $\tau_{en}$  і завантаженні номінальним струмом. Звідси:

$$\frac{C_{\tau}}{C_{\tau n}} = \frac{1}{1 + \alpha |(\tau_{en} - \tau_e)|} = c_{\tau}(\tau)$$

$$\text{для } |(\tau_{en} - \tau_e)| = \infty \quad c_{\tau} = 0$$

$$\text{для } \tau_{en} = \tau_e \quad c_{\tau} = 1$$
(4.30)

Коефіцієнт  $c_{\tau}(\tau)$  можна визначити як температурний показник зміни номінальної потужності. Корисна ємність акумулятора залежить від температури, а також від струму навантаження і від часу протікання струму. Її можна визначити за формулою:

$$C_{\tau}(i_a, t, \tau_e) = C_{\tau}(t) - K_w [i_a(t), t]$$
(4.31)

або

$$C_{\tau}(i_a, t, \tau_e) = C_{\tau}(t, i_a) - \int_0^t i_a(t) dt$$
(4.32)

де  $K_w [i_a(t), t]$  – нелінійна функція, яка визначає дійсний заряд, на який зменшилась ємність акумулятора під час його розряду;

$\int_0^t i_a(t) dt$  – корисний заряд, відібраний з акумулятора за час  $t$ ;

$C_{\tau}(t, i_a)$  – ємність акумулятора представлена як функція температури і струму навантаження.

Залежність, що визначає зміну ємності акумулятора як функцію навантаження, або так зване рівняння загасання ємності акумулятора, характеризує відома формула Пойкерта [152, 153]:

$$K_w = i_a^{n(\tau)} t$$
(4.33)

де  $K_w$  – розрядна ємність акумулятора;

$t$  – час розряду акумулятора;

$n(\tau)$  – постійна, що залежить від типу акумулятора (для свинцевого  $n = 1,27 - 1,34$ ; для лужного акумулятора  $n = 1,1$ ).

Дійсний рівень заряду акумулятора на основі наведених формул можна записати як:

$$k = \frac{C_u}{C_{\tau n}} = \frac{c_{\tau} \eta_A(i_a, \tau_e) C_{\tau n} - \int_0^t i_a(t) dt}{C_{\tau n}} \quad (4.34)$$

де  $\eta_A(i_a, \tau_e) = \left( \frac{i_a(t)}{I_n} \right)^{-\beta(\tau_e)}$  – коефіцієнт корисності накопиченої

енергії, для  $i_a \ll I_n$  може приймати значення більше 1;

$\beta$  – коефіцієнт, який визначається на основі рівняння (4.39).

Для номінально зарядженого акумулятора  $k = 1$  і тому:

$$k = c_{\tau}(\tau_e) \eta_A(i_a, \tau_e) - \frac{1}{C_{\tau n}} \int_0^t i_a(t) dt \quad (4.35)$$

Використовуючи (4.34) і (4.41), ми отримуємо формулу, що визначає внутрішній опір акумулятора, як функцію ступеня його заряду:

$$R_{\text{вн}}(i_a, t, \tau_e) = \frac{l}{k} + b \frac{E(k)}{i_a(t)} \quad (4.36)$$

де  $l$  – коефіцієнт, значення якого можна визначити за формулою:

$$l = E |\Delta U_w - b| k(\tau_e, I_n) I_n^{-1}, \quad b \approx 0,03; \quad \Delta U_w \approx 0,02 \quad (4.37)$$

$E(k)$  – миттєве значення ЕРС поляризації, яке залежить від ступеня заряду акумулятора.

Вище наведені формули дають можливість аналітично визначити параметри, які необхідні для імітаційного моделювання електрохімічного накопичувача енергії.

### 4.3 Система вимірювань та контролю рівнів напруги для розподіленої СТЕ

В системі розподіленого електропостачання необхідно контролювати рівні напруги у заданому діапазоні на струмоприймачах електрорухомого складу при русі міжпідстанційною зоною будь-якої кількості поїздів.

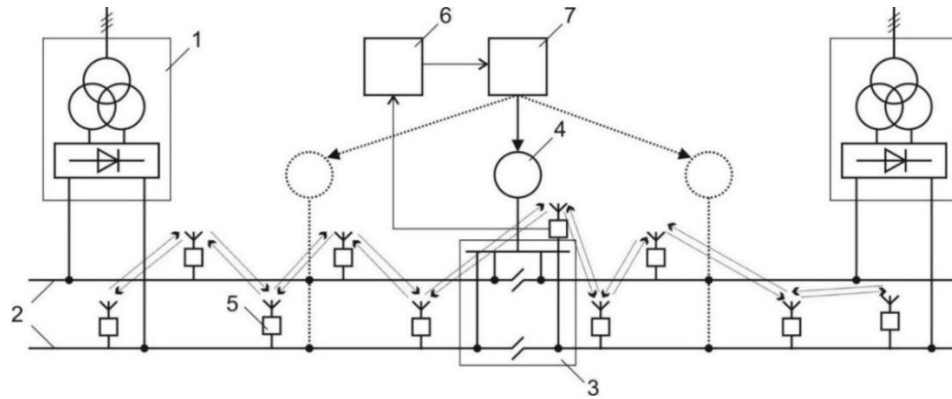


Рис. 4.12. Структурна схема системи розподілених вимірювань напруги на ділянці електрифікованої залізниці:

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

Для цього розроблено спосіб контролю рівнів напруги в контактній мережі безпосередньо на струмоприймачах електрорухомого складу незалежно від кількості поїздів на міжпідстанційній зоні (рис. 4.26) [154].

Суть даного способу полягає в тому, що для визначення напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму вимірюють напругу на шинах суміжних тягових підстанціях та посту секціонування всередині міжпідстанційної зони. При цьому додатково вимірюють розподіл напруги уздовж міжпідстанційної зони за допомогою пристроїв вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних через оптимально встановлену відстань в межах 1–3 км, після чого обчислюють необхідну потужність та регулюють величину її генерації системою управління, враховуючи кількість підсилюючих пунктів, які розподілені уздовж електрифікованої залізниці постійного струму.

Запропонована система працює наступним чином: електрифіковану ділянку залізниці між двома суміжними тяговими підстанціями обладнано пристроями вимірювання напруги з бездротовою передачею даних та системою управління. В систему управління через блок декодування подається масив значень напруги, отриманий шляхом накопичення даних, які передаються мережею, що побудована за комірковою топологією пристроями вимірювання напруги, розподілених уздовж міжпідстанційної зони та підключених по чергово до контактної мережі першої та другої колії. Далі, системою управління виконується аналіз отриманого масиву даних шляхом пошуку розрахункової точки контактної мережі, де вимагається забезпечення встановленого значення напруги. Після цього, на підставі масиву значень напруги, розраховується струморозподіл на міжпідстанційній зоні, а потім за допомогою аналітичного виразу визначається необхідна генерована потужність у місці розташування підсилюючого пункту тягової мережі. На підставі виміряного значення напруги у місці підключення підсилюючого пункту тягової мережі виконується регулювання струму генерації для досягнення розрахованої потужності. Завдяки регулюванню струму генерації підсилюючого пункту не відбувається зниження напруги на струмоприймачі кожного електрорухомого складу нижче заданого значення.

#### **Висновки до розділу 4**

Запропоновано структуру системи розподіленого електропостачання, що використовує установку розподілених сонячних генераторів електричної енергії в якості джерела живлення. Для системи визначено оптимальні топології узгоджуючого та перехідного DC/DC перетворювачів. Для перехідного перетворювача обрана мостова схема, що дозволяє при пікових струмах зменшити навантаження напівпровідникових ключів на 50 % в порівнянні з напівмостовою схемою. Для наявних в системі розв'язуючих трансформаторів DC/DC перетворювачів запропоновано найбільш перспективний магнітний матеріал та значення робочої частоти проміжних ланок змінного струму, що дозволяє

зменшити питомі втрати в магнітопроводі на 27 % та значно знизити масогабаритні показники трансформатора.

Запропоновано алгоритм для розрахунку потужності сонячної електростанції для живлення підсилюючих пунктів, що враховує параметри фотоелектричних панелей, кількість сонячної радіації, тип розміщення панелей та втрати в провідниках при передачі енергії.

Проведено аналіз найпоширеніших типів накопичувачів та визначено найбільш доцільний варіант для застосування в розподіленій системі – LiFePO<sub>4</sub> батареї, що характеризуються найкращими енергетичними характеристиками: ККД, кількість зарядно-розрядних циклів, час заряду, здатність до перевантажень (можливість віддачі імпульсних струмів), частотні характеристики (здатність швидко віддавати енергію).

Для контролю рівня напруги в контактній мережі запропоновано розподілену систему вимірювань з бездротовою передачею даних, що дозволяє моніторити зміну рівня напруги для подальшого вибору режиму роботи підсилюючого пункту та контролю величини генерованої потужності.

Основні положення розділу опубліковані в роботах [58, 59, 133, 134, 137, 151]



## **5 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛЕНОГО ЖИВЛЕННЯ**

На сучасному етапі розвитку електроенергетики необхідно використовувати форсований підхід до енергозберігаючих технологій виробництва та різноманітним способам зниження втрат електричної потужності та електроенергії, що скорочують потребу в нових електростанціях. Найдешевшим та одночасно найбільш ефективним засобом підвищення техніко – економічних показників електричних систем, зменшуючи всі види втрат та капіталовкладення на мережеві об'єкти та електростанції, віддаляючи строки їх спорудження є впровадження систем обмеження мінімального рівня напруги. При цьому додатково створюється підґрунтя для подальшого підвищення якості електроенергії згідно з вимогами стандартів.

Вибір способів підсилення, зокрема, тягових мереж, полягає у визначенні способу реалізації, номінальної потужності та місця встановлення підсилюючих пунктів в електричну мережу при одночасному оптимальному використанні вже наявних джерел потужності. До способів підсилення можна віднести одноагрегатні тягові підстанції, пункти додаткового живлення, застосування накопичувачів та альтернативних джерел електроенергії.

Для рішення поставленої проблеми необхідно застосовувати комплексний підхід, як до проблеми підвищення якості електроенергії: необхідно мати відповідні засоби регулювання, впливати на баланси активної та реактивної потужності, і навпаки, на показники якості електроенергії, що залежать від режимів роботи систем тягового електропостачання.

Оптимальне рішення даного завдання не лише створює можливість існування максимальних режимів роботи електричних систем за рахунок забезпечення балансу потужності в цілому, так і в окремих її вузлах, але й суттєво додатково зменшує всі перераховані втрати, а також приведені затрати на спорудження та експлуатацію мереж. Така оптимізаційна ефективність не потребує додаткових капіталовкладень, досягається за рахунок методичних удосконалень та запровадження раціонального організаційного механізму реалізації теоретичних

рішень і тому надзвичайно практична й актуальна, особливо на сучасній стадії розвитку електроенергетики, при все більш відчутних дефіцитах генеруючих потужностей та достатньо низьких рівнях напруги в енергосистемах.

При виконанні техніко-економічних розрахунків в електропостачанні керуються структурою виробничих витрат (рис. 5.1) і застосовують типову методику визначення економічної ефективності капітальних вкладень [155].

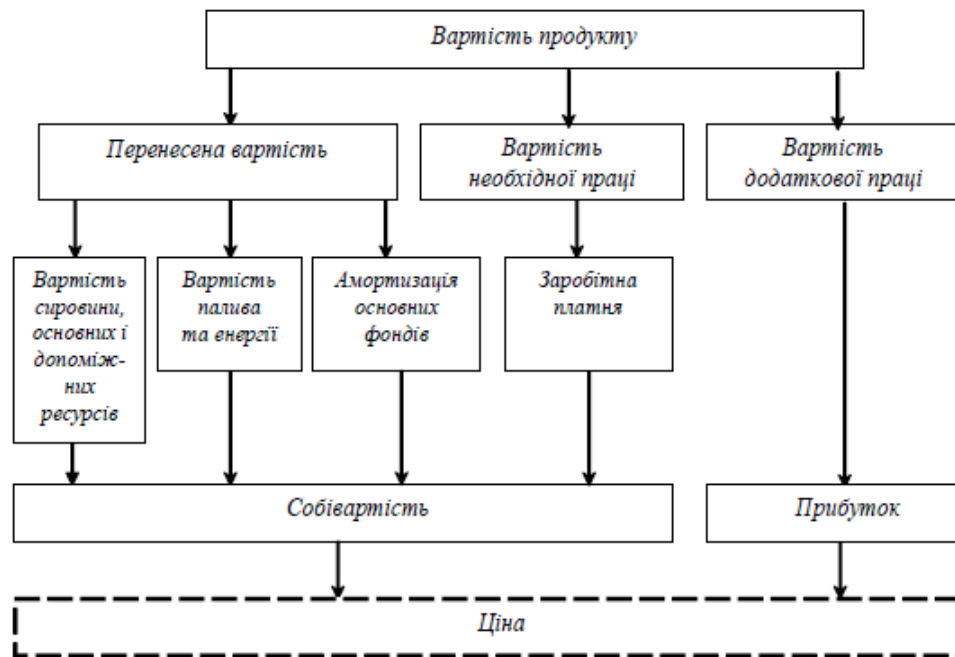


Рис. 5.1. Структура виробничих витрат

В основу економічної оцінки впроваджуваних технічних задач системи електропостачання покладена економічна ефективність. Показниками цієї ефективності є: річні загальні приведені витрати, термін окупності, питомий показник приведених витрат.

Визначення річних загальних приведених витрат виконується за формулою:

$$Z = E_H \cdot K_B + K_e, \quad (5.1)$$

де  $E_H$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень;

$K_B$  – капітальні вкладення, включаючи вартість проектування;

$K_e$  – річні експлуатаційні витрати;

Коефіцієнт  $E_n$  характеризує ефективність, з якою вкладаються засоби для розвитку народного господарства. Він дозволяє приводити капітальні вкладення  $K_v$  до розмірності річних експлуатаційних витрат  $K_e$ . Якщо, наприклад, в СЕП вкладається  $K_v$  грн, то до кінця року повинен бути прибуток у розмірі  $E_n K_v$  грн/рік. Нормативний коефіцієнт ефективності по народному господарству в цілому встановлений на рівні 0,14. З міркувань стимулювання технічного прогресу по окремих галузях допускається диференціація нормативного коефіцієнта ефективності. Так, для промисловості він встановлений на рівні 0,16, для будівництва – на рівні 0,22.

Показник витрат по формулі (5.1) містить суму всіх витрат протягом даних  $T$  років, віднесених до одного року. Цільова функція є економічною при умові, якщо приведені витрати  $Z$  будуть мінімальними.

В табл. 5.1 наведені витрати на закупівлю та монтаж пристроїв для впровадження системи розподіленого живлення для ділянки «Г – П» Придніпровської залізниці протяжністю 112,1 км. Кількість підсилюючих пунктів, їх потужність та кількість сонячних батарей наведені в табл. 4.7. При розрахунках приймалось, що у вартість підсилюючого пункту включено вартість накопичувача та контролеру.

Таблиця 5.1 – Розрахунок витрат на матеріали та обладнання

Назва матеріалу		Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, тис. грн	Вартість, тис. грн
Керований пристрій підсилення напруги 3,3 кВ	630 кВт	шт	3	1575	19725
	800 кВт		1	2000	
	1000 кВт		2	2500	
	1600 кВт		2	4000	
Фотопанелі		шт	31560	3	94680
Пристрої вимірювання напруги уздовж контактної мережі ділянки		шт	130	1,6	208
Шлейфи		шт	32	1,5	48
Всього					114661

Визначаємо заробітну плату робітників, які виконуватимуть монтаж та налаштування пристрою підсилення:

Таблиця 5.2 – Склад та час виконання робіт з монтажу

Склад робіт	Час виконання, год
Підготування місця монтажу	1024
Монтаж фотопанелей	1920
Монтаж пристрою	1280
Монтаж датчиків та приладів вимірювання	384
Монтаж шафи та її обладнання	1280
Налаштування системи в цілому	320

Для розрахування величини заробітної плати робітника за виконання роботи скористаємось виразом:

$$ЗП = (T + B) \cdot T_{\text{год}}, \quad (5.2)$$

де  $T$  – трудомісткість робіт, год;

$B$  – позапланові роботи, год (складає 12 % від  $T$ );

$T_{\text{год}}$  – погодинна тарифна ставка, грн.

Розрахунок заробітної плати робітникам за виконання встановленого плану робіт приведений в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Штат робітників та величина заробітної плати за виконання плану робіт

Штат робітників та їх категорії	Погодинна тарифна ставка робітника, грн	Заробітна плата, грн
Електромонтер III розряду	12,47	14301,59
Електромонтер III розряду	12,47	23942,4
Електромонтер III розряду	12,47	17876,99
Електромонтер IV розряду	13,39	5758,77
Електромеханік	15,86	22736,9
Інженер-проектувальник	16,3	5841,92
Всього:		90458,57

Нарахування на заробітну плату складає 37,8 % від загальної заробітної плати робітникам за виконаний план роботи.

Розрахуємо нарахування на заробітну плату за формулою:

$$E_{c.v.} = ЗП_{\text{заг}} \cdot 37,8\%, \quad (5.3)$$

де  $ЗП_{\text{заг}}$  – загальна заробітна плата, грн.;

$$E_{c.v.} = 66516,17 \cdot 37,8\% = 25143,11 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування розраховуються за формулою:

$$A = \frac{B_n \cdot H_a}{100}, \quad (5.4)$$

де  $B_n$  – вартість обладнання, що встановлюється, грн/рік;

$H_a$  – річна норма амортизації, % ( складає 15 %);

$$A = \frac{114661 \cdot 15\%}{100} = 17199,15 \text{ тис. грн/рік}$$

Розрахунок експлуатаційних витрат проводимо за формулою:

$$E = 3П + E_{с.в.} + A + \text{інш} \quad (5.5)$$

де  $3П$  – витрати на заробітну плату, грн;

$E_{с.в.}$  – нарахування на заробітну плату, % ( становить 37,8 %);

$A$  – амортизаційні відрахування, грн;

$\text{інш}$  – інші витрати, грн. ( становлять 1 % від витрат на матеріали).

$$E = 66516,17 + 25143,11 + 17199150 + \\ + 1146610 = 18437419,28 \text{ грн};$$

Вартісна оцінка на впровадження заходу розраховується за формулою:

$$B_T = B_M + 3П + E_{с.в.} \quad (5.6)$$

де  $B_M$  – вартість матеріалів для впровадження окремого заходу, грн.;

$$B_T = 114661000 + 66516,17 + 25143,11 = 114752659,28 \text{ грн.}$$

Річні загальні приведені витрати при впровадженні заходу:

$$З = 0,125 \cdot 114752659,28 + 18437419,28 = 32781501,69 \text{ грн} \quad (5.7)$$

Період окупності  $T$  – це той період часу, протягом якого капітальні вкладення повністю окупаються за рахунок економії на річних експлуатаційних витратах.

Розрахунок терміну окупності системи розподіленого живлення проведемо за виразом:

$$T_o = \frac{K}{P_T} \leq T_n \quad (5.8)$$

де  $K$  – капітальні витрати на впровадження заходу, грн;

$P_T$  – вартісна оцінка результату, грн;

$T_H$  – нормований термін окупності, роки.

$$P_T = (W_{\Delta P} + W_{W_{II}}) \cdot C \quad (5.9)$$

де  $W_{\Delta P}$  – економія електроенергії від зменшення втрат потужності в тяговій мережі, кВт·год/рік;

$W_{W_{II}}$  – економія електроенергії від зменшення споживання тяговими підстанціями з системи зовнішнього електропостачання, кВт·год/рік;

$C$  – вартість електроенергії, грн/кВт·год ( $C = 2,1839$  грн/кВт·год).

$$P_T = (657000 + 11087605) \cdot 2,1839 = 25649042,86 \text{ грн}$$

Таким чином, термін окупності становить:

$$T_o = \frac{114752659,28}{25649042,86} = 4,47 \text{ роки.}$$

Величина, зворотна нормативному коефіцієнту ефективності капітальних вкладень називається нормативним терміном окупності.

$$T_H = \frac{1}{E_H} \quad (5.10)$$

Для сектору енергетики нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень становить  $E_H = 0,125$ , що відповідає терміну окупності  $T_H = 8$  років. Для запропонованої системи розподіленого тягового електропостачання фактичний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень становить  $E_{\phi} = 0,224$  з терміном окупності  $T_{\phi} = 4,47$  роки, що говорить про економічну доцільність впроваджуваного заходу.

Слід відзначити, що розрахований термін окупності встановлення системи розподіленого живлення у короткостроковій перспективі, беручи до уваги систематичне зростання вартості електроенергії і зниження цін на сонячні батареї та елементну базу підсилюючих пунктів, може значно скоротитися.

## **Висновки до розділу 5**

Техніко-економічні розрахунки показали, що запропонована модернізація системи електричної тяги постійного струму, маючи відносні капіталомісткі витрати, характеризується строком окупності менше ніж 4,5 роки та фактичним коефіцієнтом ефективності капіталовкладень  $E_{\phi} = 0,224$ , що більше нормативного в галузі та свідчить про економічну доцільність впроваджуваного заходу.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена науковоприкладна задача покращення режиму напруги в системі тягового електропостачання постійного струму за рахунок розробки розподіленої системи, яка забезпечує перехід до нової енергоефективної схемотехніки живлення тягової мережі з децентралізацією генеруючих потужностей. Основні наукові результати та висновки полягають в такому.

1. Аналіз режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму показав їх часткову невідповідність встановленим нормам. Рівень напруги на струмоприймачах ЕРС не відповідає заданим вимогам навіть при підвищенні напруги на шинах тягових підстанцій на 200 – 300 В відносно номінального значення. Дослідженнями встановлено, що в СТЕ постійного струму діапазон зміни напруги на шинах тягових підстанцій може сягати 500 В, а рівень напруги на струмоприймачі ЕРС може змінюватись в межах 1500 В.

2. Виконане удосконалення методу розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання дозволило врахувати вплив примусового розподілу потужності на рівень напруги в тяговій мережі на ділянці при паралельній роботі тягових підстанцій та підсилюючих пунктів. На основі удосконаленого методу було побудовано математичну модель для виконання електричних розрахунків системи тягового електропостачання для ділянки з будь-якою кількістю тягових підстанцій та міжпідстанційних зон з урахуванням різних значень напруги холостого ходу тягових підстанцій та їх внутрішнього опору, різних схем підключення генеруючих потужностей до тягової мережі. Результати розрахунків свідчать про достатню точність, що відповідає умові  $\delta \leq 5\%$ . Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

3. Запропоновано систему обмеження мінімального рівня напруги на струмоприймачі ЕРС для якої на основі сенсорного методу пошуку визначено



раціональні місця розташування підсилюючих пунктів, що для досягнення однакового ефекту дозволяє зменшити їх встановлену потужність до 14 % в порівнянні з розташуванням на постах секціонування міжпідстанційних зон.

4. Для розподіленої системи тягового електропостачання визначено раціональний рівень обмеження мінімального значення напруги в контактній мережі, який складає на 7 % нижче рівня напруги холостого ходу тягових підстанцій, та визначається за критерієм мінімуму втрат електроенергії в тяговій мережі. Забезпечення раціонального рівня напруги в тяговій мережі дозволило, при виконанні однакової поїзної роботи на ділянці, зменшити втрати електроенергії на 29 % в порівнянні з втратами при обмеженні напруги в тяговій мережі на рівні 3000 В та на 64 % – в порівнянні з обмеженням напруги в тяговій мережі на рівні 2900 В.

5. Проведені розрахунки для електрифікованої ділянки Придніпровської залізниці показали, що при виконанні заданого графіка руху, використання розробленої системи забезпечує задане значення нижнього рівня напруги в тяговій мережі (3255 В), тим самим зменшуючи добові втрати електричної енергії на 30 % з 12,1 до 7,97 МВт·год в порівнянні з базовим розрахунком без підсилення та звужуючи діапазон зміни напруги на 30 %.

6. Для реалізації системи децентралізованого електропостачання запропоновано структуру, що використовує установку розподілених сонячних генераторів електричної енергії в якості джерела живлення. Для системи визначено оптимальні топології узгоджуючого та перехідного DC/DC перетворювачів. Для перехідного перетворювача обрана мостова схема, що дозволяє при пікових струмах зменшити навантаження напівпровідникових ключів на 50 % в порівнянні з напівмостовою схемою. Для наявних в системі розв'язуючих трансформаторів DC/DC перетворювачів запропоновано найбільш перспективний магнітний матеріал та значення робочої частоти проміжних ланок змінного струму, що дозволяє зменшити питомі втрати в магнітопроводі на 27 % та значно знизити масогабаритні показники трансформатора.

7. Для живлення підсилюючих пунктів запропоновано алгоритм розрахунку потужності сонячної електростанції. Проведено аналіз найпоширеніших типів та визначено найбільш доцільний варіант застосування накопичувачів для розподіленої системи – LiFePO<sub>4</sub> батареї, що характеризуються найкращими енергетичними характеристиками: ККД, кількість зарядно-розрядних циклів, час заряду, здатність до перевантажень (можливість віддачі імпульсних струмів), частотні характеристики (здатність швидко віддавати енергію). Живлення підсилюючих пунктів від альтернативних джерел та використання накопичувачів робить їх автономними та дозволяє зменшити споживання електроенергії з системи зовнішнього електропостачання на 33 %. Для контролю рівня напруги в контактній мережі запропоновано розподілену систему вимірювань з бездротовою передачею даних, що дозволяє здійснювати моніторинг зміни рівня напруги для подальшого вибору режиму роботи підсилюючого пункту та контролю величини генерованої потужності.

8. Техніко-економічні розрахунки показали, що запропонована модернізація системи електричної тяги постійного струму, маючи відносні капіталомісткі витрати, характеризується строком окупності в 4,47 роки та фактичним коефіцієнтом ефективності капіталовкладень  $E_f=0,224$ , що більше нормативного в галузі енергетики та вказує на економічну доцільність впроваджуваного заходу.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. О. В. Собкевич, К. М. Михайличенко, та О. Ю. Ємельянова, *Механізми ефективного використання та розвитку потенціалу транспортно-дорожнього комплексу України*. Київ, Україна: НІСД, 2014.
2. *Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання (за роками 2005-2016)*. Київ, Україна: Укрзалізниця, 2006-2017.
3. *Транспорт (1980-2017): Державна служба статистики України* [Електронний ресурс]. Доступно: [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2005/tz/tz\\_rik/tz\\_u/ts\\_u.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2005/tz/tz_rik/tz_u/ts_u.htm). Дата звернення: Жовт. 20, 2016.
4. Міністерство інфраструктури України (2015, Груд. 21) *Наказ № 547, Стратегічний план розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://mtu.gov.ua/files/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F%20%D0%9D%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%B7%20547.pdf>.
5. Д. О. Босий, «Розвиток наукових основ підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць», автореф. дис. д-ра техн. Наук, 05.22.09, Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, Дніпро, Україна, 2017.
6. V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, and E. M. Kosarev, «Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current», *Archives of Transport*, vol. 35, iss. 3, pp. 63 – 70, 2015.
7. К. Г. Марквардт, *Электроснабжение электрифицированных железных дорог*, Москва, Росия: Транспорт, 1982.
8. A. Rojek, *Traction power supply in 3 kV DC system*, Warshaw, Poland: KOW media&marketing Sp. Z o.o., 2012.
9. A. Shelag, *Influence of voltage in 3 kV DC cafenary on traction and energy paramers of the supplied vehieles*, Radom, Poland: Spatium, 2013.
10. Р. И. Мирошниченко, *Режимы работы электрифицированных участков*, Москва, Росия: Транспорт, 1982.

11. Т. М. Міщенко, «*Моделювання електромагнітних процесів в тяговій мережі при пакетному русі швидкісних поїздів*», *Електрифікація транспорту*, № 9, с. 50 – 61, 2015.
12. Міністерство транспорту України. (1996, Груд. 20). Наказ № 411, *Правила технічної експлуатації залізниць України (зі змінами)*.
13. ГОСТ 6962-75, «*Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений*», СССР: Госстандарт, 1975.
14. IEEE Standard 1629-2013, «*Performance of DC Overhead Current Collectors for Rail Transit Vehicles*», 2013.
15. Є. М. Косарев, «*Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму*», *Електрифікація транспорту*, № 9, с. 37 – 43, 2015.
16. Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко, *Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ: монография*, Екатеринбург, Россия: УрГУПС, 2015.
17. Б. А. Аржанников, «*Возможности системы электроснабжения постоянного тока для пропуска скоростных пассажирских и грузовых поездов повышенной веса*», [Електронний ресурс]. Доступно: <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2009>.
18. В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, Е. Н. Косарев, «*Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающим пунктом*», *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, т. 2, № 9(128), с. 8 – 18, 2014.
19. D. Bosyi, Ye. Kosariev, «*Modeling of the controlled traction power supply system in the space-time coordinates*», *Transport Problems: an International Scientific Journal*, № 3, pp. 5 – 19, 2017.
20. А. Липп и др., «*Высокоскоростной поезд Velaro для России*», *Железные дороги мира*, № 1, с. 36 – 50, 2009
21. Ч. Беккер, А. Кок, «*Четырехсистемный электровоз большой мощности EuroSprinter ES64F4*», *Железные дороги мира*, № 12, с. 30 – 39, 2006.

22. Развитие пассажирского подвижного состава для обычных линий, *Железные дороги мира*, № 9, с. 31 – 38, 2009
23. В. Г. Сиченко та ін., «Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму», *Електрифікація транспорту*, № 11, с. 61 – 70, 2016.
24. О. І. Саблін та ін., «Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 73 – 79, 2016.
25. Р. И. Мирошниченко, «Сравнительная оценка способов усиления системы постоянного тока 3 кВ», *Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института ж. д. транспорта*, №1, с. 1 – 12, 1973.
26. А. Н. Марикин, «Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока», автореф. дис. д-ра техн. наук, 05.22.07, Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург, Россия, 2008.
27. Б. А. Бесков, Б. Е. Геронимус, В. Н. Давыдов, М. Е. Крестьянов, Г. Г. Марквард, Г. А. Минин, *Проектирование системы электроснабжения электрических железных дорог: учебное пособие*, Москва, Россия: Трансжелдориздат, 1963.
28. В. А. Кисляков, «Сравнительная оценка технических показателей различных способов усиления электрифицированных линий постоянного тока» *Сборник трудов МИИТа*, № 604, с. 3 – 21, 1978.
29. М. И. Векслер, и др., *Усиление устройств тягового электроснабжения*, Москва, Россия: Транспорт, 1984.
30. В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саенко, Д. О. Босий, *Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць*, Дніпро, Україна: ПФ Стандарт-Сервіс, 2015.
31. Т. Н. Мищенко, «Показатели качества электроэнергии в тяговой сети на токоприемниках электровозов постоянного тока», *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізничн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, №. 23, с. 114 – 116, 2008.

32. М. О. Костін, А. В. Нікітенко, «Коефіцієнти потужностей рекуперуючого електрорухомого складу постійного струму», *Електрифікація транспорту*, № 11, с. 81 – 87, 2016.
33. М. О. Костін, А. М. Муха, А. В. Нікітенко, «Якість електроенергії, рекуперованої електровозами ВЛ11М6 і ВЛ11М», *Електрифікація транспорту*, № 10, с. 108 – 116, 2015.
34. М. Kostin, A. Nikitenko, «Statistics and Probability Analysis of Voltage on the Pantograph of DC Electric Locomotive in the Recuperation Mode», *Przegląd elektrotechniczny*, № 2a, pp. 273 – 275, 2013.
35. Н. А. Костин, А. В. Никитенко, «Автономность рекуперативного торможения – основа надежной и энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока», *Залізничний транспорт України*, № 3, с. 15 – 22, 2014.
36. М. О. Костін, О. І. Саблін, А. В. Нікітенко, «Вплив рекуперації та вибігу електрорухомого складу на його енергетичні показники», *Електрифікація транспорту*, № 2, с. 44 – 46, 2011.
37. О. В. Кириленко, С. П. Денисюк, «Модельовання енергетичних процесів у системах енергопостачання при вирішенні завдань енергозбереження», *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України, Електродинаміка: Збірник наукових праць*, с. 87 – 91, 2001.
38. В. Г. Сиченко, «Вплив електроенергетичних процесів у системах тягового електропостачання на якість електричної енергії», *Гірнична електромеханіка та автоматика : зб. наук. пр.*, № 94, с. 25 – 30, 2015
39. ГОСТ 13109-97, «Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення», Київ: Держстандарт, 1999.
40. International standard IEC 61000-2-13, «*Electromagnetic compatibility (EMC)*», Geneva, 2005.
41. EN 50160, «*Voltage Characteristics of Public Distribution Systems*», 2004.
42. Т. Н. Мищенко, «Математическое моделирование влияния толчков случайной функции напряжения на токоприемнике на переходные

электромагнитные процессы в электровозе ДЭ1», *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, № 9, с. 61 – 68, 2005.

43. С. В. Ершов, Б. А. Жабин, «Анализ влияния провалов напряжения на показатели работы систем электроснабжения», *Известия тульского государственного университета. технические науки*, № 12-2, с. 62 – 72, 2013.

44. С. И. Осипова, *Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов*, Москва, Россия: Транспорт, 1984.

45. Т. П. Добровольскис, «Точность стабилизации напряжения на токоприемнике электровоза», *Сб. научн. Трудов ВНИИЖТа*, № 618, 1979.

46. ДСТУ 2773-94 (ГОСТ 9219-95), «Апарати електричні тягові. Загальні технічні умови», Київ: Держстандарт України, 1996.

47. Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко, «Совершенствование системы и устройств тягового электроснабжения», *Евразия вестн*, № 9, с. 22 – 23, 2015.

48. Б. А. Аржанников, *Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография*, Екатеринбург, Россия: УрГУПС, 2010.

49. М. Т. Шалимов, Г. П. Маслов, Г. С. Магай, *Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог*, Омск, Россия, 2002.

50. А. В. Котельников, *Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы*, Москва, Россия: Интекст, 2002.

51. В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, Є. М. Косарев, «Оптимізація керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму з підсилюючими пунктами», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 95 – 103, 2015.

52. IEEE Std 1887-2017, «*Guide for Wayside Energy Storage Systems for DC Traction Applications*», 2017.

53. Hitoshi Hayashiya & Shinya Kikuchi & Kazushi Matsuura & et al., «Possibility of energy saving by introducing energy conversion and energy storage technologies in traction power supply system». *In: 15th European Conference «Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013». Lille, France 2013.

54. Lee Hanmin, Kim Gildong, Lee Changmu, Joung Euijin, «Test of DC 1500 V Stationary Energy Storage System», *International Journal of Railway*, Vol. 5, No. 3, pp. 124 – 128, 2012.

55. Z. Li, S. Hoshina, N. Satake, M. Nogi, «DC/DC converter development for battery energy storage supporting railway DC feeder system» in *9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia*, IEEE 2015, pp. 1655-1660.

56. T. Konishi, M. Tobita, «Fixed Energy Storage Technology Applied for DC Electrified Railway (Traction Power Substation)» in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, IEEE 2012, pp.1-6.

57. Vincenzo Galdi, Giuseppe Graber, Antonio Piccolo, Alfonso Capasso, Regina Lamedica, Alessandro Ruvio, «Energy management of Auxiliary Battery Substation supporting high-speed train on 3 kV DC systems» *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2015 International Conference on 22-25 Nov. 2015.

58. Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, М. С. Пастушенко, Е. Н. Косарев, «Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии», *Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane*, № 162, с. 65 – 82, 2014.

59. Ю. П. Гончаров и др., «Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей», *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, №. 30, т. 2, с. 98 – 108, 2015.

60. Ю. П. Гончаров и др., «Система распределения питания с промежуточным звеном повышенной частоты для электрифицированных железных дорог», *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, № 38, с. 82 – 89, 2011.

61. Т. А. Заруцкая, «Исследование эффективности применения сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии на тяговой подстанции постоянного тока». автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Специальность 05.22.07, Ростов-на-Дону, 2004.



62. В. Н. Пунынин, В. Л. Никитин, «Условия эффективного использования емкостного накопителя энергии в системах тягового электроснабжения железных дорог», *Электричество*, № 1, с. 52 – 58, 1993.

63. В. Н. Пунынин, М. В. Шевлюгин, «Разработка энергосберегающих систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока 3,3 кВ с использованием накопителей энергии. Часть II Имитационная модель системы тягового электроснабжения с накопителями энергии», *Фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы в области железнодорожного транспорта*, № 921, с. 14 – 22, 1999.

64. В. П. Феоктистов, М. Павелчик, «Повышение тягово-энергетической эффективности транспортных систем при помощи накопителей энергии», *Транспорт*, № 12, с. 21 – 26, 1999.

65. И. Л. Васильев, М. Е. Павличенко, «Выбор накопителя энергии для систем альтернативной энергетики», *Электротехніка і електромеханіка*, № 4 (1), с. 14 – 16, 2016.

66. В. В. Андреев, В. А. Гречишников, Ю. Н. Король, М. В. Шевлюгин, «Развитие методологии расчета систем тягового электроснабжения», *Ж. д. транспорт*, № 8, с. 32, 2014.

67. В. П. Закарюкин, *Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока*, Иркутск, Россия: ИрГУПС, 2010.

68. А. Н. Митрофанов, И. А. Крестовников, М. А. Гаранин, «Методика и программно–технические средства расчета наличной пропускной способности системы тягового электроснабжения на участках значительной протяженности» на *II международном симпозиуме. Eltrans 2003*, Санкт-Петербург, 2003, с. 88.

69. М. А. Гаранин, «Совершенствование расчета наличной пропускной способности железных дорог постоянного тока по условиям электроснабжения», автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.22.07, СамГУПС, Самара, 2004.

70. Б. М. Бородулин и др., *Система тягового электроснабжения 2х25 кВ*. Москва, Россия: Транспорт, 1989.
71. Л. А. Герман, *Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения*. Москва, Россия: РОСГУПС, 1998.
72. Р. Н. Карякин, *Тяговые сети переменного тока*. Москва, Россия: Транспорт, 1987.
73. В. Е. Марский, «Особенности расчета системы тягового электроснабжения 2х25 кВ», *Вестник ВНИИЖТа*, № 1, с.19 – 23, 1983.
74. В. Е. Марский, *Методика и программа расчета параметров многопроводных тяговых сетей переменного тока на ЭВМ серии ЕС*. Москва, Россия: Трансэлектропроект, 1987.
75. М. П. Ратнер, Е. Л. Могилевский, *Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог*. Москва, Россия: Транспорт, 1985.
76. Э. В. Тер-Оганов, *Применение имитационного моделирования для расчета и анализа работы системы электроснабжения*. Екатеринбург, Россия: УЭМИИТ, 1993.
77. Д. В. Тимофеев, *Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками*. Москва, Россия: Энергия, 1972.
78. С. А. Блинкова, «Совершенствование методики расчета энергообеспеченности скоростных пассажирских перевозок на железных дорогах постоянного тока», диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.07, Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, 2015.
79. Р. Шеннон, *Имитационное моделирование систем – искусство и наука*. Москва, Россия: Мир, 1978.
80. А. Гультяев, *Визуальное моделирование в среде MatLab*. Санкт-Петербург, Россия: Питер, 2000.
81. Zhongbei Tian, Stuart Hillmansen, Clive Roberts, Paul Weston, Lei Chen, Ning Zhao, Shuai Su, Tingyu Xin, «Modeling and Simulation of DC Rail Traction Systems for Energy Saving» in *17th International Conference. Intelligent Transportation Systems (ITSC), IEEE*, 2014.

82. О. І. Стасюк, Л. Л. Гончарова, «Математичні моделі і методи комп'ютерного керування електропостачанням залізниць на основі диференційних перетворень Пухова», *Электронное моделирование*, Том 38, № 4, с. 37 – 46, 2016.

83. О. І. Стасюк, Л. Л. Гончарова, «Математичні моделі і методи аналізу комп'ютерних мереж керування електропостачанням тяговими підстанціями залізниць», *Проблемы управления и автоматики*, № 1, с. 104 – 105, 2017.

84. О. І. Стасюк, Л. Л. Гончарова, «Диференційні математичні моделі дослідження комп'ютерної архітектури всережимної системи керування дистанції електропостачання залізниць», *Кибернетика и системный анализ*, Том 54, № 1, с 83 – 92, 2017.

85. О. І. Стасюк, Р. В. Грищук, Л. Л. Гончарова, «Математичні комп'ютерно-орієнтовані моделі безпеки інформації обчислювальних мереж тягових підстанцій залізниць», *Захист інформації*, Том 17, №2, с. 117 – 124, 2015.

86. О. І. Стасюк, Л. Л. Гончарова, «Математичні моделі комп'ютерної інтелектуалізації технологій синхронних векторних вимірів параметрів електричних мереж» *Кибернетика и системный анализ*, Том 52, №5, с 186 – 192, 2016.

87. О. І. Стасюк, Л. Л. Гончарова, «Методи інтелектуалізації інноваційних комп'ютерних технологій бортових систем моніторингу локомотивів», *Електрифікація транспорту*, № 11, с.100 – 107, 2016.

88. A. I. Stasiuk, L. L. Goncharova, «Mathematical Modeles of Computer Intellectualization of Technologies for Synchronus Phasor Measurements of Parameters of Electric Networks», *New Means Cybernetics, Informatics, Computers Engineering And Systems Analysis. Springer Science+Business Media New York*, Volume 52, Issue 5, pp. 825 – 830, 2016.

89. В. Г. Кузнецов, Развитие теоретических основ энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока: дис. д-ра техн. наук: 05.22.09, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 2012.

90. А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, «Flow3 – Расчеты режимов электрических систем в фазных координатах», № 2005611176 (РФ), Май 19, 2005.

91. В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Е. Ю. Литвинов, «Fazonord – Расчеты режимов и нагрузочной способности систем тягового электроснабжения в фазных координатах», № 2005611179 (РФ), Май 19, 2005.

92. В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, «Fazonord-качество – Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов», № 2007612771 (РФ), Июнь 28, 2007.

93. В. А. Анисимов, В. В. Анисимов, О. А. Левченко, «Комплекс ЭРА – базовая подсистема информационной технологии разработки проектов переустройства железных дорог», *Вестник РГУПС*, № 3, с. 113 – 118, 2007.

94. В. А. Анисимов, В. В. Анисимов, «Программно-технологические комплексы ИСКРА и ЭРА: области применения и перспективы развития» на *5-м Международном симпозиуме железнодорожных вузов Европы и Азии*, Алматы, КазАТК им. М.Тынышпаева, с. 96 – 103, 2012.

95. В. А. Анисимов, В. В. Анисимов, «Многоцелевые расчетно-аналитические комплексы ИСКРА и ЭРА: комплексное решение проектных и производственных задач» на *4-й всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Транспортная инфраструктура сибирского региона*, Иркутск, 2013, с. 540 – 547.

96. В. А. Анисимов, В. В. Анисимов, О. А. Левченко, «Система ЭРА: Области и опыт применения, перспективы развития», *Проектирование развития региональной сети железных дорог: сб. науч. тр.*, № 4, с. 142 – 147, 2016.

97. Л. А. Герман, *Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения*. Москва, Россия: РГОТУПС, 2003.

98. В. Е. Марский, «Расчет пропускной способности электрифицированных железных дорог», № 2008615261, Окт. 31, 2008.

99. А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Р. В. Копченкова, *Вычислительные методы для инженеров*. Москва, Россия: Высш. шк., 1994.

100. Arnd Stephan, Martin Jacob, Harald Scheiner, «OpenPowerNet – Simulation of Railway Power Supply Systems», *Program Description and References, IFB Institut für Bahntechnik GmbH*, 2017.

101. Є. М. Косарев, «Математична модель керованої розподіленої системи тягового електропостачання постійного струму», *Електрифікація транспорту*, № 14, с. 15 – 27, 2017.

102. Д. А. Босый, Е. Н. Косарев, «Особенности выполнения автоматизированных расчетов систем тягового электроснабжения постоянного тока», *Вестник БелГУТа*, № 1(34), с. 18 – 22, 2017.

103. П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін, «Математичне моделювання транзитних перетікань потужності в розподільних електричних мережах», *Вісник Приазовського державного технічного університету*, № 18, с. 16 – 20, 2008.

104. О. Б. Бурикін, В. А. Видмиш, П. П. Медяний, «Визначення втрат потужності від транзитного перетікання в електричних мережах», *Енергетика та електротехніка*, № 1, с. 1 – 5, 2010.

105. В. Кулик, О. Бурикін, Ю. Малогулко, «Оптимізація перетікань активної та реактивної потужностей у розподільних електромережах засобами розосередженого генерування», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, 90 – 93.

106. В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, *Моделирование систем тягового электроснабжения*, Иркутск, Россия: ИрГУПС, 2007.

107. Т. М. Міщенко, «Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів», *Електротехніка та електроенергетика*, № 1, с. 19 – 28, 2014.

108. Э. С. Почаевец «Анализ режимов системы электрической тяги методом фиксированной выходной мощности», *Энергетика и транспорт*, № 1, с. 18 – 26, 1979.

109. А. М. Половко, П. Н. Бутусов, *Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации*. Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2004.

110. В. А. Василенко, *Слайн-функции: теория, алгоритмы, программы. Монография.* Новосибирск, Россия: Наука, 1983.
111. Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж., *Теория сплайнов и ее приложения. Монография.* Москва, Россия: Мир, 1972.
112. Уолш Дж. Л., *Интерполяция и аппроксимация рациональными функциями в комплексной области.* Москва, Россия: Изд-во Иностранной Литературы, 1961.
113. О. Косак, О. Тумашова, *Методи наближених обчислень.* Львів, Україна: БаК, 2003.
114. М. В. Гельман, М. М. Дудкин, К. А. Преображенский, *Преобразовательная техника: учебное пособие.* Челябинск, Россия: ЮУрГУ, 2009.
115. Д. О. Босий, «Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності», *Електрифікація транспорту*, № 8, с. 15 – 25, 2014.
116. D. Bosiy, E. Kosarev, «Calculation of the Traction Power Supply Systems Using the Functions of Resistance», *Problemy Kolejnictwa*, № 168, pp. 7 – 14, 2015.
117. Д. О. Босий, «Просторово-часова модель системи тягового електропостачання» *Вісник Нац. техніч. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр.*, № 19 (1128), с. 139 – 151, 2015.
118. М. О. Костін, О. Г. Шейкіна, *Теоретичні основи електротехніки.* Дніпропетровськ, Україна: Вид-во Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2006.
119. Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов, *Основы теории цепей. Учебник для вузов.* Москва, Россия: Энергия, 1975.
120. А. Г. Свешников, А. Н. Боголюбов, В. В. Кравцов, *Лекции по математической физике. Учебное пособие.* Москва, Россия: МГУ, 1993.
121. Д. О. Босий, Є. М. Косарєв, «Інтелектуальна система електропостачання транспорту» (Intelligence System of Electrified Transport), № 60711, Лип. 20, 2015.

122. Ю. П. Петров, И. А. Петров, *Введение в теорию инженерных расчетов, учитывающую вариации параметров исследуемых объектов*. Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2014.

123. Э. С. Почаевец, *Обобщенные методы анализа режимов системы тягового электроснабжения: учебн. пособие для вузов*, Днепропетровск, Украина: ДИИТ, 1981.

124. Г. И. Ивченко, Ю. И. Медведев, *Введение в математическую статистику*. Москва, Россия: ЛКИ, 2010.

125. Р 50.1.033-2001, *«Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа хи-квадрат»*. Москва, Россия: Изд-во стандартов. 2002.

126. Б. Ю. Лемешко, *Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению. Монография*. Москва, Россия: ИНФРА-М, 2017.

127. М. С. Никулин, «О критерии хи-квадрат для непрерывных распределений» *Теория вероятностей и её применение*, № 3, с. 675 – 676, 1973.

128. Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова, *Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография*. Новосибирск, Россия: НГТУ, 2011.

129. И. Л. Баранов, «Применение показателей чувствительности узлов в задачах управления режимами ЭЭС» дис.канд.тех.наук: 05.14.02, Москва, 2015.

130. П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько, *Оцінка чутливості втрат потужності в електричних мережах: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010.

131. Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець, *Альтернативна енергетика в Україні: монографія*. Дніпропетровськ, Україна: НГУ, 2013.

132. В. Г. Сиченко, «Інтеграція сонячної енергетики у систему тягового електропостачання постійного струму», *Вісник Нац. техніч. ун-ту «ХПИ»*. Серія: Автоматика та приладобудування, № 12 (1121), с. 364 – 368, 2015.

133. D. Bosiy, O. Sablin, I. Khomenko, Ye. Kosariev, I. Kebal, S. Myamlin, «Intelligent technologies for efficient power supply in transport systems», *Transport Problems*, № 12 (SE), pp. 57 – 71, 2017.

134. Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, Е. Н. Косарев и др., «Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей» *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, № 30, с. 98 – 108, 2015.

135. Е. И. Сокол, В. В. Ивахно, С. Ю. Кривошеев, Е. А. Маляренко, Е. М. Зржавец, Б. А. Стысло, «Интеграция объектов возобновляемой энергетики в низковольтные электрические сети», на *XIII міжнародній науково-практичній конференції. Відновлювальна енергетика XXI століття*, с. 112 – 115, 2012.

136. Е. И. Сокол, Ю. П. Гончаров, А. В. Ерьсько, и др., «Максимизация электрической энергии, получаемой от фотогенератора», *Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*, № 4, с. 110 – 116, 2012.

137. Є. М. Косарев, В. Г. Сиченко, А. М. Муха, К. О. Хань, «Розробка керованого підсилюючого пункту для розподіленої системи тягового електропостачання» *Електротехніка і електромеханіка*, № 4 (1), с. 89 – 94, 2016.

138. IGBT модуль FZ3600R17HP4, [Електронний ресурс]. Доступно: [www.infineon.com](http://www.infineon.com).

139. Д. О. Забарило, «Визначення частоти високочастотної ланки для перспективної схеми електрорухомого складу», *Наука та прогрес транспорту*, № 5 (53), с. 65 – 73, 2014.

140. А. Н. Горский, Ю. С. Русин, Н. Р. Иванов, Л. А. Сергеева, *Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания*. Москва, Россия: Радио и связь, 1988.

141. Ю. С. Русин, И. Я. Гликман, А. Н. Горский, *Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры: Справочник*. Москва, Россия: Радио и связь, 1991.



142. М. Браун, *Источники питания. Расчет и конструирование*. Киев, Украина: МК-Пресс, 2005.
143. Р. Х. Бальян, *Трансформаторы для радиоэлектроники*. Москва, Россия: Советское радио, 1971.
144. Ibrahim, H., Ilinca, A., Perron, J., *Energy Storage systems – Characteristics and comparisons, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 2007.
145. Hase, S., Konishi, T., Okui, A., Nakamichi, Y., Nara, H., Uemura, T., «*Fundamental Study on Energy Storage System for DC Electric Railway System*», in Power Conversion Conference, PCC Osaka 2002, pp.1456 – 1459.
146. Morita, G., Hase, S., Konishi, T., Nakamichi, Y., Nara, H., Uemura, T., «*Verification Tests of Electric DoubleLayer Capacitors for Static Energy Storage System in DC Electrified Railway*» in International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2008, pp.1017 – 1022.
147. Ise, T., Kita, M., Taguchi, A., «*A Hybrid Energy Storage with a SMES and Secondary Battery*», *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, №. 2, pp. 1915 – 1918, 2005.
148. Suzuki, S., Baba, J., Shutoh, K., Masada, E., «*Effective Application of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) to Load Leveling for High Speed Transportation System*», *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, №. 2, pp. 713 – 716, 2004.
149. Battistelli L., Ciccarelli F., Lauria D., Proto D., «*Optimal design of DC electrified railway stationary storage system*», in International Conference «Clean Electrical Power 2009», Capri, Italy, 2009.
150. Yao Low Wen, J.A. Aziz, «*Modeling of Lithium Ion battery with nonlinear transfer resistance*», in Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), IEEE, pp. 104 – 109, 2011.
151. В. В. Замаруєв, Б. О. Стисло, Є. М. Косарєв, «*Покращення якості електричної енергії в системі електроживлення залізничного транспорту шляхом застосування накопичувачів електричної енергії*» *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, № 27 (1249), с. 360 – 364, 2017.

152. A. Szumanowski, «*Akumulacja energii w napędach wielozródłowych*», in *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, Warszawa, s. 108, 1983.

153. A. Szumanowski, *Akumulacja energii w pojazdach*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1983.

154. Д. О. Босий «*Пристрій вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних*» № U201408019, Січ. 12, 2015.

155. Ф. П. Шкрабець, *Електропостачання: навч. посіб.* Дніпропетровськ, Україна: НГУ, 2015.

## ДОДАТОК А

РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ПАКЕТІ МАТНСАД

## Розрахунок напруги на струмоприймачі електровозу

Вихідні дані

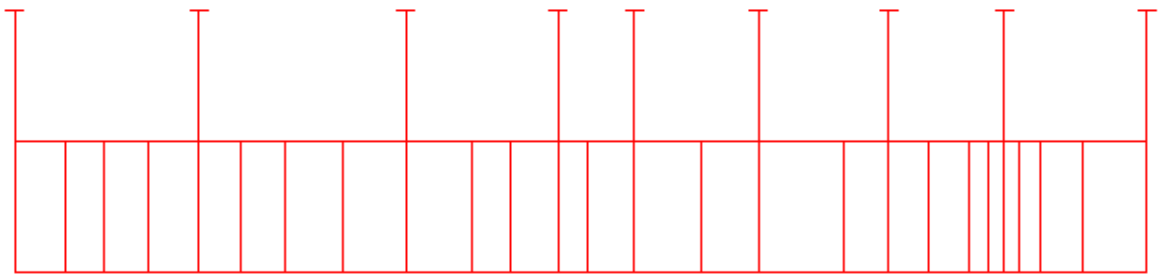
ORIGIN := 1      $r_0 := 0.052$

Схема ділянки

S :=

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	5.8	10.2	15.1	20.9	25.7	30.7	37.2	44.3
2	1	0	0	0	1	0	0	0	1
3	0	1	1	1	0	1	1	1	0
4	1	0	0	0	1	0	0	0	1
5	$3.401 \cdot 10^3$	0	0	0	$3.496 \cdot 10^3$	0	0	0	$3.468 \cdot 10^3$
6	0.089	0	0	0	0.01	0	0	0	...

 Графічна частина



Графіки руху поїздів та споживання струму у парному і непарному напрямках

$vt_1 :=$

	1
1	0
2	1
3	2
4	...

$vx_1 :=$

	1
1	0
2	0.01
3	0.01
4	...

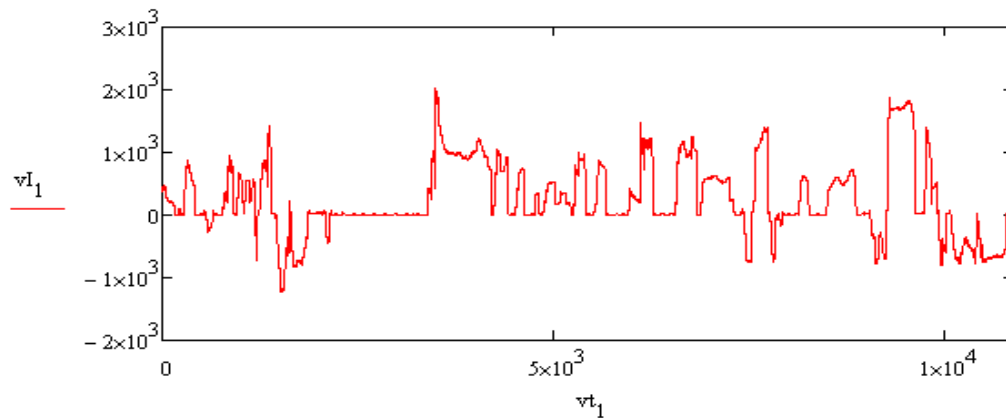
$vl_1 :=$

	1
1	381
2	411
3	419
4	...

$$k := (41) \quad i := 1..rows(k) \quad tP_i := \begin{pmatrix} k_i \\ vt_i \\ vx_i \\ vl_i \end{pmatrix} \quad tP_1 = \begin{pmatrix} 41 \\ (10894,1) \\ (10894,1) \\ (10894,1) \end{pmatrix}$$

$$T := \begin{cases} m \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..rows(tP) \\ \quad m \leftarrow \max[m, \max[(tP_i)_2]] \\ m \end{cases} \quad T = 1.089 \times 10^4$$

Струм EPC



$X_0(S) := S_{1,1}$  координата початку ділянки, км;

$X_k(S) := S_{1,cols(S)}$  координата кінця ділянки, км;

вектор координат розташування тягових підстанцій, км;

$$l\_vec(S) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..cols(S) \\ l_{rows(i)+1} \leftarrow S_{1,i} \text{ if } (S_{2,i} = 1) \cdot (S_{4,i} = 1) \\ 1 \end{cases}$$

вектор внутрішніх опорів тягових підстанцій, Ом;

$$p\_vec(S) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..cols(S) \\ P_{rows(p)+1} \leftarrow S_{6,i} \text{ if } (S_{2,i} = 1) \cdot (S_{4,i} = 1) \\ p \end{cases}$$

графікова координата розташування поїзда з номером  $n$  у момент часу  $t$ , км;

$$x_e(n,t) := \begin{cases} \text{linterp}(vt_n, vx_n, t) \text{ if } [(vt_n)_1 \leq t] \cdot [t \leq (vt_n)_{rows(vt_n)}] \\ \text{break otherwise} \end{cases}$$

струм поїзда з номером  $n$  у момент часу  $t$ , А;

$$I_e(n,t) := \begin{cases} \text{linterp}(vt_n, vl_n, t) \text{ if } [(vt_n)_1 \leq t] \cdot [t \leq (vt_n)_{rows(vt_n)}] \\ \text{break otherwise} \end{cases}$$

вектор опорів контактної мережі між тяговими підстанціями, Ом;

$$r\_vec(r_0, S) := \begin{cases} f \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 1..cols(S) \\ \begin{cases} \text{if } (f = -1) \cdot (S_{2,i} = 1) \cdot (S_{4,i} = 1) \\ \begin{cases} f \leftarrow i \\ \text{continue} \end{cases} \\ \text{if } (f \neq -1) \cdot [(S_{2,i} = 1) \cdot (S_{4,i} = 1)] \\ \begin{cases} r_{rows(i)+1} \leftarrow (S_{1,i} - S_{1,f}) \cdot \frac{r_0}{2} \\ f \leftarrow i \end{cases} \end{cases} \\ r \end{cases}$$

вектор опорів контактної мережі між тяговими підстанціями та від початку до кінця ділянки при наявності консольного живлення, Ом;

$$r\_vec\_k(r_0, S) := \left| \begin{array}{l} f \leftarrow -1 \\ l \leftarrow l\_vec(S) \\ r \leftarrow 0 \\ \text{if } l_1 \neq X_0(S) \\ \quad \left| \begin{array}{l} r_{rows(t)+1} \leftarrow (l_1 - X_0(S)) \cdot r_0 \\ 1 \end{array} \right. \\ \text{for } i \in 1..cols(S) \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{if } (f = -1) \cdot (S_{2,i} = 1) \cdot (S_{4,i} = 1) \\ \quad \left| \begin{array}{l} f \leftarrow i \\ \text{continue} \end{array} \right. \\ \text{if } (f \neq -1) \cdot [(S_{2,i} = 1) \cdot (S_{4,i} = 1)] \\ \quad \left| \begin{array}{l} r_{rows(t)+1} \leftarrow (S_{1,i} - S_{1,f}) \cdot \frac{r_0}{2} \\ f \leftarrow i \end{array} \right. \end{array} \right. \\ \text{if } l_{rows(t)} \neq X_k(S) \\ \quad \left| \begin{array}{l} r_{rows(t)+1} \leftarrow (X_k(S) - l_{rows(t)}) \cdot r_0 \\ 1 \end{array} \right. \\ r \end{array} \right.$$

вектор вузлів з'єднання контактних підвісок, км;

$$n\_vec(S) := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..cols(S) \\ \quad n_{rows(n)+1} \leftarrow S_{1,i} \text{ if } (S_{3,i} = 1) \\ n \end{array} \right.$$

вектор напруг холостого ходу тягових підстанцій, В;

$$E\_vec(S) := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..cols(S) \\ \quad E_{rows(E)+1} \leftarrow S_{5,i} \text{ if } (S_{2,i} = 1) \cdot (S_{4,i} = 1) \\ E \end{array} \right.$$

значення еквівалентного опору зліва від  $i$ -ї підстанції на підставі векторів внутрішніх опорів тягових підстанцій та опорів контактної мережі ділянки, Ом;

$$R_L(i, p, r) := \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 1..i-1 \quad \text{if } i > 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} R_L \leftarrow p_j + r_j \text{ if } j = 1 \\ R_L \leftarrow R_L + r_j \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ \quad \left| \begin{array}{l} R_L \leftarrow \frac{R_L \cdot p_{j+1}}{R_L + p_{j+1}} \text{ if } j < i-1 \\ R_L \end{array} \right. \end{array} \right.$$

значення еквівалентного опору справа від  $i$ -ї підстанції на підставі векторів внутрішніх опорів тягових підстанцій та опорів контактної мережі ділянки, Ом;

$$R_R(i, p, r) := \begin{cases} \text{for } j \in \text{rows}(p) .. i + 1 & \text{if } i < \text{rows}(p) \\ \left| \begin{array}{l} R_R \leftarrow p_j + r_{j-1} \text{ if } j = \text{rows}(p) \\ R_R \leftarrow R_R + r_{j-1} \text{ otherwise} \\ R_R \leftarrow \frac{R_R \cdot p_{j-1}}{R_R + p_{j-1}} \text{ if } j > i + 1 \end{array} \right. \\ R_R \end{cases}$$

значення еквівалентного опору до якого прикладається е.р.с.  $i$ -ї підстанції на підставі векторів внутрішніх опорів тягових підстанцій та опорів контактної мережі ділянки, Ом;

$$R(i, p, r) := \begin{cases} R \leftarrow p_i + R_R(i, p, r) \text{ if } i = 1 \\ R \leftarrow p_i + R_L(i, p, r) \text{ if } i = \text{rows}(p) \\ R \leftarrow p_i + \frac{1}{\frac{1}{R_L(i, p, r)} + \frac{1}{R_R(i, p, r)}} \text{ if } (i > 1) \cdot (i < \text{rows}(p)) \\ R \end{cases}$$

транспонований вектор часткових вирівнювальних струмів в контактній мережі зліва від  $i$ -ї підстанції на підставі векторів: внутрішніх опорів тягових підстанцій, опорів контактної мережі ділянки, напруг холостого ходу тягових підстанцій, Ом;

$$I_L(i, p, r, E) := \begin{cases} I_{1, \text{rows}(p)-1} \leftarrow 0 \\ \text{If } \leftarrow \frac{E_i}{R(i, p, r)} \\ \text{for } k \in i - 1 .. 1 & \text{if } i > 1 \\ \left| \begin{array}{l} I_{1, k} \leftarrow \text{If} \cdot \frac{R_R(i, p, r)}{R_L(i, p, r) + R_R(i, p, r)} \text{ if } (k = i - 1) \cdot (i \neq \text{rows}(p)) \\ I_{1, k} \leftarrow \text{If} \text{ if } (k = i - 1) \cdot (i = \text{rows}(p)) \\ I_{1, k} \leftarrow I_{1, k+1} \cdot \frac{p_{k+1}}{R_L(k + 1, p, r) + p_{k+1}} \text{ if } (k \neq i - 1) \end{array} \right. \\ I \end{cases}$$

транспонований вектор часткових вирівнювальних струмів в контактній мережі справа від  $i$ -ї підстанції на підставі векторів: внутрішніх опорів тягових підстанцій, опорів контактної мережі ділянки, напруг холостого ходу тягових підстанцій, Ом;

$$I_R(i, p, r, E) := \begin{cases} I_{1, \text{rows}(p)-1} \leftarrow 0 \\ \text{If } \leftarrow \frac{E_i}{R(i, p, r)} \\ \text{for } k \in i .. \text{rows}(p) - 1 & \text{if } i < \text{rows}(p) \\ \left| \begin{array}{l} I_{1, k} \leftarrow \text{If} \cdot \frac{R_L(i, p, r)}{R_R(i, p, r) + R_L(i, p, r)} \text{ if } (k = i) \cdot (i > 1) \\ I_{1, k} \leftarrow \text{If} \text{ if } (k = i) \cdot (i = 1) \\ I_{1, k} \leftarrow I_{1, k-1} \cdot \frac{p_k}{R_R(k, p, r) + p_k} \text{ if } k \neq i \end{array} \right. \\ I \end{cases}$$

транспонований вектор результуючих вирівнювальних струмів в контактній мережі на підставі векторів: внутрішніх опорів тягових підстанцій, опорів контактної мережі ділянки, напруг холостого ходу тягових підстанцій, Ом;

$$I_K(p, r, E) := \begin{cases} \text{sum}_{1, \text{rows}(p)-1} \leftarrow 0 \text{ if } \text{rows}(p) > 1 \\ \text{for } i \in 1 .. \text{rows}(p) \\ \left| \begin{array}{l} \_I_{k, L} \leftarrow I_L(i, p, r, E) \\ \_I_{k, R} \leftarrow I_R(i, p, r, E) \\ \text{for } j \in 1 .. \text{rows}(p) - 1 \\ \text{sum}_{1, j} \leftarrow \text{sum}_{1, j} - \_I_{k, L_{1, j}} + \_I_{k, R_{1, j}} \end{array} \right. \\ \text{sum} \end{cases}$$

вектор результуючих напруг холостого ходу в точках підключення тягових підстанцій до тягової мережі, В;

$$U_{\text{xxx}}(E, I_k, p) := \begin{cases} \text{res}_1 \leftarrow E_1 - I_{k1, 1} \cdot p_1 \\ \text{for } i \in 2 .. \text{rows}(p) - 1 & \text{if } \text{rows}(p) > 2 \\ \text{res}_i \leftarrow E_i - (I_{k1, i} - I_{k1, i-1}) \cdot p_i \\ \text{res}_{\text{rows}(p)} \leftarrow E_{\text{rows}(p)} + I_{k1, \text{rows}(p)-1} \cdot p_{\text{rows}(p)} \\ \text{res} \end{cases}$$

Функція, що знаходить точки нерівномірності лівіше та правіше від заданої координати  $x$  у заданій схемі  $S$ ; результат повертає у вигляді  $(j \ x_L \ x_R \ x_{LN} \ x_{RN})$ , де  $j$  - номер зони,  $x_L$  - координата підстанції зліва,  $x_R$  - координата підстанції справа,  $x_{LN}$  - координата вузла зліва,  $x_{RN}$  - координата вузла справа.

```

Find_LR(x, S) :=
  l ← 1_vec(S)
  n ← rows(l)
  for i ∈ 1..n - 1
    if (x ≥ li) · (x ≤ li+1)
      j ← i
      xL ← li
      xR ← li+1
      break
  xLN ← xR
  xRN ← xL
  for i ∈ 1..cols(S)
    if (S1,i > xL) · (S3,i = 1) · (S1,i < xR)
      xLN ← S1,i if (S1,i ≥ x) · [(S1,i - x) < (xLN - x)]
      xRN ← S1,i if (x ≥ S1,i) · [(x - S1,i) < (x - xRN)]
  xLN ← xRN
  xRN ← xLN
  (j xL xR xLN xRN)

```



Визначення функції опору тягової мережі, Ом.

```

fR(x, p, r, r0, S) := | 1 ← l_vec(S)
                       | n ← n_vec(S)
                       | x0 ← X_0(S)
                       | xk ← X_k(S)
                       | if [(x0 = l1) (xk = lrows(l)) + (x ≥ l1) (x ≤ lrows(l))] rows(l) > 1
                       |   (j xL xR xLN xRN) ← Find_LR(x, S)
                       |   R1 ← p1 if j = 1
                       |   R1 ←  $\frac{1}{\frac{1}{R_L(j, p, r)} + \frac{1}{p_j}}$  otherwise
                       |   R2 ← prows(p) if j = rows(p) - 1
                       |   R2 ←  $\frac{1}{\frac{1}{R_R(j+1, p, r)} + \frac{1}{p_{j+1}}}$  otherwise
                       |   rL ← (xLN - xL) r0 0.5
                       |   rR ← (xR - xRN) r0 0.5
                       |   r12 ← (xRN - xLN) r0
                       |   r1 ← (x - xLN) r0
                       |   r2 ← (xRN - x) r0
                       |   if xLN ≠ xRN
                       |     | 1
                       |     | res ←  $\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2 + r_{12}} + \frac{1}{\frac{r_1 r_{12}}{r_1 + r_2 + r_{12}} + R_1 + r_L} + \frac{1}{\frac{r_2 r_{12}}{r_1 + r_2 + r_{12}} + R_2 + r_R}$ 
                       |     | res ←  $\frac{1}{\frac{1}{R_1 + r_L} + \frac{1}{R_2 + r_R}}$  otherwise
                       |   otherwise
                       |     | if x ≤ l1
                       |     |   | xLN ← l1
                       |     |   | if rows(n) > 0
                       |     |   |   | xRN ← n1 if (n1 < l1)
                       |     |   |   | f_kon ← 1 otherwise
                       |     |   | f_kon ← 1 otherwise
                       |     |   | for i ∈ 1..cols(S)
                       |     |   |   | if (S1,i > x0) (S3,i = 1) (S1,i < l1)
                       |     |   |     | xLN ← S1,i if (S1,i ≥ x) [(S1,i - x) < (xLN - x)]
                       |     |   |     | xRN ← S1,i if (x ≥ S1,i) [(x - S1,i) < (x - xRN)]
                       |     |   | xLN ← xRN
                       |     |   | xRN ← xLN
                       |     |   | R2 ← p1 if RR(1, p, r) = 0
                       |     |   | R2 ←  $\frac{1}{\frac{1}{R_R(1, p, r)} + \frac{1}{p_1}}$  otherwise
                       |     |   | rR ← (l1 - xRN) r0 0.5
                       |     |   | r12 ← (xRN - xLN) r0
                       |     |   | r1 ← (x - xLN) r0
                       |     |   | r2 ← (xRN - x) r0
                       |     |   | res ← R2 + rR +  $\frac{(r_1 + r_{12}) r_2}{r_1 + r_{12} + r_2}$  if (xLN ≠ xRN) (f_kon ≠ 1)
                       |     |   | res ← R2 + (l1 - xRN) r0 0.5 + (xRN - x) r0 otherwise
                       |     | if x ≥ lrows(l)
                       |     |   | if rows(n) > 0
                       |     |   |   | xLN ← nrows(n) if (nrows(n) > lrows(l))
                       |     |   |   | f_kon ← 1 otherwise
                       |     |   | f_kon ← 1 otherwise
                       |     |   | xRN ← lrows(l)
                       |     |   | for i ∈ 1..cols(S)
                       |     |   |   | if (S1,i > lrows(l)) (S3,i = 1) (S1,i < xk)
                       |     |   |     | xLN ← S1,i if (S1,i ≥ x) [(S1,i - x) < (xLN - x)]
                       |     |   |     | xRN ← S1,i if (x ≥ S1,i) [(x - S1,i) < (x - xRN)]
                       |     |   | xLN ← xRN
                       |     |   | xRN ← xLN
                       |     |   | R1 ← prows(l) if RL(rows(l), p, r) = 0
                       |     |   | R1 ←  $\frac{1}{\frac{1}{R_L(\text{rows}(l), p, r)} + \frac{1}{p_{\text{rows}(l)}}}$  otherwise
                       |     |   | rL ← (xLN - lrows(l)) r0 0.5
                       |     |   | r12 ← (xRN - xLN) r0
                       |     |   | r1 ← (x - xLN) r0
                       |     |   | r2 ← (xRN - x) r0
                       |     |   | res ← R1 + rL +  $\frac{r_1 (r_{12} + r_2)}{r_1 + r_{12} + r_2}$  if (xLN ≠ xRN) (f_kon ≠ 1)
                       |     |   | res ← R1 + (xLN - lrows(l)) r0 0.5 + (x - xLN) r0 otherwise

```

res

Функція, що повертає квадратну матрицю заданої схеми без навантажень. По головній діагоналі - власні результуючі провідності віток, які входять у вузол. Інші елементи - провідності зв'язків між вузлами.

```

A(S) := | n ← rows(1_vec(S))
        | l ← 1_vec(S)
        | p ← p_vec(S)
        | r ← r_vec_k(r_0, S)
        | s ← 0 if l_1 ≠ X_0(S)
        | s ← -1 otherwise
        | for i ∈ 1..n
        |   | if (i > 1) · (i < n)
        |     | res_{i,i} ← 1/p_i + 1/r_{i+s} + 1/r_{i+s+1}
        |     | 1
        |     | otherwise
        |     |   | res_{i,i} ← 1/p_i + 1/r_{i+s+1} if i = 1
        |     |   | res_{i,i} ← 1/p_i + 1/r_{i+s} if i = n
        |     |   | if i > 1
        |     |   |   | res_{i,i-1} ← -1/r_{i+s}
        |     |   |   | 1
        |     |   |   | if i ≤ n - 1
        |     |   |   |   | res_{i,i+1} ← -1/r_{i+s+1}
        |     |   |   |   | 1
        |     |   |   |   | res

```

Функція, що відповідає за модифікацію зв'язків в матриці A. Між вузлами j1 та j2 видаляє зв'язки, перераховує провідності вхідних віток, розділяє опір r\_old між 1-м і 2-м вузлом на r\_LL і r\_RR. Новий вузол додається останнім.

```

modify(_A, j1, j2, r_old, r_LL, r_RR) := | n ← rows(_A)
        | _A_{j1, j2} ← 0
        | _A_{j2, j1} ← 0
        | _A_{j1, j1} ← _A_{j1, j1} - 1/r_old + 1/r_LL
        | _A_{j2, j2} ← _A_{j2, j2} - 1/r_old + 1/r_RR
        | _A_{n+1, n+1} ← 1/r_LL + 1/r_RR
        | _A_{j1, n+1} ← -1/r_LL
        | _A_{n+1, j1} ← -1/r_LL
        | _A_{j2, n+1} ← -1/r_RR
        | _A_{n+1, j2} ← -1/r_RR
        | _A

```

в залежності від результатів пошуку найближчих вузлів зліва і справа додає точку в основну матрицю схеми  $A$  вузол від 1 до 3 з модифікацією зв'язків.  $\text{modify}(\_A, j1, j2, r\_old, r_{LL}, r_{RR})$  - відповідає за модифікацію зв'язків в матриці  $A$ . Між вузлами  $j1$  та  $j2$  видаляє зв'язки, перераховує провідності вхідних віток, розділяє опір  $r\_old$  між 1-м і 2-м вузлом на  $r_{LL}$  і  $r_{RR}$ . Новий вузол додається останнім.

```

AddNode(_A, x, S) :=
  l ← l_vec(S)
  r ← r_vec_k(x0, S)
  s ← 0 if l1 ≠ X_0(S)
  s ← -1 otherwise
  (j xL xR xLN xRN) ← Find_LR(x, S)
  rL ← (xLN - xL) · x0 · 0.5
  rR ← (xR - xRN) · x0 · 0.5
  r12 ← (xRN - xLN) · x0
  r1 ← (x - xLN) · x0
  r2 ← (xRN - x) · x0
  r_old ← rj+s+1
  j1 ← j
  j2 ← j + 1
  if xLN ≠ xRN
    if (xL ≠ xLN)
      rLL ← (xLN - xL) · x0 · 0.5
      rRR ← (xR - xLN) · x0 · 0.5
      _A ← modify(_A, j1, j2, r_old, rLL, rRR)
      r_old ← rRR
      j1 ← rows(_A)
      rLL ←  $\frac{r12 \cdot r1}{r1 + r12 + r2}$ 
      rRR ←  $rR + \frac{r2 \cdot r12}{r1 + r12 + r2}$ 
      _A ← modify(_A, j1, j2, r_old, rLL, rRR)
      ind ← rows(_A)
      r_old ← rRR
      j1 ← rows(_A)
      if (xR ≠ xRN)
        rLL ←  $\frac{r2 \cdot r12}{r1 + r12 + r2}$ 
        rRR ← (xR - xRN) · x0 · 0.5
        _A ← modify(_A, j1, j2, r_old, rLL, rRR)
    otherwise
      rLL ← rL
      rRR ← rR
      _A ← modify(_A, j1, j2, r_old, rLL, rRR)
      ind ← rows(_A)
  (
    _A
    ind
  )

```

$F(x, S)$  повертає функції струморозподілу кожної тягової підстанції. В залежності від  $x$  доповнює матрицю  $A$  вузлом навантаження з модифікацією параметрів схеми при знаходженні  $x$  між вузлами схеми. При цьому при попаданні  $x$  між  $i$ -м та  $j$ -м вузлом видаляються зв'язки між ними та додаються нові між  $i$  та  $x$ ,  $x$  та  $j$ . Повертає тензор, в якому 1-й елемент - функція струморозподілу; 2-й - потенціали у вузлах; 3-й - індекс вузла з навантаженням.

```

F(x, S) :=
  l ← l_vec(S)
  p ← p_vec(S)
  r ← r_vec_k(r0, S)
  s ← 0 if l1 ≠ X_0(S)
  s ← -1 otherwise
  TP_flag ← 1
  for i ∈ 1..rows(l)
    Gi,i ← 1/pi
  A_ ← A(S)
  if (x ≤ l1) + (x ≥ l_rows(l))
    if x ≤ l1
      B1 ← 1
      B_rows(l) ← 0
      B_rows(l) ← 1 if x ≥ l_rows(l)
    for i ∈ 1..rows(l) otherwise
      if x = li
        TP_flag ← 0
        Bi ← 1
        B_rows(l) ← 0
        break
  if (x > l1) · (x < l_rows(l)) · (TP_flag = 1)
    (A_
     ind) ← AddNode(A_, x, S)
    Grows(A_), rows(A_) ← 0
    B_rows(A_) ← 0
    Bind ← 1
  ( G A_^-1 · B
    A_^-1 · B
    ind )

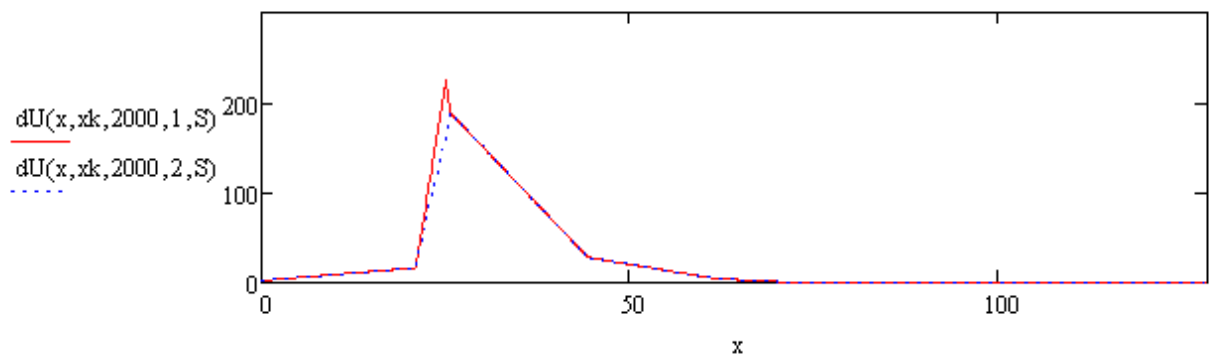
```

Функція, що повертає функцію спаду напруги при розташуванні навантаження в точці  $x_n$  зі струмом  $I_n$  на колії з номером  $n$

```

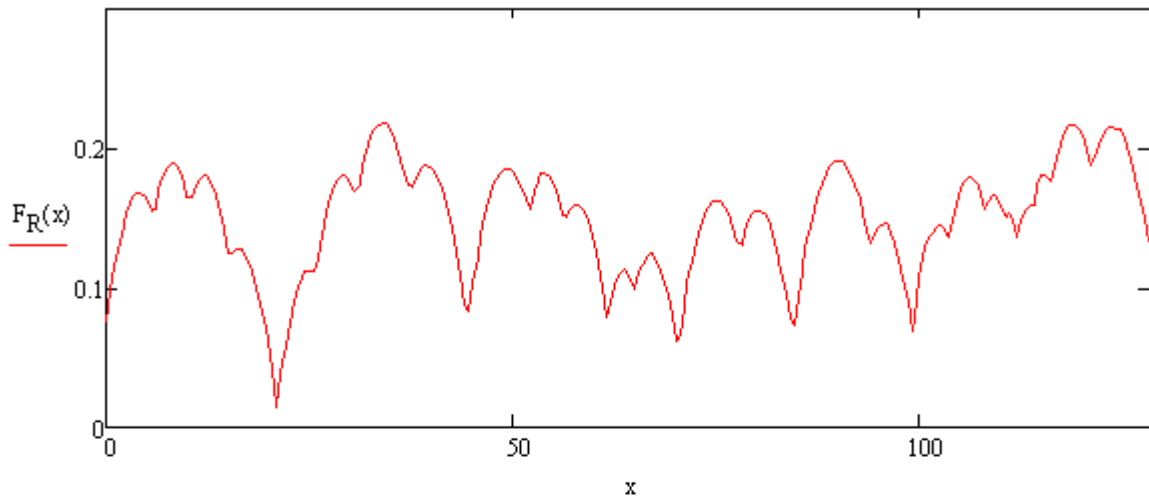
dU(x,x_n,I_n,n,S) :=
  _F ← F(x_n,S)
  nv ← n_vec(S)
  M(2) ← _F2·I_n
  M(1) ← 1_vec(S)
  if _F3 ≠ 0
    MF3,1 ← x_n
    MF3,2 ← I_n·fR(x_n,p_vec(S),r_vec(r0,S),r0,S)
    (j xL xR xLN xRN) ← Find_LR(x_n,S)
    if (xL ≠ xLN)·(xLN ≠ xRN)·(_F3 ≠ 0)
      MF3-1,1 ← xLN
      1
    if (xR ≠ xRN)·(xLN ≠ xRN)·(_F3 ≠ 0)
      MF3+1,1 ← xRN
      lst ← 1
    if n = 2
      del ← 1
      for i ∈ 1..rows(nv) if rows(nv) ≠ 0
        if x_n = nvi
          del ← 0
          break
      if (del = 1)·(_F3 ≠ 0)
        Mres ← submatrix(M, 1, _F3 - 1, 1, 2)
        M ← stack(Mres, submatrix(M, _F3 + 1, _F3 + 1, 1, 2)) if lst
        M ← Mres otherwise
    M ← csort(M, 1)
  linterp(M(1), M(2), x)

```



$F_R(x) := f_R(x, \text{vec}_p, \text{vec}_r, r_0, S)$       функція опору тягової мережі

$x := 0, 0.5.. X_k(S)$        $t := 0, 0.5.. T$



Напруга холостого ходу в тяговій мережі

$$U_x(x, p, r_0, E, S) := \begin{cases} \text{linterp}(\text{vec}_1, U_{xx}(E, I_K(p, r_{\text{vec}}(r_0, S), E), p), x) & \text{if } \text{rows}(p) > 1 \\ E_{1,1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Напруга на струмоприймачі електровозу без впливу інших

$$U_-(n, t) := U_x(x_e(n, t), \text{vec}_p, r_0, \text{vec}_E, S) - I_e(n, t) \cdot f_R(x_e(n, t), \text{vec}_p, r_{\text{vec}}(r_0, S), r_0, S)$$

Напруга на струмоприймачі електровозу з впливом від інших

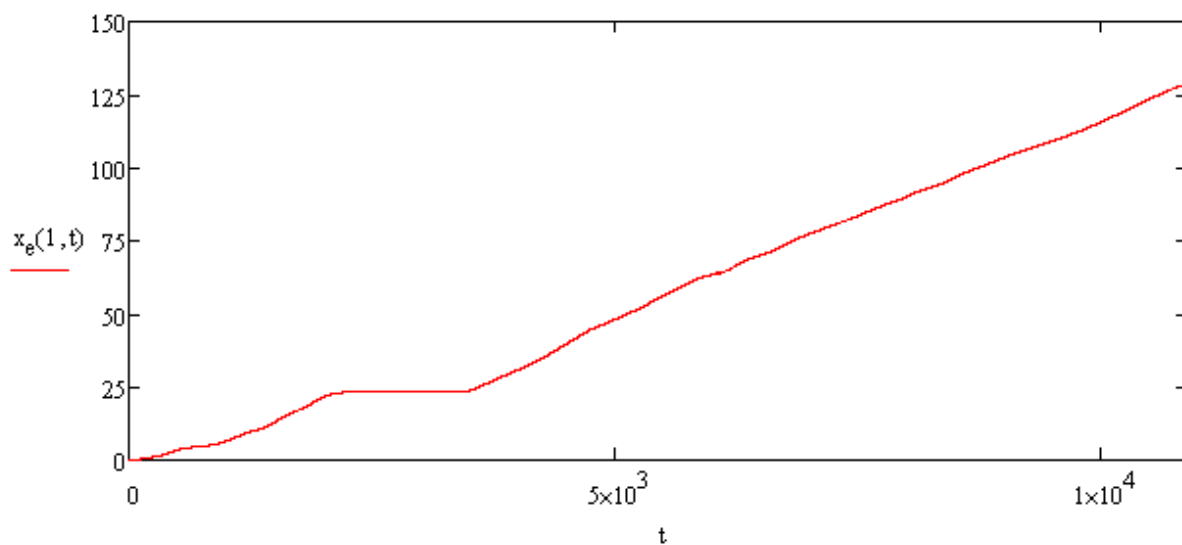
```

U(n, t, tP) :=
  res_fmd ← find_x(t, tP)
  if rows(res_fmd) > 0
    f ← 0
    for i ← 1..rows(res_fmd)
      if res_fmd[i, 1] = k_n
        f ← 1
        ind ← i
        break
    break if f = 0
  otherwise
    x ← res_fmd[ind, 2]
    I ← res_fmd[ind, 3]
    U_res ← U_x(x, vec_p, r_0, vec_E, S) - I * f_R(x, vec_p, r_vec(r_0, S), r_0, S)
    for i ← 1..rows(res_fmd)
      if i ≠ ind
        x_n ← res_fmd[i, 2]
        I_n ← res_fmd[i, 3]
        n_n ← 1 if (mod(res_fmd[i, 1, 2]) = 0) * (mod(res_fmd[ind, 1, 2]) = 0)
        n_n ← 2 otherwise
        U_res ← U_res - dU(x, x_n, I, n, n, S)
    U_res
  break otherwise

```

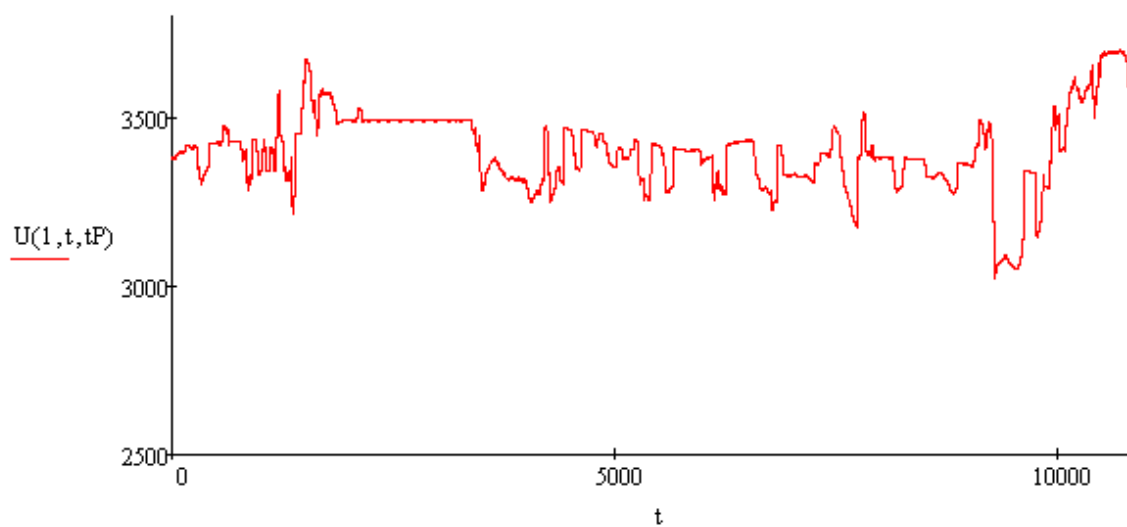
ГРП

-



Напруга на струмоприймачі ЕРС

-



миттєва потужність, що споживається навантаженнями, Вт.

$$P_e(t, tP) := \begin{cases} \text{res\_f} \leftarrow \text{find\_x}(t, tP) \\ \text{sum} \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1 \dots \text{rows}(\text{res\_f}) \\ \quad \text{sum} \leftarrow \text{sum} + U(\text{NumToN}(\text{res\_f}_{i,1}), t, tP) \cdot \text{res\_f}_{i,3} \\ \text{sum} \end{cases}$$

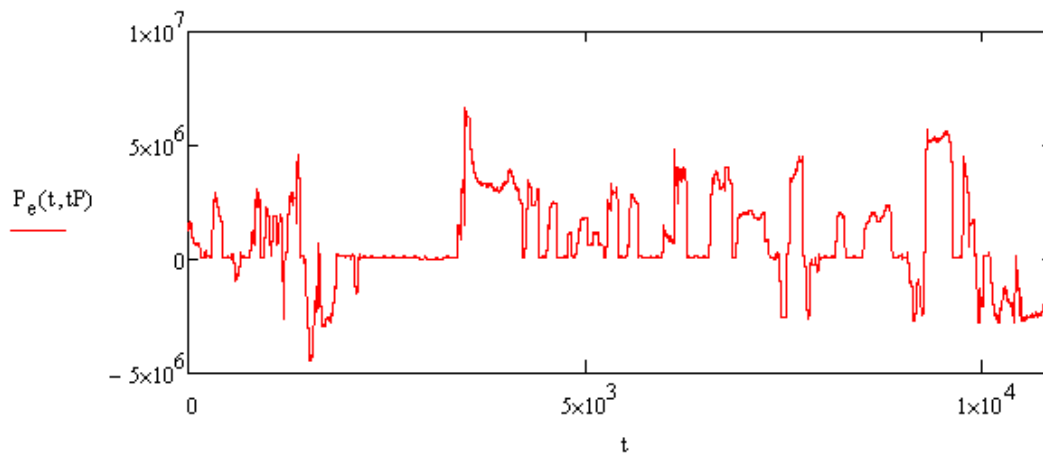
напруга на шинах тягової підстанції  $n$  у часі  $t$ , В.

$$U_{III}(n, t, tP) := \begin{cases} l \leftarrow l\_vec(S) \\ res\_f \leftarrow find\_x(t, tP) \\ res \leftarrow U_x(l_n, vec\_p, r_0, vec\_E, S) \\ f\_R \leftarrow f_R(l_n, vec\_p, r\_vec(r_0, S), r_0, S) \\ \text{for } i \in 1..rows(res\_f) \\ \quad \begin{cases} x \leftarrow res\_f_{i,2} \\ I \leftarrow res\_f_{i,3} \\ res \leftarrow res - I \cdot (F(x, S))_n \cdot f\_R \end{cases} \\ res \end{cases}$$

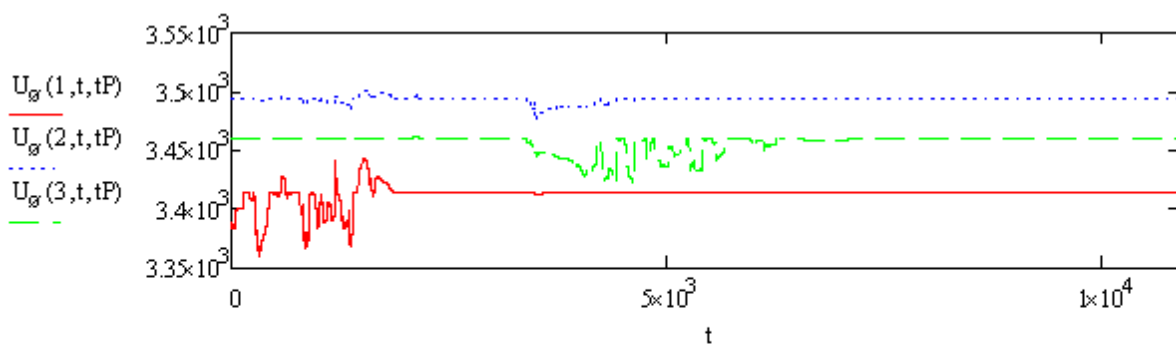
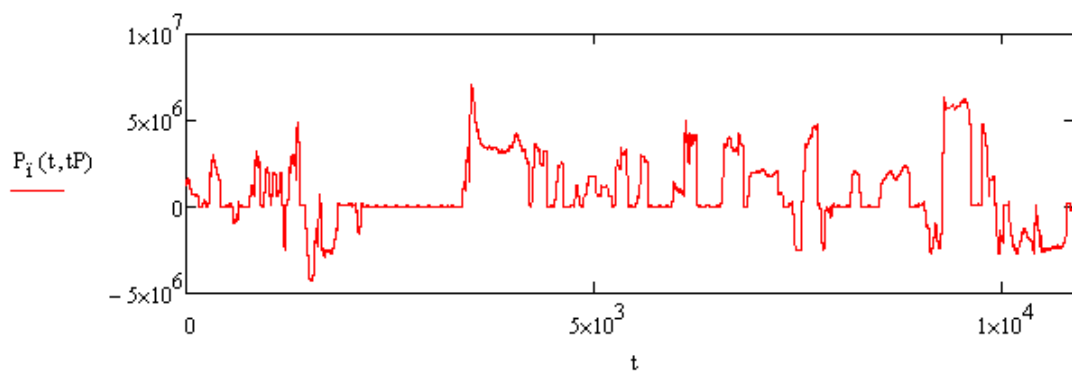
миттєва потужність, що віддається тяговими підстанціями, Вт.

$$P_{II}(t, tP) := \begin{cases} l \leftarrow l\_vec(S) \\ res\_f \leftarrow find\_x(t, tP) \\ sum \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 1..rows(l) \\ \quad \text{for } i \in 1..rows(res\_f) \\ \quad \quad \begin{cases} x \leftarrow res\_f_{i,2} \\ I \leftarrow res\_f_{i,3} \\ sum \leftarrow sum + I \cdot (F(x, S))_j \cdot U_x(l_j, vec\_p, r_0, vec\_E, S) \end{cases} \\ sum \end{cases}$$

-

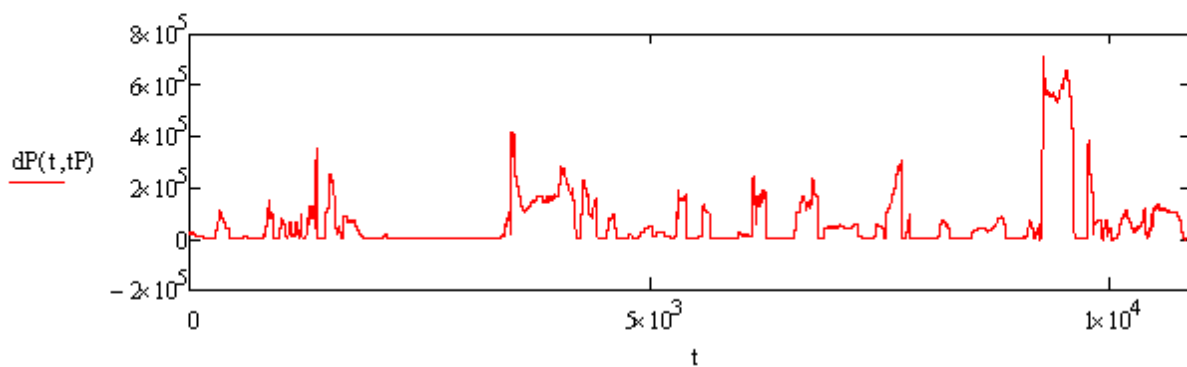






Втрати потужності в тяговій мережі

$$dP(t, tP) := P_{II}(t, tP) - P_e(t, tP)$$



### Підсилення СТЕ за допомогою підсилюючих пунктів

Початкові значення струмів підсилюючих пунктів

$$I_{op1} := 0 \quad I_{op2} := 0 \quad I_{op3} := 0 \quad I_{op4} := 0$$

$$I_{op5} := 0 \quad I_{op6} := 0 \quad I_{op7} := 0 \quad I_{op8} := 0$$

Формування цільової функції

$$f_{aim}(I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8, t) := \begin{cases} tP \leftarrow \text{modify\_cur\_8pp}(2, tP, I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8) \\ \text{res} \leftarrow P_i(t, tP) - P_e(t, tP) \\ \text{trace}["t = \{0\}; \text{res} = \{1\}; I = \{2\}", t, \text{res}, \text{round}[(I1 \ I2 \ I3 \ I4 \ I5 \ I6 \ I7 \ I8)^T]] \\ \text{res} \end{cases}$$

Обмеження за напругою

$$U_{min} := 2900 \quad U_{max} := 4000$$

Given

$$U_{min} \leq \text{if}(0 \leq t \leq 1.089 \cdot 10^4, U(1, t, \text{modify\_cur\_8pp}(2, tP, I_{op1}, I_{op2}, I_{op3}, I_{op4}, I_{op5}, I_{op6}, I_{op7}, I_{op8})), U_{max}) \leq U_{max}$$

Обмеження за струмом

$$-1000 \leq I_{op1} \leq 0 \quad -1000 \leq I_{op3} \leq 0 \quad -1000 \leq I_{op5} \leq 0 \quad -1000 \leq I_{op7} \leq 0$$

$$-1000 \leq I_{op2} \leq 0 \quad -1000 \leq I_{op4} \leq 0 \quad -1000 \leq I_{op6} \leq 0 \quad -1000 \leq I_{op8} \leq 0$$

Параметризація цільової функції

$$\text{optf}(t) := \text{Minimize}(f_{aim}, I_{op1}, I_{op2}, I_{op3}, I_{op4}, I_{op5}, I_{op6}, I_{op7}, I_{op8})$$

Вивод результатів розрахунку

$$\text{op\_tenz} := \begin{cases} \text{for } t \in 0, 1..T \\ \quad \text{trace}("t = \{0\}", t) \\ \quad \text{res} \leftarrow \text{optf}(t) \\ \quad \text{for } i \in 1..8 \\ \quad \quad \text{vt}_{t+1, i} \leftarrow t \\ \quad \quad \text{vx}_{t+1, i} \leftarrow x_{up_i} + 0.0001 \cdot (t - 0.5 \cdot T) \\ \quad \quad \text{vl}_{t+1, i} \leftarrow \text{res}_i \\ \quad \text{trace}("I = \{0\}", \text{round}(\text{res})) \\ \quad \begin{pmatrix} \text{vt} \\ \text{vx} \\ \text{vl} \end{pmatrix} \end{cases}$$

## ДОДАТОК Б

### АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ:



Начальник служби електропостачання  
 РФ «Львівська залізниця»  
 ПАТ «Укрзалізниця»

М.М. Пулін

2018 р.

**АКТ**

впровадження дисертаційної роботи

Косарева Євгена Миколайовича

Цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Косарева Є. М. присвячені покращенню режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму прийняті до використання службою електропостачання РФ «Львівська залізниця» ПАТ «Укрзалізниця». Дослідження будуть впроваджуватися з метою зменшення діапазону зміни напруги на струмоприймачах електрорухомого складу.

Найбільшій увазі з отриманих результатів дисертації заслуговують:

1. Рекомендації щодо визначення рівнів напруги на струмоприймачах електрорухомого складу, які дозволяють забезпечити енергооптимальний режим роботи електрифікованої ділянки;
2. Методика визначення раціонального місця розташування підсилюючих пунктів на електрифікованій ділянці;
3. Математична модель для визначення показників системи тягового електропостачання при її експлуатації та модернізації.

Результати дисертаційної роботи Косарева Є. М. враховують особливості роботи електрифікованих ділянок залізниць постійного струму при паралельній роботі тягових підстанцій та підсилюючих пунктів і можуть бути використані для розробки перспективних способів модернізації системи тягового електропостачання постійного струму.

Головний інженер служби  
 електропостачання  
 РФ «Львівська залізниця»

О.І.Шалко

Начальник дорожньої  
 електротехнічної лабораторії  
 РФ «Львівська залізниця»

А.І.Барна

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної  
роботи Дніпропетровського  
національного університету  
залізничного транспорту імені  
академіка В. Лазаряна,  
д.т.н., професор



О. О. Матусевич  
2018 р.

## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
Косарева Євгена Миколайовича «Покращення режиму напруги в системі  
тягового електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму»

м. Дніпро

10 03 2018 р.

Цей акт складено про те, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті, прийняті до використання наукові та практичні результати, отримані в дисертації Косарева Є. М.:

1. Математична модель для визначення показників системи тягового електропостачання при її проектуванні, експлуатації та модернізації (дисципліна «Електропостачання залізниць», курсовий проект «Розрахунок системи тягового електропостачання», для студентів четвертого курсу спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»).

2. Метод визначення раціонального місця розташування пунктів підсилення при їх паралельній роботі з тяговими підстанціями (дисципліна «Електропостачання залізниць», практичні роботи для студентів четвертого, п'ятого курсів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»).

Декан факультету  
Управління енергетичними  
процесами, д.т.н., професор

А. М. Афанасов

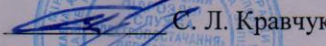

Професор кафедри  
Інтелектуальних систем  
електропостачання, д.т.н.

В. Г. Кузнецов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник служби електропостачання

Південної залізниці

 С. Л. Кравчук«  » 2015 р.

## АКТ


## впровадження результатів науково-дослідної роботи

При виконанні науково-дослідної роботи за госпрозрахунковою темою «Дослідження раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії та дослідження балансу електричної енергії в умовах спотворення її якості на тягових підстанціях постійного та змінного струму», шифр № 24, № держреєстрації 0113U007949, розглянутий стан проблеми енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів, запропоновані методологічні основи вибору енергозберігаючих заходів в системах електропостачання постійного струму, запропоновані сучасні методи визначення втрат електроенергії в елементах системи тягового електропостачання, досліджена робота електронних лічильників у несинусоїдних режимах, проведений аналіз режимів роботи тягових підстанцій постійного та змінного струму та запропоновані заходи та рекомендації по підвищенню ефективності електромагнітних процесів на них.

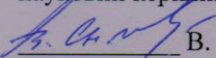
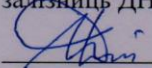
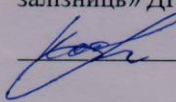
Мета науково-дослідної роботи – вибір раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії та дослідження балансу електричної енергії в умовах спотворення її якості на тягових підстанціях постійного та змінного струму.

Очікувані результати від впровадження роботи – зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі та на тягових підстанціях постійного і змінного струму, розробка програмного забезпечення для вибору раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання залізниць

Від «Замовника»

Перший заступник начальника  
служби електропостачання В.М. Козачок

Від «Виконавця»

Завідуючий кафедрою  
«Електропостачання залізниць» ДНУЗТ,  
науковий керівник НДР, д.т.н. В. Г. СиченкоДоцент кафедри «Електропостачання  
залізниць ДНУЗТ», к.т.н. Д. О. БосийАсистент кафедри «Електропостачання  
залізниць» ДНУЗТ С. М. Косарев

## ДОДАТОК В

ПРОГРАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

ДП «ПРИДНІПРОВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»

ТОВ «ЕЛЕКТРОТЯГОВІ СИСТЕМИ»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник Служби електропостачання  
Придніпровської залізниці



О. О. Самков

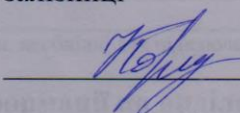


ПРОГРАМА

експериментальних вимірювань параметрів споживання  
та показників якості електроенергії на основних присіднаннях  
тягових підстанцій постійного струму

Узгоджено:

Начальник ДЕЛ Придніпровської  
залізниці



О. П. Кордін

№ п/п	Назва	Проект
1	Портативний вимірювальний пристрій (ВАТЭС РМ23, РМ26, Дистансметр 330)	Р06
2	Датчик змінного струму (EM18)	ЕНЕ
3	Датчик вольтажу (EM LV100-300)	ЕНЧ
4	Датчик постійного струму	ЕНЧ
5	Високовольтний реактор для вимірювання струму ДП	ЕНЧ
6	Аналізатор ширини імпульсів типу ІСР-5009	ЕНЧ
7	Комп'ютер з програмним забезпеченням ЕАТ	ЕНЧ
8	Портативний комп'ютер (Laptop, HP)	ЕНЧ
9	Програмні модулі	ЕНЧ

№ п/п	Найменування	Проекти
1	Схема зовнішнього електропостачання тягових підстанцій	Р06
2	Однорядна схема тягових підстанцій	ЕНЕ
3	Схема з'єднання та комбінування контактної мережі ліній	ЕНЧ
4	Діаграма графік руху потягів, вагонів, машин по лінії	ЕНЧ
5	Регіони опрацювання електроенергії на ділянці АСКОР	ЕНЧ
6	Регістрація вимірювань і струму за даними системи моніторингу та якості Ретікс ПАС-33	ЕНЧ
7	Паспорт ліній силового об'єкту тягових підстанцій, параметри якості ЕД мережі ліній, параметри системи напівпровідникового електропостачання	ЕНЧ
8	Технічний профіль ліній	ЕНЧ

м. Дніпропетровськ

2014



### Мета експерименту

Експериментальним шляхом дослідити режими роботи тягових підстанцій постійного струму в умовах спотворення якості електричної енергії.

Дослідити фактори, які впливають на баланс електроенергії в тяговій мережі, та визначити при дії цих факторів виникнення додаткових втрат електроенергії в контактній мережі.

Розробити рекомендації щодо виявлення джерел погіршення якості електричної енергії та його впливу на баланс електричної енергії.

Розробити рекомендації щодо оптимальних режимів роботи суміжних тягових підстанцій за критерієм мінімуму втрат електроенергії в контактній мережі.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації по дослідним ділянкам Варварівка – Самойлівка, Верховцево – Железнякове Придніпровської залізниці.

Етап 2. Організація експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Етап 4. Обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій

### Умови проведення експерименту

#### 1. Погодні умови

Суха, ясна погода. Температура навколишнього середовища  $-10 \dots +40^{\circ}\text{C}$ .

#### 2. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1.	Портативний аналізатор якості електричної енергії (SATEC PM175, PM296, Энергомонитор 3.3Т)	2
2.	Датчик змінного струму LEM-Flex	6
3.	Датчик напруги LEM LV100-3000	2
4.	Датчик постійного струму	2
5.	Високовольтний резистор дільника напруги ДН	2
6.	Аналогово-цифровий перетворювач типу USB-6009	2
7.	Комплект радіопередачі даних RFA1	2
8.	Портативний комп'ютер (ноутбук, нетбук)	4
10.	Цифровий мультиметр	1

\* до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

### Етап 1. Отримання необхідної інформації по виділеній ділянці

№ п/п	Найменування	Причетні
1.	Схема зовнішнього електропостачання тягової підстанції	ЕЧЕ
2.	Однолінійна схема тягової підстанції	ЕЧЕ
3.	Схема живлення та секціонування контактної мережі ділянки	ЕЧЦ
4.	Плановий графік руху поїздів, виконані графіки руху ділянкою	ЕЧЦ
5.	Режими споживання електроенергії за даними АСКОЕ	ЕЕЛ
6.	Регістрограми напруги і струму за даними систем моніторингу та захисту Регіна, ЦЗАФ-3,3	РРД
7.	Паспортні дані силового обладнання тягових підстанцій, параметри контактної мережі ділянки, параметри системи зовнішнього електропостачання	ЕЧТ
8.	Поздовжній профіль ділянки	ЕЧТ

## Етап 2. Організація експерименту

Експеримент проводиться на 2-х ділянках та 2-х тягових підстанціях Придніпровської залізниці.

ЕЧ-3 та ЕЧ-7 Придніпровської залізниці відповідно з програмою готує місця проведення вимірів на дослідних тягових підстанціях. Вимірювання проводяться одночасно на двох тягових підстанціях кожної ділянки.

ЕЧЕ-Варварівка, ЕЧЕ-Самойлівка

1. Вторинні кола ТН-35 кВ, 10 кВ кола технічного обліку електроенергії;
2. Комірка фідера контактної мережі 3,3 кВ.
3. Фільтруючий пристрій (відсос) 3,3 кВ.

ЕЧЕ-Верховцево, ЕЧЕ-Железняково

1. Вторинні кола ТН-35 кВ, кола технічного обліку електроенергії;
2. Комірка фідера контактної мережі 3,3 кВ.
3. Фільтруючий пристрій (відсос) 3,3 кВ.

Схеми приєднання засобів вимірювальної техніки наведені на рис. 1.

Для підключення вимірювальних приладів у вторинні кола трансформаторів напруги і струму необхідне узгодження з відповідною службою енергопередаючої компанії.

Підключення в кола вторинної напруги виконується контактним з'єднанням за допомогою «крокодилів».

Для підключення гнучких роз'ємних кліщів типу LEM-Flex та узгодження діапазону вимірювань вимагається послідовне врізання в кола струму провідників з шістьма повними витками або виконання таких витків  $\varnothing$  25-40 мм за наявності достатньої довжини на проводах кожної фази трансформатора струму вторинної сторони (рис. 2).

Приєднання датчиків напруги LEM LV100-3000 виконується контактним способом безпосередньо на струмоведучі частини 3 кВ зі зняттям напруги.

Для приєднання інших датчиків постійного струму вимагається наявність вимірювального шунта у «+» та «-» шинах випрямного агрегату.

Для живлення аналізаторів, датчиків струму і напруги, портативних комп'ютерів під час вимірювань необхідний доступ до мережі 220 В власних потреб тягової підстанції.

Підключення вимірювальних пристроїв виконуються з дотриманням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

ТОВ «ЕТС» надає необхідні засоби вимірювальної техніки та з'єднувальні проводи. Для вимірювань також залучаються прилади сторонніх організацій.

Монтаж та підключення вимірювальних приладів здійснюється кваліфікованим працівником РРД під контролем представника ТОВ «ЕТС».

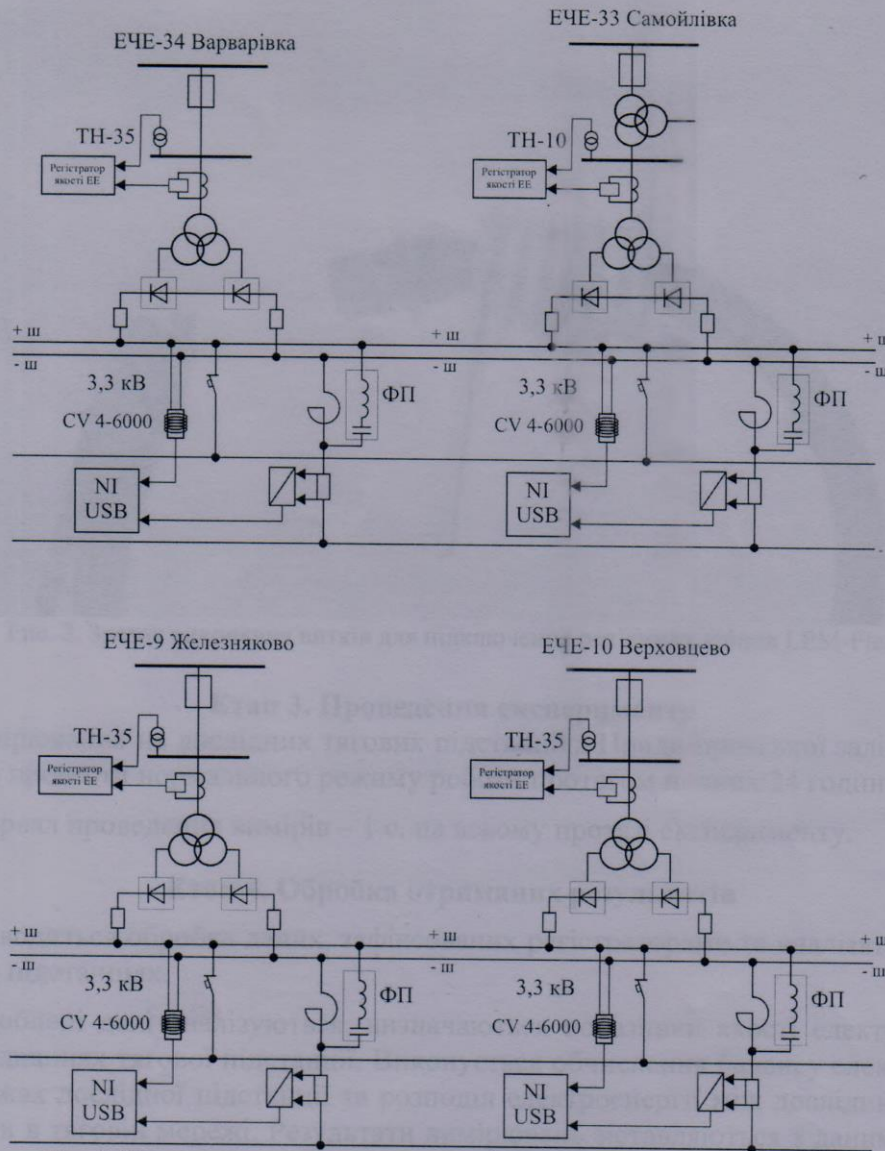


Рис 1. Загальна схема проведення вимірювань на тягових підстанціях

Оперативні перемикання у схемі живлення пристроїв електропостачання для проведення вимірювань на ЕЧЕ, а саме виведення/введення в роботу фідера контактної мережі, виконуються енергодиспетчером у відповідності з погодженою зі службою та дистанцією електропостачання програмою за попереднім замовленням.

Дату та час проведення експерименту визначає служба електропостачання Придніпровської залізниці. Служба призначає відповідальних за проведення експерименту та інструктажі причетних.

Програми та розпорядчі документи щодо підготовки та узгодження з причетними схем живлення контактної мережі, сторонніх та залізничних споживачів з урахуванням забезпечення руху поїздів та електропостачання пристроїв СЦБ, зв'язку та інших здійснює служба електропостачання у встановленому порядку.

Загальне керівництво проведенням вимірювань здійснює представник ТОВ «ЕТС»

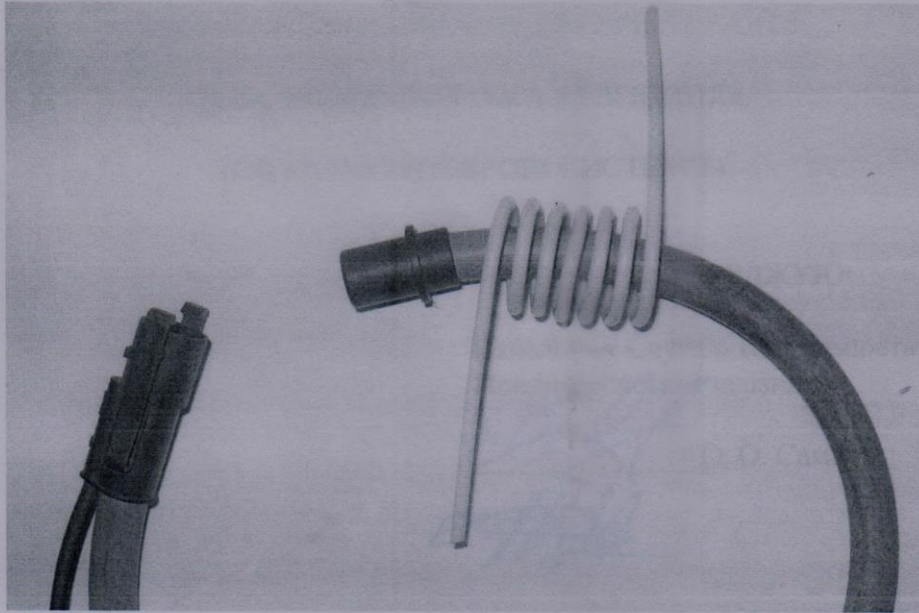


Рис. 2. Зразок виконання витків для підключення роз'ємних кліщів LEM-Flex

### Етап 3. Проведення експерименту

Вимірювання на дослідних тягових підстанціях Придніпровської залізниці необхідно провести нормального режиму роботи протягом повних 24 годин.

Інтервал проведення вимірів – 1 с. на всьому протязі експерименту.

### Етап 4. Обробка отриманих результатів

Проводиться обробка даних, зафіксованих регістраторами та аналізаторами на тягових підстанціях.

Оброблені дані аналізуються, визначаються показники якості електроенергії на приєднаннях тягової підстанції. Виконується обчислення балансу електроенергії в межах дослідної підстанції та розподіл електроенергії між дослідними підстанціями в тяговій мережі. Результати вимірювань зіставляються з даними системи комерційного обліку.

Відповідальні за проведення експерименту – служба електропостачання, ТОВ «ЕТС».

Експеримент проводять – представники ТОВ «ЕТС», представник служби, представники дистанції електропостачання, обслуговуючий персонал тягової підстанції.

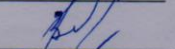
Розроблено:

д.т.н., с.н.с.



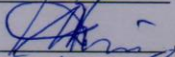
В. Г. Сиченко

д.т.н., професор



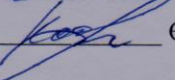
В. Г. Кузнецов

к.т.н., доцент



Д. О. Босий

аспірант



Є. М. Косарев

«Дніпропетровськ»

СОГЛАСОВАНО:

Начальник  
Павлоградской дистанции  
электроэнергетики  
Д. Г. БОРИСЕНКО  
« 3 » сентября 2014 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Начальник  
службы электроснабжения  
Приднепровской железной дороги  
О. А. САМКОВ  
« 05 » 12 2014 г.

Старший энергодиспетчер ЭЧЭС-7  
В. В. ОРЕХОВ  
« 3 » сентября 2014 г.

### Программа

проведения измерений параметров электропотребления и показателей  
качества электроэнергии тяговых подстанций  
ЭЧЭС-33 Самойловка, ЭЧЭС-34 Варваровка

Днепропетровск

**1 Объект испытаний:**

- 1.1. Тяговый агрегат ТТ-3,4 РУ-10 кВ тяговой подстанции ЭЧЭ-33 Самойловка, ЭЧ-7 Павлоград
- 1.2. Тяговый агрегат ТТ-1 РУ-35 кВ тяговой подстанции ЭЧЭ-34 Варваровка, ЭЧ-7 Павлоград

**2 Цель испытаний:**

- 2.1. Регистрация по 3-м фазам действующих величин напряжения, тока, коэффициентов искажения синусоидальности, коэффициентов несимметрии напряжения и тока, выборочное осциллографирование кривых тока и напряжения на вводе тяговых агрегатов;
- 2.2. Непрерывное осциллографирование кривых выпрямленного напряжения и тока в сети 3,3 кВ.

**3 Измерительные приборы:**

- 3.1. Прибор для измерений электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии типа «Энергомонитор 3,3Т1»;
- 3.2. Анализатор качества электрической энергии Satec EDL-175хг.
- 3.3. Датчики напряжения LEM LV-100-3000, аналогово-цифровой преобразователь NI USB-6009.

**3 Место проведения испытаний:**

- 3.1 Тяговая подстанция ЭЧЭ-33 Самойловка (Дистанция электроснабжения ЭЧ-7 Павлоград), панель счетчиков ЗРУ-10 кВ, учет МВ-ТТ-3 ЗРУ-10 кВ, ячейка разъединителя РКВ-2 РУ-3,3 кВ.
- 3.2 Тяговая подстанция ЭЧЭ-34 Варваровка (Дистанция электроснабжения ЭЧ-7 Павлоград), машинный зал, панель счетчиков КВ-1 МВ-ТТ-1,2, ячейка разъединителя РКВ-1 РУ-3,3 кВ.

**4. Общие положения:**

- 4.1. Проведение измерений выполняется одновременно на двух тяговых подстанциях ЭЧЭ-33 Самойловка, ЭЧЭ-34 Варваровка.
- 4.2. Выполнение подключений измерительных приборов на тяговых подстанциях производится поочередно.
- 4.3. Схема питания устройств электроснабжения на период проведения измерений на тяговых подстанциях остается без изменений.

**5. Подготовительные работы:**

- 5.1 Накануне испытаний ЭЧЭ-33, 34 дают заявки ЭЧЦ-7 на производство работ по проведению измерений параметров потребления и показателей качества электроэнергии на тяговых подстанциях.
- 5.2 Переключения и допуск к работе специалистов ДИИТа и ДЭЛ выполняет оперативно обслуживающий персонал тяговой подстанции.

5.3 На время проведения замеров руководство подстанции электроснабж

ения ЭЧ-7 назначает ответственного за соблюдением правил ПТЭ и ПТБ при производстве работ.

## **6. Проведение замеров:**

### **6.1 Подключение измерительных приборов**

Измерительные приборы для записи информации подключаются представителем ДИИТа, ДЭЛ и специалистом группы РЗА РРУ-7.

#### 6.1.1. На тяговой подстанции ЭЧЭ-33 Самойловка

1) подключение прибора Satec EDL-175хг необходимо выполнить ко вторичным цепям трансформаторов тока и напряжения ввода тягового агрегата МВ-ТТ-3 на панели счетчиков ЗРУ-10 кВ.

2) подключение датчика напряжения LEM LV-100-3000 к +/- шинам 3,3 кВ и датчика тока к шунту необходимо выполнить в ячейке разъединителя РКВ-2 РУ-3,3 кВ.

#### 6.1.2. На тяговой подстанции ЭЧЭ-34 Варваровка

1) подключение прибора Энергомонитор 3,3Т1 необходимо выполнить ко вторичным цепям трансформаторов тока и напряжения ввода тягового агрегата МВ-ТТ-1,2 на панели счетчиков КВ-1 МВ-ТТ-1,2 в машинном зале.

2) подключение датчика напряжения LEM LV-100-3000 к +/- шинам 3,3 кВ и датчика тока к шунту необходимо выполнить в ячейке разъединителя РКВ-1 РУ-3,3 кВ.

### **6.2 Оперативные переключения**

Для выполнения подключений измерительных приборов в ЗРУ-10 кВ ЭЧЭ-33 Самойловка и в машинном зале ЭЧЭ-34 Варваровка ко вторичным цепям трансформаторов тока и напряжения оперативных переключений не требуется.

Для выполнения подключений измерительных приборов в РУ-3,3 кВ требуются оперативные переключения.

#### 6.2.1. На тяговой подстанции ЭЧЭ-33 Самойловка

1) Включить на параллельную работу тяговый агрегат КВ-1.

2) Разобрать схему тягового агрегата КВ-2, для чего

Отключить МВ-ТТ-3, БАОД КВ-2, автоматику обдува;

Разобрать схему разъединителями +/- РКВ-2, ТТ-3-2.

3) После выполнения подключения измерительных приборов собрать схему тягового агрегата КВ-2.

4) Включить тяговый агрегат КВ-2 на параллельную работу.

5) Отключить тяговый агрегат КВ-1.

#### 6.2.2. На тяговой подстанции ЭЧЭ-34 Варваровка

1) Включить на параллельную работу тяговый агрегат КВ-2.

2) Разобрать схему тягового агрегата КВ-1, для чего

Отключить БВ КВ-1, МВ-ТТ-1,2;

Разобрать схему разъединителями +/- РКВ-1, ТТ-1-1.

3) После выполнения подключения измерительных приборов собрать схему тягового агрегата КВ-1.

4) Включить тяговый агрегат КВ-1 на параллельную работу.

5) Отключить тяговый агрегат КВ-2.

#### 6.4 Длительность измерений.

Проведение записи данных параметров электропотребления и показателей качества электрической энергии проводится длительностью не менее суток (24 часов).

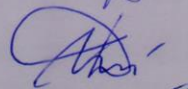
Программу составили:

Начальник ДЭЛ



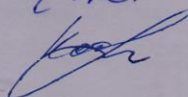
А. П. Кордин

Доцент кафедры ЭЛС



Д. А. Босый

Аспирант кафедры ЭЛС



Е. Н. Косарев



СОГЛАСОВАНО:

Начальник  
Верховцевской дистанции  
электрообеспечения  
В. А. ЧАБАНЕНКО  
« 11 » 12 2014 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Начальник  
службы электрообеспечения  
Приднепровской железной дороги  
О. А. САМКОВ  
« 11 » 12 2014 г.

Старший энергодиспетчер ЭЧЦС-3  
В. П. КИРИЧЕНКО  
« 11 » 12 2014 г.

**Программа  
проведения измерений параметров электропотребления и показателей  
качества электроэнергии тяговых подстанций  
ЭЧЭ-9 Железняково, ЭЧЭ-10 Верховцево**

Днепропетровск  
2014

### **1 Объект испытаний:**

1.1. Тяговый агрегат ТТ-1 РУ-35 кВ тяговой подстанции ЭЧЭ-9 Железнякаво, ЭЧ-3 Верховцево

1.2. Тяговый агрегат ТТ-1 РУ-35 кВ тяговой подстанции ЭЧЭ-10 Верховцево, ЭЧ-3 Верховцево

### **2 Цель испытаний:**

2.1. Регистрация по 3-м фазам действующих величин напряжения, тока, коэффициентов искажения синусоидальности, коэффициентов несимметрии напряжения и тока, выборочное осцилографирование кривых тока и напряжения на вводе тяговых агрегатов;

2.2. Непрерывное осциллографирование кривых выпрямленного напряжения и тока в сети 3,3 кВ.

### **3 Измерительные приборы:**

3.1. Прибор для измерений электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии типа «Энерготестер ПКЭ»;

3.2. Анализатор качества электрической энергии Satec EDL-175хг.

3.3. Датчики напряжения LEM LV-100-3000, аналогово-цифровой преобразователь NI USB-6009.

### **3 Место проведения испытаний:**

3.1 Тяговая подстанция ЭЧЭ-9 Железнякаво (Дистанция электроснабжения ЭЧ-3 Верховцево), шкаф управления БВ-КВ-1 ЗРУ 3,3 кВ, ячейка разъединителя РКВ-1 РУ-3,3 кВ.

3.2 Тяговая подстанция ЭЧЭ-10 Верховцево (Дистанция электроснабжения ЭЧ-3 Верховцево), шкаф управления БВ-КВ-2 ЗРУ 3,3 кВ, ячейка разъединителя РКВ-1 РУ-3,3 кВ.

### **4. Общие положения:**

4.1. Проведение измерений выполняется одновременно на двух тяговых подстанциях ЭЧЭ-9 Железнякаво, ЭЧЭ-10 Верховцево.

4.2. Выполнение подключений измерительных приборов на тяговых подстанциях производится поочередно.

4.3. Схема питания устройств электроснабжения на период проведения измерений на тяговых подстанциях остается без изменений.

### **5. Подготовительные работы:**

5.1 Накануне испытаний ЭЧЭ-9, ЭЧЭ-10 дают заявки ЭЧЦ-3 на производство работ по проведению измерений параметров потребления и показателей качества электроэнергии на тяговых подстанциях.

5.2 Переключения и допуск к работе специалистов ДИИТа и ДЭЛ выполняет оперативный персонал тяговых подстанций.

5.3 На время проведения работ

электроснабжения ЭЧ-3 назначает ответственного за соблюдением правил ПТЭ и ПТБ при производстве работ.

## **6. Проведение замеров:**

### **6.1 Подключение измерительных приборов**

Измерительные приборы для записи информации подключаются представителем ДИИТа, ДЭЛ и специалистом группы РЗА РРУ-3.

#### 6.1.1. На тяговой подстанции ЭЧЭ-9 Железнякаво

1) подключение прибора Satec EDL-175хг необходимо выполнить к вторичным цепям трансформаторов тока и напряжения ввода тягового агрегата ТТ-1 на шкафу управления БВ-КВ-1.

2) подключение датчика напряжения LEM LV-100-3000 к +/- шинам 3,3кВ и датчика тока к шунту необходимо выполнить в ячейке разъединителя РКВ-1 РУ-3,3 кВ.

#### 6.1.2. На тяговой подстанции ЭЧЭ-10 Верховцево

1) подключение прибора Энерготестера ПКЭ необходимо выполнить ко вторичным цепям трансформаторов тока и напряжения ввода тягового агрегата ТТ-1 на шкаф управления БВ-КВ-2.

2) подключение датчика напряжения LEM LV-100-3000 к +/- шинам 3,3кВ и датчика тока к шунту необходимо выполнить в ячейке разъединителя РКВ-1 РУ-3,3 кВ.

### **6.2 Оперативные переключения**

Для выполнения подключений измерительных приборов в ЗРУ-3,3 кВ ЭЧЭ-9 Железнякаво и ЭЧЭ-10 Верховцево к вторичным цепям трансформаторов тока и напряжения оперативных переключений не требуется.

Для выполнения подключений измерительных приборов в РУ-3,3 кВ требуются оперативные переключения.

#### 6.2.1. На тяговой подстанции ЭЧЭ-9 Железнякаво

1) Включить на параллельную работу тяговый агрегат КВ-3.

2) Разобрать схему тягового агрегата КВ-1, для чего

Отключить МВ-КВ-1, БАОД КВ-1;

Разобрать схему разъединителями РКВ-1-1, +/- РКВ-1.

Включить заземляющие ножи ЗН КВ-1-1, ЗН +/- РКВ-1

Установить переносные заземления на БАОД КВ-1 с двух сторон.

3) После выполнения подключения измерительных приборов собрать схему тягового агрегата КВ-1.

4) Включить тяговый агрегат КВ-1 на параллельную работу.

5) Отключить тяговый агрегат КВ-3.

#### 6.2.2. На тяговой подстанции ЭЧЭ-10 Верховцево

1) Включить на параллельную работу тяговый агрегат КВ-3.

2) Разобрать схему тягового агрегата КВ-1, для чего

Отключить АВОР, ТУ КВ-1, КАУ КВ-1

Отключить МВ-КВ-1, БВ КВ-1

4

Разобрать схему разъединителями РКВ-1-2, +/- РКВ-1

Включить заземляющие ножи ЗН КВ-1-2, ЗН +/- РКВ-1

Установить переносные заземления на БАОД КВ-1 с двух сторон

3) После выполнения подключения измерительных приборов собрать схему тягового агрегата КВ-1.

4) Включить тяговый агрегат КВ-1 на параллельную работу.

5) Отключить тяговый агрегат КВ-3.

#### 6.4 Длительность измерений.

Проведение записи данных параметров электропотребления и показателей качества электрической энергии проводится длительностью не менее суток (24 часов).

Программу составили:

Начальник ДЭЛ

А. П. Кордин

Доцент кафедры ЭЛС

Д. А. Босый

Аспирант кафедры ЭЛС

Е. Н. Косарев