

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

**«ДО ЗАХИСТУ»**

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ /Д. О. Босий/

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Дослідження способів оптимізації напруги в тяговій мережі постійного струму на ділянці Н-Ч**

Theme **Research of ways of optimization of voltage in a traction network of a direct current on a site N-CH**

Керівник дипломної роботи

проф. \_\_\_\_\_ Д. О. Босий

Нормоконтролер

доц. \_\_\_\_\_ Т. М. Міщенко

Студент групи ЕС1926

\_\_\_\_\_ В. В. Блиндюк

Student

Blyndiuk Volodymyr

Дніпро – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна  
Факультет «Управління енергетичними процесами»  
Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»  
Галузь 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Спеціалізація Електротехнічні системи електроспоживання

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Зав. кафедри  
\_\_\_\_\_ Сиченко В. Г.  
(підпис)  
« 20 » \_\_\_\_\_ січня 2020р.

**ЗАВДАННЯ**

до дипломної роботи на здобуття ОС

\_\_\_\_\_ магістр  
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

студента групи ЕС1926  
(номер групи)

\_\_\_\_\_ Блиндюк В.В.  
(ПІБ)

1 Тема дипломного проекту (роботи) «Дослідження способів оптимізації напруги в тяговій мережі постійного струму на ділянці Н-Ч».

затверджена наказом по університету від «17» січня 2020 р. № 53 ст.

2 Термін подання студентом закінченої роботи «07» грудня 2020 р.

3 Вихідні дані до дипломного проекту (роботи): Допустимі рівні напруги на шинах тягової підстанції, графік руху поїздів, схеми живлення контактної мережі постійного струму ділянки Н-Ч.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): проблема оптимізації режиму напруги в тягових мережах постійного струму; особливості вимог та розрахунку живлення швидкісних магістралей; розробка методу розрахунку розподіленої системи керованого електропостачання; дослідження способів оптимізації параметрів системи керованого електропостачання.

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| Назва розділу дипломної роботи                                                                                                                                  | Термін виконання | Обсяг розділу, % |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| ВСТУП                                                                                                                                                           | 09.09            | 5                |
| СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ НАПРУГИ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ                                                          | 21.10            | 15               |
| ПЕРСПЕКТИВА РОЗВИТКУ ШВИДКІСНОГО ТА ВИСОКОШВИДКІСНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ. ПРОБЛЕМАТИКА ІСНУЮЧОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.                                 | 07.11            | 25               |
| РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАНТІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ | 15.11            | 35               |
| ВИСНОВКИ                                                                                                                                                        | 03.12            | 10               |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                                                                                                      | 07.12            | 10               |

Дата видачі завдання: «20» січня 2020 р.

Керівник дипломної роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

професор Босий Д.О.

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Блиндюк В.В.

(ПІБ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 93 сторінки, складається з 4 розділів та містить 58 ілюстрацій, 8 таблиць, 40 бібліографічних джерел.

Мета роботи – розробка методичних засад оптимізації режиму напруги в тяговій мережі постійного струму на ділянці Н-Ч та аналіз режимів напруги і розробка рекомендацій щодо його покращення в системі тягового електропостачання постійного струму при впровадженні швидкісного та великовагового руху.

Також розробка методології розрахунку розподілених систем керованого електропостачання, стабілізація режиму напруги в тяговій мережі та мінімізація втрат в контактній мережі за рахунок оптимізації параметрів системи, а саме – рівня напруг на шинах одно агрегатних тягових підстанцій.

Визначення режиму напруги і оцінка його впливу на роботу електрорухомого складу і пристроїв електропостачання є одним з найбільш важливих завдань при побудові сучасної інтелектуальної системи тягового електропостачання. Від режиму напруги залежать такі параметри, як швидкість руху поїзда, зміни струму і тягового зусилля електровоза, можливість подолання інерційних підйомів, навантаження і робота окремих пристроїв електропостачання.

Показано, що розподілена система живлення з використанням пунктів підсилення дозволяє оптимізувати режим напруги в тяговій мережі, збільшити відстань між пунктами живлення, реалізувати режими швидкісного руху при зниженні втрат енергії.

Ключові слова: ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, КЕРОВАНА РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ, ШВИДКІСНИЙ РУХ

## ЗМІСТ

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                                                         | 6  |
| 1.СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ НАПРУГИ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....      | 11 |
| 1.1 Особливості вимог та розрахунку живлення швидкісних магістралей.....                                            | 11 |
| 1.2 Показники ефективності системи електропостачання постійного струму.....                                         | 12 |
| 1.3 Існуючі заходи підвищення енергетичної ефективності в системі тягового електропостачання постійного струму..... | 15 |
| 1.4 Особливості дослідження оптимізації режиму напруги в тяговій мережі постійного струму.....                      | 18 |
| 2.ШВИДКІСНИЙ РУХ НА ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЯХ.....                                                                | 23 |
| 2.1 Розвиток високошвидкісних магістралей у світі.....                                                              | 23 |
| 2.2 Проблеми системи тягового електропостачання при введенні швидкісного руху поїздів.....                          | 33 |
| 2.3 Система керованого електропостачання для пропуску швидкісних поїздів.....                                       | 36 |
| 3.РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....                                | 43 |
| 3.1 Постановка задачі розрахунку .....                                                                              | 43 |
| 3.2 Розрахунок на основі методу накладання .....                                                                    | 44 |
| 3.3 Приклад розрахунку розподіленої системи.....                                                                    | 52 |
| 4. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....                                                            | 67 |
| 4.1 Дослідження оптимізації параметрів ділянки з однаковою напругою на шинах тягових підстанцій. ....               | 67 |
| 4.2 Дослідження оптимізації параметрів ділянки з різною напругою на шинах тягових підстанцій. ....                  | 74 |
| 4.3 Аналітичне порівняння результатів дослідження .....                                                             | 80 |
| ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....                                                                                       | 87 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                     | 89 |

|           |              |          |        |      |                                                                                                   |  |  |                       |      |        |    |  |
|-----------|--------------|----------|--------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|-----------------------|------|--------|----|--|
|           |              |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020                                                                             |  |  |                       |      |        |    |  |
|           |              |          |        |      |                                                                                                   |  |  |                       |      |        |    |  |
| Змн.      | Арк.         | № докум. | Підпис | Дата | <u>Дослідження способів оптимізації напруги в тяговій мережі постійного струму на ділянці Н-Ч</u> |  |  | Літ.                  | Арк. | Аркуші |    |  |
| Розробник | Блиндюк В.В. |          |        |      |                                                                                                   |  |  |                       |      | 5      | 93 |  |
| ОП та БНС |              |          |        |      |                                                                                                   |  |  | ДНУЗТ, ЕП, гр.ЕС-1926 |      |        |    |  |
| Керівник  | Босий Д.О.   |          |        |      |                                                                                                   |  |  |                       |      |        |    |  |
| Економ.   |              |          |        |      |                                                                                                   |  |  |                       |      |        |    |  |
| Н. Контр. | Міщенко Т.М. |          |        |      |                                                                                                   |  |  |                       |      |        |    |  |

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Режим напруги в тяговій мережі, за відсутності експлуатаційних обмежень, визначає провізну та пропускну здатність електрифікованої залізниці, що впливає на встановлену вагу та кількість пропущених поїздів за певний проміжок часу. Забезпечення необхідного рівня напруги у тягових мережах електрифікованих залізниць має здійснюватись застосуванням необхідних технічно можливих заходів під час розробки та виготовлення обладнання і комплектуючих виробів, проектування та побудови системи тягового електропостачання на базі обґрунтованого вибору її конфігурації і параметрів та раціональних схем підключення до системи зовнішнього електропостачання.

Особливостями передачі електроенергії по тяговій мережі є зміна положення електрорухомого складу (ЕРС) і зміна режимів їх роботи, обмеження, що визначаються впливом поїздів один на одного залежно від їх взаємного розташування, а також обмеження, пов'язані, загалом, із забезпеченням перевізного процесу. Одним з основних показників якості електричної енергії, що передається в системі тягового електропостачання (СТЕ) є рівень напруги на шинах тягової підстанції і, отже, на струмоприймачах електровозів, який, проте, залежить не лише від зміни тягового навантаження, але і від зміни навантаження районних споживачів і живлячої енергосистеми, а характер чинників, що впливають на напругу, є нелінійним і нестаціонарним. При цьому рівень напруги, як показник якості, повинен розглядатися як деякий параметр, що оптимізує передачу і споживання електроенергії для ЕРС.

Ефективність роботи СТЕ також визначається станом інфраструктури передачі енергії електроприймачам. Сьогодення тягового електропостачання зумовлене «стрімким» моральним та фізичним старінням інфраструктури: контактної мережі та тягових підстанцій. Експлуатаційна довжина електрифікованих колій, які знаходяться в експлуатації понад 40 років, за останні

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 6    |

10 років збільшилась в 20 раз і складає майже 50 % від їх загальної довжини. Питома пошкоджуваність контактної мережі на 100 км розгорнутої довжини з кожним роком росте. Такі ж негативні тенденції можна відмітити і стосовно обладнання тягових підстанцій та ліній електропостачання. Департаментом електрифікації та електропостачання, службами електропостачання виконуються значні обсяги робіт для модернізації, капітального ремонту та заміни обладнання інфраструктури тягового електропостачання, але обсяг інвестицій в цьому напрямку повинен бути значно більшим. Значно посилити тягове електропостачання може впровадження новітніх технологій та сучасного обладнання.

Режим роботи електрифікованих ділянок залежить від великої кількості взаємопов'язаних і взаємовпливаючих факторів. Насамперед, це режими роботи системи зовнішнього електропостачання, кількість електрорухомого складу на фідерній зоні, параметри системи тягового електропостачання та режим ведення кожного електровоза. 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 пропускної здатності.

Такий режим забезпечує регламентовані витрати енергії на тягу з урахуванням втрат в системі електропостачання, необхідну надійність роботи електрорухомого складу (ЕРС) та пристроїв електропостачання. Робота ділянки у вимушеному режимі 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.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Надійна робота та енергоефективність системи електропостачання в основному залежать від рівня напруги на струмоприймачеві та значень сили струму, яка протікає в контактній мережі. Для стабілізації напруги та зменшення струму пропонується керована розподілена система електропостачання.

Високошвидкісні залізниці і залізниці з інтенсивним рухом, підвищеною пропускною здатністю, з невеликими інтервалами (3...15 хв) між поїздами і споживаною потужністю 10...12 МВт і більше мають інший характер електротягового навантаження. Для таких ліній характерне імпульсне навантаження: як для проводів електротягової мережі, так і для перетворювачів та комутаційних апаратів тягових підстанцій, постів секціонування, інших лінійних пристроїв. При цьому зростають пікові навантаження на тягові підстанції, збільшуються втрати напруги та енергії в пристроях тягового електропостачання, ускладнюються умови струмознімання і підвищується температура проводів контактної мережі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Робота відповідає науковим напрямкам роботи кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна і співпадає з науково-дослідною роботою за договором № 0112U008158 «Дослідження якості електричної енергії в системах живлення залізничної автоматики та розробка заходів щодо їх поліпшення».

**Мета і завдання роботи.** Розробка методології розрахунку електричних схем розподіленого електропостачання, оптимізація параметрів розподіленої системи. Головною метою є стабілізація рівня напруги на рівні максимально економічно ефективного та зменшення втрат в контактній мережі.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішені наступні завдання:

- стабілізація рівня напруги на струмоприймачеві;
- мінімізація втрат в контактній мережі.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 8    |

Об'єкт дослідження – процес передачі електроенергії пристроями електропостачання при розподіленій системі з керованим рівнем напруги.

Предмет дослідження – показники рівня напруги на струмоприймачеві та рівень втрат в контактній мережі.

Методи дослідження – теоретичні дослідження на основі розробленої моделі в системі комп'ютерної алгебри з класу систем автоматизованого проектування MathCAD.

**Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист:**

1. Розроблена методологія розрахунку дозволяє спростити процес опрацювання даних та поліпшити динамічність розрахунку системи, для швидшого реагування та коректування закону керування напругою на тягових підстанціях.
2. В роботі досліджується робота керованої розподіленої системи електропостачання, на основі розробленої комп'ютерної моделі цієї системи та експериментальних даних руху поїздів були досліджені техніко-економічні показники роботи системи при різних режимах роботи системи електропостачання.

**Практичне значення отриманих результатів:**

1. Використання розподіленої системи дозволить вирішити питання збільшення міжпідстанційної зони. Розподілена система не потребує постійного перебування обслуговуючого персоналу на території підстанції, це те, що при впровадженні сучасних підстанцій модульного типу відпадає необхідність будівництва підстанцій з окремим приміщенням та великою площею. Також при виборі місця для будівництва підстанції, яке зазвичай визначається не техніко-економічною ефективністю функціонування системи, а близькістю населених пунктів.
2. Концепція керованого розподіленого живлення дозволить зробити перший крок впровадження інтелектуальної системи електропостачання, що

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

дозволить більш економічно використовувати енергетичні ресурси, дозволить зменшити собівартість перевезень, які іноді відіграють велику роль в вартості товару для кінцевого споживача – населення країни.

3. Всі теоретичні розрахунки показали поліпшення якості електричної енергії внаслідок впровадження та застосування закону керування значенням напруги на шинах 3,3 кВ тягової підстанції.

**Особистий внесок здобувача.** Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Здобувачем самостійно проведені розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих під час експериментальних досліджень результатів, формулювання висновків.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на Х-ій науково-практичній конференції «Проблеми безпеки на транспорті» (Гомель, 26–27 листопада 2020 р.)

#### **Публікації**

Босый Д.А., Блиндюк В.В. Исследование способов оптимизации напряжения в тяговой сети постоянного тока [Текст] / Проблемы безопасности на транспорте : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 26–27 ноября, 2020 г.) : в 5 ч. Ч. 5 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 229 с. ISBN 978-985-554-946-9 (ч. 5)

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

# 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ НАПРУГИ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

## 1.1 Особливості вимог та розрахунку живлення швидкісних магістралей

Характер тягового навантаження в розрахунку СТЕ електрифікованих залізниць зі швидкістю руху до 160 км/год приблизно описується нормальним законом розподілу.

Виходячи з максимальних значень струмових навантажень протягом часу руху поїздів за графіком вибираються пристрої СТЕ [1].

Високошвидкісні залізниці і залізниці з інтенсивним рухом, підвищеною пропускною здатністю, з невеликими інтервалами (3...15 хв) між поїздами і споживаною потужністю 10...12 МВт і більше мають інший характер електротягового навантаження. Для таких ліній характерне імпульсне навантаження: як для проводів електротягової мережі, так і для перетворювачів та комутаційних апаратів тягових підстанцій, постів секціонування, інших лінійних пристроїв. При цьому зростають пікові навантаження на тягові підстанції, збільшуються втрати напруги та енергії в пристроях тягового електропостачання, ускладнюються умови струмознімання і підвищується температура проводів контактної мережі.

Питома потужність електроспоживання високошвидкісних ліній складає 1...1,3 МВт/км, а для двоколійних ліній з підвищеною пропускною здатністю може досягати 1,7...2,5 МВт/км. За нормами Міжнародного союзу залізниць, розробленими ще в 1996 р. для двоколійної високошвидкісної лінії з максимальною швидкістю 300...350 км/год передбачається максимальна питома потужність споживання електроенергії на тягу 3 МВА/км. Потужність пристроїв тягового електропостачання рекомендується приймати, виходячи із зазначеної питомої потужності електроспоживання [2].

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 11   |

Необхідна потужність СТЕ залежить від багатьох факторів, основними з яких є маса поїзда, швидкість руху, основний опір руху, інтервали між поїздами, частота чергування режимів руху і розгону, можливість рекуперативного гальмування, план і профіль колії, характеристики мережі тягового електропостачання. Параметри електротягової мережі для забезпечення необхідної точності повинні визначатися за допомогою сучасного методу фізико-математичного моделювання процесу високошвидкісного руху поїздів [3].

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

Під енергоефективністю розуміють оптимальне використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) за існуючих рівнів технологічного розвитку та вимог охорони навколишнього середовища. Основним показником енергоефективності є питома витрата енергії в розрахунку на одиницю корисного продукту в усіх сферах діяльності людини (економіці, техніці, побуті). Відносно до національної та регіональної економіки таким показником енергоємність валового внутрішнього продукту (ВВП) і валового регіонального продукту (ВРП) [4, 5].

Енергетична ефективність перевізного процесу залежить від великої кількості його учасників й низки факторів, що впливають на нього.

На сьогодні основний потенціал підвищення енергетичної ефективності перевізного процесу пов'язаний з двома господарствами залізничного транспорту – локомотивним і управління рухом [6].

На частку зазначених господарств припадає майже 60-70% потенційної економії електроенергії на електрифікованих ділянках, на господарство електропостачання – приблизно 10-15%.

У цьому контексті витрата електроенергії на тягу визначається трьома основними групами факторів, що відповідають вказаним господарствам:

- енергетичні показники руху поїзда;
- характеристики системи тягового електропостачання;

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

- умови організації руху.

Необхідно взяти до уваги, що можливості підвищення енергоефективності залізничної системи далеко не вичерпані, і зараз основним напрямком заходів щодо зниження споживання енергетичних ресурсів є удосконалення конструкцій інфраструктури та рухомого складу, а також методів управління рухом.

Для систем тягового електропостачання до таких напрямків належать:

- мінімальний рівень технологічних втрат;
- мінімізація небалансу (умовних втрат) і перетоків потужності [7].

Найчастіше системи тягового електропостачання експлуатуються не в номінальних режимах, а електрообладнання та мережі СТЕ виявляються недовантаженими або перевантаженими.

Це призводить до збільшення частки втрат у трансформаторах та обладнанні, до зниження коефіцієнта потужності в системах електропостачання.

Підвищення ефективності функціонування СТЕ може досягатися через зниження втрат електричної енергії в системі трансформації, розподілу й перетворення (трансформатори, розподільчі мережі, електрорухомий склад, системи електричного зовнішнього та внутрішнього освітлення й т. ін.), а також через оптимізацію режимів експлуатації обладнання, що споживає цю енергію [8].

Як відомо, ефективний режим електроенергетичної системи – це такий режим (з допустимих), який задовольняє умови надійності технічних засобів, що входять у систему якості електроенергії й при якому забезпечується мінімум сумарної витрати ресурсів. Як правило, поняття ефективного функціонування електроенергетичних систем розглядається в комплексному вигляді для тривалих і короткострокових режимів роботи.

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

- витрата електричної енергії;

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 13   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

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

Для підвищення енергоефективності необхідно зменшувати втрати енергії при її перетворенні й передачі, знижувати потужність, необхідну для виконання корисної роботи, і підвищувати коефіцієнт потужності [10].

Слід також зазначити, що з фізичного погляду підвищення енергоефективності полегшує роботу силових електричних кілі знижує величину втрат потужності. З позиції підвищення енергоефективності експлуатації технічних систем найбільше значення має підвищення коефіцієнта потужності.

Низьке ж значення коефіцієнта потужності пояснюється специфікою реалізації технічних систем - їх реалізація здійснюється при потужностях, приведених до валу електродвигуна, істотно менших їх номінальних значень.

У реальних технічних системах при зниженні навантаження на валу двигунам від номінального значення до значення холостого ходу значення коефіцієнта потужності зменшується в 3-4 рази. Для залізниць зі швидкістю руху до 160 км/год характер електротягового навантаження підпорядковується закону нормального розподілу. Пристрої тягової мережі вибирають виходячи з максимальних значень струмових навантажень під час руху поїздів за графіком. Однак, для швидкісних залізниць і залізниць з інтенсивним рухом та підвищеною пропускнуою здатністю характер електротягового навантаження має інший вигляд. Для таких ліній характерні імпульсні навантаження, при цьому зростають пікові навантаження на тягові підстанції, збільшуються втрати напруги і енергії в пристроях тягового електропостачання, ускладнюються умови струмознімання і підвищується нагрівання проводів контактної мережі [11]. Встановлено, що питома витрата електроенергії збільшується зі зростанням швидкості внаслідок збільшення аеродинамічного опору руху, для горизонтальної ділянки при

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 14   |

прискоренні ЕРС  $\alpha=5$  км/год/с і швидкості 250 км/год. питоме електроспоживання більш ніж в 3рази перевищує цей показник на швидкості 120 км/год, що становить 50,8Вт·год/т·км і 16,01 Вт·год/т км відповідно.

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

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

Для порівняльного аналізу різних систем тягового електропостачання, або їх схемо-технічних рішень, доцільне також використання питомих показників, наприклад: питоме електроспоживання, питома потужність і т. ін. Необхідно також проводити оцінку навантажувальної здатності проводів контактної мережі та обладнання тягових підстанцій, постів секціонування та пунктів підсилення тягової мережі.

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

Великий внесок в розробку заходів та дослідження з підвищення енергоефективності в тягових системах зробили багато вчених наприклад: Б.О. Аржанніков, М.О. Костін, В.Г. Кузнецов, К.Г. Марквардт, Г.Г. Марквардт, Р.І. Мірошніченко, М. В. Панасенко, В.Г. Сиченко, О.І. Стасюк, та інші.

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

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 15   |

Підвищення техніко-економічних показників існуючих ділянок електричних залізниць постійного струму може бути досягнуто з впровадженням певних технічних та організаційних заходів [12-14]:

- використання пунктів паралельного з'єднання;
- збільшення перерізу проводів контактної мережі;
- будівництво додаткових тягових підстанцій;
- застосування блоків розподіленого живлення;
- повна заміна шестипульсних випрямлячів на випрямлячі з дванадцятьма пульсаціями в кривій випрямленої напруги.
- розробка і випуск випрямлячів з оптимальною шкалою номінальних потужностей;
- розширення сфери рекуперативного гальмування і експлуатаційне освоєння дванадцятипульсних випрямно-інверторних перетворювачів;
- експлуатаційне освоєння ефективних схем згладжу вальних фільтрів тягових підстанцій постійного струму;
- встановлення на фідерній зоні вольто додаткових пристроїв ВДП з регулюванням напруги;
- використання перетворювальних трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням.

Основні концепції і принципи підсилення системи тяги постійного струму 3,0 кВ описані ще в 60 –80 роках минулого сторіччя [12-17]. Сучасне підсилення СТЕ 3,0 кВ не зазнало значних структурних змін: змінювалася лише елементна база, зумовлена розвитком науки, техніки та технологій. У[18-21], виконано порівняльні розрахунки різних систем тягового електропостачання, запропоновано способи підсилення СТЕ постійного струму, побудовані на основі сучасних досягнень, повною мірою висвітлені їх переваги та недоліки, наведені результати досвіду експлуатації.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 16   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Але ефект від застосування окремих заходів різний і, як правило, є недостатнім [11]. Для підсилення тягового електропостачання конкретної лінії з метою досягнення необхідних показників питомої потужності для забезпечення руху швидкісних поїздів потрібно впроваджувати цілий комплекс заходів. Тому все частіше пропонується застосування розподілених систем живлення електрифікованих залізниць. Під розподіленою схемою живлення контактної мережі розуміють таку, за якої споживачі на найбільш завантажених зонах отримують живлення не лише від найближчих, але й від низки віддалених пунктів живлення [12]. Участь таких пунктів в живленні суміжних між підстанційних зон виходить тим більшою, чим менша потужність встановлених на одній підстанції тягових агрегатів.

Забезпечення належного режиму потужності та напруги в тяговій мережі при швидкісному русі, підвищення енергоефективності та зниження енергоємності залізничної галузі згідно з [24] можливе також за рахунок впровадження систем електричної тяги з використанням накопичувачів (ESS – energystoragesystem), розподілених вздовж електрифікованої ділянки та призначених для запасаєння енергії рекуперації й компенсації піків струму та втрат напруги при поверненні її в контактну мережу [22-25].

Актуальним варіантом підсилення системи 3,0 кВ є установка підсилювальних пунктів (ПП) на міжпідстанційній зоні, які будуть працювати за принципом децентралізованої системи. Перевагою цієї системи є потреба лише в підживленні контактної мережі, що не потребує значної агрегатної потужності та дозволяє значно знизити споживання електричної енергії із системи зовнішнього електропостачання [26-28].

Розглянута система потребує значно меншого перерізу проводів контактної мережі й при цьому зменшуються втрати енергії і напруги. Ці якості є найважливішими перевагами системи розподіленого живлення. Крім того, значно полегшується захист контактної мережі від струмів короткого замикання,

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

знижуються потенціали рейок відносно землі, а відповідно і небезпека руйнування підземних споруд блукаючими струмами. Головним напрямком реконструкції ліній 3,3 кВ у разі застосування розподіленої схеми живлення є можливість передачі енергії від вже існуючих тягових підстанцій (без будівництва нових)[40].

#### **1.4 Особливості дослідження оптимізації режиму напруги в тяговій мережі постійного струму**

Одними з основних параметрів системи тягового електропостачання є число та потужність тягових підстанцій і відстань між ними. Повна встановлена потужність тягових підстанцій в основному складає  $10 \div 20$  МВт, але сучасний стан тягового електропостачання постійного струму характеризується зростаючим дефіцитом електричної енергії для забезпечення необхідного режиму напруги в тяговій мережі при впровадженні швидкісного руху.

При цьому коефіцієнт використання режимної потужності та обладнання тягових підстанцій не перевищує 15 %.

Координація роботи різних служб електрифікованих залізниць здійснюється за допомогою графіка руху, який визначає час ходу поїздів, обертання локомотивів, роботу станцій і т.і. Тому основна вимога до системи електропостачання зводиться до забезпечення нормального режиму напруги на струмоприймачах, який би гарантував досягнення за даної швидкості, обумовленої графіком руху та забезпечував надійну та справну роботу ЕРС [29].

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.

На сьогоднішній день для поліпшення режиму напруги можуть застосовуватися різні способи, які мають різні схемні реалізації [1, 29].

В Україні для покращення режиму напруги застосовується тільки установка пунктів паралельного з'єднання і збільшення перерізу дротів

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 18   |

контактної мережі, а регульовальні можливості управління режимами напруги обмежуються застосуванням пристроїв РПН на тягових підстанціях. У реальних умовах експлуатації СТЕ це призводить до неоптимального функціонування тягової мережі [7]. На сьогоднішній день, за участі авторів, пропонуються різні варіанти удосконалених схемних рішень для поліпшення режиму напруги в тяговій мережі, основою яких є застосування розподіленої системи тягового електропостачання [1, 30-33].

Нині пророблено декілька варіантів побудови таких систем, наприклад, розподіленої системи тягового електропостачання із застосуванням одноагрегатних тягових підстанцій, основою яких є застосування перетворювача ПА-5200 [34]. В цій системі здійснюється рівномірний розподіл агрегатної потужності по довжині електрифікованої ділянки. При проведенні оціночних розрахунків для обґрунтування доцільності цієї схеми приймалися наступні припущення: електровози споживають постійний і не змінний за величиною струм, поїзди рухаються рівномірно із постійною встановленою швидкістю 160 км/год, не враховується час на розгін та гальмування, загальний час ходу всіх поїздів розрахунковою зоною становить 15 хв, напруга на шинах тягових підстанцій є сталою та незмінною за величиною у часі, внутрішні опори тягових підстанцій приймаються рівними. Результати порівняльного розрахунку схем централізованого та розподіленого живлення тягової мережі показують, що втрати електроенергії при реалізації заданого графіку руху поїздів при застосуванні схеми розподіленого живлення склали 104,21 кВт·год, що на 35,9% менше від втрат електроенергії при централізованому живленні.

Регулювання споживаної потужності при цьому здійснюється у єдиній системі розподіленого керування активним інтелектуальним обладнанням, здатним адаптивно змінювати характеристики передачі, перетворення та споживання електроенергії і оптимізувати режим функціонування системи тягового електропостачання при завданих обсягах перевізної роботи та в умовах

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 19   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

швидкісного руху. Необхідно зазначити, що ефективність системи розподіленого типу, особливо при застосуванні альтернативних джерел електричної енергії, буде значно вищою при застосуванні накопичувачів електричної енергії. Використання накопичувачів електричної енергії (НЕ) в СТЕ дозволяє частково або повністю усунути нерівномірності енергоспоживання СТЕ, приймати надлишкову енергію рекуперації, підтримувати на певному рівні потужність тягової підстанції під час експлуатації, 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 ТП [35-37].

На сьогоднішній день в пристроях СТЕ пропонуються до використання різні типи накопичувачів, але доцільність застосування того чи іншого типу накопичувача до цього часу не обґрунтована в повній мірі.

Необхідно вказати, що за результатами експериментальних досліджень потужність НЕ для компенсації втрат напруги має бути  $0,5 \div 1,5$  МВт, в залежності від рівня споживаного струму та координати.

Незважаючи на широку номенклатуру пропонованих акумуляторних накопичувачів електричної енергії, специфіка використання їх в енергетиці накладає достатньо серйозні обмеження на вибір типу акумулятора:

- висока енергоємність;
- термін служби акумуляторної батареї;
- відсутність «ефекту пам'яті»;
- допустимість режимів швидкого заряду батареї;
- здатність працювати в режимі великих струмових перевантажень;
- безпека використання;
- низька вартість.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 20   |

На жаль, жоден з існуючих на сьогоднішній день типів електрохімічних батарей (ЕХБ) не відповідає повністю таким вимогам: не зважаючи на велику поширеність, свинцево-кислотні акумулятори хоча і дозволяють використовувати їх в режимі великих струмових перевантажень та є досить дешевими, не допускають швидкісних режимів заряду/розряду, мають низьку енергоємність, є екологічно небезпечними, і вимагають спеціально обладнаних приміщень. NiCd та NiMH акумулятори допускають роботу при великих струмових перевантаженнях, швидкісний режим заряду/розряду, але мають ефект пам'яті (особливо, NiCd) і досить великий струм саморозряду.

Батареї LiCoO<sub>2</sub> та LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> мають високі енергетичні показники, великий термін служби, повністю позбавлені ефекту пам'яті, мають низький рівень саморозряду, допускають великі струмові перевантаження і швидкісні режими заряду/розряду, є екологічно безпечними, мають досить великий термін служби, але мають високу вартість і є вибухонебезпечними при неправильному режимі експлуатації. LiFePO<sub>4</sub> батареї мають всі позитивні якості літєвих батарей (висока енергоємність, наявність режимів швидкого заряду/розряду, відсутність ефекту пам'яті, не вимагають періодичного обслуговування), але при цьому є вибухобезпечними, і мають набагато більший термін служби. Відносно недавня поява (2003 р.) акумуляторів цього типу пояснює їх високу вартість.

Експериментальні дослідження батареї LiFePO<sub>4</sub> відображають вплив паразитних елементів в еквівалентній схемі. Їх наявність суттєво впливає на частотні характеристики батареї.

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що режими напруги в системі тягового електропостачання постійного струму не дозволяють в повній мірі забезпечити необхідні умови для впровадження швидкісного руху на існуючих лініях. Рівні напруги, як на шинах тягового навантаження, так і в тяговій мережі мають значний діапазон коливань, який

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 21   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

визначається різними факторами: як впливом змін режимів роботи системи зовнішнього електропостачання, так і режимами роботи тягової мережі.

При цьому, при наявності значного резерву встановленої потужності, на тягових підстанціях України відсутні засоби регулювання режимів напруги в тяговій мережі. Найбільш часто поліпшення режимів напруги виконується за рахунок тривіальних мало затратних заходів, що недостатньо при збільшенні тягових навантажень, виникаючих при збільшенні швидкостей руху. Однією з необхідних умов при цьому є необхідність звуження діапазону змін напруги на струмоприймачах е. р. с. та підвищення ефективності використання енергії.

Для вирішення поставленого завдання авторами пропонується використання схемо-технічних рішень системи тягового електропостачання на основі розподіленого живлення. Їх застосування дозволяє зменшити діапазон зміни напруги в тяговій мережі та підвищити економічні показники функціонування системи тягового електропостачання. Встановлення необхідного рівня звуження діапазону змін напруги для швидкісного руху потребує проведення додаткових досліджень. На основі проведеного аналізу показано, що суттєвого покращення режиму напруги в тяговій мережі можна досягти використанням батарейних систем накопичення електричної енергії, дозволяючих зменшити коливання споживаної потужності і рознести в часі фази накопичення та віддачі електроенергії. При цьому необхідно вирішити питання розробки системи керування режимами роботи пропонованих накопичувачів електричної енергії [29].

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 22   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

## 2. ШВИДКІСНИЙ РУХ НА ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЯХ

### 2.1 Розвиток високошвидкісних магістралей у світі

Перша високошвидкісна залізниця з'явилася в Японії. Передумовою стало те, що 1950-х різко загострилася транспортна ситуація між Токіо і Осака. 1 жовтня 1964 року була запущена в експлуатацію перша в світі ВШМ. Їй присвоїли назву «Токайдо», протяжність траси становила 515,4 км, а максимальна допустима швидкість поїздів 210 км / год. Уже в 1967 році дорога стала приносити прибуток, а до 1971 повністю окупила витрати на строительство 151. 14 березня 1992 був введений в експлуатацію Нодзомі - це найшвидший маршрут високошвидкісних поїздів на лініях Сінкансен Токайдо і Сан'е. Шлях від станції Токіо до станції Сін-Осака (515,4 км) займає 2 години 25 хвилин. В даний час на лінії Сан'е-Сінкансен на поїздах 700-й серії маршрутна швидкість становить 285 км / год, а на поїздах 500-й і N700-ї серій - 300 км / год. Потяги маршруту Нодзомі займають провідне місце за швидкістю серед комерційно експлуатованих в світі поїздів (після шанхайського Maglev і високошвидкісних поїздів на лінії Ухань-Гуанчжоу в Китаї). У підсумку за 40 років експлуатації сумарний обсяг перевезених пасажирів по ВСМ Японії наблизився до 7 млрд. Чоловік, частка авіасполучення на лінії "Токайдо" знизилася до 20% від загального пасажиропотоку, а сама система високошвидкісних залізниць стала предметом національної гордості японців [1].

Китай володіє найбільшою в світі мережею високошвидкісних залізниць загальною протяжністю понад 7055 км, включаючи ділянку тисяча дев'яносто дев'яносто п'ять км, на якому швидкість руху поїздів перевищує 350 км/год. За підтримки держави і завдяки спеціальним заходам стимулювання очікується, що сумарна протяжність швидкісної залізничної мережі досягне до 2012 р. 13000 км, і до 2020 р. 16000 км. У технологічному плані організація високошвидкісного залізничного сполучення відбувається за рахунок угод з передачі технологій від зарекомендували себе зарубіжних виробників таких як Бомбардье, Алстом. і Кавасакі. Переймаючи зарубіжні технології Китай прагне на основі їх зробити

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 23   |

власні розробки. Швидкісна залізниця Ухань-Гуанчжоу відкрита 26 грудня 2009 року. Є найшвидшою в світі зі швидкістю руху до 350 км/год. Випробування лінії проводилися з 9 грудня, максимальна досягнута швидкість при цьому була 394,2 км/год. Довжина шляху - 968 км. Середня швидкість невинного проїзду становить 313 км/год; час у дорозі - близько 3 годин. Це найдовша швидкісна залізниця Китаю і є частиною запланованої 2100- кілометрової швидкісної залізничної лінії Пекін - Гуанчжоу. Чженчжоускій високошвидкісна залізниця яка з'єднує міста Чженчжоу і Сіань. Будівництво лінії було розпочато 25 вересня 2005 року. Дорога протяжністю 456 км була введена в експлуатацію 6 Лютого 2010 року. Потяги на цій лінії рухаються зі швидкістю 350 км/год, максимальна швидкість - трохи менше 400 км / год. Мінімальний радіус кривих на цій лінії - 9000 метрів і в декількох особливо важких місцях 7000 метрів. Лінія двоколійна, електрифікована на змінному струмі напругою 25 кВ. Відстань між осями шляхів - 5 метрів. На лінії: 3 тунелю протяжністю 8460,7851 і 7685 метрів, а також міст через річку Вей протяжністю 79732 метрів. Цей міст є найдовшим у світі і перетинає річку Вей двічі, а також інші річки, автомобільні і залізні дороги. У найближчі п'ять років уряд Китайської Народної Республіки витратить 526 млрд. у.о. державних грошей на будівництво залізниць. Отже, щорічно на ці цілі буде виділятися приблизно 105 млрд. у.о. За п'ять років в країні побудують 42 нових високошвидкісних залізні магістралі. Щорічно по ним будуть перевозитися близько 7 млрд. пасажирів. За підсумками 2015 р., довжина всіх швидкісних ліній КНР складе 40 000 км. В цілому протяжність всіх залізниць країни досягне 120 000 км. У 2011 р китайські залізничники проведуть випробування високошвидкісного поїзда, який може їздити зі швидкістю до 500 км на годину. До 2012 в Пекіні з'являться поїзди на магнітній подушці. Зараз в Китаї єдина лінія для поїзда на магнітному підвісі пов'язує Шанхай з міжнародним аеропортом "Пудун". Зараз в Китаї розкинулися більше 7500 км швидкісних залізниць. А у вересні 2010 р в Китаї був встановлений світовий рекорд швидкості поїзда - вона досягла

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 24   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

416 км на годину. За підрахунками залізничників, вклавши один юань у високі технології швидкісних залізничних магістралей, можна отримати прибуток в 9 юанів. Тому ці дороги стали важливою тенденцією розвитку залізних шляхів в КНР, та й в усьому світі.

Шанхайський Maglev - це перша в світі комерційна залізнична лінія на магнітному підвісі. Поєднує станцію шанхайського метро з міжнародним аеропортом Пудун і долає відстань 30 км приблизно за 7 хв. 20 сек., Розганяючись до швидкості 431 км / год і утримуючись на ній протягом приблизно 1,5 хв. Будувалася німецькою компанією Transrapid в 2001-2003 рр., Введена в експлуатацію 1 січня 2004 року.

При однакових швидкостях руху споживання енергії поїздом на магнітній підвісці на 25% більша, ніж у традиційного поїзда. Загальна необхідність в сталі в системі магнітної левітації в 4 рази більше, ніж в системі колесо-рельс. В 4 рази дорожче перетворювачі електроенергії в системі Maglev. Затрати на полотно Maglev в 1,4раза більші. Плюсом Maglev є найбільша швидкість руху (600км/ч). С точки зору безпеки існує думка, що транспорт Maglev найбільш безпечний, так як немає можливості сходу з рейок.

На рисунку 2.1 Зображена інфраструктура ВСМ Китаю та Японії.

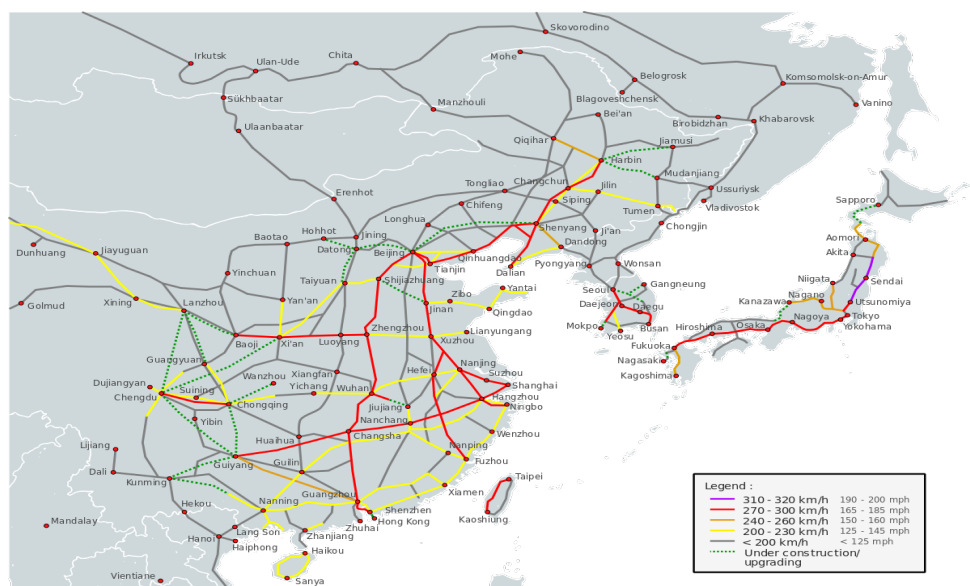


Рисунок 2.1 – Інфраструктура ВСМ Китаю та Японії

Виробництвом поїздів для TGV зайнявся Alstom. Французи, на відміну від японців, що використовують принцип розподіленої тяги (кожен вагон - моторний), почали випуск поїздів постійного формування з локомотивною тягою. Два електровоза розміщуються по кінцях поїзда, між ними розташовуються зчленовані причіпні вагони на проміжних візках. Можливість рухатися як на постійному, так і на змінному струмі розширила полігон курсування TGV на всю мережу національних залізниць, а також в суміжні країни. За 30 років у Франції було створено понад десяти модифікацій високошвидкісних поїздів. Швидкості зросли з 270 до 574,7 км / год. Останній рекорд був поставлений за допомогою нової технології AGV (automotrice a grande vitesse - "високошвидкісний самохідний вагон"), яка полягає у використанні розподіленої тяги з розташуванням моторних візків під підлогою між пасажирськими вагонами. Це стало можливим з появою сучасних синхронних двигунів з постійними магнітами. Експлуатаційна швидкість таких поїздів буде складати 360 км / год, а за рахунок зниження маси складу економія складе до 30% в порівнянні з класичними TGV. Вперше ідея створення TGV виникла в 1960-і роки у відповідь на будівництво Японією швидкісної мережі Сінкансен (1959 рік). Поїзд був зроблений сполучених, тобто сусідні вагони мали загальну візок, яка дозволяла вагонам рухатися вільно одна від одної. В 1976 році Французький уряд виділив гроші на великомасштабну реалізацію проекту TGV, і незабаром почалося будівництво першої швидкісної лінії LGV Sud-Est (фр. Ligne a grande vitesse - швидкісна лінія Південний схід). 27 вересня 1981 р було відкрито пасажирське сполучення TGV між Парижем і Ліоном. TGV був значно швидше звичайних поїздів, автомобілів і навіть літаків. Незабаром була відкрита лінія LGV Атлантика до Тура і Ле Мана (будівництво почалося в 1985, рух відкрито в 1989); LGV Північна Європа в сторону Кале і бельгійського кордону (будівництво почалося в 1989, рух відкрито в 1993); LGV РОНА- Альпи стало продовженням лінії LGV Південний Схід, продовживши її до Балансу (будівництво почалося в 1990, рух відкрито в 1992). У 2001 році було відкрито рух

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 26   |

по LGV Середземномор'ї до Марселя. У 2006 побудована лінія LGV Схід, яка зв'язала Париж і Страсбург. Швидкісні лінії, засновані на технології TGV, були побудовані в Бельгії, Нідерландах і Великобританії - всі вони з'єднані з французькою мережею. Повідомлення Eurostar відкрилося в 1994 році, з'єднавши континентальну Європу з Лондоном через Євротунель. Ця лінія частково використовує LGV Північна Європа у Франції. Перший етап будівництва швидкісної лінії в Великобританії (CTRL) був завершений в 2003 році. Другий етап був закінчений 14 листопада 2007 року. Тепер найшвидші поїзди проходять маршрут від Лондона до Парижа всього за 2 години 15 хвилин, а маршрут Лондон - Брюссель - за 1 годину 51 хв. 28 листопада 2003 року TGV перевіз свого мільярдного пасажирів з початку руху в 1981 році. Планується, що в 2010 році це число подвоїться. На першому місці за кількістю перевезених пасажирів серед швидкісних ліній знаходиться Сінкансен (5 мільярдів пасажирів в 2000 році).

ВСМ Німеччини Intercity-Express (англ. «Міжміський експрес», також відомий під скороченням ICE) - мережу швидкісних поїздів, в основному поширена в Німеччині, розроблена компанією Deutsche Bahn. Сучасне покоління поїздів Intercity-Express, ICE 3, розроблені консорціумом з компаній Siemens AG і Bombardier під загальним керівництвом Siemens AG. Максимальна швидкість поїздів ICE на спеціально для них побудованих ділянках залізничної мережі складає 320 км/год. На стандартних ділянках мережі швидкість ICE становить в середньому 160 км/год. ICE забезпечують як максимальну швидкість, так і максимальний комфорт переміщення. ICE стали базою для розвитку концерном Siemens свого сімейства високошвидкісних поїздів під загальною торговою маркою Siemens Velaro. Проекти Velaro реалізовані, зокрема в Іспанії та Китаї. Ці поїзди поставляються також і в Росію для використання на швидкісних лініях Москва - Санкт-Петербург і Москва - Нижній Новгород. Спочатку в ICE була прийнята концепція поїзда з двома локомотивами і безмоторних вагонами і мала певні недоліки. Так, тільки більш пізні моделі ICE 3 можуть долати підйоми до

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

40% о (тисячних) на високошвидкісному ділянці Кельн - Рейн-Майн. 29 травня 1991 року відбулася перша поїздка потягів ICE до нового вокзалу Кассель-Вільгельмсхее і 2 червня того ж року почалася планова експлуатація ICE на лінії Гамбург-Мюнхен. Таким чином, в мережу були включені обидва нових швидкісних ділянки - Ганновер - Фульда і Мангейм - Штутгарті. У 1997 році на лінії вийшло нове покоління поїздів - ICE 2. Потяги були реалізовані у вигляді двох напівпоїздів, які можна зчеплення і розчеплення в процесі експлуатації, що дозволяє краще реагувати на мінливу ситуацію з завантаженням пасажирами. У 2000 році вступили в експлуатацію ICE 3. У поїздах нового покоління мотори розташовані під підлогою декількох вагонів, це забезпечує кращий розподіл навантаження і крутного моменту. Також був випущений ICE 3М, призначений для використання на залізницях за межами Німеччини в першу чергу в Нідерландах. Бельгії і Швейцарії, а також у Франції та здатний використовувати різні стандарти електропостачання. Крім того, був випущений ICE Т, який є модифікацією ICE, не призначеної для високошвидкісних трас і розвиває максимальну швидкість 230 км/год. Вони призначені для використання на лініях, що не перебудованих для використання ICE і мають значно менші радіуси повороту. Для подолання таких поворотів в цих потягах використовується техніка керованого нахилу, розроблена фірмою FIAT На відміну від французького TGV або японського Сінкансен, ICE не розробляються як єдина система і тому далеко не на всіх ділянках потяги останнього покоління (ICE 3) можуть розвинути свою максимальну швидкість 330 км/год. І на території Німеччини існує два типи високошвидкісних трас: нові траси, побудовані спеціально для експлуатації високошвидкісних поїздів, на яких максимально дозволена швидкість становить до 350 км / год і поліпшені траси з максимальною швидкістю до 230 км / год, що представляють собою раніше існували траси, адаптовані для ICE. Оскільки при швидкостях вище 160 км/год гальмівний шлях поїзда перевищує 1 км, для управління рухом поїздів на високошвидкісних ділянках використовується

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 28   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

система автоматичного стеження за рухом поїзда Лінійне вплив вплив на поїзд). Ця система забезпечує автоматичний контроль за місцем розташування і швидкістю поїздів через пару проводів (так званий лінійний провідник), прокладених між рейками. У центральний пост управління повідомляється отримана інформація і машиніст отримує сигнали з інформацією про подальші дії на багато кілометрів вперед. Для високошвидкісних трас використовуються також контактні проводи зі спеціального сплаву, що поліпшує контакт і зменшує іскроутворення. Контактні проводи мають дуже високу натяг, з метою запобігання коливань під впливом вітру і повітряних потоків від проїжджаючих поїздів.

На рисунку 2.2 зображена інфраструктура ВСМ Європи.



Рисунок 2.2 – Інфраструктура ВСМ Європи

Найважливішим підсумком останнього десятиліття XX століття в області високошвидкісного залізничного транспорту стало об'єднання кількох національних ВСМ міжнародними маршрутами. Реалізовано висунутий ще в 1983 і остаточно офіційно оформлений в 1989 році проект міжнародної високошвидкісної мережі Париж - Брюссель - Кельн - Амстердам і Лондон як перший крок європейської мережі ВСМ.

У січні 1990 року була організована спеціальна дослідницька група високого рівня Європейської Ради «Європейська високошвидкісна залізнична мережа». Відповідно до планів, представленими цією групою, до 2010 року в Європі належить спорудити близько 9 000 км нових ВСМ і реконструювати понад 15 000 км існуючих залізничних ліній.

Європейська рада в Брюсселі в 1993 році схвалив «Білу книгу», що визначила транспортну стратегію ЄС. У числі 26 проектів, пов'язаних з розвитком транспортної інфраструктури, в «Білій книзі» відзначені 9 проектів ВСМ, на які передбачається витратити 2/3 всіх фінансових коштів, призначених для розвитку транспорту.

З 1998 року в документах, що визначають стратегію розвитку транспортної системи Європи, в якості перспективних напрямів відзначається створення ВСМ Санкт-Петербург - Москва як першої ланки російської високошвидкісної залізничної мережі і організація швидкісного руху на маршрутах Москва - Санкт-Петербург - Гельсінкі і Москва - Мінськ - Берлін, що входять до міжнародних транспортних коридорів № 2 і 9.

У поточному столітті європейські ВСМ, які є частиною міжнародних транспортних коридорів, повинні уможливити поїздки високошвидкісними наземними маршрутами по широтним, меридіональним і діагональним напрямкам від Шотландії до Сицилії і Балканського півострова, від Швеції і Норвегії до південного краю Піренейського півострова, від Москви через Мінськ і Берлін в Західну Європу і через Санкт-Петербург і Гельсінкі до Скандинавії.

Розроблені плани пов'язують ВСМ з організацією повітряного сполучення шляхом спорудження вокзалів-аеропортів, подібних чинним Шарль де Голль Руассі (Франція), Сіпхол (Нідерланди), Франкфурт-на-Майні (ФРН) та ін. Всього в Європі заплановано створення близько 40 таких пересадочних вузлів .

Спорудження тунелю під Ла-Маншем, будівництво залізничних мостових переходів через протоки Великий Бельт (Данія) і Ересунн (Данія - Швеція) так

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 30   |

само, як і спорудження кількох великих тунелів і мостів між островами Японського архіпелагу, підтвердили практичну можливість організації мереж ВСМ не тільки в межах материкових територій, а й з островами.

Основні вимоги до ВСМ визначаються її головним призначенням - здійснення масових регулярних перевезень населення великих і середніх міст. При проектуванні в будівництві і експлуатації ВСМ необхідно забезпечити:

1. Безпека пасажирів і максимальну комфортність;
2. Потреба пропускну спроможність магістралі на задану перспективу;
3. Максимальна привабливість для пасажирів;
4. Життєздатність ВСМ, в т.ч. в надзвичайних ситуаціях;
5. Мінімальний негативний вплив на навколишнє середовище.

Потрібна пропускну здатність визначається на перспективу 20-25 років з урахуванням перерозподілу пасажирів з авіа та автомобільного транспорту. Для максимального користування послугами ВСМ, її траса повинна максимально наближатися до міст. Мінімізація впливу на навколишнє середовище включає в себе:

1. Захист населення від шуму;
2. Рекультивація територій, прилеглих до траси ВСМ;
3. Обхід особливо охоронюваних територій, прилеглих до траси ВСМ;
4. Мінімізація відчужують с / г угідь;
3. Збереження умов стоку поверхневих і ґрунтових вод.

Життєздатності ВСМ, в т.ч. в надзвичайних ситуаціях (повені, землетруси, снігові лавини або замети) сприяють прийняті на стадії проектування інженерні та організаційні рішення:

- 1.Наличие можливості виходу ВШМ на звичайні ЖД (для обходу пошкодженої ділянки ВСМ, підвезення відновлювальних матеріалів);
- 2.Укладка додаткових приймально-відправних колій (як правило, на перегонах, для швидкої пересадки пасажирів з несправного поїзда на справний);

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 31   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

### 3. Створення ефективної системи снігоборотьби:

- Цілодобовий моніторинг стану сніжного покриву;
- Цілодобовий моніторинг метеоумов;
- Електрообігрівання стрілочних переводів;
- багатоярусні лісозахисні смуги;
- Примусовий спуск снігових мас в гірських районах.

4. Установка в сейсмоактивних зонах датчиків землетрусів, що передають сигнал на зупинку поїздів.

Розвиток ВШМ в окремих європейських країнах, а потім створення загальноєвропейської мережі ВСМ поставили питання про їх сумісності між собою.

Параметри, що вимагають уніфікації:

#### 1. Ширина колії.

У більшості європейських країн ширина колії 1435 мм. В Іспанії та Португалії - 1 668 мм, в Фінляндії - 1524 мм, в Україні - 1520 мм.

#### 2. Система електрифікації залізниць.

Франція і Великобританія: ~ 25 кВ, 50 Гц; = 1,5 кВ. Німеччина: ~ 15 кВ, 16 2/3 Гц. Україна: ~ 25 кВ, 50 Гц; = 3 кВ.

#### 3. Різні габарити рухомого складу.

#### 4. Різниця пасажирських платформ.

Для забезпечення сумісності ЖД Європи була створена спеціальна європейська комісія, яка розробила і затвердила серію документів з технічного сумісності ВШМ.

Основні вимоги до ВШМ повинні викладатися в нормативних документах, які є базою для подальшого проектування і будівництва, тобто конструювати ВШМ без відповідних вимог не можна.

В даний час в нашій країні розробляється нормативна база для високошвидкісного залізничного транспорту.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 32   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

До основних елементів інфраструктури ВШМ відносяться:

- 1.Трасса ВШМ (основні параметри, план і поздовжній профіль);
- 2.Земляное полотно і залізничну колію;
- 3.Система залізничної автоматики, телемеханіки та зв'язку;
- 4.Система електропостачання;
- 5.Розподільчі пункти;
- 6.Вокзали, депо, ремонтні зони [37].

## **2.2 Проблеми системи тягового електропостачання постійного струму при введенні швидкісного і великовагового руху поїздів**

Відповідно до Європейського стандарту EN 50163, прийнятим 06.03.1995, номінальною напругою в контактній мережі прийнято 3,0 кВ, максимальним робочим стабільним - 3,6 кВ і по допустимим нормам (нестабільним) - 3,9 кВ. Максимальні відхилення напруги на шинах тягової підстанції при номінальній напрузі мережі до-допустимих в межах  $3,85 \div 3,3$  кВ (550 В, 14,3%). При допустимих відхиленнях напруги живлення енергосистем (ГОСТ 13109-67) в межах  $\pm 5\%$  верхній рівень від 3,85 кВ складе 4,04 кВ, а нижній рівень від 3,3 кВ - 3,135 кВ. Таким чином, можливі (нормовані) максимальні напруги на шинах підстанцій лежать в межах від 3,135 до 4,04 кВ (18,6%).

При прийнятому в проектуванні електровозів номінальному напруги на струмоприймачі 3 кВ допускається максимальна напруга 3,9 кВ і мінімальне 2,0 кВ. Додатковими вимогами залізниць прийнятий мінімальний рівень 2,7 кВ для навантажених ділянок В результаті дослідження роботи тягових і допоміжних машин за умовами обмеження по зчепленню, по струму навантаження, по нагріванню обмоток, обмеження щодо потенційних умов на колектив-торі і по комутації під щітками прийняті тривалий найбільше напругу 3,6 кВ та тривалий найменше - 2,8 кВ. Цей діапазон напруг по відношенню до регламентованого 3,9-2,0 кВ хоча і зменшений, але від но-номінального напруги на струмоприймачі електровоза 3,0 кВ відрізняється на + 20% і -6,7%.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 33   |

З іншого боку відомо, що напруга на струмоприймачі електровозів, які перебувають на фідерної зоні, не може бути постійним і рівним 3,0 кВ навіть при наявності на зоні регулювання напруги. Тому прагнення до звуження діапазону відхилення напруги є умовою забезпечення номінального режиму тягових і допоміжних машин електровоза.

Звуження діапазону відхилення напруги на струмоприймачі електровоза забезпечується застосуванням на тягових підстанціях пристроїв автоматичного регулювання напруги, що компенсують падіння напруги на внутрішньому опорі підстанції при стабілізованих автоматических зовнішніх характеристиках.

У локомотивному господарстві цю задачу вирішують підвищенням ефективності використання діючих електровозів або шляхом створення нових більш потужних електровозів постійного струму. Водіння поїздів підвищеної маси за рахунок збільшення числа існуючих електровозів або їх секцій супроводжується значним зростанням потужності і струму, споживаючих з тягової мережі. Так, наприклад, на гірських ділянках постійного струму з підйомами 17 % при масі поїзда 5000 т три електровози ВЛ10 споживали потужність і тяговий струм, відповідно, до 15 мВт і 6,5-7 кА. На Московської дорозі на ділянці Рибне-Перово струм двох електровозів ВЛ10 з поїздом масою 10158 т досягав 3,5-4,5 кА, а напруга в контактній мережі знижувався до 2,6 кВ .

На гірській ділянці Златоуст-Кропачево Південно-Уральської залізниці дороги максимально споживаний струм чотирьох електровозів ВЛ10 двох перебуваю-кованих поїздів загальною масою 10200 т утримувався на окремих перегонах протягом тривалого часу (до 5 хв) на рівні 4800 А. При цьому напруга на струмоприймачах знижувалося до 2,5 кВ. Зниження напруги привело до збільшення часу руху на ділянці до 3 годин 28 хвилин в порівнянні з графіком часом 2 години 30 хвилин одиночного поїзда маси 6000 т з двома електровозами ВЛ10. Збільшення струмів в проводах контактної мережі в складі М120 + 2МФ100 + 2А185 призвело до значному нагрівання проводів (опускання компенсаторних

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 34   |

вантажів до 1,5 м). Навантаження живлять фідерів ряду тягових підстанцій становила понад 3700 А протягом 2 хв і більше 3000 А протягом 10 хв. В кінцевому підсумку випробування на Південно-Уральської дорозі показали, що при зниженні напруги в контактній мережі потужності електровозів не використовується, знижується швидкість руху і збільшується час ходу на ділянці.

Таким чином, на існуючих електрифікованих напрямках при водінні швидкісних і великовагових поїздів виникають обмеження пропускної здатності по пристроях електропостачання. В першу чергу це стосується вантажонапружених ділянок, електрифікованим на постійному струмі 3,0 кВ. До числа таких обмежень відноситься зниження напруги на струмоприймачі електровоза нижче допустимого для нормальної експлуатації значення 2700 на і нагрів проводів контактної мережі, до власної втрати їх механічної міцності. Зниження напруги на струмоприймачі знижує швидкість руху поїздів, а при збереженні споживаної потужності відбувається збільшення струму електровоза і втрат електричної енергії в тяговій мережі.

Крім того, різниця вихідних напруг тягових підстанцій, викликана різними значеннями їх внутрішнього опору і відхиленнями напруги мережі живлення, при наявності тягового навантаження на фідерної зоні призводять до появи "зрівняльних струмів" між підстанціями і, відповідно, додаткових втрат електричної енергії. Так, різниця миттєвих значень випрямленої напруги суміжних тягових підстанцій величиною 300-500 В викликає протікання "зрівнюючих струмів", що досягають 20-40% тягового навантаження. В результаті втрачаються переваж-вин двостороннього живлення, відбувається перерозподіл потужності, що віддається тяговими підстанціями, і додаткове збільшення струму контактної мережі у підстанції з великим вихідним напругою.

При реконструкції і модернізації залізничного транспорту передбачається підвищення швидкості руху поїздів; підвищення середовищ-ній маси поїзда; водіння на другому етапі великовагових поїздів масою 6000-8000-12000 т;

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 35   |

подовження пасажирських поїздів; підвищення потужності електровозів до і понад 9000 кВт без обмеження по силі тяги з підвищено ними швидкостями руху; зниження перевантаження тягової мережі вантажонапружених ліній.

Тому необхідність вирішення транспортної проблеми шляхом підняття швидкості і використання великовагових поїздів ставить питання про здатність системи електропостачання постійного струму 3,0 кВ виконати це завдання. Якщо технічними та економічними розрахунками доводиться, що за допомогою існуючої електричної тяги постійного струму неможливо досягти цієї важливої мети, то, природно, повинні бути використані інші системи тяги, в тому числі і системи змінного струму.

З огляду на, що в країні, так само як і на залізницях країн світу по системі постійного струму електрифіковано близько половини ліній з електричною тягою, очевидно, що необхідна реконструкція системи електричної тяги постійного струму, а не переобладнання її на систему змінного струму. Реконструкція спрямована на підвищення пропускної і провізної здатності. При цьому повинні бути максимально реалізовані переваги цієї системи з мінімальними капітальними вкладеннями [38].

### **2.3 Система керованого електропостачання для пропуску швидкісних і великовагових поїздів**

Як зазначалося, існуюча система електропостачання постійного струму 3,0 кВ накладає ряд обмежень при збільшенні транспортних по-струмів на електрифікованих ділянках залізниць.

З способів вдосконалення системи постійного струму 3,0 кВ, найбільш часто зустрічається в практиці підсилення системи електропостачання шляхом будівництва проміжних тягових підстанцій, часто призводить до невиправданих витрат, так як при пропуску деяких категорій поїздів, зокрема великовагових, швидкісних, потужності сусідніх підстанцій не використовуються. Очевидно, що в цих умовах необхідний новий технологічний процес передачі електричної енергії

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 36   |

шляхом управління перерозподілом потужності тягових підстанцій. Іншими словами, потрібно узгоджена, спільна робота сусідніх тягових підстанцій. Радикальним засобом усунення зазначених недоліків і рішення проблеми вдосконалення системи електропостачання електричної тяги постійного струму 3 кВ є створення системи керованого електропостачання. До числа основних завдань керованої системи електропостачання відносяться: регулювання напруги в контактній мережі; зведення "зрівнюючих струмів" на фідерних зонах електрифікованих ділянок до мінімальної величини; забезпечення надійного рекуперативного гальмування автоматичним зниженням напруги на шинах сусідніх тягових підстанцій при переході електровоза в режим рекуперації; обмеження допустимих струмів навантаження проводів контактної мережі за рахунок їх перерозподілу між сусідніми тяговими підстанціями.

Технічною основою для створення керованого електропостачання служить випускається з 1968 року ПО УЕТМ тягове трансформаторне обладнання з безконтактним автоматичним 20-процентним діапазону регулюванням випрямленої напруги тягових підстанцій (трансформатори ТДПУ-20000/10 (35), ТДП-16000/10 (35), ТРДП-16000/10 (35), реактори РТДП-6300/10 (35), шафи автоматичного регулювання напруги типу ШАУН). Московський електромеханічний завод (МЕЗ) для автоматичного управління шафами ШАУН з метою зміни випрямленої напруги тягових підстанцій випустив систему регулювання напруги в контактній мережі ( "Сирена"). З 2006 шафи ШАУН 5 і "Сирена" з використанням мікропроцесорної техніки випускає НВП "Електромаш". При цьому слід підкреслити, що вартість керуючих і регулюючих пристроїв незрівнянно менше, ніж будівництво додаткових підстанцій, прийнятого в якості основного способу посилення тягового електропостачання 3,0 кВ. Реконструкція системи електропостачання постійного струму шляхом використання існуючого і впровадження нового перспективного обладнання тягових підстанцій, в тому числі нових типів перетворювальних трансформаторів і

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 37   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

вольтододаткові пристроїв з безконтактним автоматичним регулюванням випрямленої напруги складають основу для створення розподіленої керованої системи електропостачання електричної тяги постійного струму. При розробці цієї системи необхідно вирішити теоретичні питання по її створенню, режиму роботи, проектування, виготовлення і експлуатації. При цьому в якості основних умов для дослідження і вибору рішень приймаються витрата електричної енергії на тягу, величини тягових струмів в проводах і втрат електричної енергії в контактній мережі, рівень напруги на струмоприймачі електровозів в режимі тяги, можливість забезпечення ефективного рекуперативного режиму, зниження "зрівнюючих струмів" в контактній мережі, зниження споживання перетворювачами з безконтактним регулюванням випрямленої напруги реактивної потужності мережі живлення, забезпечення електропостачання для пропуску швидкісних поїздів і поїздів підвищеної маси.

Іншою стороною питання, що виникла при керованому електропостачанні, є облік і вплив сусідніх фідерних зон і пов'язане з ним раціональне примусове управління потужністю паралельно працюючих тягових підстанцій при забезпеченні мінімуму втрат електричної енергії в тяговій мережі. У зв'язку з цим видається, що система електропостачання протяжної ділянки з декількома фідерними зонами є взаємозалежною по зонам системою і може бути представлена єдиною електричною ланцюгом з аналізом і використанням загальних законів теоретичних основ електротехніки. Іншими словами мова йде про розробку системи керованого електропостачання в рамках єдиного підходу до створення енергетичних керованих комплексів з мінімізацією втрат електричної енергії.

Для збереження корисної потужності електровоз при зниженні напруги змушений працювати з підвищеним струмом, що призводить до збільшення втрат напруги і потужності в тяговій мережі і, в кінцевому підсумку, до зниження пропускної спроможності електрифікованої ділянки.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 38   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

При існуючому електропостачанні електрична потужність тягових трансформаторів на підстанціях розраховується виходячи з передумови рівності напруг на сусідніх тягових підстанціях. При знаходженні поїзда між одноагрегатними тяговими підстанціями (ТП) електровозом споживається потужність від двох сусідніх ТП, також отримує енергію від ТП які знаходяться за межами ділянки між сусідніми ТП.

Можливість регулювання напругою на шинах ТП дає можливість перерозподіляти споживану потужність по системі електропостачання виходячи з техніко-економічних показників роботи системи електропостачання.

Використання моделі системи керованого електропостачання для пропуску швидкісних поїздів і поїздів підвищеної маси дозволяє проводити електричний розрахунок з обмеженням струму навантаження підстанції, забезпечити вибір діапазону регулювання напруги тягових підстанцій в залежності від довжини фідера зони. Для обмеження струму підстанції на постійному рівні зі збільшенням довжини фідера зони необхідно підвищена сить різниці напруги і, відповідно, діапазон регулювання напруги регулюючими пристроями ТП.

При схемі розподіленого живлення напруги в контактну мережу подається від одноагрегатних тягових підстанцій на відміну від типових двох-трьох агрегатних тягових підстанцій при зосередженому живленні.

Розташування потужних типових підстанцій приймається, як правило, на залізничних станціях, а при розподіленому харчуванні можливе розташування одноагрегатних тягових підстанцій на перегонах.

Суттєва перевага розподіленого живлення перед схемою зосередженого електропостачання полягає в забезпеченні більшої надійності електропостачання. Вихід з роботи однієї двох-трьох агрегатної тягової підстанцій веде до зниження безперебійності електропостачання і до обмеження руху поїздів. Відключення одноагрегатної підстанцій не викликає помітного обмеження електропостачання,

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 39   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

так як резервування здійснюється за рахунок сусідніх близько розташованих підстанцій.

При розподіленому живленні із агрегатами без автоматичного регулювання напруги забезпечення резервування проводиться за рахунок введення надлишку потужності кожної підстанції, що в кінцевому підсумку призводить до не використання встановлених на підстанціях потужностей.

Такий недолік може бути усунутий використанням керованого електропостачання, розглянутого в розділах коли застосовується не тільки регулювання напруги на кожній підстанції, а й автоматичне, примусове перерозподіл потужностей підстанцій за рахунок зміни рівнів напруги сусідніх пунктах живлення, забезпечуючи при цьому живлення значною навантаження електричного рухомого складу від декількох підстанцій.

Введення керованого електропостачання при розподіленому в порівнянні з нерегульованим електропостачанням може привести до збільшення довжини фідерних зон.

Живлення тягових підстанцій при розподіленому живленні можна здійснити від трифазної ЛЕП-35 по окремій трасі або по опорах контактної мережі, а також по ЛЕП-110 кВ [39].

Слід зазначити, що цільовою функцією всіх регуляторів залишалася стабілізація напруги на шинах тягових підстанцій або на постах секціонування.

Створені за останні десятиліття сучасні керовані перетворювачі, мікропроцесорні системи управління, надійні радіоканали зв'язку дозволяють вирішувати завдання стабілізації напруги безпосередньо на струмоприймачах рухомого складу за рахунок підлеглого регулювання напруги на шинах тягових підстанцій.

Центральним питанням при побудові такої системи є розробка алгоритмів і принципів побудови пристрою управління, що забезпечує стабільність напруги на струмоприймачах поїздів в умовах різко змінного навантаження. Наукові основи

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 40   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

такої системи повинні базуватися на методах аналізу і синтезу керуючих впливів із застосуванням математичного моделювання.

Ділянка тягового електропостачання при взаємодії з рухомим складом являє собою складну нестационарну динамічну систему з випадковим характером впливів, що обурюють. Будемо розглядати міжпідстанційну зону як елементарну підсистему.

Об'єктом управління в кожній підсистемі є тягова мережа, керуючим пристроєм – керуючий комп'ютер, датчики, канал зв'язку, керовані випрямні установки тягових підстанцій. Рівноваги вплив на тягову мережу надає рухомий склад і навколишнє середовище.

Стратегічним завданням управління є забезпечення оптимальних рівнів напруги на струмоприймачах поїздів всієї ділянки, що вимагає посилення.

Тактичне завдання управління полягає в знаходженні закону зміни напруги на шинах суміжних тягових підстанцій, забезпечує необхідний рівень напруги на струмоприймачах рухомого складу.

Для швидкісних ділянок при русі поїздів зі швидкостями 200 ... 250 км / год і інтервалах попутного проходження більше 10 хвилин достатньо вирішити тактичну задачу при переміщенні поїздів з однієї міжпідстанційної зони на іншу, при цьому можливі наступні способи управління:

- стабілізація напруги на шинах суміжних тягових підстанцій;
- стабілізація напруги на постах секціонування;
- стабілізація напруги на струмоприймачах поїздів.

При побудові системи автоматичного керування напругою на етапі проектування необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз ефективності різних способів управління;
- здійснити синтез автоматичного регулятора для прийнятого способу управління;

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 41   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

– розробити технічні засоби для реалізації системи автоматичного управління.

При порівняльній оцінці ефективності способів управління слід мати на увазі, що тягові розрахунки виконуються для напруги на струмоприймачі рухомого складу В, тому систему управління, стабілізуючу напругу на струмоприймачі рухомого складу на рівні, близькому до розрахункового, слід вважати найбільш ефективною, забезпечує графік руху поїздів з розрахунковим значенням потужності і мінімальними сумарними втратами в контактній мережі і рухомому складі. У цьому сенсі критерієм ефективності є стабільність напруги на струмоприймачі рухомого складу, що характеризується середньоквадратичним відхиленням і коефіцієнтом варіації. При побудові математичної моделі ключове значення має вибір цільової функції [37].

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 42   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

### 3. РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ КЕРОВАНОЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

#### 3.1 Постановка задачі розрахунку

Приймаємо, що реалізація керованого електропостачання здійснюється за допомогою одноагрегатних тягових підстанцій, для яких є можливим протікання струму між різними міжпідстанційними зонами.

Концепція розподіленого живлення з керованими тяговими підстанціями (далі ТП) передбачає підсилення впливу явища зрівнюючих струмів та ускладнення розрахунку цих струмів через наявність більшої кількості джерел з різною напругою на шинах ТП.

Розрахунок струмів фідерів ТП пропонується виконуватися в три етапи:

1. Розрахунок частини зрівнюючих струмів без навантаження на розглянутій частині електрифікованої ділянки;
2. Розрахунок струмів від навантаження на ділянці;
3. Накладання цих струмів дає існуючі струми в контактній мережі.

В цьому розділі визначимо частини зрівнюючих струмів без навантаження на розглянутій частині електрифікованої ділянки які виникають від різниці напруг на ТП, за умов, що на постійному струмі випрямляч керований.

Для реалізації першого етапу рисунок 2.1 показує схему живлення ділянки, навантаження – електровоз відсутній.

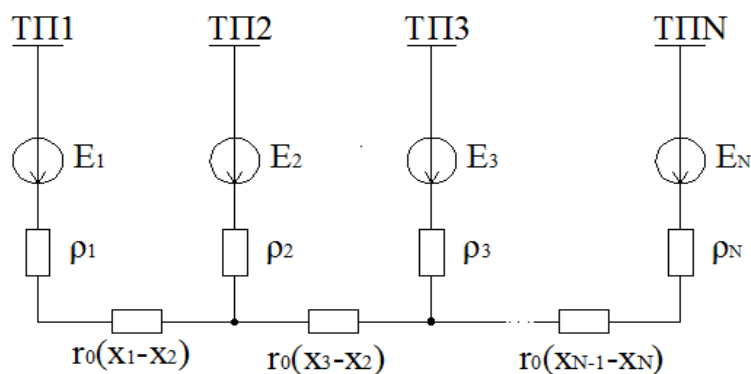


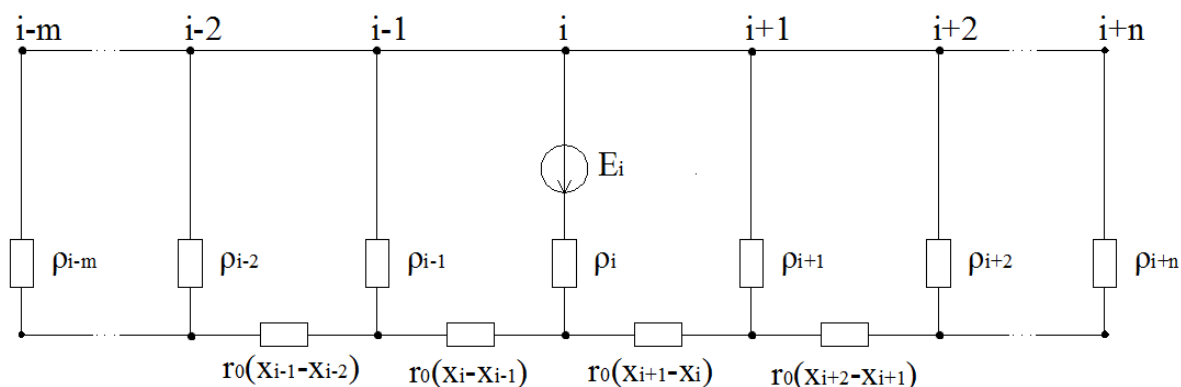
Рисунок 3.1 – Принципова схема живлення розподіленої системи

Щоб розрахувати часткові зрівнюючі струми без навантаження необхідно визначити які струму протікають від кожного ТП за заданою конфігурацією системи тягового електропостачання та значенням ЕРС відповідного ТП.

### 3.2 Розрахунок на основі методу накладання

#### 3.2.1 Розрахункова схема

Для вирішення цього завдання скористаємося методом накладання. Суть метода накладання в тому, що струм у будь-якій вітці кола, створюваний кількома джерелами, які діють у даному колі, дорівнює алгебраїчній сумі струмів, створюваних кожним з цих джерел окремо. Скориставшись цим методом для розрахунку візьмемо деякий  $i$ -тий ТП. Тоді розрахункова схема буде мати вигляд рисунок 3.2:



$\rho_i$  - внутрішній опір одноагрегатної ТП;  $E_i$  - величина електрорушійної сили  $i$ -тої одноагрегатної ТП;  $m$  - кількість ТП зліва від  $i$ -тої одноагрегатної ТП;  $n$  - кількість ТП зліва від  $i$ -тої одноагрегатної ТП;  $r_0$  - опір 1 км контактної мережі;  $x_i$  - координата  $i$ -тої одноагрегатної ТП.

Рисунок 3.2 – Розрахункова схема для  $i$ -тої одноагрегатної ТП

Для вирішення методом накладання нам необхідно розрахувати від  $i$ -тої одноагрегатної ТП струми в контактній мережі без наявності навантаження. Для визначення струму  $I_i$  використаємо закон Ома:

$$I_i = \frac{E_i}{r_{ekv}}, \quad (3.1)$$

де  $r_{ekv}$  - еквівалентний опір до стуму  $i$ -тої одноагрегатної ТП.

### 3.2.2 Визначення еквівалентного опору, опору зліва та праворуч схеми

Для визначення  $r_{ekv}$  необхідно ліву частину розрахункової схеми відносно  $i$ -того ТП звести до єдиного опору та праву частину звести до єдиного опору. Ці величини приймемо як  $r_L$  та  $r_R$  відповідно. Тоді розрахункова схема має вигляд як на рисунку 3.3:

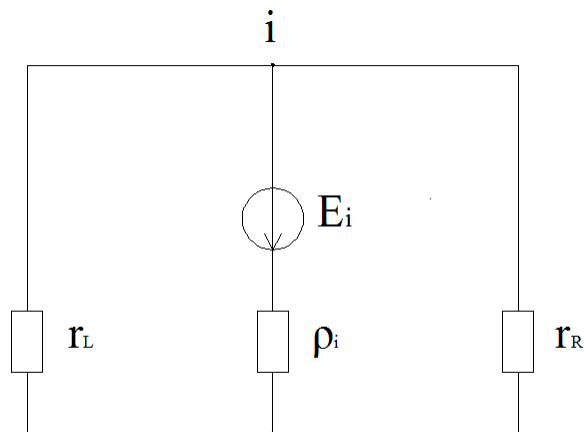


Рисунок 3.3 – Розрахункова схема для визначення еквівалентного опору

Розрахунок  $r_L$  та  $r_R$  проводиться циклічно послідовно та паралельних з'єднань. Етапи циклу для розрахунку  $r_L$ :

1. Умова розрахунку  $r_L \in i \neq 1$ , якщо умова виконана то першою дією для розрахунку  $r_L$  завжди буде послідовне згортання  $\rho_1$  - внутрішній опір першого ТП та опір контактної мережі першої ділянки  $r_1$ , який в свою чергу визначається по формулі:

$$r_1 = r_0 \cdot (x_2 - x_1), \quad (3.2)$$

$$r_{Lekv_1} = r_1 + \rho_1, \quad (3.3)$$

Цей етап розрахунку виконується лише раз при складанні  $\rho_1$  та  $r_1$

2. Наступною дією стане паралельне складання отриманого результату з  $\rho_2$  - внутрішній опір другого ТП

$$r_{Lekv_2} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{r_{Lekv_1}}}, \quad (3.4)$$

3. Наступною дією стане послідовне складання вже отриманого результату з  $r_2$  - опором контактної мережі другої ділянки, який розраховується по аналогії з  $r_1$

$$r_{Lekv_3} = r_2 + r_{Lekv_2}, \quad (3.5)$$

Далі циклічно виконуються дії 2 та 3 до моменту коли пункт 2 виконується зі складанням  $r_{i-1}$  елемента, ця дія стає кінцевою і результат цієї дії буде дорівнювати значенню  $r_L(i)$ .

За аналогією розрахуємо  $r_R$  тільки починаючи з останнього ТП, етапи циклу для розрахунку  $r_R$ :

1. Умова розрахунку  $r_R \in i \neq N$ , де  $N$  – кількість ТП на ділянці, якщо умова виконана то першою дією для розрахунку  $r_R$  завжди буде послідовне згортання  $\rho_{i-n}$  - внутрішній опір останнього ТП та опір контактної мережі ділянки  $r_{i-n}$ , який в свою чергу визначається по формулі:

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 46   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

$$r_{i-n} = r_0 \cdot (x_{i-n} - x_{i-n+1}), \quad (3.6)$$

$$r_{Rekv_1} = r_{N-1} + \rho_N, \quad (3.7)$$

Цей етап розрахунку виконується лише раз при складанні  $r_{N-1}$  та  $\rho_N$

2. Наступною дією стане паралельне складання отриманого результату з  $\rho_{N-1}$  - внутрішній опір ТП

$$r_{Rekv_2} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{N-1}} + \frac{1}{r_{Rekv_1}}}, \quad (3.8)$$

3. Наступною дією стане послідовне складання вже отриманого результату з  $r_{N-2}$  - опором контактної мережі

$$r_{Rekv_3} = r_{N-2} + r_{Rekv_2}, \quad (3.9)$$

Далі циклічно виконуються дії 2 та 3 до моменту коли пункт 2 виконується зі складанням елемента  $r_i$ , ця дія стає кінцевою і результат цієї дії буде дорівнювати значенню  $r_R(i)$ .

В залежності від  $i$  визначаємо  $r_{ekv}$  за формулою:

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 47   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

$$r_{ekv}(i) = \begin{cases} \rho_i + r_L(i), & i = N; \\ \rho_i + r_R(i), & i = 1 \\ \rho_i + \frac{1}{\frac{1}{r_R(i)} + \frac{1}{r_L(i)}}, & (i \neq 1) \cdot (i \neq N) \end{cases}, \quad (3.10)$$

### 3.2.3 Визначення струму в контактній мережі за відсутності навантаження

Далі за формулою (3.1) визначимо  $I_i$  - струм від  $i$ -тої одноагрегатної ТП.

Для розрахунку часткових зрівнюючих струмів в контактній мережі введемо поняття  $I_{kL_j}$  та  $I_{kR_j}$ , де  $j$  – ділянка контактної мережі від 1 до  $n-1$ . Фізичний зміст цих струмів – показання значення струму протікає від  $i$ -тої ЕДС по  $j$ -тим ділянкам контактної мережі без навантаження. Напрямок протікання  $I_{kL_j}$  приймемо справа ліворуч, а напрям протікання  $I_{kR_j}$  зліва праворуч, так як показано на рисунку 3.4:

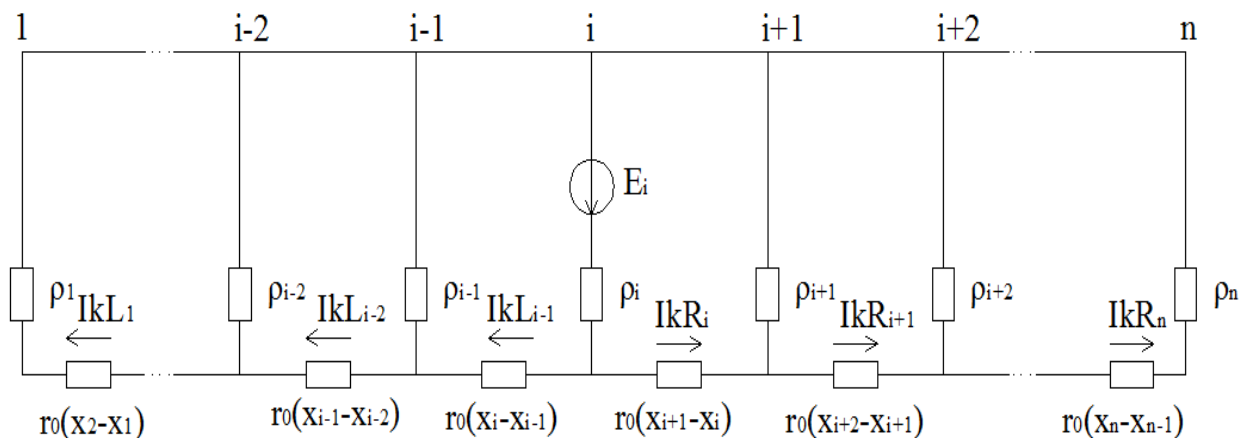


Рисунок 3.4 – Струми в контактній мережі від  $i$ -тої одно агрегатної ТП

Розрахунок  $I_{kL_j}$  та  $I_{kR_j}$  слід починати з визначення  $I_{kLi-1}$  та  $I_{kRi}$ . Так визначення струмів  $I_{kL_j}$  проводиться в два етапи:

1) Визначення  $I_{kL_{i-1}}$ , виконується першою дією та тільки один раз в розрахунку за формулою:

$$I_{kL_{i-1}} = \begin{cases} I_i \cdot \frac{r_R(i)}{r_R(i) + r_L(i)}, & i \neq N \\ I_i, & i = N \end{cases}, \quad (3.11)$$

2) Визначення значення  $I_{kL_{i-2}}$ , використовуючи формули розкиду за формулою:

$$I_{kL_{i-2}} = I_{kL_{i-1}} \cdot \frac{\rho_{i-1}}{\rho_{i-1} + r_L(i-1)}, \quad (3.12)$$

Так дія 2 за формулою (3.12) виконується до розрахунку  $I_{kL_1}$ , з кожною дією значення  $j$  зменшується на одиницю як  $i$  індекс при  $\rho$  та зменшується на одиницю абсцис в залежності  $r_L$ .

Розрахунок  $I_{kR_j}$  аналогічно  $I_{kL_j}$  в два етапи:

1. Визначення  $I_{kL_{i-1}}$ , виконується першою дією та тільки один раз в розрахунку формулою:

$$I_{kR_i} = \begin{cases} I_i \cdot \frac{r_L(i)}{r_R(i) + r_L(i)}, & i \neq 1 \\ I_i, & i = 1 \end{cases}, \quad (3.13)$$

2. Визначення значення  $I_{kR_{i+1}}$ , використовуючи формули розкиду формулою:

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 49   |

$$I_{kR_{i+1}} = I_{kR_i} \cdot \frac{\rho_{i+1}}{\rho_{i+1} + r_R(i+1)}, \quad (3.14)$$

Так дія 2 формулою (3.14), виконується до розрахунку  $I_{kR_n}$ , з кожною дією значення  $j$  збільшується на одиницю як  $i$  індекс при  $\rho$  та збільшується на одиницю абсцис в залежності  $r_R$ .

Результатом розрахунком є значення струмів в контактній мережі  $I_{kL_j}$  та  $I_{kR_j}$ , які можна показати у вигляді матриць з кількість стовпців, що відповідає  $N - 1$ , та одним рядом, покажемо це в табл. 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1 - **Значення**  $I_{kL_j}$

|            |     |                |            |     |     |     |
|------------|-----|----------------|------------|-----|-----|-----|
| 1          | ... | i-1            | i          | i+1 | ... | n-1 |
| $I_{kL_1}$ | ... | $I_{kL_{i-1}}$ | $I_{kL_i}$ | 0   | ... | 0   |

Таблиця 3.2 - **Значення**  $I_{kR_j}$

|   |     |     |            |                |     |            |
|---|-----|-----|------------|----------------|-----|------------|
| 1 | ... | i-1 | i          | i+1            | ... | n-1        |
| 0 | ... | 0   | $I_{kR_i}$ | $I_{kR_{i+1}}$ | ... | $I_{kR_n}$ |

Розрахунок  $I_{kL_j}$  та  $I_{kR_j}$  виконується відносно кожного ТП і результати цих розрахунків можна звести до матриці з кількість стовпців якої буде дорівнювати  $j$ , а кількість рядків буде дорівнювати  $N$ , покажемо це в табл. 3.3 та 3.4.

Таблиця 3.3 – Значення  $I_{kL_j}$  після розрахунку відносно всіх ТП

|     | 1          | 2          | ... | j-1        | j          |
|-----|------------|------------|-----|------------|------------|
| 1   | 0          | 0          | ... | 0          | 0          |
| 2   | $I_{kL_j}$ |            | ... |            |            |
| ... | ...        | ...        | ... | ...        | ...        |
| N-2 | $I_{kL_j}$ | $I_{kL_j}$ | ... | 0          | 0          |
| N-1 | $I_{kL_j}$ | $I_{kL_j}$ | ... | $I_{kL_j}$ | 0          |
| N   | $I_{kL_j}$ | $I_{kL_j}$ | ... | $I_{kL_j}$ | $I_{kL_j}$ |

Таблиця 3.4 – Значення  $I_{kR_j}$  після розрахунку відносно всіх ТП

|     | 1          | 2          | ... | j-1        | J          |
|-----|------------|------------|-----|------------|------------|
| 1   | $I_{kR_j}$ | $I_{kR_j}$ | ... | $I_{kR_j}$ | $I_{kR_j}$ |
| 2   | 0          | $I_{kR_j}$ | ... | $I_{kR_j}$ | $I_{kR_j}$ |
| ... | ...        | ...        | ... | ...        | ...        |
| N-2 | 0          | 0          | ... | $I_{kR_j}$ | $I_{kR_j}$ |
| N-1 | 0          | 0          | ... | 0          | $I_{kR_j}$ |
| N   | 0          | 0          | ... | 0          | 0          |

За відомою методологією методу накладання визначимо значення струмів в контактній мережі при відсутності навантаження, прийнявши додатній напрямок протікання струму  $I_{kR_j}$ , як показано на малюнку 3.4, розрахунок вковуємо за формулою:

$$I_{k_j} = I_{kR_j} - I_{kL_j}, \quad (3.15)$$

Результатом розрахунком є значення струмів в контактній мережі  $I_{k_j}$ , які можна показати у вигляді матриці з кількість стовпців, що відповідає  $N-1$ , та одним рядом, покажемо це в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Значення струму в контактній мережі  $I_{k_j}$

|           |           |     |               |               |
|-----------|-----------|-----|---------------|---------------|
| 1         | 2         | ... | $N-2$         | $N-1$         |
| $I_{k_1}$ | $I_{k_2}$ | ... | $I_{k_{n-2}}$ | $I_{k_{n-1}}$ |

### 3.3 Приклад розрахунку розподіленої системи

#### 3.3.1 Вихідні дані

Для прикладу розрахуємо ділянку з параметрами:

$S = 40$  км,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = \rho_5 = 0,14$  Ом,  $N = 5$ ,  $r_0 = 0,05$  Ом.

ТП на ділянці розміtimo рівномірно через кожні 10 км. так там як показано на рисунку 3.5:

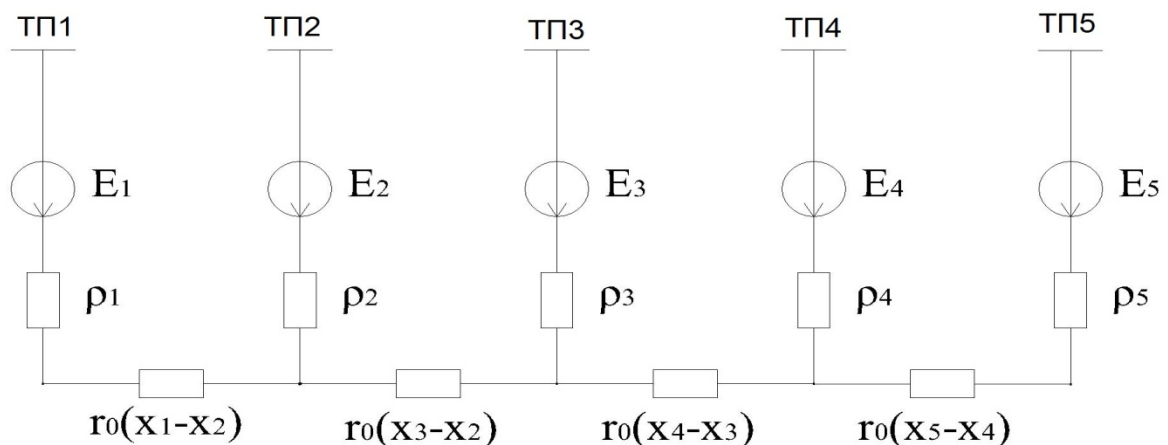


Рисунок 3.5 – Розподілена система з кількістю одно агрегатних ТП рівному п'яти

Для наглядності роботи методології розрахуємо схему за двома варіантами: зі встановленим однаковим значенням ЕРС на кожному ТП та встановленим різним значенням ЕРС на кожному ТП.

Варіант №1 вектор значення ЕРС має вигляд як на рисунку 3.6:

$$E := \begin{pmatrix} 3300 \\ 3300 \\ 3300 \\ 3300 \\ 3300 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.6 – ЕРС тягових підстанцій першого варіанту розрахунку

Варіант №2 вектор значення ЕРС тягових підстанцій має вигляд як на рисунку 3.7:

$$E := \begin{pmatrix} 3500 \\ 3450 \\ 3400 \\ 3350 \\ 3300 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.7 – ЕРС тягових підстанцій другого варіанту розрахунку

Другий варіант розрахунку наближений до умов керованого розподіленого електропостачання и повинен містити зрівнюючі струми, перший варіант не повинен містити зрівнюючі струмів.

### 3.3.2 Розрахунок схеми, визначення еквівалентних опорів

Є всі необхідні вихідні дані для розрахунку схеми. Першим етапом є визначення  $r_L$  та  $r_R$ . Для прикладу визначимо опори відносно  $i = 3$

Етапи циклу для розрахунку  $r_L$ :

1. Умова розрахунку  $r_L \in i \neq 1$ , якщо умова виконана то першою дією для розрахунку  $r_L$  завжди буде послідовне згортання  $\rho_1$  – внутрішній опір першого ТП та опір контактної мережі першої ділянки  $r_1$ , який в свою чергу визначається по формулі (3.2):

$$r_1 = r_0 \cdot (x_2 - x_1) = 0,05 \cdot (10 - 0) = 0,5, \text{ Ом}$$

Перша дія як за формулою (3.3):

$$r_{Lekv_1} = r_1 + \rho_1 = 0,5 + 0,14 = 0,64, \text{ Ом}$$

Цей етап розрахунку виконується лише раз при складанні  $\rho_1$  та  $r_1$

2. Наступною дією стане паралельне складання отриманого результату з  $\rho_2$  – внутрішній опір другого ТП формулою (3.4):

$$r_{Lekv_2} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{r_{Rekv_1}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,14} + \frac{1}{0,64}} = 0,1149, \text{ Ом}$$

3. Наступною дією стане послідовне складання вже отриманого результату з  $r_2$  – опором контактної мережі другої ділянки, який розраховується по аналогії з  $r_1$  формулою (3.5):

$$r_{Lekv_3} = r_2 + r_{Rekv_2} = 0,5 + 0,1149 = 0,6149, \text{ Ом}$$

$$r_L(3) = r_{Lekv_3}$$

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 54   |

Розрахунок  $r_L$  в моделі MathCAD покажемо на рис 3.8:

$$R_L(i) := \begin{cases} \text{for } j \in 1..i-1 & \text{if } i > 1 \\ \left| \begin{array}{l} R_L \leftarrow p_j + r_j \quad \text{if } j = 1 \\ R_L \leftarrow R_L + r_j \quad \text{otherwise} \\ R_L \leftarrow \frac{R_L \cdot p_{j+1}}{R_L + p_{j+1}} \quad \text{if } j < i-1 \end{array} \right. \\ R_L \end{cases}$$

$$R_L(3) = 0.6149$$

Рисунок 3.8 – Розрахунок  $r_L$  в моделі MathCAD

За аналогією розрахуємо  $r_R$  тільки починаючи з останнього ТП та для  $i = 2$ , етапи циклу для розрахунку  $r_R$ :

1. Визначимо опір ділянки КМ та перший еквівалентний опір за формулою (3.6):

$$r_4 = r_0 \cdot (x_5 - x_4) = 0,05 \cdot (50 - 40) = 0,5, \text{ Ом}$$

Перша дія як за формулою (3.7):

$$r_{Rekv_1} = r_4 + \rho_5 = 0,5 + 0,14 = 0,64, \text{ Ом}$$

Цей етап розрахунку виконується лише раз при складанні  $r_{N-1}$  та  $\rho_N$

2. Наступною дією стане паралельне складання отриманого результату з  $\rho_{N-1}$  – внутрішній опір ТП за формулою (3.8):

$$r_{Rekv_2} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_4} + \frac{1}{r_{Rekv_1}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,14} + \frac{1}{0,64}} = 0,1149, \text{ Ом}$$

3. Наступною дією стане послідовне складання вже отриманого результату з  $r_{N-2}$  – опором контактної мережі за формулою (3.9):

$$r_{Rekv_3} = r_3 + r_{Rekv_2} = 0,5 + 0,1149 = 0,6149, \text{ Ом}$$

4. Наступною дією стане паралельне складання отриманого результату з  $\rho_{N-2}$  – внутрішній опір ТП за формулою (3.8):

$$r_{Rekv_4} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_3} + \frac{1}{r_{Rekv_3}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,14} + \frac{1}{0,6149}} = 0,1141, \text{ Ом}$$

5. Наступною дією стане послідовне складання вже отриманого результату з  $r_{N-3}$  – опором контактної мережі за формулою (3.9):

$$r_{Rekv_5} = r_2 + r_{Rekv_4} = 0,5 + 0,1141 = 0,6141 \text{ Ом}$$

Далі циклічно виконуються дії 2 та 3 до моменту коли пункт 2 виконується зі складанням елемента  $r_i$ , ця дія стає кінцевою і результат цієї дії буде дорівнювати значенню  $r_R(2) = r_{Rekv_5}$

$$R_R(i) := \begin{cases} \text{for } j \in \text{rows}(p) \dots i + 1 & \text{if } i < \text{rows}(p) \\ \left| \begin{array}{l} R_R \leftarrow p_j + r_{j-1} \text{ if } j = \text{rows}(p) \\ R_R \leftarrow R_R + r_{j-1} \text{ otherwise} \\ R_R \leftarrow \frac{R_R \cdot p_{j-1}}{R_R + p_{j-1}} \text{ if } j > i + 1 \end{array} \right. \\ R_R \end{cases} \quad R_R(2) = 0.614035$$

Рисунок 3.9 – Розрахунок  $r_R$  в моделі MathCAD

Аналогічно  $r_L$  та  $r_R$  при інших значеннях  $i$ .

Для прикладу визначимо еквівалентний опір  $r_{ekv}$  відносно  $i=3$  за формулою (3.10):

$$r_{ekv}(3) = \rho_3 + \frac{1}{\frac{1}{r_R(3)} + \frac{1}{r_L(3)}} = 0,14 + \frac{1}{\frac{1}{0,6149} + \frac{1}{0,6149}} = 0,4474, \text{ Ом}$$

Розрахунок  $r_{ekv}$  в моделі MathCAD покажемо на рис. 3.10:

$$\begin{aligned} R(i) &:= \begin{cases} R \leftarrow p_i + R_R(i) & \text{if } i = 1 \\ R \leftarrow p_i + R_L(i) & \text{if } i = \text{rows}(p) \\ R \leftarrow p_i + \frac{1}{\frac{1}{R_L(i)} + \frac{1}{R_R(i)}} & \text{if } (i > 1) \cdot (i < \text{rows}(p)) \end{cases} \\ R & \qquad \qquad \qquad R(3) = 0.447436 \end{aligned}$$

Рисунок 3.10 – Розрахунок  $r_{ekv}$  в моделі MathCAD

Аналогічно  $r_{ekv}$  при інших значеннях  $i$ .

Далі розрахунок для двох варіантів відрізняється, тому розрахуємо їх окремо. Розрахуємо перший варіант.

### 3.3.3 Розрахунок струмів в контактній мережі при однаковому значенні рівня напруги на шина ТП

Далі за формулою (3.1) визначимо  $I_i$  - струм від  $i$ -тої ЕРС.

$$I_3 = \frac{E_3}{r_{ekv}(3)} = \frac{3300}{0,4474} = 7375,95, \text{ А}$$

Далі розрахунок  $I_{kL_j}$  та  $I_{kR_j}$ . Так визначення струмів  $I_{kL_j}$  проводиться в два етапи:

- 1) Визначення  $I_{kL_{i-1}}$ , виконується першою дією та тільки один раз в розрахунку за формулою (3.11):

$$I_{kL_2} = I_3 \cdot \frac{r_R(3)}{r_R(3) + r_L(3)} = 7375,95 \cdot \frac{0,6149}{0,6149 + 0,6149} = 3687,975, \text{ A}$$

- 2) Визначення значення  $I_{kL_{i-2}}$  за формулою (3.12), використовуючи формули розкиду:

$$I_{kL_1} = I_{kL_2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_2 + r_L(3-1)} = 3687,975 \cdot \frac{0,14}{0,14 + 0,64} = 688,42, \text{ A}$$

Рисунок з моделі в MathCAD на рисунку 3.11:

$$\begin{aligned}
 I\_L(i) := & \left| \begin{array}{l} I_{1, \text{rows}(p)-1} \leftarrow 0 \\ \text{If} \leftarrow \frac{E_i}{R(i)} \\ \text{for } k \in i-1..1 \quad \text{if } i > 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} I_{1,k} \leftarrow \text{If} \cdot \frac{R_R(i)}{R_L(i) + R_R(i)} \quad \text{if } (k = i-1) \cdot (i \neq \text{rows}(p)) \\ I_{1,k} \leftarrow \text{If} \quad \text{if } (k = i-1) \cdot (i = \text{rows}(p)) \\ I_{1,k} \leftarrow I_{1,k+1} \cdot \frac{p_{k+1}}{R_L(k+1) + p_{k+1}} \quad \text{if } (k \neq i-1) \end{array} \right. \\ I \end{array} \right. \\
 I\_L(3) = & (661.891117 \quad 3687.679083 \quad 0 \quad 0)
 \end{aligned}$$

Рисунок 3.11 – Розрахунок  $I_{kL}$  в моделі MathCAD

Похибка у розрахунку викликана більшою точністю пакету MathCAD.

За допомогою пакету MathCAD можна визначити  $I_{kL}$  для кожної ділянки КМ та для кожного значення  $i$  як це показано на рисунку 3.12:

$$I\_K\_L := \left( \begin{array}{l} I_k \leftarrow I\_L(1) \\ \text{for } i \in 2.. \text{rows}(p) \\ \quad I_k \leftarrow \text{stack}(I_k, I\_L(i)) \\ I_k \end{array} \right)$$

$$I\_K\_L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3564.023028 & 0 & 0 & 0 \\ 661.891117 & 3687.679083 & 0 & 0 \\ 123.656055 & 688.94088 & 3714.728845 & 0 \\ 27.049762 & 150.705817 & 812.596935 & 4376.619963 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.12 – Розрахунок всіх значень  $I_{kL}$  в моделі MathCAD

Стовпці – ділянки КМ, рядки – значення  $i$ .

За допомогою пакету MathCAD можна визначити  $I_{kL}$  для кожної ділянки КМ при накладанні значень відповідно до методу накладання, як показано на рис. 3.13:

$$I\_k\_sum\_L := \left( \begin{array}{l} \text{for } i \in 1.. \text{rows}(p) - 1 \\ \quad \text{sum} \leftarrow 0 \\ \quad \text{for } j \in 1.. \text{rows}(p) \\ \quad \quad \text{sum} \leftarrow \text{sum} + I\_K\_L_{j,i} \\ \quad \text{res}_{1,i} \leftarrow \text{sum} \\ \text{res} \end{array} \right)$$

$$I\_k\_sum\_L = (4376.62 \quad 4527.33 \quad 4527.33 \quad 4376.62)$$

Рисунок 3.13 – Розрахунок суми  $I_{kL}$  в моделі MathCAD

Розрахунок  $I_{kR_j}$  аналогічно  $I_{kL_j}$  в два етапи:

1) Визначення  $I_{kR_i}$ :

$$I_{kR_i} = I_3 \cdot \frac{r_L(3)}{r_R(3) + r_L(3)} = 7375,95 \cdot \frac{0,6149}{0,6149 + 0,6149} = 3687,975, \text{ A}$$

2) Визначення значення  $I_{kR_{i+1}}$  за допомогою формул розкиду:

$$I_{kR_4} = I_{kR_3} \cdot \frac{\rho_4}{\rho_4 + r_L(3+1)} = 3687,975 \cdot \frac{0,14}{0,14 + 0,64} = 688,42, \text{ A}$$

Рисунок з моделі в MathCAD покажемо на рис. 3.14:

$$\begin{aligned}
 I\_R(i) := & \left| \begin{array}{l} I_{1, \text{rows}(p)-1} \leftarrow 0 \\ \text{If} \leftarrow \frac{E_i}{R(i)} \\ \text{for } k \in i.. \text{rows}(p) - 1 \quad \text{if } i < \text{rows}(p) \\ \left| \begin{array}{l} I_{1,k} \leftarrow \text{If} \cdot \frac{R_L(i)}{R_R(i) + R_L(i)} \quad \text{if } (k = i) \cdot (i > 1) \\ I_{1,k} \leftarrow \text{If} \quad \text{if } (k = i) \cdot (i = 1) \\ I_{1,k} \leftarrow I_{1,k-1} \cdot \frac{P_k}{R_R(k) + P_k} \quad \text{if } k \neq i \end{array} \right. \\ I \end{array} \right. \\
 I\_R(3) = & (0 \quad 0 \quad 3687.68 \quad 661.89)
 \end{aligned}$$

Рисунок 3.14 – Розрахунок  $I_{kR}$  в моделі MathCAD

Похибка у розрахунку викликана більшою точністю MathCAD.

За допомогою пакету MathCAD можна визначити  $I_{kR}$  для кожної ділянки КМ та для кожного значення  $i$  покажемо на рис. 3.15:

$$I\_K\_R := \begin{array}{l} | \text{Ik} \leftarrow I\_R(1) \\ | \text{for } i \in 2.. \text{rows}(p) \\ | \quad \text{Ik} \leftarrow \text{stack}(\text{Ik}, I\_R(i)) \\ | \text{Ik} \end{array}$$

$$I\_K\_R = \begin{pmatrix} 4376.619963 & 812.596935 & 150.705817 & 27.049762 \\ 0 & 3714.728845 & 688.94088 & 123.656055 \\ 0 & 0 & 3687.679083 & 661.891117 \\ 0 & 0 & 0 & 3564.023028 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.15 – Розрахунок всіх значень від  $i$ -тих ТП  $I_{kR_j}$  в моделі MathCAD

Де стовпці ділянки КМ, рядки значення  $i$ .

За допомогою пакету MathCAD можна визначити  $I_{kL}$  для кожної ділянки КМ при накладанні значень відповідно до методу накладання зображено на рис. 2.16:

$$I\_k\_sum\_R := \begin{array}{l} | \text{for } i \in 1.. \text{rows}(p) - 1 \\ | \quad \text{sum} \leftarrow 0 \\ | \quad \text{for } j \in 1.. \text{rows}(p) \\ | \quad \quad \text{sum} \leftarrow \text{sum} + I\_K\_R_{j,i} \\ | \quad \text{res}_{1,i} \leftarrow \text{sum} \\ | \text{res} \end{array}$$

$$I\_k\_sum\_R = (4376.62 \quad 4527.326 \quad 4527.326 \quad 4376.62)$$

Рисунок 3.16 – Розрахунок суми всіх значень  $I_{kR_j}$  в моделі MathCAD

За допомогою пакету MathCAD та відомою методологією методу накладання визначимо значення струмів в контактній мережі при відсутності навантаження, прийнявши додатній напрямок протікання струму  $I_{kR_j}$ :

$$I\_k := -I\_k\_sum\_L + I\_k\_sum\_R$$

$$I\_k = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

Рисунок 3.16 – Розрахунок  $I_k$  в моделі MathCAD

### 3.3.4 Розрахунок струмів в контактній мережі при різному значенні рівня напруги на шина ТП – другий варіант розрахунку

$$I_3 = \frac{E_3}{r_{ekv}(3)} = \frac{3400}{0,4474} = 7599,4635, \text{ A}$$

Далі розрахунок  $I_{kL_j}$  та  $I_{kR_j}$  згідно формул (3.11) – (3.14).

Так визначення струмів  $I_{kL_j}$  проводиться в два етапи:

- 3) Визначення  $I_{kL_{i-1}}$ , виконується першою дією за формулою (3.11) та тільки один раз в розрахунку:

$$I_{kL_2} = I_3 \cdot \frac{r_R(3)}{r_R(3) + r_L(3)} = 7599,4635 \cdot \frac{0,6149}{0,6149 + 0,6149} = 3799,732, \text{ A}$$

- 4) Визначення значення  $I_{kL_{i-2}}$  за допомогою формули (2.12) використовуючи формули розкиду:

$$I_{kL_1} = I_{kL_2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_2 + r_L(3-1)} = 3799,7317 \cdot \frac{0,14}{0,14 + 0,64} = 709,283, \text{ A}$$

Розрахунок в моделі MathCAD зображений на рис. 3.17:

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 62   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

$$I\_L(i) := \left| \begin{array}{l} I_{1, \text{rows}(p)-1} \leftarrow 0 \\ \text{If} \leftarrow \frac{E_i}{R(i)} \\ \text{for } k \in i-1..1 \quad \text{if } i > 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} I_{1,k} \leftarrow \text{If} \cdot \frac{R_R(i)}{R_L(i) + R_R(i)} \quad \text{if } (k = i-1) \cdot (i \neq \text{rows}(p)) \\ I_{1,k} \leftarrow \text{If} \quad \text{if } (k = i-1) \cdot (i = \text{rows}(p)) \\ I_{1,k} \leftarrow I_{1,k+1} \cdot \frac{p_{k+1}}{R_L(k+1) + p_{k+1}} \quad \text{if } (k \neq i-1) \end{array} \right. \\ I \end{array} \right.$$

$$I\_L(3) = (681.948 \quad 3799.427 \quad 0 \quad 0)$$

Рисунок 3.17 – Розрахунок  $I_{kL}$  для  $i$ -тої ТП в моделі MathCAD

Похибка у розрахунку викликана більшою точністю MathCAD та не перевищує 1%.

За допомогою пакету MathCAD можна визначити  $I_{kL}$  для кожної ділянки КМ та для кожного значення  $i$ :

$$I\_K\_L := \left| \begin{array}{l} I_k \leftarrow I\_L(1) \\ \text{for } i \in 2.. \text{rows}(p) \\ \quad I_k \leftarrow \text{stack}(I_k, I\_L(i)) \\ I_k \end{array} \right.$$

$$I\_K\_L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3726.024 & 0 & 0 & 0 \\ 681.948 & 3799.427 & 0 & 0 \\ 125.53 & 699.379 & 3771.013 & 0 \\ 27.05 & 150.706 & 812.597 & 4376.62 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.18 – Розрахунок  $I_{kL}$  для всіх ТП в моделі MathCAD

Де стовпці ділянки КМ, рядки значення  $i$ .

За допомогою пакету MathCAD можна визначити  $I_{kL}$  для кожної ділянки КМ при накладанні значень відповідно до методу накладання, зображений на рис. 3.19:

```

I_k_sum_L :=
for i ∈ 1..rows(p) - 1
    sum ← 0
    for j ∈ 1..rows(p)
        sum ← sum + I_K_L_j,i
    res_1,i ← sum
res

```

$I\_k\_sum\_L = (4560.55 \ 4649.51 \ 4583.61 \ 4376.62)$

Рисунок 3.19 – Розрахунок суми  $I_{kL}$  для всіх ТП в моделі MathCAD

Розрахунок  $I_{kR_j}$  аналогічно  $I_{kL_j}$  в два етапи:

- 3) Визначення  $I_{kR_i}$ , виконується першою дією та тільки один раз в розрахунку

$$I_{kR_3} = I_3 \cdot \frac{r_L(3)}{r_R(3) + r_L(3)} = 7599,4635 \cdot \frac{0,6149}{0,6149 + 0,6149} = 3799,7317 \text{ , A}$$

- 4) Визначення значення  $I_{kR_{i+1}}$  за допомогою формул розкиду

$$I_{kR_4} = I_{kR_3} \cdot \frac{\rho_4}{\rho_4 + r_L(3+1)} = 3799,7317 \cdot \frac{0,14}{0,14 + 0,64} = 709,283 \text{ ,A}$$

Покажемо на рис. 3.20 з моделі в MathCAD алгоритм для розрахунку  $I_{kR_j}$ :

$$I\_R(i) := \left| \begin{array}{l} I_{1, \text{rows}(p)-1} \leftarrow 0 \\ \text{If} \leftarrow \frac{E_i}{R(i)} \\ \text{for } k \in i.. \text{rows}(p) - 1 \quad \text{if } i < \text{rows}(p) \\ \quad \left| \begin{array}{l} I_{1,k} \leftarrow \text{If} \cdot \frac{R_L(i)}{R_R(i) + R_L(i)} \quad \text{if } (k = i) \cdot (i > 1) \\ I_{1,k} \leftarrow \text{If} \quad \text{if } (k = i) \cdot (i = 1) \\ I_{1,k} \leftarrow I_{1,k-1} \cdot \frac{P_k}{R_R(k) + P_k} \quad \text{if } k \neq i \end{array} \right. \\ I \end{array} \right.$$

$$I\_R(3) = (0 \quad 0 \quad 3799.43 \quad 681.95)$$

Рисунок 3.20 – Розрахунок  $I_{kR}$  для  $i$ -тої ТП в моделі MathCAD

Похибка у розрахунку викликана більшою точністю MathCAD та не перевищує 1%.

За допомогою пакету MathCAD визначимо  $I_{kR}$  для кожної ділянки КМ:

$$I\_K\_R := \left| \begin{array}{l} I_k \leftarrow I\_R(1) \\ \text{for } i \in 2.. \text{rows}(p) \\ \quad I_k \leftarrow \text{stack}(I_k, I\_R(i)) \\ I_k \end{array} \right.$$

$$I\_K\_R = \begin{pmatrix} 4641.87 & 861.845 & 159.84 & 28.689 \\ 0 & 3883.58 & 720.256 & 129.277 \\ 0 & 0 & 3799.427 & 681.948 \\ 0 & 0 & 0 & 3618.023 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.21 – Розрахунок  $I_{kR}$  для всіх ТП в моделі MathCAD

Де стовпці ділянки КМ, рядки значення  $i$ .

За допомогою пакету MathCAD можна визначити  $I_{kL}$  для кожної ділянки КМ при накладанні значень відповідно до методу накладання, зображений на рис. 2.22:

```

I_k_sum_R :=
for i ∈ 1..rows(p) - 1
    sum ← 0
    for j ∈ 1..rows(p)
        sum ← sum + I_K_Rj,i
    res1,i ← sum
res

```

$I\_k\_sum\_R = (4641.87 \ 4745.425 \ 4679.523 \ 4457.938)$

Рисунок 3.22 – Розрахунок суми  $I_{kR}$  для всіх ТП в моделі MathCAD

За допомогою пакету MathCAD та відомою методологією методу накладання визначимо значення струмів в контактній мережі при відсутності навантаження, прийнявши додатній напрямок протікання струму  $I_{kR}$ , покажемо на рис. 3.23:

$I\_k := -I\_k\_sum\_L + I\_k\_sum\_R$   
 $I\_k = (81.318 \ 95.913 \ 95.913 \ 81.318)$

Рисунок 3.23 – Розрахунок суми  $I_{kR}$  для всіх ТП в моделі MathCAD

Як бачимо з рисунок 3.23 в другому варіанті з різною напругою на шинах підсилюючих пунктів виникають зрівнюючі струму і чим більше розрахункова ділянка тим більше кількість ТП і тим складніший розрахунок, чим більше різниця напруг тим більші часткові зрівнюючі струму.

## 4. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

### 4.1 Дослідження оптимізації параметрів ділянки з однаковою напругою на шинах тягових підстанцій

В моделі MathCAD розрахована складна, існуюча схема, ділянка від Ніжньодніпровськ-Вузол до станції Чаплине. Використаємо значення напруг на шинах ТП, які були реалізовані під час руху рухомого складу по цій ділянці. В табл. 3.1 покажемо значення цих напруг:

Таблиця 4.1 - Значення рівня напруг на кожній ТП

|      | Значення напруги, В |
|------|---------------------|
| ТП 1 | 3500                |
| ТП 2 | 3500                |
| ТП 3 | 3500                |
| ТП 4 | 3500                |
| ТП 5 | 3500                |
| ТП 6 | 3500                |
| ТП 7 | 3500                |
| ТП 8 | 3500                |

Параметри розрахункової ділянки:

$S=112,2$  км;  $\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_{N-1} = \rho_N = 0,1$  Ом;  $N = 11$ ;  $r_0=0,055$  Ом.

Розрахункова схема ділянки графічно має вигляд як на рис. 4.1

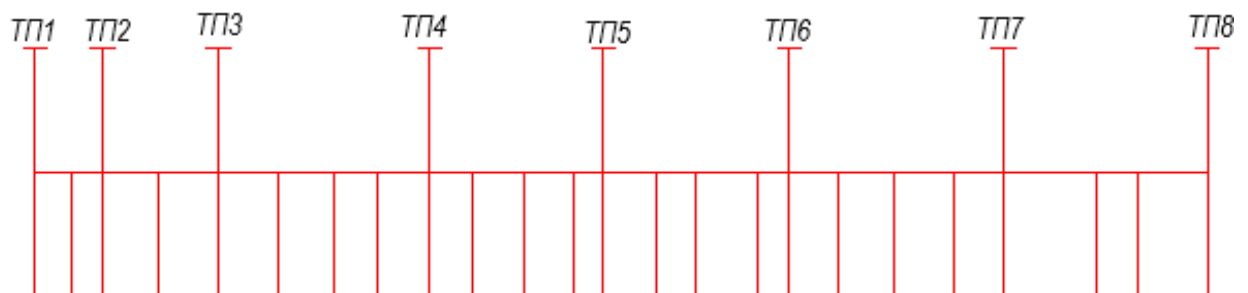


Рисунок 4.1 – Схема ділянки Ніжньодніпровськ-Вузол-Чаплине

Згідно розрахунку в моделі MathCAD на досліджуваній ділянці знаходиться 11 поїздів, 6 непарних та 5 парних, які покажемо на рисунку 4.2.

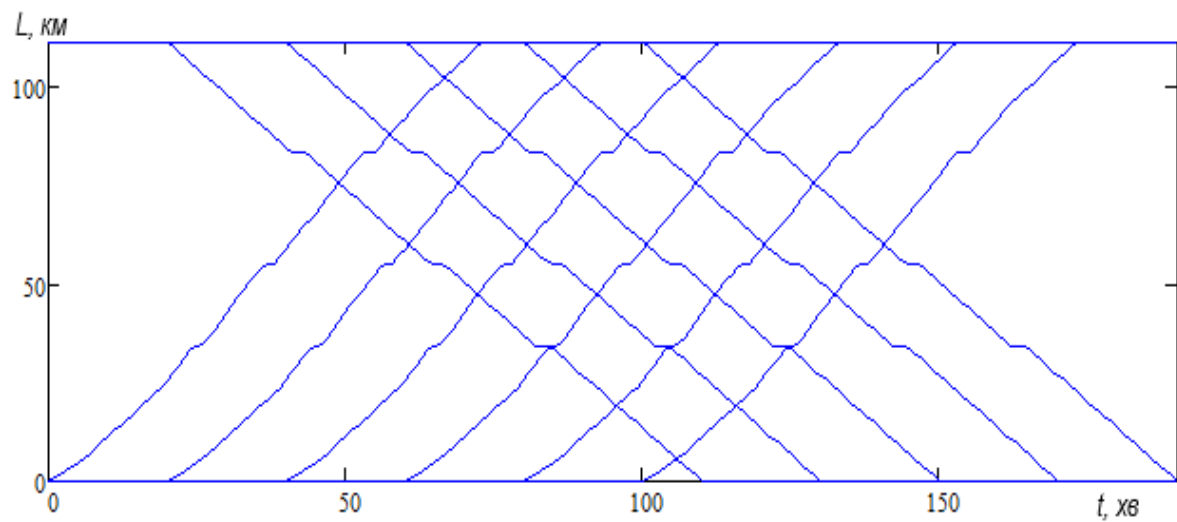


Рисунок 4.2 – Графік руху поїздів

На рисунку 4.3 показано графік зміни опору тягової мережі.

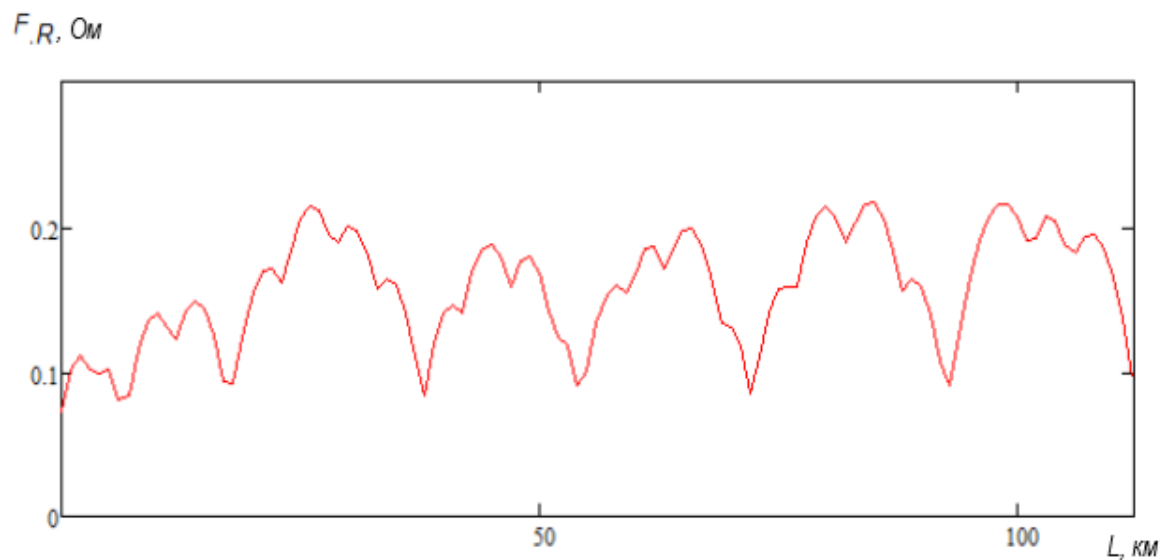


Рисунок 4.3 – Опір тягової мережі

На рисунку 4.4 показано функції струморозподілу для кожної тягової підстанції.

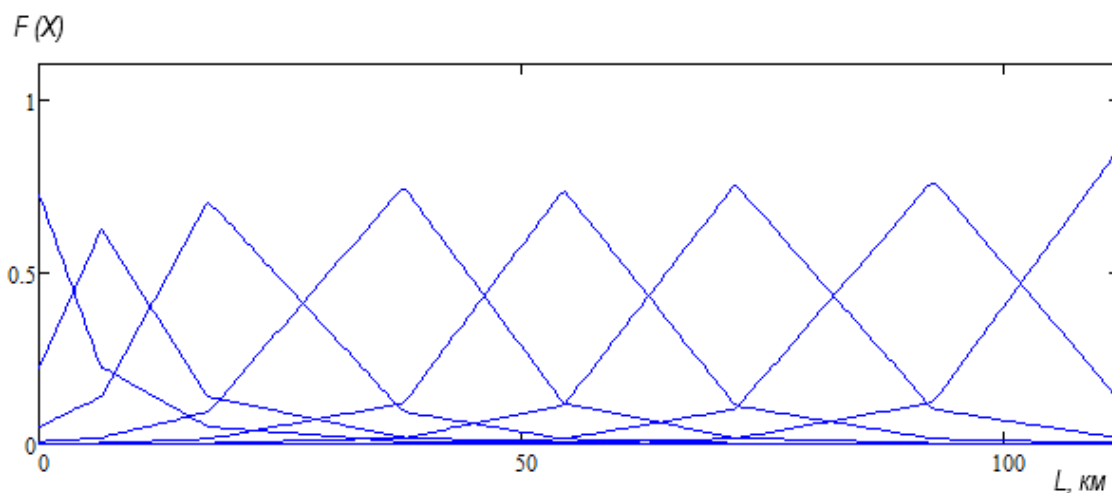


Рисунок 4.4 – Функції струморозподілу для кожної тягової підстанції

На рисунку 4.5 – 4.7 показано напругу на струмоприймачах електровозів.

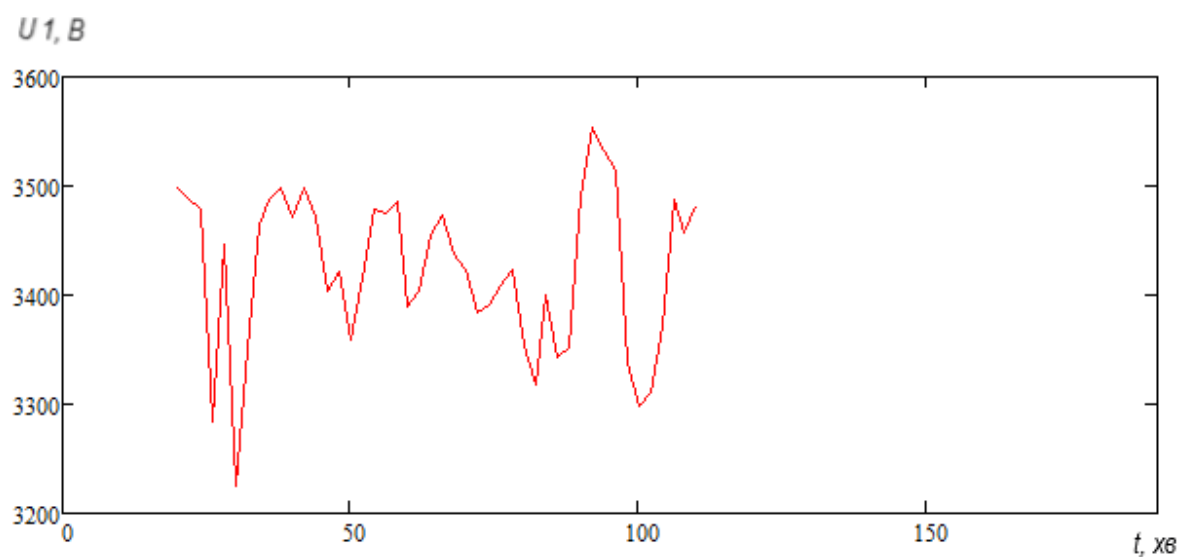


Рисунок 4.5 – Напруга на струмоприймачі електровозу №1

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ

Арк.

69

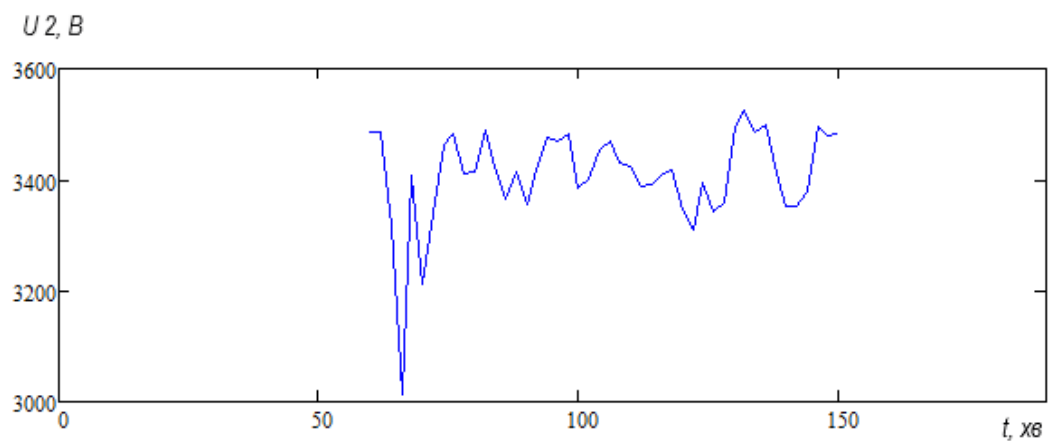


Рисунок 4.6 – Напруга на струмоприймачі електровозу №2

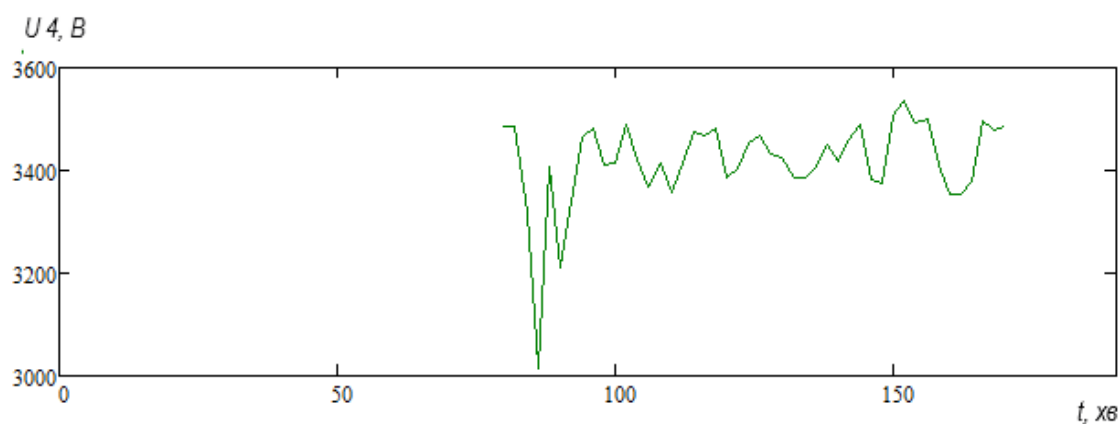


Рисунок 4.7 – Напруга на струмоприймачі електровозу №4

На рисунках 4.8 – 4.12 показано залежності струму тягових підстанцій.

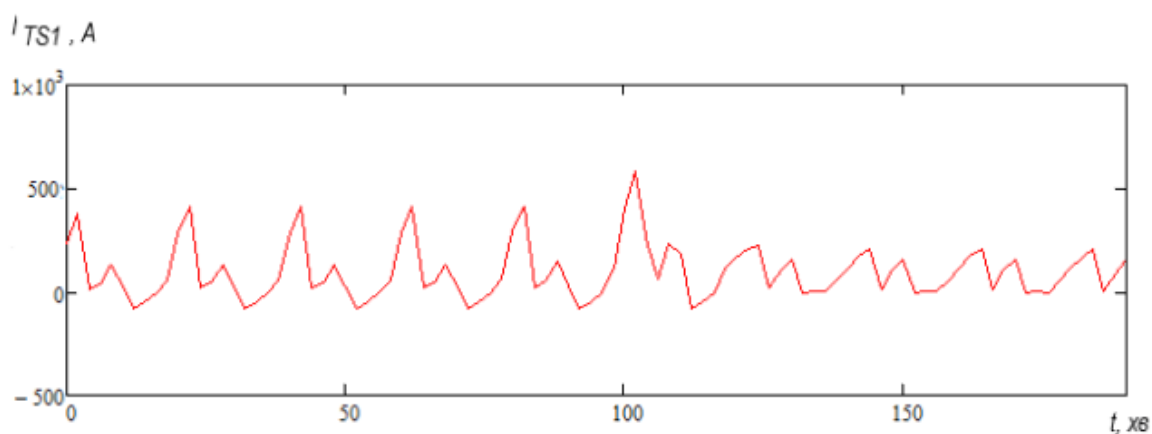


Рисунок 4.8 – Струм тягової підстанції №1

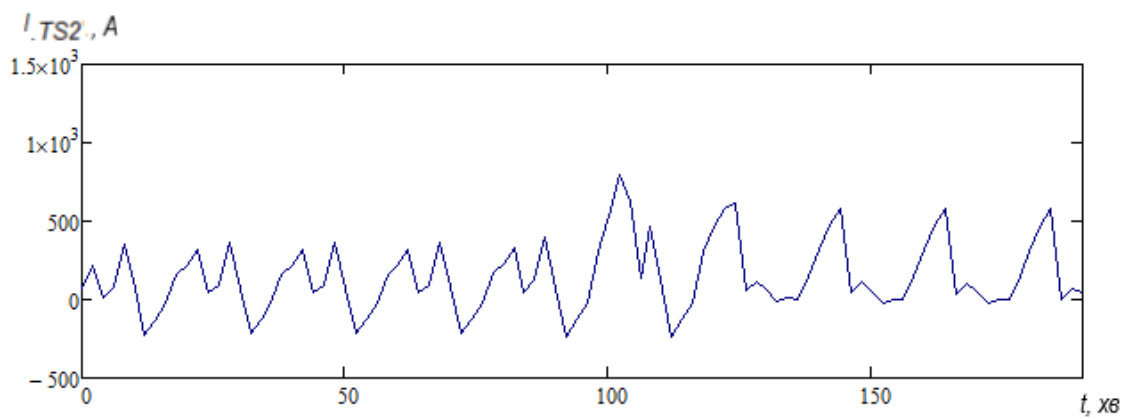


Рисунок 4.9 – Струм тягової підстанції №2

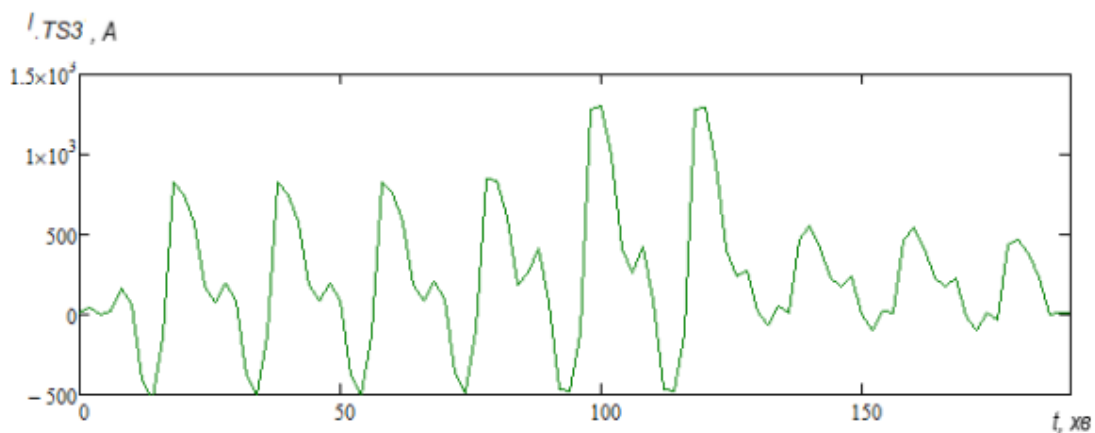


Рисунок 4.10 – Струм тягової підстанції №3

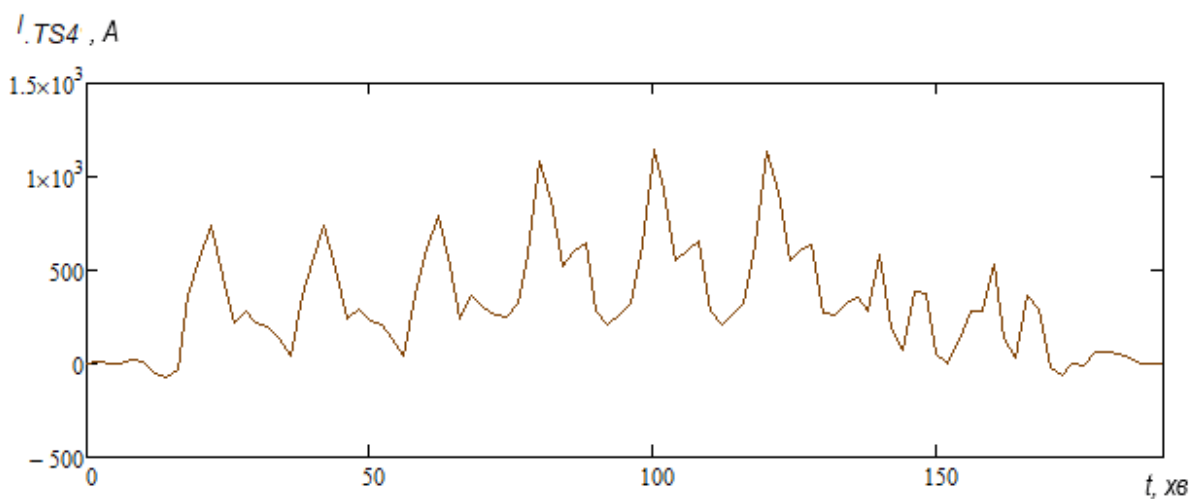


Рисунок 4.11 – Струм тягової підстанції №4

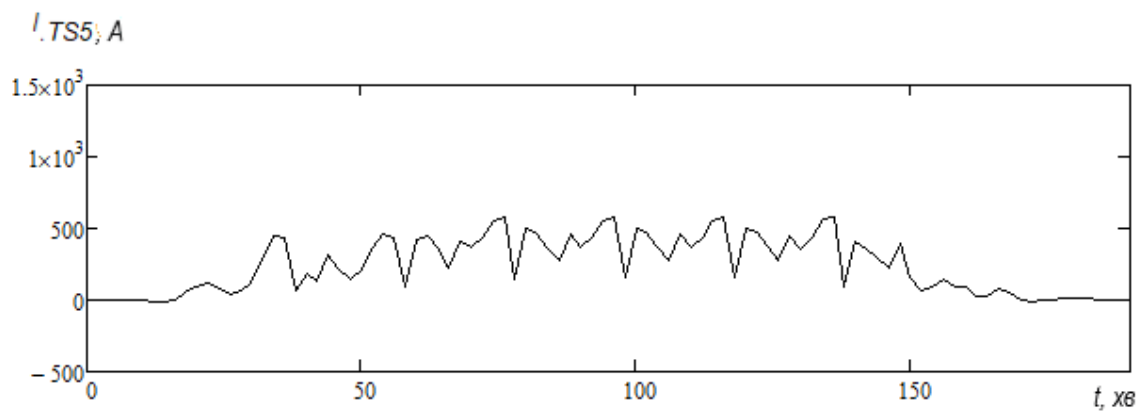


Рисунок 4.12 – Струм тягової підстанції №5

На рисунку 4.13 показано загальну потужність електровозів на досліджуваній ділянці.

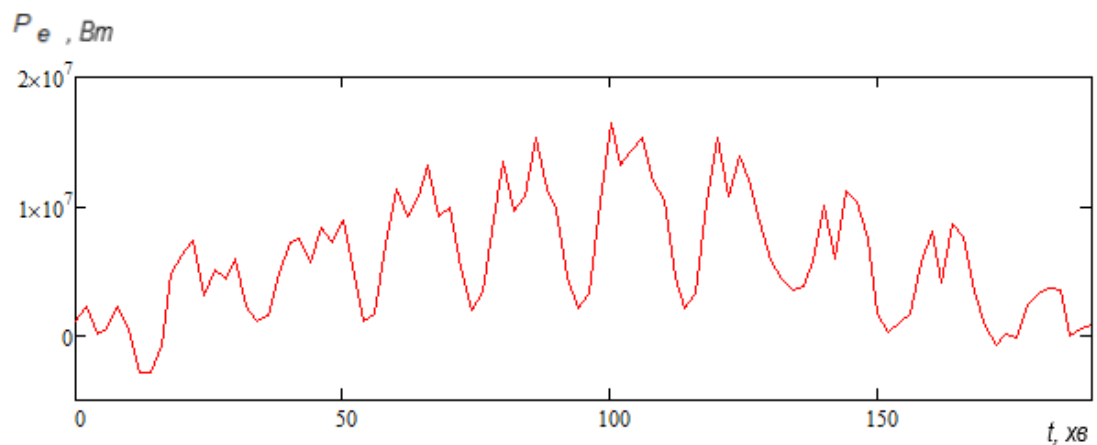


Рисунок 4.13 – Загальна потужність електровозів

На рисунку 4.14 показано загальну потужність тягових підстанцій.

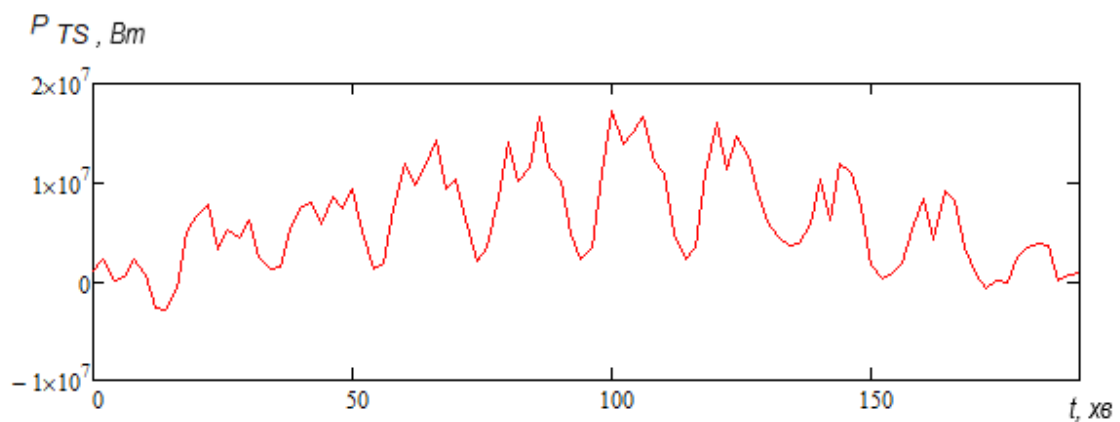


Рисунок 4.14 – Загальна потужність тягових підстанцій

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ

Арк.

72

На рисунку 4.15 показано втрати потужності на досліджуваній ділянці.

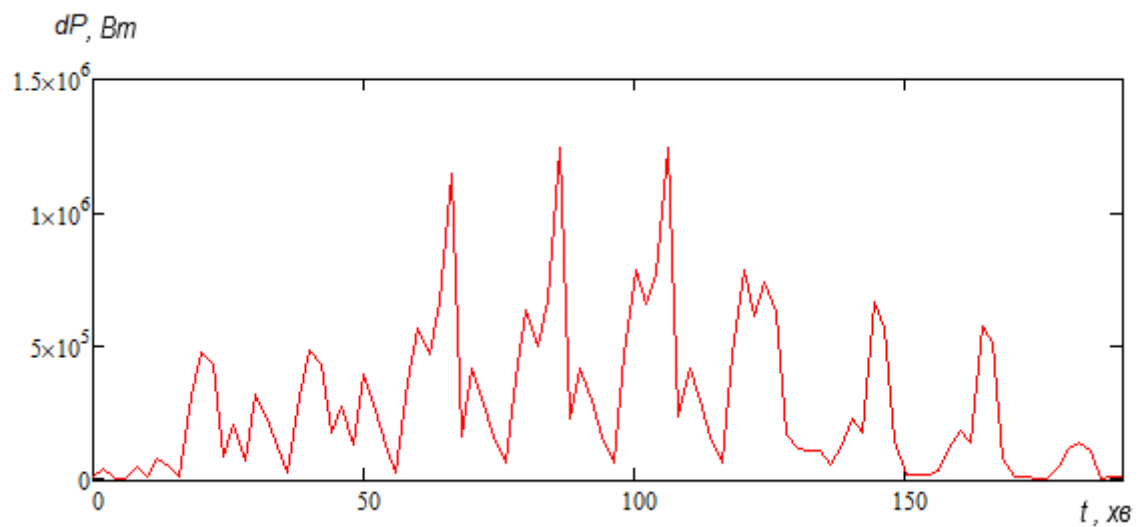


Рисунок 4.15 – Втрати потужності

На рисунку 4.16 показано спожита енергія електровозами та віддана енергія тяговими підстанціями.

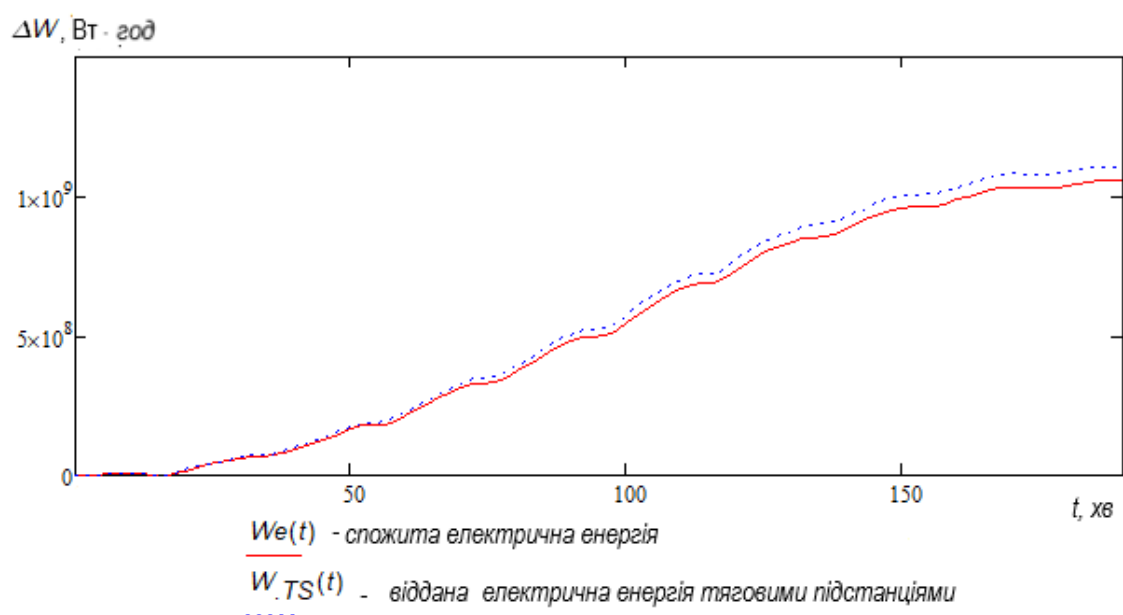


Рисунок 4.16 – Спожита енергія електровозами та віддана енергія тяговими підстанціями

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ

Арк.

73

На рисунку 4.17 показано втрати електричної енергії на досліджуваній ділянці.

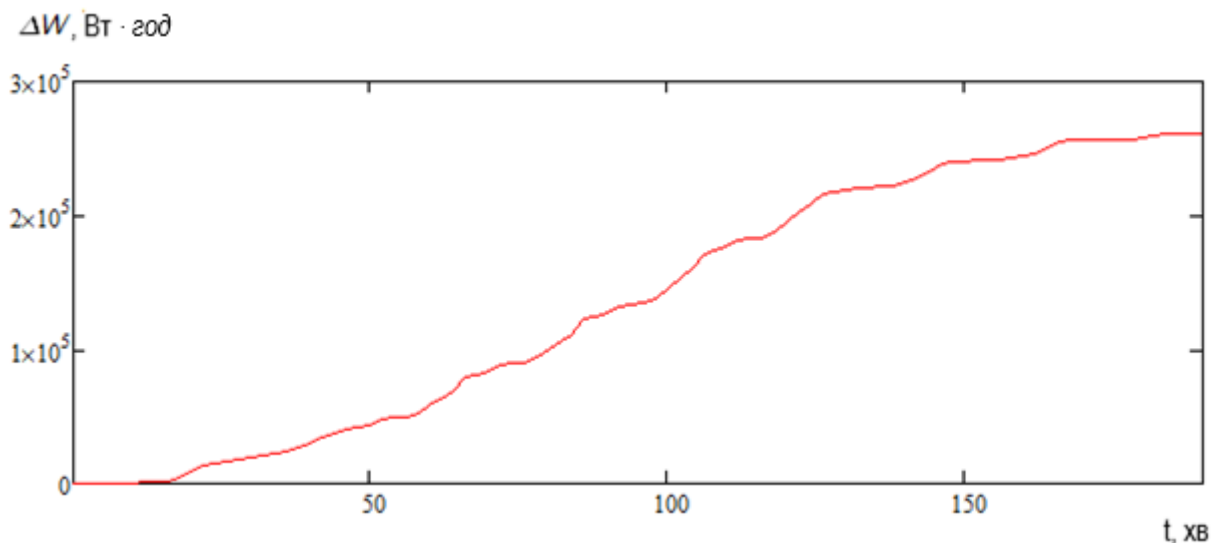


Рисунок 4.17 – Втрати електричної енергії

#### 4.2 Дослідження оптимізації параметрів ділянки з різною напругою на шинах тягових підстанцій

В моделі MathCAD розрахована складна, існуюча схема, ділянка від Ніжньодніпровськ-Вузол до станції Чаплине. Використаємо значення напруг на шинах ТП, які були реалізовані під час руху рухомого складу по цій ділянці. Результати приведені в табл. 4.2:

Таблиця 4.2 - Значення рівня напруг на кожній ТП

|      | Значення напруги, В |
|------|---------------------|
| ТП 1 | 3700                |
| ТП 2 | 3550                |
| ТП 3 | 3590                |
| ТП 4 | 3780                |
| ТП 5 | 3540                |
| ТП 6 | 3720                |
| ТП 7 | 3600                |
| ТП 8 | 3800                |

Параметри розрахункової ділянки:

$S=112,2$  км;  $\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_{N-1} = \rho_N = 0,1$  Ом;  $N = 11$ ;  $r_0=0,055$  Ом.

Згідно розрахунку в моделі MathCAD на досліджуваній ділянці знаходиться 11 поїздів, 6 непарних та 5 парних.

При зміні напруги вважатимемо, що схема живлення, графік руху поїздів, опір тягової мережі, функції струмозподілу між тяговими підстанціями не зміняться, тому вони будуть відповідати попередньому варіанту.

На рисунках 4.18 – 4.20 показано графіки напруги на струмоприймачах електровозів.

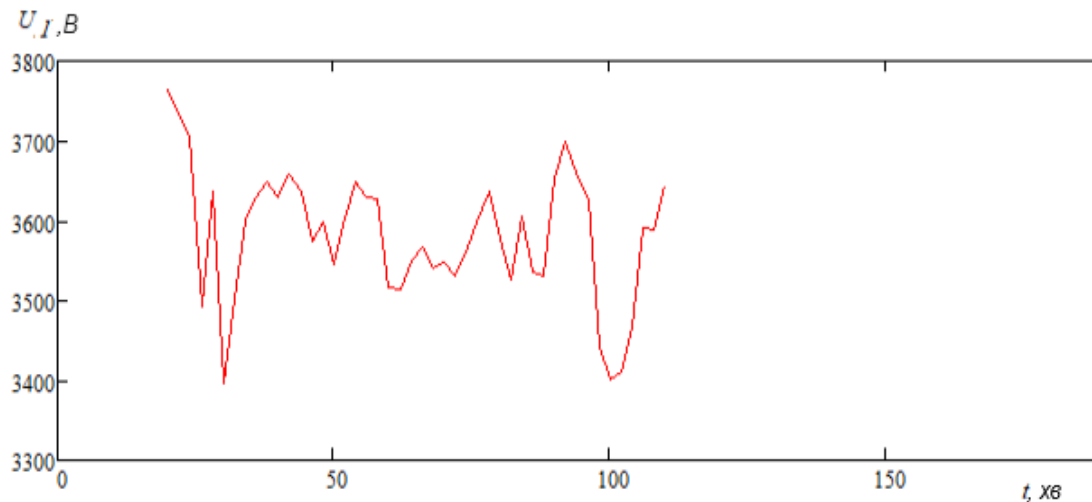


Рисунок 4.18 – Напруга на струмоприймачі електровозу №1

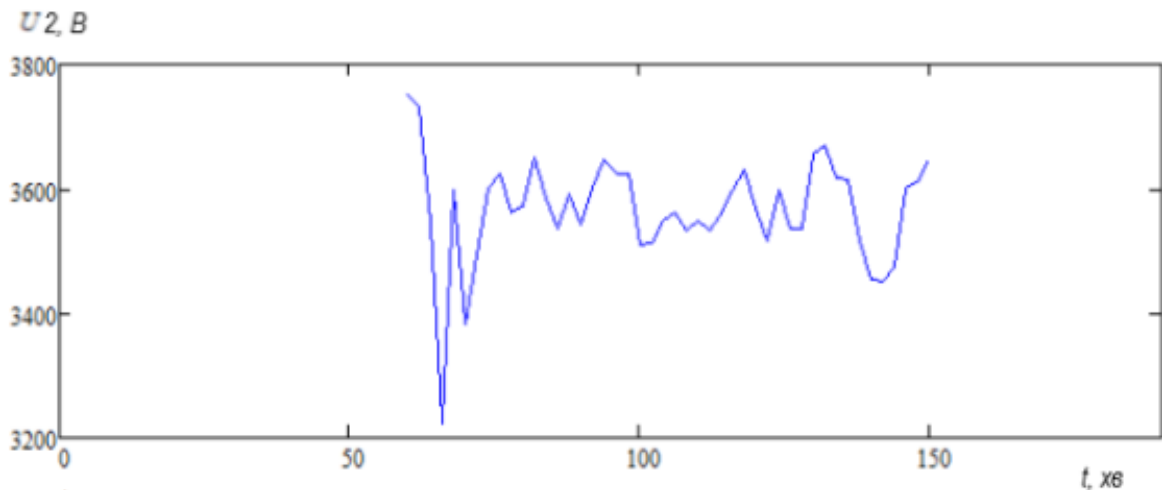


Рисунок 4.19 – Напруга на струмоприймачі електровозу №2

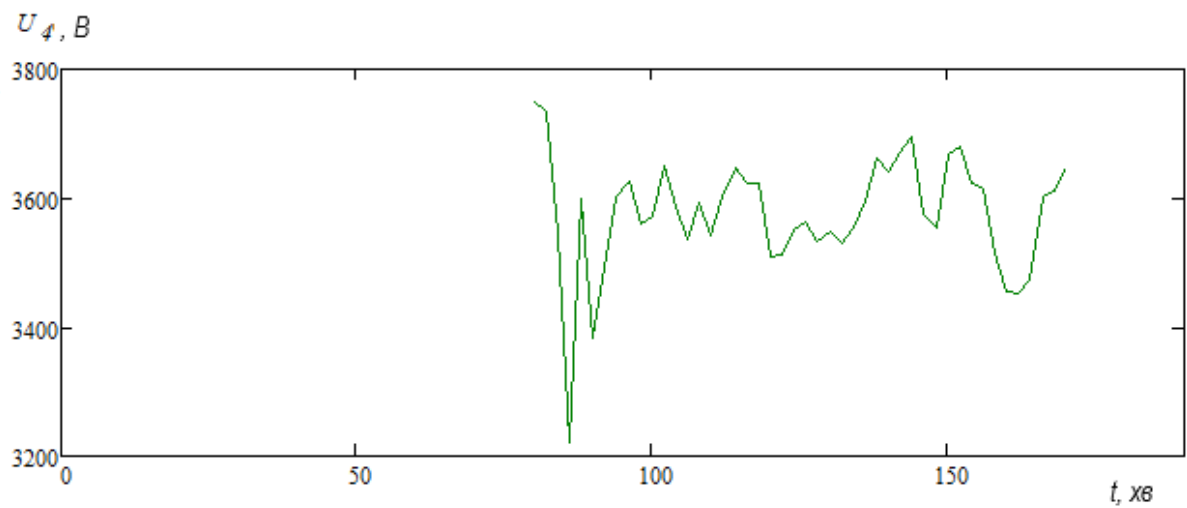


Рисунок 4.20 – Напруга на струмоприймачі електровозу №4

На рисунках 4.21 – 4.25 показано залежності струму тягових підстанцій.

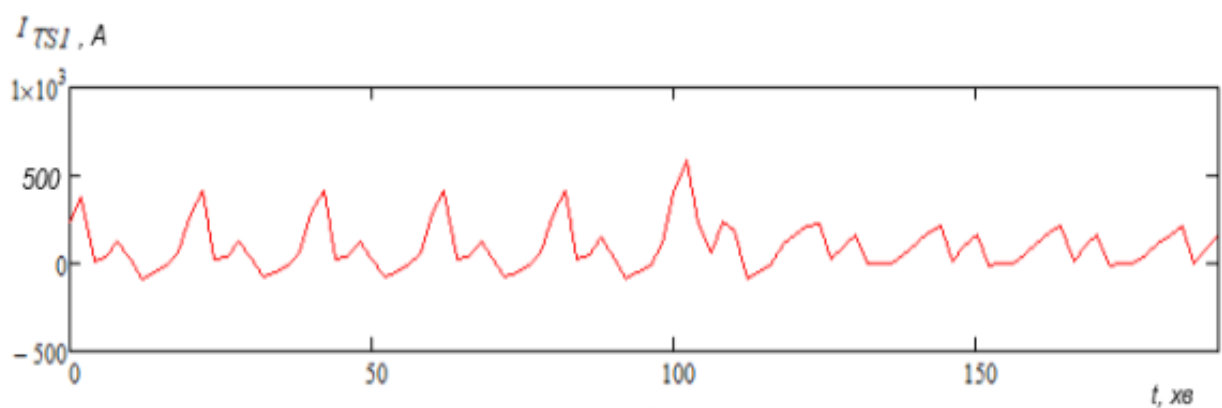


Рисунок 4.21 – Струм тягової підстанції №1

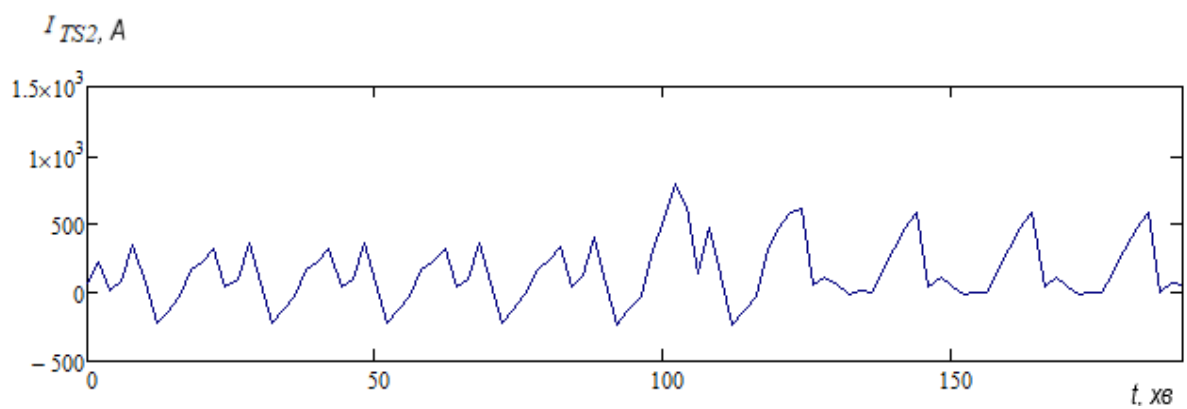


Рисунок 4.22 – Струм тягової підстанції №2

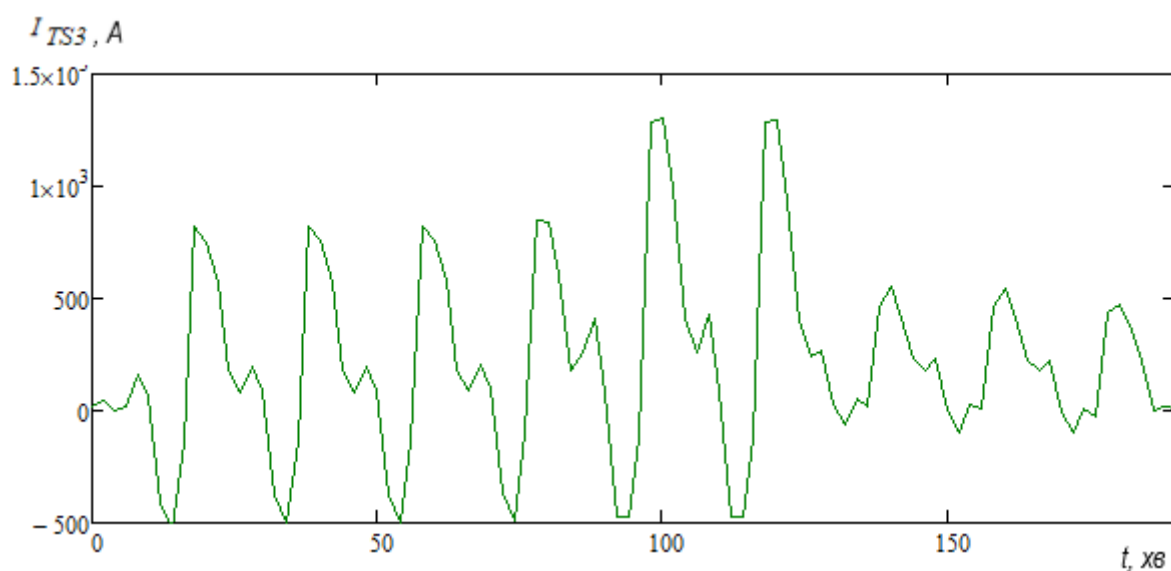


Рисунок 4.23 – Струм тягової підстанції №3

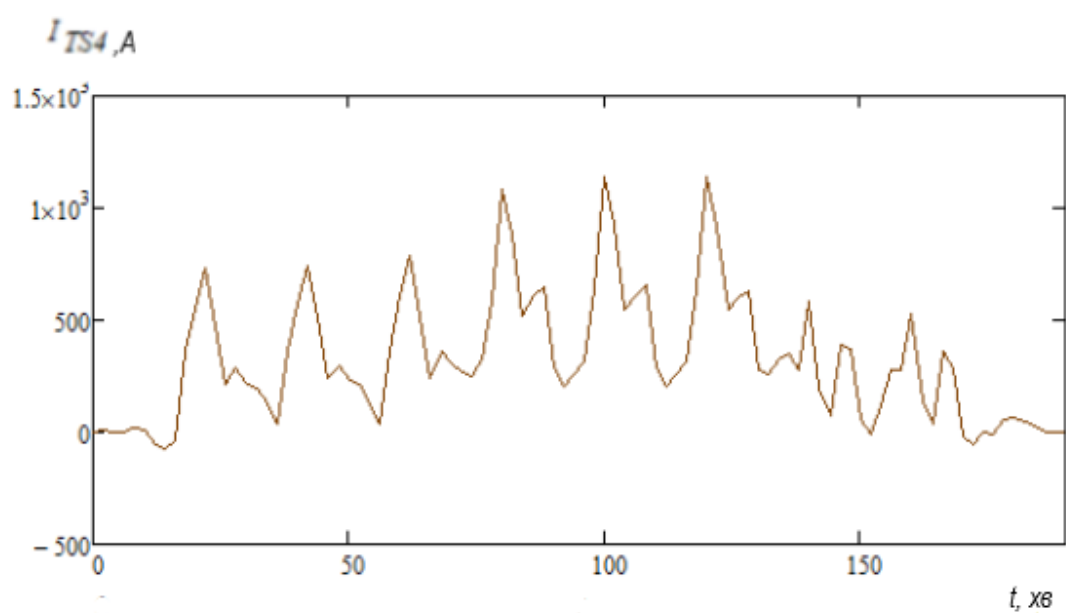


Рисунок 4.24 – Струм тягової підстанції №4

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ

Арк.

77

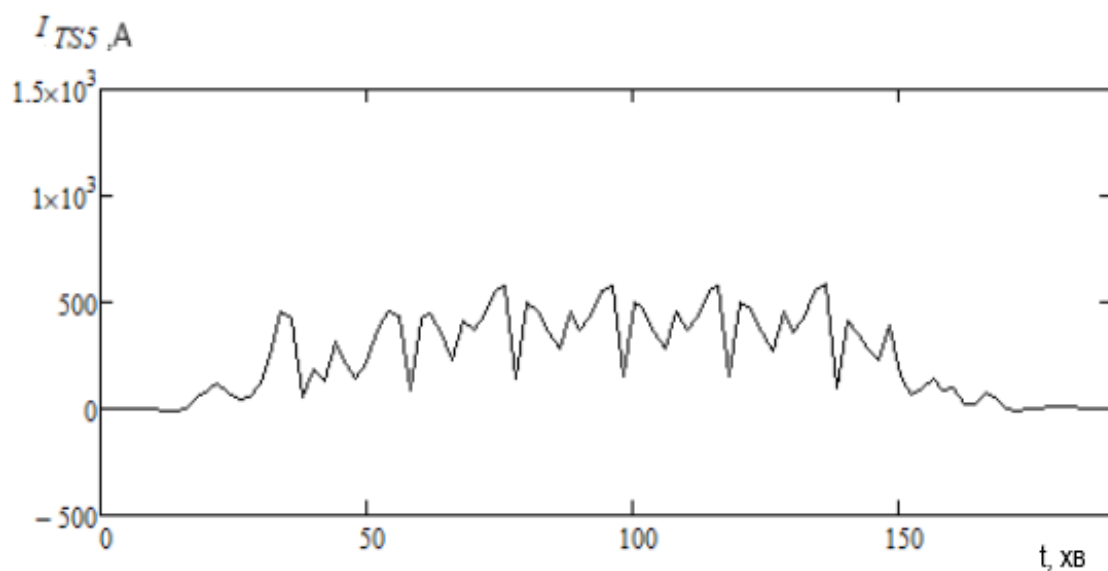


Рисунок 4.25 – Струм тягової підстанції №5

На рисунку 4.26 показано загальну потужність електровозів на досліджуваній ділянці.

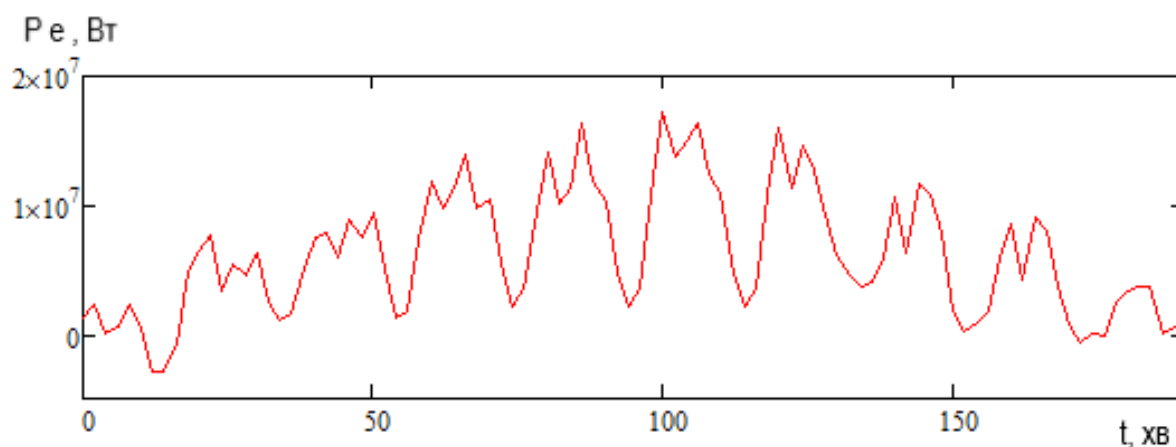


Рисунок 4.26 – Загальна потужність електровозів

На рисунку 4.27 показано загальну потужність тягових підстанцій.

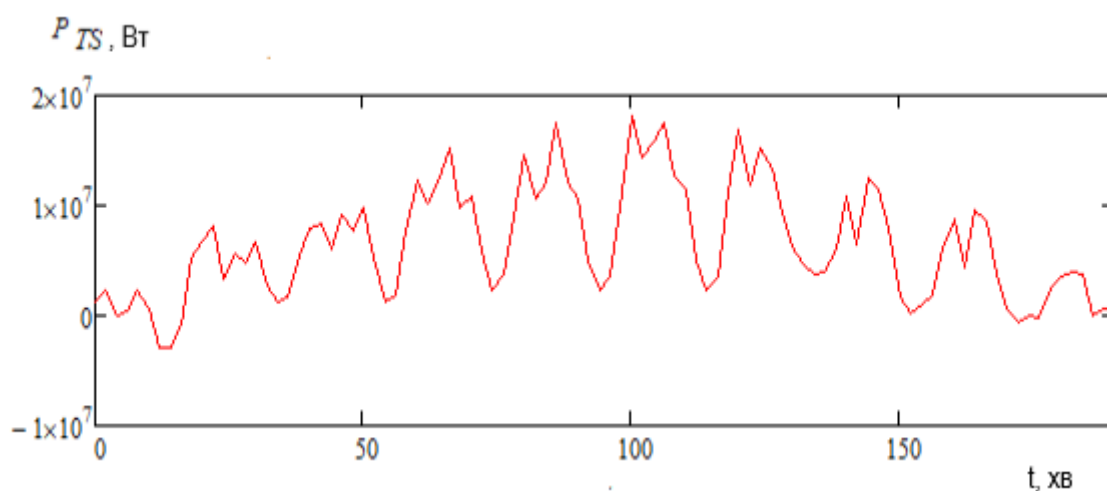


Рисунок 4.27 – Загальна потужність тягових підстанцій

На рисунку 4.28 показано втрати потужності на досліджуваній ділянці.

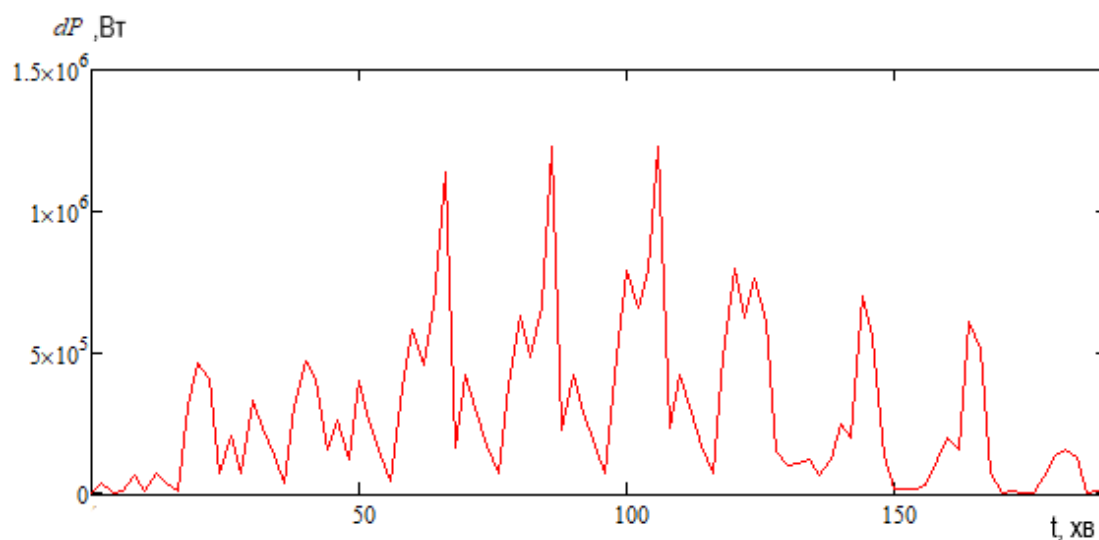


Рисунок 4.28 – Втрати потужності

На рисунку 4.29 показано спожиту енергію електровозами та віддану енергію тяговими підстанціями.

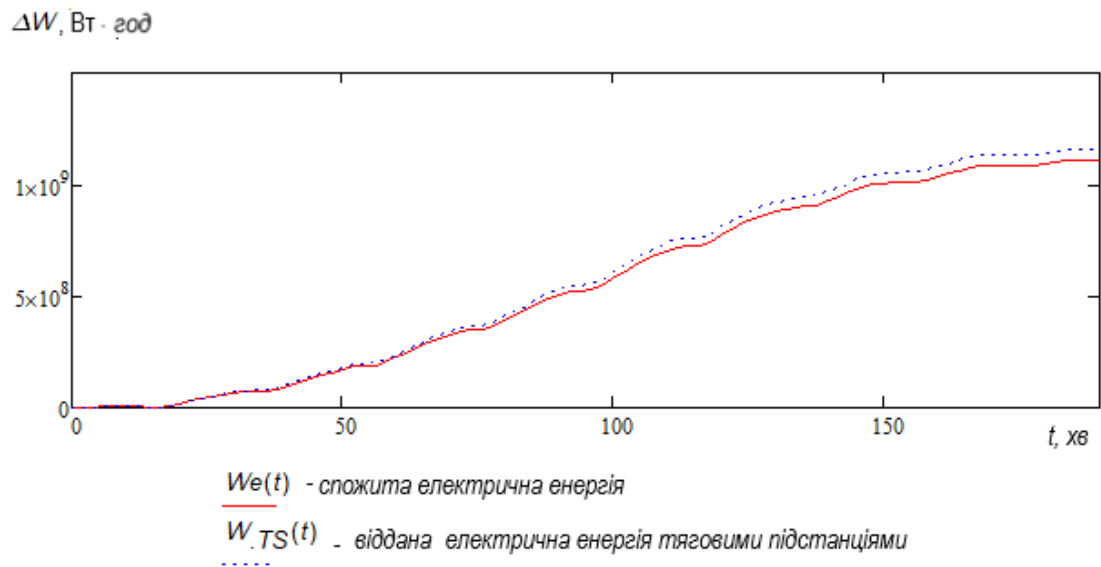


Рисунок 4.29 – Спожита енергія електровозами та віддана енергія тяговими підстанціями

На рисунку 4.30 показано втрати електричної енергії на досліджуваній ділянці.

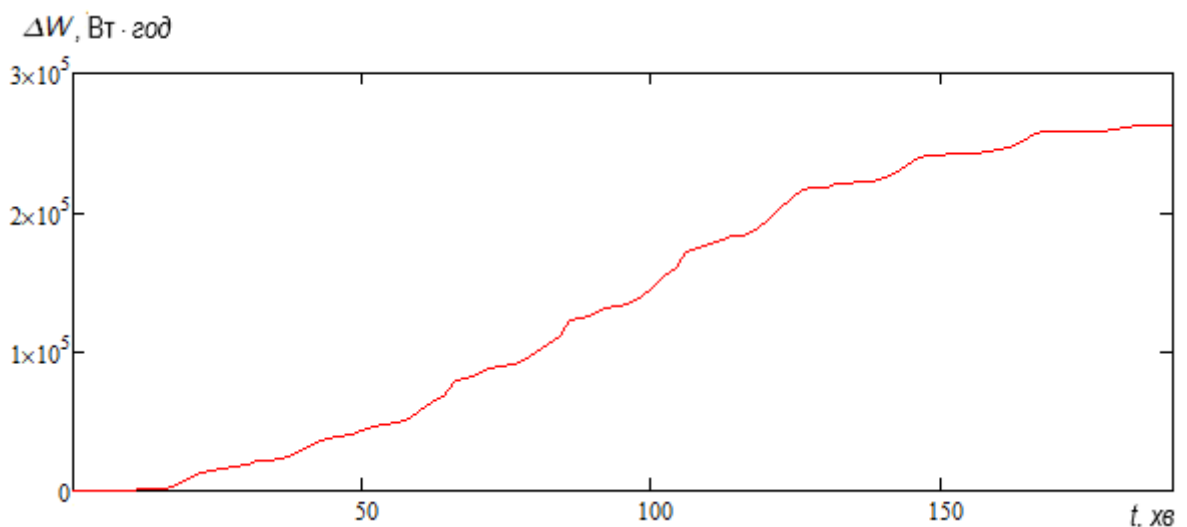


Рисунок 4.30 – Втрати електричної енергії

#### 4.3 Аналітичне порівняння результатів дослідження

Два головних техніко-економічних показників роботи системи електропостачання є мінімальна напруга на струмоприймачеві, яка для даного експерименту, яка як бачимо не виходить за допустові межі при заданому

навантаженні. Тому критерієм оптимізації буде другий техніко-економічний показник – втрати електричної енергії в контактній мережі. Один із показників економічної ефективності роботи системи електропостачання, чим менші втрати тим дешевші і вигідніші перевозки залізницею.

Для розрахунку втрат в контактній мережі скористаємось методом різниці споживаної потужності електровозом та потужності яку віддають всі тягові підстанції для живлення електровозу. За формулою визначимо втрати потужності для нашого експерименту:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N S_{ТП_i} - S_e, \quad (4.12)$$

де  $S_{ТП_i}$  – потужність яку віддає  $i$ -та ТП;

$S_e$  – потужність, яку споживає електровоз.

Для розрахунку потужності яку споживає електровоз є всі необхідні дані, і розраховується за формулою:

$$S_e = U_e \cdot I_e, \quad (4.13)$$

де  $U_e$  – напруга на струмоприймачеві, В;

$I_e$  – струм електровозу прийнятим рівним 1000 А.

Для розрахунку потужності яку віддає  $i$ -та ТП необхідно визначити струм який віддає ТП в тягову мережу. Він складається з струму, що живить електровоз та зрівнюючого струму, який викликаний різницею значень напруг на шинах ТП, він розрахований за формулою (4.15). Тому визначимо струм який віддає ТП, розраховується він за формулою:

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 81   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

$$I_{ТП_i} = \begin{cases} I_{f_i}(x) + I_{k_i}, i = 1 \\ I_{f_i}(x) + I_{k_i} - I_{k_{i+1}}, (i \neq 1) \cdot (i \neq N), \\ I_{f_i}(x) + I_{k_i}, i = N \end{cases} \quad (4.14)$$

Для розрахунку потужності яку віддає і-та ТП необхідно врахувати внутрішній опір ТП, значення якого відомо. Потужність яку віддає і-та ТП визначається за формулою:

$$S_{ТП_i} = (U_i - I_{ТП_i} \cdot \rho_i) \cdot I_{ТП_i}, \quad (4.15)$$

Критерієм оптимізації системи електропостачання будуть втрати електричної енергії, які були розраховані за формулою (3.12), цей вибір було зроблено через те, що напруга на струмоприймачеві, за час моделювання руху електровоза не виходить за допустові межі. Але значення зміна значення напруги на струмоприймачеві буде якісним показником роботи керованої системи електропостачання, тому необхідно розрахувати і цей параметр.

Ціллю оптимізації буде зменшення вартості перевезень, покращення технічних показників функціонування системи електропостачання.

Параметрами оптимізації будуть значення напруг на живлячих пристроях керованої розподіленої системи електропостачання – одноагрегатних тягових підстанцій, при цьому не враховується швидкість перемикавання напруги, технічно можлива дискретність перемикавання напруги.

Обмеженнями оптимізації будуть слугувати знову значення напруги на одноагрегатних ТП, ці межі викликані номінальною роботою пристроїв електропостачання, міркувань безпеки, довговічності роботи пристроїв, межі становимо такі як на формулі:

$$3000 \leq U \leq 3900, \text{ В} \quad (4.16)$$

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 82   |

Одним з результатів оптимізації є значення напруги на шинах кожної підстанції протягом ходу електровоза по розрахунковій ділянці з визначеним кроком зміни напруги – шаг дискретизації перерахунку значень напруги  $d$ , який в нашому моделюванні прийнятий за 10 с.

Кількість змін напруги визначимо як  $k$ , так як при моделюванні електровоз рухався 9000 секунд, то кількість змін напруги можна розрахувати за формулою:

$$k = \frac{t}{d} + 1 = \frac{9000}{10} + 1 = 901, \quad (4.17)$$

Для першої ТП графік зміни напруги має вигляд як на рисунку 4.31:

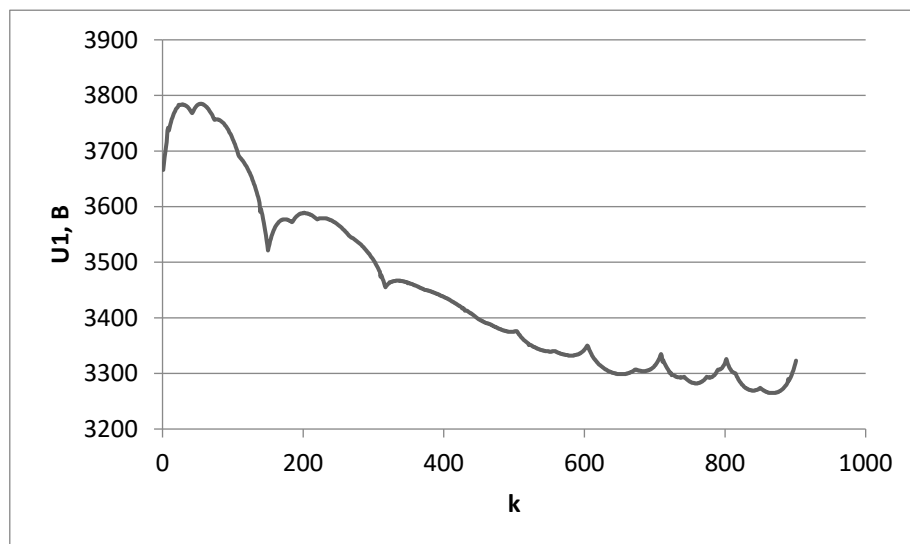


Рисунок 4.31 – Графік зміни напруги першої ТП

Для третьої ТП графік зміни напруги має вигляд як на рисунку 4.32:

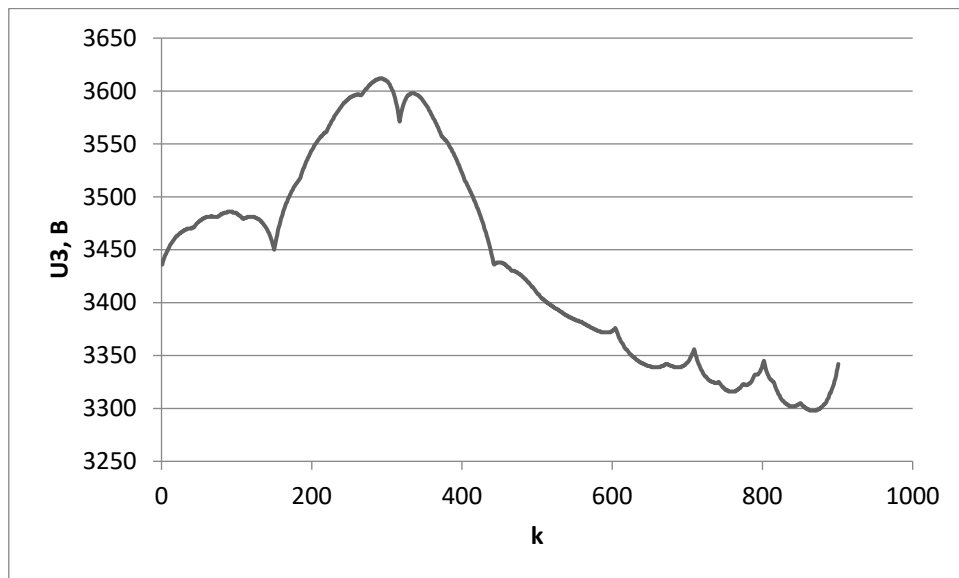


Рисунок 4.32 – Графік зміни напруги третьої ТП

Порівняємо зміну значення напруги на струмоприймачеві з оптимізацією і без. Для цього визначимо напруги з оптимізацією, тобто підставимо значення отриманих та показаних на рисунках 4.31–4.32 напруг в формулу (4.1) як  $U_i$ . Розрахувавши в моделі, зобразимо значення напруги на струмоприймачеві в порівнянні на рисунку 4.33.

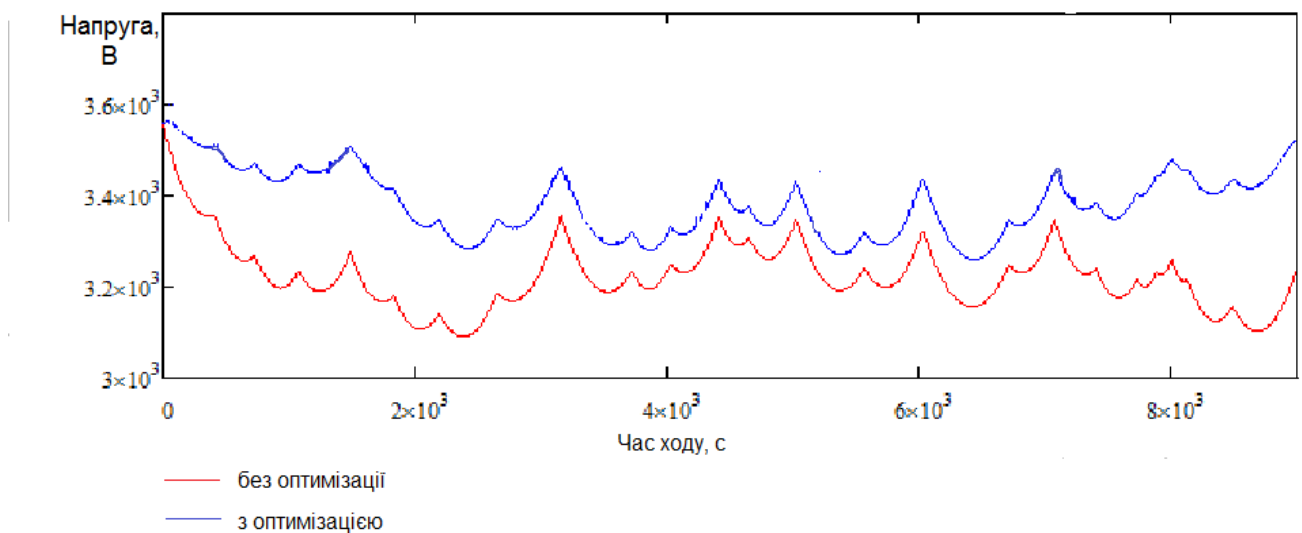


Рисунок 4.33 – Напруга на струмоприймачеві в порівнянні

Як бачимо система керованого електропостачання в найбільших міжпідстанційних зонах, які можна побачити на рисунку 4.1 ефективно підняла

напругу і тримала її на рівні 3440 В, мінімум становить 3280 В. Без оптимізації мінімум 3010 В. Проаналізувавши графік можна зробити висновок про кращий діапазон зміни напруги, він вузький, в межах 3600-3280 В, в порівнянні зі звичайною системою 3500-3010 В, що дозволяє найбільш ефективно використовувати енергетичні ресурси системи електропостачання.

Критерієм оптимізації було зниження втрат, порівнявши два розрахунки цих втрат за формулою (4.12) можна зробити висновок про ефективність керованої системи електропостачання.

Розрахунок втрат зроблений в моделі, покажемо на рисунку 4.17 значення втрат електричної енергії в системі тягового електропостачання в порівнянні керованої системи з оптимізацією рівня напруги на шинах ТП та без керування напруги прийнявши їх рівними значенням.

Для порівняльної оцінки зменшення втрат за формулами (4.18) та (4.19) визначимо суму втрат для не керованої системи та керованої системи відповідно:

$$\Delta P_{\sum NoContrl} = \int_0^t \Delta P \Delta t, \quad (4.18)$$

де  $\Delta P_{\sum NoContrl}$  – сума втрат потужності протягом всього руху не керованої системи, Вт.

$$\Delta P_{\sum Contrl} = \int_0^t \Delta P \Delta t, \quad (4.19)$$

де  $\Delta P_{\sum Contrl}$  – сума втрат потужності протягом всього руху керованої системи, Вт.

За графіками, що показані на рисунках (4.17) та (4.30) в кожний момент  $t$  в моделі визначимо значення втрат електричної енергії, що дорівнює

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 85   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

1805679 кВт·год для не керованої системи електропостачання і 1149913 кВт·год для керованої системи електропостачання.

Визначимо зменшення втрат електричної енергії в системі тягового електропостачання, за допомогою відсоткового співвідношення вираженою формулою:

$$e = \frac{|\Delta P_{\Sigma NoCtrl} - \Delta P_{\Sigma Ctrl}|}{\Delta P_{\Sigma NoCtrl}} \cdot 100\%, \quad (4.20)$$

де  $e$  – відсоток економії електричної енергії, %.

Визначимо за формулою (4.20) економію:

$$e = \frac{|1805679 - 1149913|}{1805679} \cdot 100\% = 36,31\%$$

Зменшення втрат на 36,31% при рівномірному русі поїзда, відмінний показник роботи моделі керованої розподіленої системи електропостачання. Стабілізація напруги та суттєве зменшення втрат показує техніко-економічну доцільність та ефективність роботи розподіленої системи електропостачання.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 86   |

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В даній магістерській роботі була досліджена робота керованої розподіленої системи електропостачання, на основі розробленої комп'ютерної моделі цієї системи та експериментальних даних руху поїзда були досліджені техніко-економічні показники роботи системи при різних режимах роботи системи електропостачання. Всі теоретичні розрахунки показали поліпшення якості електричної енергії внаслідок впровадження та застосування закону керування значенням напруги на шинах 3,3 кВ тягової підстанції.

1. Встановлено, що застосування системи керованого розподіленого електропостачання дозволяє стабілізувати напругу на ділянках з навантаженим рухом, та при впровадженні прискореного або швидкісного руху поїздів.

2. Використання розподіленої системи дозволить вирішити питання збільшення міжпідстанційної зони. Розподілена система не потребує постійного перебування обслуговуючого персоналу на території підстанції, це та те, що при впровадженні сучасних підстанцій модульного типу відпадає необхідність будівництва підстанцій з окремим будинком з великою площею. Також при виборі місця для будівництва підстанції, яке зазвичай визначається не техніко-економічною ефективністю функціонування системи, а близькістю населених пунктів.

3. Розроблена методологія розрахунку дозволяє спростити процес опрацювання даних та поліпшити динамічність розрахунку системи, для швидшого реагування та коректування закону керування напругою на тягових підстанціях.

4. Концепція керованого розподіленого живлення дозволить зробити перший крок впровадження інтелектуальної системи електропостачання, що дозволить більш економічно використовувати енергетичні ресурси, дозволить зменшити собівартість перевезень, які іноді відіграють велике роль в вартості товару для кінцевого споживача – населення країни.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 87   |

5. Математична модель потребує внесення особливостей режиму рекуперації, є перспектива, що це дозволить ще більше зменшити втрати електричної енергії. З впровадженням системи є необхідно розробити систему релейного захисту, що буде суттєво відрізнятись від нині існуючої. Також необхідне вирішення питання транзиту потужності через випрямляч, використання керованого випрямляча, чи іншої дієвої системи.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 88   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сиченко, В.Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія / В.Г. Сиченко, Ю.Л. Саєнко, Д.О. Босий. – Дніпропетровськ: «Стандарт-Сервіс», 2015. – 344 с.
2. Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте: матер. Шестого Международного симпозиума 25 – 28 октября 2011 г. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2013. – С. 337 – 349
3. Марский, В.Е. Подготовка тягового электроснабжения для организации скоростного движения на линии Санкт-Петербург–Москва / В.Е. Марский. – Токо́сьем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе: сб. научн. тр. ОАО ВНИИЖТ. – 2010. – С. 38–45.
4. Денисюк, С.П. Енергетична ефективність та енергозбереження / С.П. Денисюк, В.І. Василенко. – Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – №1. – С. 33-44.
5. Маркман, Г.З. Энергоэффективность преобразования и транспортировки электрической энергии: учебное пособие / Г.З. Маркман. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 184 с.
6. Денисюк, С.П. Енергозбереження та енергетичний менеджмент у пристроях тягового електропостачання: навчальний посібник / С.П. Денисюк, В.Г. Кузнецов, В.Г. Сиченко, О.М. Крупинський. – Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. Дніпропетровськ, 2015. – 264 с.
7. Hubskeyi, P.V. Reserves for improving the energy efficiency of traction power systems / P.V. Hubskeyi. – Problemy kolejnictwa. Warszawa, 2018. – Т. 62, z. 178. – Р. 7-12
8. Сиченко, В.Г. Енергетика тягових мереж: монографія / В.Г. Сиченко, В.Г. Кузнецов, Д.О. Босий, І.О. Саблін. – Дніпро: Вид-о ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. – 210 с.

|      |      |          |        |      |                                  |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                  | 89   |

9. Švarcбург, L. E. Energy efficiency exploitation of technical systems / L.E. Švarcбург. – Scientific Journals Maritime University of Szczecin. – 2013. – №35(107). – P. 132–137.

10. Бурков, А.Т. Особенности методики определения электропотребления при выборе максимальной скорости пассажирских составов / А.Т. Бурков, М.М. Мирсаитов. – Изв. ПГУПС. – 2015. – №1 (42). – С. 5-11.

11. Аржанников, Б.А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография / Б.А. Аржанников. – Екатеринбург: УрГУПС, 2010. – 176 с.

12. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог: учебник для вузов / К.Г. Марквардт. – Москва: Трансжелдориздат, 1958. – 288 с.

13. Мирошниченко, Р.И. Режимы работ электрифицированных участков / Р.И. Мирошниченко. – Москва: Транспорт, 1982. – 207 с

14. Мирошниченко, Р.И. Сравнительная оценка способов усиления системы постоянного тока 3 кВ / Р.И. Мирошниченко. – Вестн. Всесоюз. научно-исслед. ин-та ж.-д. трансп. – 1973. – №1. – С. 1–12.

15. Проектирование системы электроснабжения электрических железных дорог: учебное пособие / Бесков Б.А., Геронимус Б.Е., Давыдов В.Н., Крестьянов М.Е., Марквард Г.Г., Минин Г.А. – Москва: Трансжелдориздат, 1963. – 471 с.

16. Кисляков, В. А. Сравнительная оценка технических показателей различных способов усиления электрифицированных линий постоянного тока / В.А. Кисляков. – Сб. тр. МИИТа. –1978. – №604. – С. 3-21.

17. Косарев, Є.М. Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму / Є.М. Косарев. – Електрифікація транспорту. – 2015. – № 9. – С. 37–43.

18. Аржанников, Б.А. Совершенствование системы и устройств тягового электроснабжения / Б.А. Аржанников, И.О. Набойченко. – Евразия вести. – 2015. – № 9. – С. 22 –23.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 90   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

19. Шалимов, М.Г. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог: Метод. указания / М.Г. Шалимов, Г.П. Маслов, Г.С. Магай. – Омский государственный университет путей сообщения. – Омск : ОмГУПС, 2002. – 48 с.

20. Bosiy, D. Intelligent technologies for efficient power supply in transport systems / D. Bosiy, O. Sablin, I. Khomenko, Ye. Kosariev, I. Kebal, S. Myamlin. – Transport Problems. – 2017. – Vol. 12 (SE). – P. 57 -71.

21. Hanmin Lee. Tes of DC 1500 V Stationary Energy Storage System / Lee Hanmin, Kim Gildong, Lee Changmu, Joung Euijin. – International Journal of Railway. – 2012. – Vol. 5. No. 3. – P. 124–128.

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

23. Гончаров, Ю.П. Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии / Ю.П. Гончаров, В.Г. Сыченко , Д.А. Босый, М.С. Пастушенко, Є.М. Косарев. – Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane. – 2014. – №162. – С. 65–82.

24. Гончаров, Ю.П. Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей / Ю.П. Гончаров, Е.И. Сокол, В.В. Замаруев, В.В. Ивахно, С.Ю. Кривошеев, А.В. Ересько, Е.А. Маляренко, Б.А. Стысло, Н.В. Панасенко, В.Г. Сыченко. – Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – Вип. 30, т. 2. – С. 98–108

25. Гончаров, Ю.П. Система распределения питания с промежуточным звеном повышенной частоты для электрифицированных железных дорог /

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 91   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Ю.П. Гончаров и др. – Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім.акад. В. Лазаряна. – 2011. – №38. – С. 82–89.

26. Сиченко, В.Г. Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму / В.Г. Сиченко, Є.М. Косарєв, П.В. Губський, В.В. Замаруєв, В.В. Івахно, Б.В. Стисло Б.О. – Електрифікація транспорту. – 2016. – №11. – С. 61–70.

27. Аржанников, Б.А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография / Б.А. Аржанников. – Екатеринбург: УрГУПС, 2010. – 176 с.

28. Косарєв, Є.М. Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму / Є. М. Косарєв. – Електрифікація транспорту. – 2015. – №9. – С. 37-43.

29. V. Sychenko. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current / V. Sychenko, D. Bosiy, E. Kosarev. – The archives of transport. Volume 35, Issue 3, 2015, p. 63-70.

30. Сиченко, В.Г. Оптимізація керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму з пунктами підсилення / В. Г. Сиченко, Д.О. Босий, Є.М. Косарєв. – Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6. – С. 95-103.

31. Гончаров, Ю. П. Стабілізуючі тягові перетворювальні агрегати з системою активної фільтрації для електропостачання тягових мереж постійного струму швидкісних магістралей / Ю.П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Замаруєв та ін. – Залізничний транспорт України. – 2011. – № 6. – С. 26-31.

32. Добровольски, Т.П. Обеспечение стабильного напряжения в контактной сети при пропуске скоростных тяжеловесных поездов. / Т.П. Добровольскис, Е.Н. Алексеев. – Токо́сьем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе: Сб. научн. тр. ОАО ВНИИЖТ. – М.:Интекст, 2010, с. 184-187.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 92   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

33. Пунынин, В.Н. Условия эффективного использования емкостного накопителя энергии в системах тягового электроснабжения железных дорог / В.Н. Пунынин, В.Л. Никитин. – Электричество, 1993. – № 1, с. 52-58.

34. Международный проект «Высокоскоростные железные дороги» / И.П. Киселёв, Е.А. Сотников, В.С. Суходоев. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2001. – 51 с.

35. Аржанников, Б.А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока / Б.А. Аржанников. – Екатеринбург: УрГУПС, 2010. – 176 с.

36. Марикин, А.Н. Стабилизация напряжения на токоприемнике подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока / А.Н. Марикин. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2008 – 255 с.

37. Босий, Д.О. Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності / Д.О. Босий. – Електрифікація транспорту. – 2014. – № 8. – С. 15.

38. Методы оптимизации в примерах в пакете MathCAD 15. Ч. I: Учеб. пособие / И.В. Кудрявцева, С.А. Рыков, С.В. Рыков, Е.Д. Скобов. – СПб.: НИУ ИТМО, ИХиБТ, 2014. – 166 с.

39. Методы оптимизации. Курс лекций. / Е.А. Нурминский – ДВГУ–ДВФУ. – 2015. – 40 с

40. Губський, П.В. Підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання постійного струму при швидкісному русі: дис. к. тех. наук / В.П. Губський. – Д., 2019 – 205 с.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.1926-ЕС.РД.2020- ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 93   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |