

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет
Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему Покращення управління режимами електропостачання залізниці

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1412-2

Черневич М.В.

(прізвище та ініціали) (підпис)

спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва)

Керівник

Саблін О.І.

(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя

2023 рік

Запорізький національний університет

Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень
(повна назва кафедри)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

Спеціалізація _____
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма 141.00.11 Електроенергетика,
електротехніка
(шифр і назва)
та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.



В.Л. Коваленко

“ 07 ” грудня 2023 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Черневич Микита Володимирович

1. Тема роботи: Покращення управління режимами електропостачання залізниці

Керівник роботи: Саблін О.І.

затверджені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639 - с




2. Строк подання студентом роботи: 01 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: поточний тариф вартості електроенергії; рід струму - постійний; напруга живлення – 3000 В;

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендовано розробити): Вступ; характеристика існуючих способів підвищення напруги в тяговій мережі; аналіз споживання електричної енергії обладнанням заводу; побудова імітаційної моделі ділянки тягової мережі постійного струму; техніко-економічне обґрунтування розроблених заходів

5. Перелік графічного матеріалу (пропонується): аналіз споживання електроенергії залізниці; моделювання ланок енергосистем; підключення тягових підстанцій результати моделювання та розрахунків

6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Саблін О.І., професор		
Розділ 2	Саблін О.І., професор		
Розділ 3	Саблін О.І., професор		
Нормоконтроль	Бандуренко І.І., асистент		

7. Дата видачі завдання 01.06.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Аналіз способів підвищення напруги в тяговій мережі	01.10.2023	
2	Моделювання ділянки тягової мережі	01.11.2023	
3	Розгляд двоколіїної ділянки	01.12.2023	

Студент



Черневич М.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник дипломної роботи



Саблін О.І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтролер



Бандуренко І.І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У рамках магістерського дослідження вивчено аспекти підвищення напруги на двоколіній ділянці тягової мережі постійного струму при різних швидкостях руху поїздів. Здійснено аналіз існуючих систем для підвищення напруги на ділянці постійного струму, де розглянуті різні довжини міжпідстанційної зони. Досліджено вплив збільшення міжпідстанційної зони до 50 км з використанням перетворювача напруги 6,6/3,3 кВ на пропускну здатність даної ділянки при руху кількох швидкісних поїздів. Зроблено висновок про економічну ефективність системи з виносними фідерами живлення на ділянці завдовжки 15 км. Також зроблено висновок щодо раціональності використання системи із перетворювачем напруги 6,6/3,3 кВ на ділянці завдовжки 50 км.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: система тягового енергопостачання, напруга, пантограф, електрорухомий склад, електропостачання, перетворювач, фідери.

ANNOTATION

As part of the master's research, the aspects of voltage increase on the two-track section of the direct current traction network at different train speeds were studied. An analysis of the existing systems for increasing the voltage on the direct current section was carried out, where different lengths of the intersubstation zone were considered. The impact of increasing the inter-substation zone to 50 km using a 6.6/3.3 kV voltage converter on the throughput of this section with the movement of several high-speed trains was studied. A conclusion was made about the economic efficiency of the system with remote power feeders on a 15 km long section. A conclusion was also made regarding the rationality of using a system with a voltage converter of 6.6/3.3 kV on a 50 km section.

KEY WORDS: traction power supply system, voltage, pantograph, electric rolling stock, power supply, converter, feeders.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз способів підвищення напруги в тяговій мережі	9
1.1 Способи регулювання напруги на шинах тягових підстанцій	11
1.2 Існуючі способи підвищення напруги в системі постійного струму ...	13
1.3 Напрямки розвитку ділянок постійного струму для швидкісного руху	15
2 Моделювання ділянки тягової мережі	22
2.1 Моделювання схеми заміщення ділянки постійного струму	26
3 Розгляд двоколіїної ділянки	31
3.1 Двоколіїні ділянки при звичайній схемі живлення	31
3.2 Застосування перетворювача напруги 6,6/3,3 кВ дільниці.....	36
3.3 Застосування виносних фідерів живлення 3,3 кВ на ділянці	41
3.4 Підвищення напруги холостого ходу на тяговій підстанції	46
3.5 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів	52
3.6 Питання охорони праці.....	56
Висновки.....	65
Список використаних джерел	66
Додатки	69

ВСТУП

Мережа залізниць в Україні становить лише 2,4% від загальних залізниць світу. Загальна протяжність електрифікованих залізниць в Україні складає 9,2 тис. км, при цьому 49,8% електрифіковано за системою змінного струму 25 кВ 50 Гц, а 50,2% - за системою постійного струму 3,3 кВ [1]. Обсяг перевезень на електрифікованих залізницях України становить значну частку - 86,4% від загального обсягу [1]. З моменту виникнення залізниць у промислово розвинених країнах ведуться наукові дослідження та випробування із метою вдосконалення швидкості руху поїздів.

На діючих залізницях можливе підвищення швидкості лише до рівня 140 – 160 км/год, проте це вимагає значних капіталовкладень. Проблема підвищення швидкості руху поїздів вимагає комплексного розвитку всіх складових: вагонного та локомотивного парку, колійної інфраструктури, систем централізації, автоблокування, енергопостачання, та відповідно, значних фінансових вкладень.

Розвиток технічних засобів залізниці може відбуватися за двома напрямками:

- 1) Розвиток багатосистемного електрорухомого складу.
- 2) Вибір єдиної системи електричної тяги з можливим переходом на неї всіх залізниць.

У випадку системи постійного струму, характеризується відносно низьким значенням напруги в контактній мережі. Це може викликати непередбачувані витрати на тягові підстанції та контактну мережу при великій потужності електрорухомого складу. Рівень низької напруги обмежує швидкість руху поїздів та збільшує втрати електроенергії. Розвиток силових напівпровідників та високочастотних імпульсних перетворювачів свідчить про важливість розгляду системи постійного струму зі збільшеною напругою, зокрема 12 кВ, як перспективної. Однак викликає складність впровадження цієї системи, особливо у контексті електрорухомого складу та потреби

поступового переходу існуючих ліній, що робить цей процес непрактичним протягом наступних 20-30 років.

Вважається, що система постійного струму не є перспективною для високошвидкісного руху, проте вона успішно використовується для міського електротранспорту та з'єднань залізниці з приміським рухом. Такий вибір є компромісом між вимогами високошвидкісного руху та ефективністю в інших аспектах залізничного транспорту.

Для підвищення рівня напруги постійного струму до поїздів розглянуті наступні шляхи: встановлення перетворювача напруги 6,6/3,3 кВ, коли тягова підстанція подає живлення через шину 6,6 кВ за допомогою підсилюючого проводу; підвищення напруги холостого ходу (на тяговій підстанції до 3,5 кВ), використання системи з виносними фідерами живлення 3,3 кВ.

У дипломному проекті розглядається варіант підвищення рівня напруги через систему з виносними фідерами, що сприяє підвищенню пропускної здатності ділянки та зниженню витрат електроенергії. Також розглядається використання перетворювача напруги 6,6/3,3 кВ для збільшення довжини міжпідстанційної зони, дозволяючи проходження кількох пар швидкісних поїздів через неї. Ця система забезпечує подачу напруги на перегін підвищеною напругою, зменшуючи втрати потужності в тяговій мережі та дозволяючи використовувати той же електровоз, що і при звичайній системі 3,3 кВ.

1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАПРУГИ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ

Споживані електрорухомим складом струми, що йдуть з поїздами в зонах живлення тягових підстанцій, значно впливають на зміну напруги на струмоприймачі як свого, так і інших електровозів, на шинах тягових підстанцій і в системі зовнішнього енергопостачання.

Рівень напруги на струмоприймачі залежить від:

- 1) зміни напруги в первинній системі електропостачання;
- 2) схеми живлення електровозів (одностороннє або двостороннє);
- 3) зміни числа поїздів на ділянці.

На шинах тягових підстанцій Напруга має менші межі коливання, ніж на струмоприймачах електровозах. Якщо брати нормальний режим роботи системи, то для підстанцій з первинною напругою 110 кВ напруга коливається від -5 до 4,4 %, для підстанцій з напругою 35 кВ - - 4 до +4 %.

При вимушених режимах та ненормальних схемах живлення напруга коливається у великих межах: до 8% при відключеній одній з ліній електропередач; зниження напруги живлення на окремих підстанціях на 13,8%, іноді на 21,8% за наявності на цих підстанціях великого районного навантаження, малої потужності системи електропостачання і недостатньому перерізі проводів ліній електропередач.

Напруга на струмоприймачах електровозів при нормальній схемі живлення міжпідстанційних зон змінюється у значних межах. Можна зробити висновок, що чим більша потужність, споживана електровозом, тим більші межі. При струмах 1000 А напруга змінюється в межах 2,6...3,5; 2,3...3,3 кВ, різниця напруги близько 1000 В; при струмах 1700...1800 А (електровоз ВЛ 8) – 1000...1200 В.

Для електровозів від значення напруги залежить швидкість руху. Координація роботи різних служб транспорту здійснюється з допомогою графіка руху, визначального час ходу поїздів, оборот локомотивів, роботу

станцій. Основна вимога до режиму напруги в тяговій мережі полягає в тому, щоб час ходу поїздів, закладений у графік, має бути виконаний.

Обмежити зміни напруги в тяговій мережі можна збільшенням потужності системи електропостачання, особливо у вимушеному режимі, коли електровоз може працювати при сильно зниженому напрузі, тому при такій ситуації доводиться скорочувати розміри руху або посилювати систему електропостачання.

Зміна напруги характеризується відхиленням та коливанням напруги. Відхилення напруги – зміна напруги такої тривалості, що призводить до зміни швидкості руху поїздів. Коливання напруги – це відхилення напруги в короткий проміжок часу, коли швидкість не встигає змінитися.

Основними тягово-енергетичними показниками роботи є швидкість і витрата енергії. Також відомо те, що чим менше ухил чи відстань між підстанціями, то менше змінюється швидкість зі збільшенням маси поїздів. Підвищення маси поїздів за збереження їх кількості без посилення системи електропостачання призводить до зниження середньої швидкості на керівному підйомі. Якщо швидкість і сила тяги залишається постійною, звідки потужність електровоза теж залишається постійною, то при підвищенні напруги знизиться струм, споживаний електровозом, а значить, знизиться втрати електроенергії. При підвищенні напруги струм електровоза знижується, при цьому швидкість незначно коливається, якщо режим змінюється за рахунок послаблення збудження. У питомих витратах електроенергії відзначається такі особливості: зниження у разі підвищення напруги на ділянках з важким профілем і з високою швидкістю; підвищення за низьких швидкостей руху.

Режим напруги у системі електропостачання має забезпечувати нормальну роботу системи електричної тяги. Прийнята номінальна напруга на струмоприймачі електровоза 3 кВ постійного струму. Номінальна напруга на шинах підстанції 3,3 кВ. Максимальна та мінімальна напруга на струмоприймачах відповідно 3,6...4,0 та 2,0...2,7 кВ.

У Правилах технічної експлуатації зазначено, що напруга на струмоприймачі електровоза на будь-якому блоці – ділянці має бути не менше 2,7 кВ. Норми напруги на струмоприймачах передбачають найменшу напругу для електровозів у нормальних режимах роботи системи та наступні максимальні втрати напруги щодо номінальної напруги на шинах підстанції – 18,2 %.

Режими роботи системи можуть бути нормальними та вимушеними. Для нормальних режимів роботи можуть бути забезпечені оптимальні умови напруги. Для вимушених режимів необхідно забезпечити нижню межу значення напруги.

Вимоги щодо оптимізації напруги:

1) забезпечення руху поїздів зі швидкістю, що вимагається за умовами пропускної спроможності ділянки або економічно обґрунтованою або допускається за окремими залізничними пристроями;

2) забезпечення при заданих (за графіком) часах ходу перегонів мінімальної витрати енергії з урахуванням втрат у системі електропостачання;

3) забезпечення надійності роботи всіх елементів електрорухомого складу та пристроїв електропостачання.

Чим вище напруга на перегоні, що лімітує, тим менший міжпоїздовий інтервал і тим більша можливість забезпечити прискорений пропуск поїздів у періоди їх згущення.

1.1 Способи регулювання напруги на шинах тягових підстанцій

Для підвищення стабілізації та регулювання напруги на шинах тягових підстанцій та в окремих точках тягової мережі застосовуються пристрій для перемикання відгалуження обмоток понижуючих трансформаторів під навантаженням (РПН), перетворювальні трансформатори зі ступінчастим та безконтактним регулюванням, система 6,6 кВ/3,3 кВ. Напруги на тягових шинах підстанцій підвищують установки КПІ та ЧПІ. Пристрої РПН

обладнані всі понижуючі трансформатори типу ТДТН - 15 (20) МВА. На деяких тягових підстанціях ці пристрої використовують для дистанційного (з щита управління) перемикання відгалужень обмоток трансформаторів.

Існує установка, що забезпечує автоматичне регулювання напруги на шинах тягових підстанцій (АРПН). Однак вони не використовуються з повною силою, оскільки підтримати підвищену напругу на шинах постійного струму вимагає підвищення напруги на первинній стороні перетворювальних трансформаторів, а значить і у всіх споживачів, що живлять від шин 10 кВ, трансформаторів потреб.

Перетворювальні трансформатори ТМРН-15000/10, ТДРУНГ-20000/110, ТДЦТРУН-25000/110 мають ступінчасте регулювання. Для трансформатора ТДРУНГ-20000/110 – система АРПН.

Перетворювальні трансформатори ТДПУ-20000/10 мають безконтактне регулювання (ДН) напруги за допомогою дросельного мосту.

Діапазон регулювання напруги приблизно 18-20% мінімальної напруги холостого ходу.

Як регулятор напруги ДНУЗТ запропонував тиристорний перетворювач (РТП), що складається з двох почергово керованих мостів, зашунтованих діодами і включених в фідер, що відсмоктує, підстанції.

Чим вище стабілізована напруга на шинах тягових підстанцій і відповідно вища напруга на струмоприймачі електровоза, наступного в парному (важчому за профілем) напрямку, тим менше частка часу ходу в режимі тяги і рекуперації і більше в режимі вибігу. У непарному напрямку (легшому за профілем) при підвищенні напруги збільшується частка часу ходу в режимі тяги і зменшується в режимі вибігу та рекуперації. При збільшенні напруги витрата енергії на тягу в парному напрямку збільшується, непарному зменшується.

1.2 Існуючі способи підвищення напруги в системі постійного струму

Для більшості ділянок, електрифікованих на постійному струмі, у зв'язку зі збільшеними розмірами руху та збільшенням маси поїздів питання посилення пристроїв електропостачання стоїть особливо гостро. Враховуючи те, що головним недоліком системи постійного струму 3,3 кВ є низька напруга і тому при підвищенні маси поїздів у системі електропостачання з'являються дуже великі струми, запропоновано підвищити напругу в тяговій мережі з 3 кВ до 6, 12, 24 кВ постійного струму.

Розроблено способи посилення, які випробовуються на діючих електрифікованих ділянках. Є пропозиції щодо доцільності переведення окремих ділянок, електрифікованих на постійному струмі 3 кВ, на змінний струм 25 кВ, 50 Гц.

Існуючі способи посилення системи тяги постійного струму 3 кВ можна поділити на дві групи:

1) посилення системи електропостачання за збереження напруги у ній вище 4 кВ без заміни електровоза:

- існуюча система без посилення (підвіска М-120+2МФ-100 на кожному колію без підсилювальних проводів);
- установка на підстанціях тягових трансформаторів із регулюванням напруги під навантаженням;
- підвіска на кожний шлях по одному підсилювальному дроту А-185;
- підвіска на кожен шлях по два підсилювальні дроти А-185;
- спорудження у існуючій міжпідстанційній зоні однієї проміжної підстанції з живленням від лінії 110 кВ;
- спорудження у міжпідстанційній зоні одноагрегатної тягової підстанції, що отримує живлення по лінії 10 кВ;
- установка у міжпідстанційній зоні двох перетворювальних пунктів з живленням від поздовжньої лінії 6 кВ (система ІПА 6,6/3,3 кВ – інверторно – перетворювальний агрегат);

- установка у міжпідстанційній зоні двох перетворювальних пунктів з живленням від поздовжньої лінії 12 кВ (система ППА 13,2/3,3 кВ).

2) перехід інші системи тяги, отже і обов'язковий перехід інші електровози:

- система постійного струму 6 кВ із використанням інших електровозів;

- система постійного струму 12 кВ;

- система постійного струму 24 кВ;

- система змінного струму 25 кВ.

Проводимо аналіз ділянок постійного струму, що існують в Україні. Вже застосували пункти 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, тобто контактну підвіску на постійному струмі – М-120+2МФ-100+2А-185. Отже, перспективними є решта пунктів. Найбільш економічні способи посилення окремих зон: 1.5 – для зон завдовжки 30 км; 1.8 – для зон завдовжки 20 – 25 км.

У системі тяги 3 кВ відстань між підстанціями не перевищувала 30 км; для системи 6 кВ – 50 км; для системи 12 кВ постійного струму та 25 кВ змінного струму – 60 км.

У системі постійного струму 6, 12, 24 кВ електровозі встановлюється фільтр пробка, яка зменшує вплив на лінії зв'язку. Особливістю є наявність в електровозі ланцюга з тиристорами, за допомогою яких здійснюється частотне регулювання - можна подавати на тягові двигуни напругу різної шпаруватості, а значить струм, що протікає через обмотки двигуна, буде різним, різною буде швидкість двигуна.

Перевагами системи постійного струму 6, 12, 24 кВ є:

- значне зниження струмів у контактній мережі;
- менший переріз контактної підвіски;
- зменшення втрати напруги та потужності в тяговій мережі;
- еквівалентна за енергетичними характеристиками системі 27,5 кВ;
- відстань між тяговими підстанціями 40 – 60 км;

Недоліками системи постійного струму 6,12, 24 кВ вважаються:

- створення нового типу електровоза;
- виник вплив на лінії зв'язку;
- ускладнилася конструкція тягової підстанції.

Особливістю системи постійного струму 3,3 кВ з лініями живлення 6, 12 кВ – наявність інверторно-перетворювального агрегату на перегоні контактної мережі.

Переваги системи постійного струму 3,3 кВ з лініями живлення 6, 12 кВ:

- покращилися енергетичні показники постійного струму за рахунок передачі потужності частково через лінію поздовжнього електропостачання 6, 12 кВ;
- знизилася втрата напруги та потужності в тяговій мережі;
- вдається використати той же електровоз, що і за системи 3 кВ;
- відстань між тяговими підстанціями 40-50 км.

Недоліки системи постійного струму 3,3 кВ з лініями живлення 6, 12 кВ:

- складність обслуговування контактної мережі;
- необхідно мати інверторно-перетворювальний агрегат, що не обслуговується, що живиться від поздовжньої лінії 6, 12 кВ.

Кожна з цих систем має свої переваги та недоліки, але насамперед при виборі тієї чи іншої системи для ділянки необхідно враховувати особливості розташування даної ділянки, розміри руху, які будуть здійснюватися на ньому і чи залишати резерви на подальшу перспективу.

1.3 Напрямки розвитку ділянок постійного струму для швидкісного руху

Проходження великоваговими складами ділянок залізниці з великими відстанями між тяговими підстанціями постійного струму або довгих

консольних ділянок призводить до зниження напруги контактної мережі у струмоприймачів і обмеження потужності, що розвивається локомотивами.

Для забезпечення пропускної спроможності під час руху великовагових складів та забезпечення швидкісного руху потрібне збільшення потужності живлення контактної мережі за допомогою будівництва додаткових підстанцій між існуючими тяговими підстанціями. Відсутність досить потужної мережі змінного струму поблизу ділянки залізниці споруда додаткової підстанції потребує значних капіталовкладень.

Живлення контактної мережі постійного струму на ділянці між існуючими тяговими підстанціями доцільно виконувати через перетворювач з підвищеною вхідною напругою, що живиться по ізольованому від контактної мережі підсилювальному дроту.

Як перетворювач використовувався автономний інвертор на тиристорах звичайного типу з трансформатором, що працює на підвищеній частоті 800 Гц, і вихідним випрямлячем.

Застосування сучасних IGCT тиристорів дозволяє суттєво підвищити надійність перетворювача та спростити його схему. Перетворювач постійного струму підвищеної вхідної напруги в постійний струм напругою контактної мережі 3,3 кВ є багатофазним перетворювачем постійного струму, виконаний за схемою з широтно-імпульсним регулюванням напруги на накопичувальних дроселях, що дозволяє забезпечити більш високу якість електропостачання контактної мережі.

Перетворювач виконаний за безтрансформаторною схемою і включає шість IGCT-тиристорних ключів, три діодні ключі, три накопичувальні дроселі і фільтрове обладнання. Спрощена важлива схема представлена на рисунку 1.1.

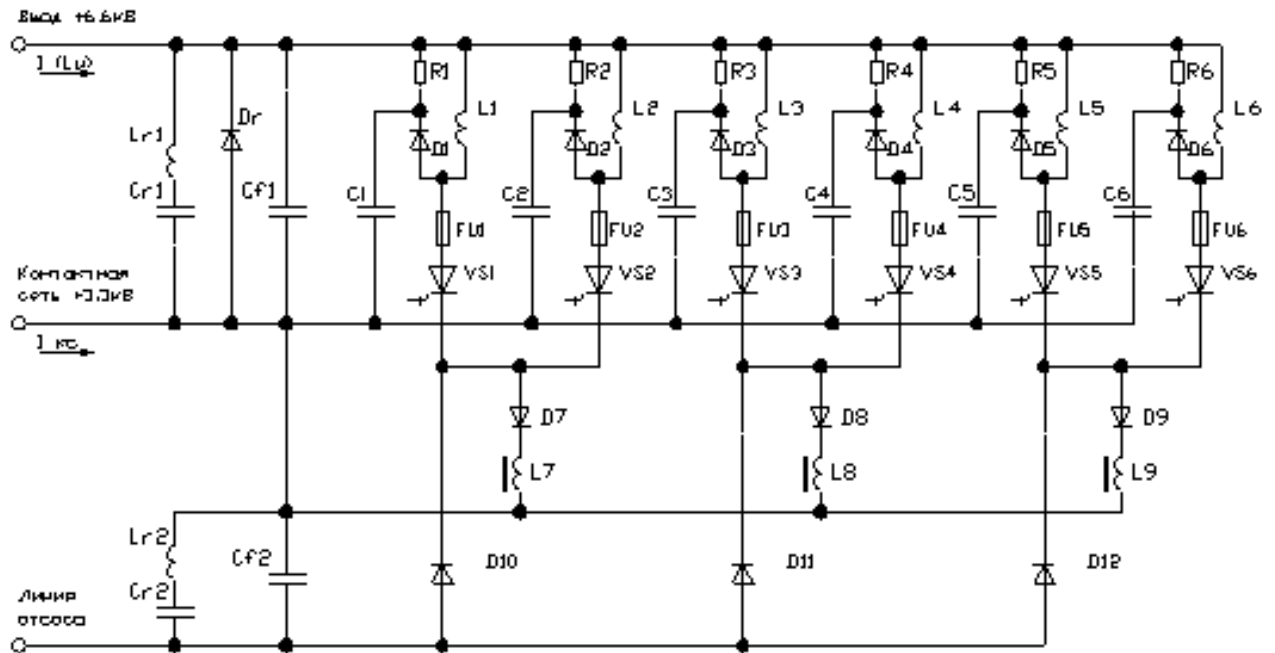


Рисунок 1.1 – Схема імпульсного перетворювача постійного струму

Тактова частота роботи перетворювача обрана з умов забезпечення мінімальних масогабаритних показників дросельного обладнання та теплового режиму напівпровідникових приладів та становить 1000 Гц. Відповідно кожен з тиристорних ключів працює на частоті 167 Гц, що дозволяє забезпечити охолодження силових приладів за допомогою радіаторів на теплових трубах з примусовим повітряним охолодженням. Регулятор, крім стабілізації вихідної напруги, забезпечує обмеження вихідного струму при можливих перевантаженнях, а також забезпечує функції захисту в різних позаштатних ситуаціях. Виконання перетворювача за шестиканальною схемою забезпечує збереження його працездатності при відмові одного або кількох каналів з відповідним зниженням вихідної потужності. Допустимий рівень психофізичних напруг у контактній мережі забезпечується застосуванням аперіодичних та резонансних фільтрів.

Електронний захист перетворювального обладнання з управлінням IGBT-тиристорів побудований з використанням широкосмугових вимірювальних датчиків струму в кожному із шести каналів.

Можливі короткі замикання у високовольтному обладнанні відключаються спеціальними запобіжниками, що швидко діють, включеними послідовно з кожним із силових тиристорних ключів. Зникнення вхідної напруги може призвести до появи неприпустимої напруги зворотного знаку на IGBT-тиристорах. Для блокування зворотної напруги використовуються шунтуючі діоди, що з'єднують контактну мережу 3,3 кВ із вхідною мережею підвищеної напруги.

При коротких замиканнях на виході перетворювача відключається швидкодіючий вимикач і одночасно блокуються імпульси управління IGBT-тиристорами. При внутрішніх коротких замиканнях імпульси управління також блокуються і одночасно видається команда на вимкнення живлення вхідної мережі. Для цієї ж мети послідовно з кожним із IGBT-тиристорів включений швидкодіючий запобіжник.

Максимальне значення прямої напруги на тиристорному ключі вибирається у 9 кВ, зворотне напруга відсутня. Перевантаження струму при штатному функціонуванні електронного захисту також відсутні. Таким чином, результати розрахунків дозволяють зробити висновок, що перетворювач зберігає працездатність після аварійних відключень.

При розробці конструкції перетворювача використовувався досвід створення IGBT-тиристорного інвертора для частотно-регульованого електроприводу з вихідною напругою 6 кВ та потужністю 5 МВт. Фотографія такого перетворювача представлена на рисунку 1.2.

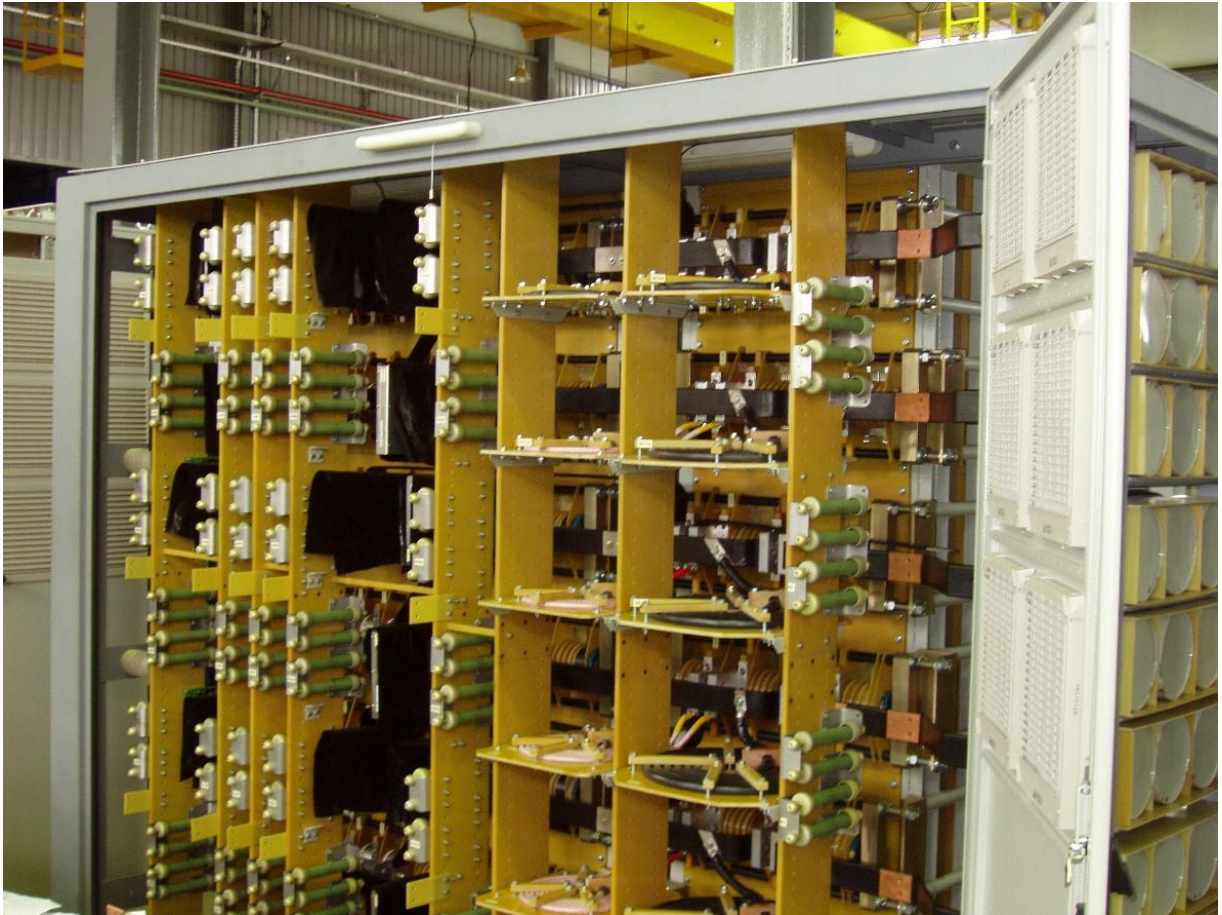


Рисунок 1.2 – Конструкція перетворювача на IGBT-тиристорах

Конструкція перетворювача побудована з використанням організованих повітряних каналів для охолодження напівпровідникових приладів. Конденсаторні батареї та шинні з'єднання між приладами виконані з мінімізацією індуктивності контурів струмових ланцюгів при комутації для забезпечення зниження перенапруг на напівпровідникових приладах. Для зниження перенапруг при комутації використовується також високочастотний LRD-контур, виконаний відповідно до рекомендацій розробників IGBT-тиристорів.

Розрахунки показують, що застосування перетворювача та живлення його від підвищеної напруги по дроту, що підсилює, ефективно при відстанях між сусідніми тяговими підстанціями до 35-40 км.

Схема живлення системи з перетворювачем напруги представлена на рисунку 1.3.

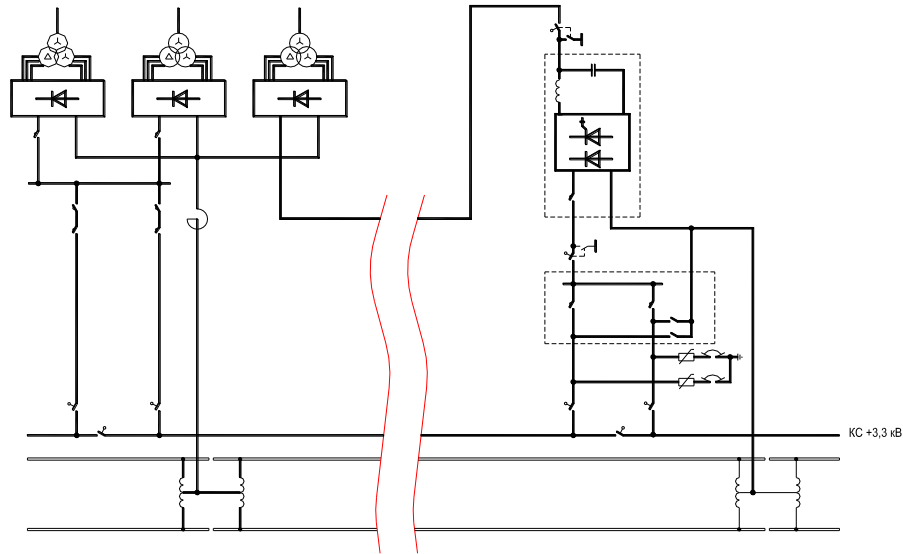


Рисунок 1.3 – Схема живлення системи посилення для контактної мережі
3,3кВ

Застосування системи з виносними фідерами живлення.

Проходження швидкісними поїздами ділянок залізниці з невеликими відстанями між тяговими підстанціями постійного струму призводить до зниження напруги в контактній мережі у струмоприймачів та обмеження потужності, що розвивається локомотивами. Для забезпечення пропускної спроможності під час руху швидкісних поїздів та забезпечення швидкісного руху потрібне збільшення потужності живлення контактної мережі.

Живлення контактної мережі постійного струму на ділянці довжиною 15-20 км між існуючими тяговими підстанціями доцільно виконувати через систему з виносними фідерами живлення 3,3 кВ. Оптимальні точки підключення виносних фідерів десь на відстані 3-4 км. від тягової підстанції. Схема підключення системи з виносними фідерами представлена на рисунку 1.4.

Особливістю системи з виносними фідерами живлення є те, що живлення міжпідстанційної зони здійснюється не в місці розташування тягової підстанції (в нульовому кілометрі ділянки), а десь на 3-4 кілометри фідерної зони. Як фідери живлять узятий провід 2А-185.

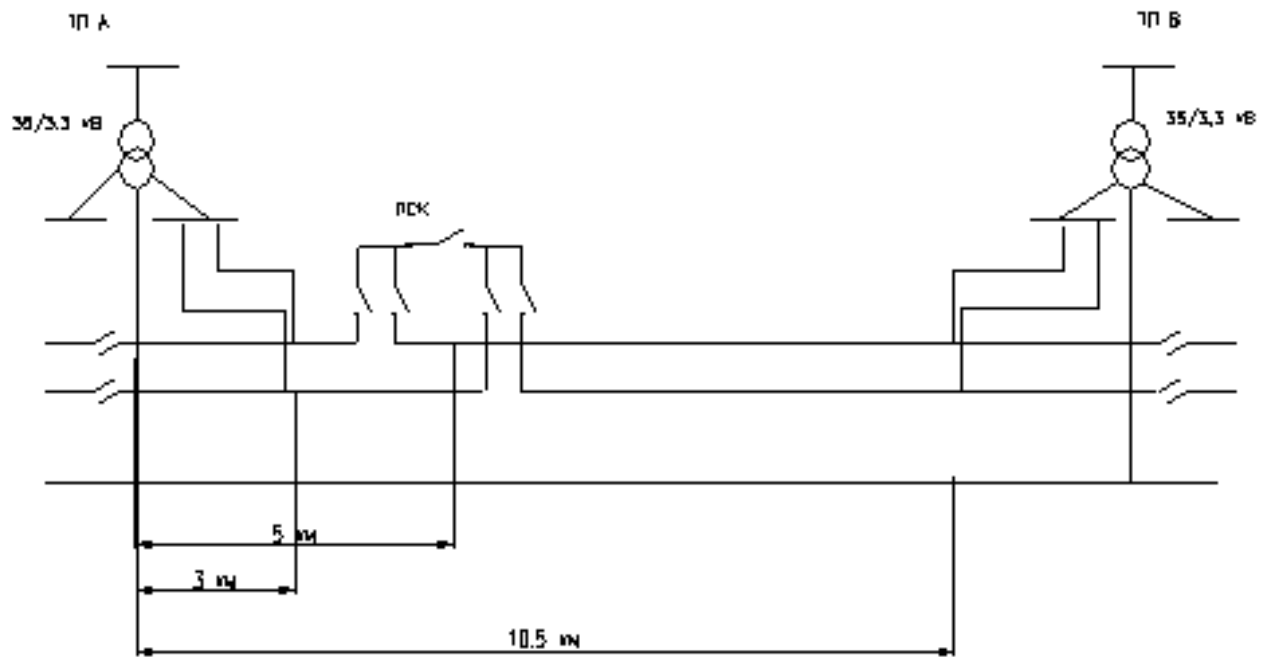


Рисунок 1.4 – Схема підключення системи з виносними фідерами живлення 3,3 кВ

При застосуванні системи з виносними фідерами з'явилася можливість підвищити напругу на струмоприймачі електровоза при пропуску швидкісних поїздів, а також знизити витрати електроенергії та втрати потужності в тяговій мережі.

Ця система не вимагає особливого обслуговування як система з перетворювачем напруги, і обслуговується як звичайна система 3,3 кВ без виносних фідерів бригадами дистанції контактної мережі.

Порівняння цих систем – з перетворювачем напруги 6,6/3,3 кВ та системи з виносними фідерами живлення 3,3 кВ – у схемах підключення до міжпідстанційної зони представлені на листі 1.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ДІЛЯНКИ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ

Вивчення та дослідження різних процесів у системі тягового електропостачання пов'язане з певними труднощами, які полягають у фінансових та тимчасових витратах для підготовки експерименту на ділянках електропостачання та окремих елементах в умовах нормальних та аварійних режимів. Програма Electronics Workbench допомагає проводити всі необхідні дослідження, не стикаючись із труднощами. За допомогою Electronics Workbench можна скласти модель будь-якої ділянки залізниці – одноколійного, двоколійного, триколійного, постійного та змінного струму різних напруг. Це дозволяє досліджувати нетрадиційні системи тяги, оцінювати їх економічність за втратами електроенергії та потужності в тяговій мережі, вивчати стаціонарні та перехідні процеси.

У програмі є бібліотеки, які включають велику кількість поширених електронних компонентів. До складу цих бібліотек входять такі елементи: пасивні елементи, гібридні елементи, логічні елементи, цифрові та аналогові елементи, транзистори, тригери, підсилювачі, керовані джерела, керовані ключі, індикатори. Елементи можуть бути як реальними, і ідеальними параметрами.

В Electronics Workbench також представлені контрольно-вимірювальні прилади, які на вигляд та характеристики наближені до їх промислових аналогів вимірювань: амперметр, вольтметр, осцилограф, мультиметр, боді-плоттер (графобудівник частотних характеристик), функціональний генератор, генератор слів, логічний аналізатор, лог перетворювач. Прилади можна налаштувати таким чином, щоб, змінювати шкалу приладів в залежності від діапазону вимірювання, задавати режим роботи приладу, задавати вид вхідних впливів на схему.

Electronics Workbench дозволяє виконувати такі операції:

- вибирати елементи та прилади з наявних бібліотек;
- змінювати параметри цих елементів у широкому діапазоні;

- надавати елементу будь-яке умовне позначення;
- переміщати елементи та схеми у будь-яке місце робочого листа;
- копіювати, вставляти, видаляти елементи;
- повертати елементи на градус, кратний 90;
- змінювати колір провідників;
- одночасне підключення кількох вимірювальних приладів та спостереження їх показань на екрані монітора;

Користуватися при операціях доводиться мишкою і клавіатурою.

Велика кількість приладів дозволяє проводити вимірювання різних величин, задавати вхідні дії, будувати графіки.

Графічні можливості дозволяють:

- зображати криві на графіках;
- одночасно побудувати кілька кривих на одному графіку;
- Виміряти координати точок на графіку.

Програма Electronics Workbench легко освоюється та зручна в роботі.

У ній можна отримати результати моделювання екстремальних значень електротехнічних розрахунків, таких як пропускна здатність, максимальне значення струмів, втрат напруги, перетоку потужності, роботи комутаційної апаратури, релейного захисту.

Перш ніж створювати креслення принципової схеми, необхідно підготувати її ескіз з приблизним розташуванням компонентів і з урахуванням можливості оформлення окремих компонентів у вигляді блоків.

Підготовка вихідних даних для моделювання.

Для моделювання використовувалися параметри підвіски М-120 + 2МФ100 + 2 А-185 та рейок Р65

Опір тягової мережі складається із суми опорів проводів контактної мережі та рейкового ланцюга.

Опір 1 км дротів контактної мережі [11]:

$$r_{кн} = \frac{1}{\sum g_0} \quad (2.1)$$

де $\sum g_0$ сума провідностей 1 км проводів, що становлять контактну мережу:

$$\sum g_0 = 6,32 + 5,65 \cdot 2 + 5,9 \cdot 2 = 29,42 \text{ См / км}$$

Тоді;

$$r_{кн} = \frac{1}{29,42} = 0,034 \text{ Ом / км}$$

Шунтуюча дія землі, що призводить до зниження опору рейкової мережі, враховується множенням значення на коефіцієнт, який для середнього значення опору рейок при переміщенні навантаження вздовж фідерної зони дорівнює [16]:

Опір 1 км рейкової мережі:

$$r_{pm} = \frac{2}{m \cdot G} \quad (2.2)$$

де m кількість рейкових ниток;

G Маса рейки; $G = 65 \text{ кг}$

Тоді

$$r_{pm} = \frac{2}{4 \cdot 65} = 0,007 \text{ Ом / км}$$

$$r_p = r_{pm} \cdot \beta = 0,007 \cdot 0,95 = 0,0066 \text{ Ом / км}$$

Опір 1 км тягової мережі

$$r_{TC} = r_{КП} + r_p \quad (2.3)$$

$$r_{mc} = 0,034 + 0,0066 = 0,041 \text{ Ом/км}$$

Опір до шин постійного струму (внутрішній опір підстанції), наведений до напруги на цих шинах [11]:

$$\rho = 0,01 A U_T^2 \left(\frac{u_{кп}}{n_{mn} \cdot S_{нп}} + \frac{u_{км}}{n_{mt} \cdot S_{нт}} + \frac{100}{S_{кз}} \right), \quad (2.4)$$

де A – коефіцієнт комутації, рівний для шестифазних схем випрямлення і трифазних мостових 0,5; величини з індексом «п» відносяться до понизливих трансформаторів, а з індексом «т»- до тягових.

U_m – номінальна напруга на шинах тягової підстанції;

u_k - напруга короткого замикання трансформатора, %;

n_m - число паралельно працюючих трансформаторів;

S_n - номінальна потужність трансформатора, МВА;

$S_{кз}$ - потужність короткого замикання на вводах тягової підстанції, МВА.

Приймемо = 640 МВА.

Як ГПТ обрані: на тяговій підстанції 1, 2: два у роботі трансформатора ТМРУ – 6200/35 з напругою короткого замикання 8,3 %, номінальна потужність 3700 кВА.

Підставивши числові дані, отримаємо:

$$\rho_1 = 0,01 \cdot 0,5 \cdot 3,3^2 \left(\frac{8,3}{2 \cdot 3,7} + \frac{100}{640} \right) = 0,0696 \text{ Ом}$$

$$\rho_2 = 0,01 \cdot 0,5 \cdot 3,3^2 \left(\frac{8,3}{2 \cdot 3,7} + \frac{100}{640} \right) = 0,0696 \text{ Ом}$$

Для підсилювального дроту напругою 6,6 кВ обрано 2 дроти А – 185. Активний опір одного дроту дорівнює 0,17 Ом/км, двох паралельно з'єднаних дротів – 0.085 Ом/км [21].

2.1 Моделювання схеми заміщення ділянки постійного струму

Моделюючи тягову мережу системи електропостачання за допомогою програми Electronics Workbench, представимо тягову підстанцію у вигляді спрощеної схеми заміщення. Неможливо використовувати модель трансформатора, яку пропонує програма, оскільки вона вимагає заземлень, а це неприпустимо, оскільки може призвести до шунтування деяких ланцюгів.

Схема заміщення фази трансформатора складається з джерела лінійної напруги та внутрішнього опору підстанції представлена рисунку 2.1. Отримані значення опорів тягової мережі внести до змодельованої блок-схеми ділянки тягової мережі, причому таких блоків можна встановити скільки завгодно, імітуючи ділянки будь-якої відстані 1, 2, 5, 10 км та інші. Тягова мережа представлена активними опорами. Контактна мережа та рейки з'єднані в блоки довжиною 5 км з відповідними значеннями, заданими у діалогових вікнах кожного елемента, представлена на рисунку 2.2.

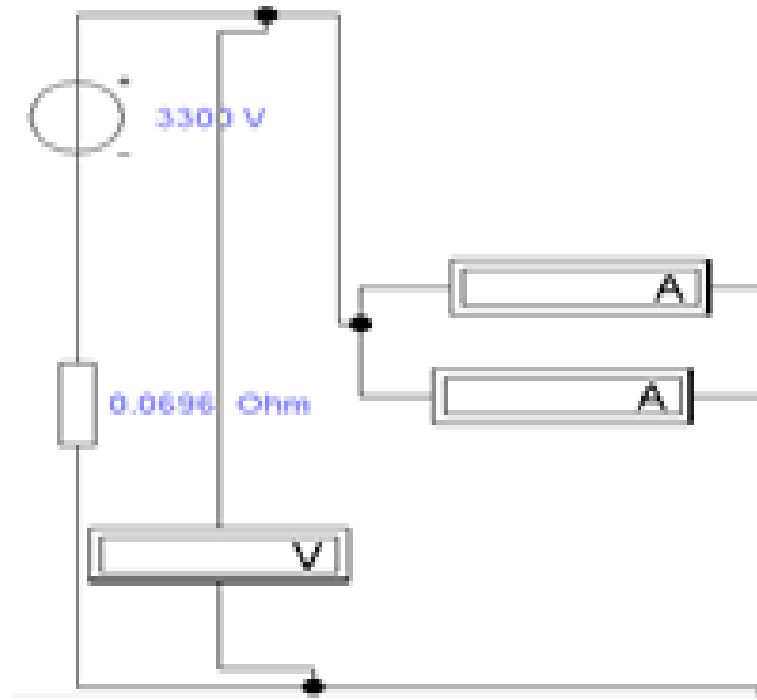


Рисунок 2.1 – Схема заміщення тягової підстанції

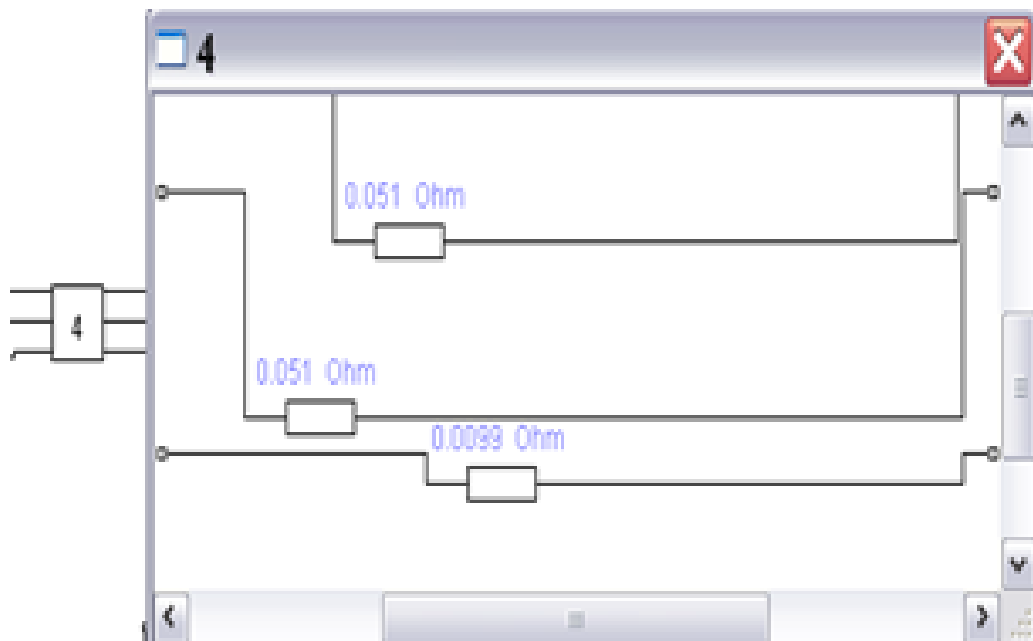


Рисунок 2.2 – Схема заміщення ділянки тягової мережі

Схема заміщення поста секціонування контактної мережі представлена на рисунку 2.3.

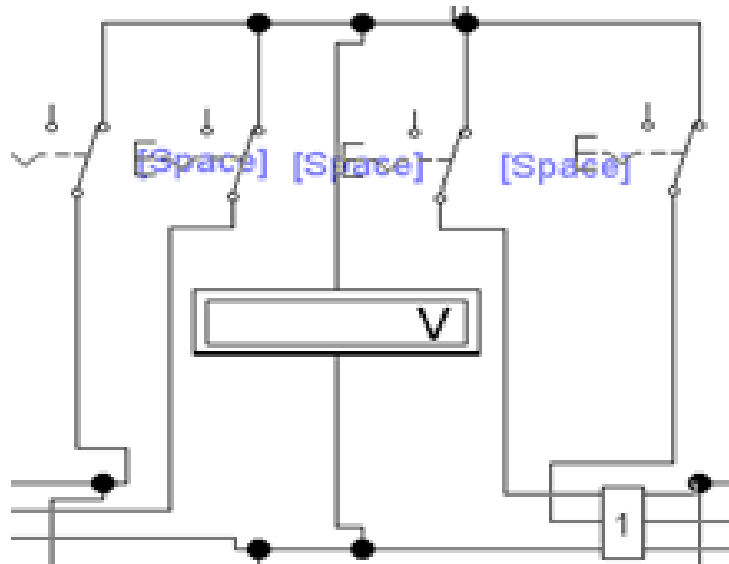


Рисунок 2.3 – Схема заміщення поста секціонування

Схема заміщення електровоза представлена у вигляді джерела струму, що задає, показана на рисунку 2.4.

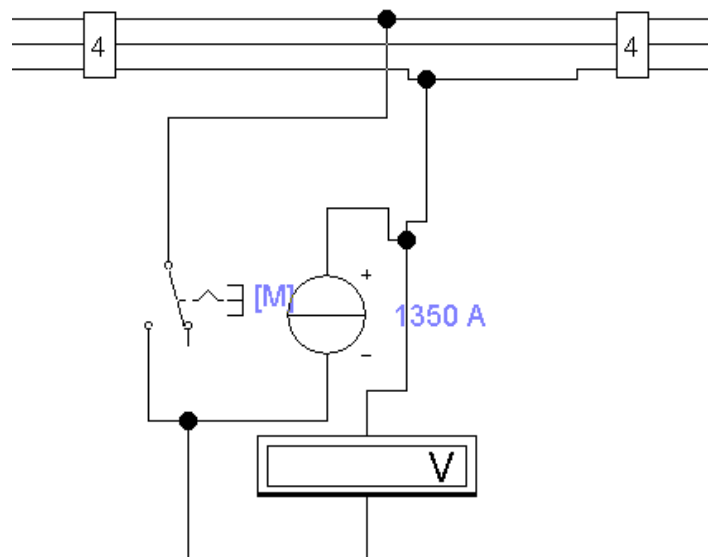


Рисунок 2.4 – Схема заміщення електровозу

Також у Electronics Workbench можна скласти модель перетворювача напруги, яка представлена блоком, підключеним до контактної мережі на посаді секціонування. Схема електропостачання 3,3 кВ з поздовжньою лінією

6 кВ та перетворювачем напруги представлена на рисунку 2.5 Розрахункова схема електропостачання при системі 3,3 кВ представлена на рисунку 2.6. Схема електропостачання з виносними фідерами живлення 3,3 кВ показана на рисунку 2.7.

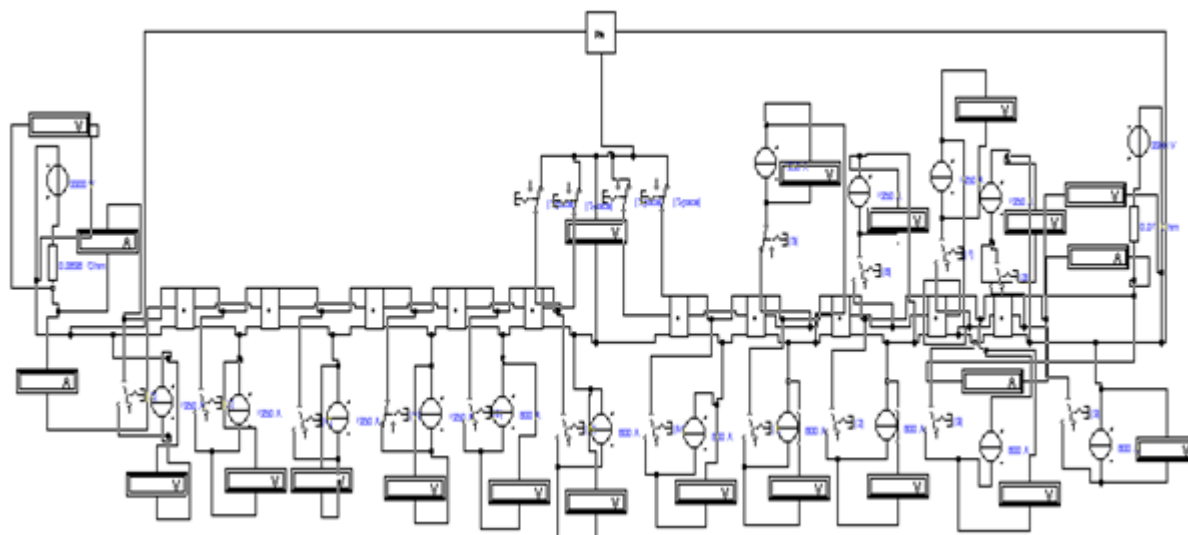


Рисунок 2.5 – Модель схеми електропостачання 3,3 кВ з поздовжньою лінією 6 кВ та перетворювачем напруги

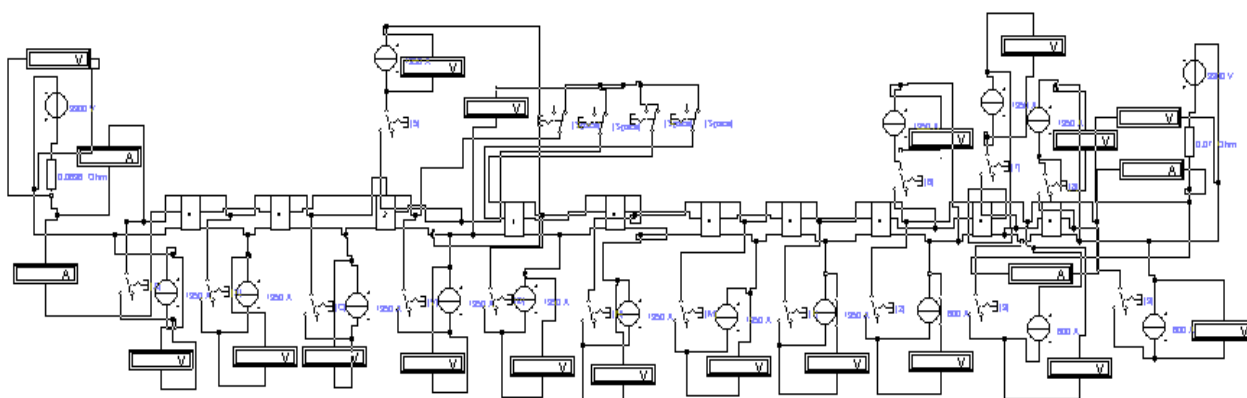


Рисунок 2.6 – Модель схеми електропостачання 3,3 кВ

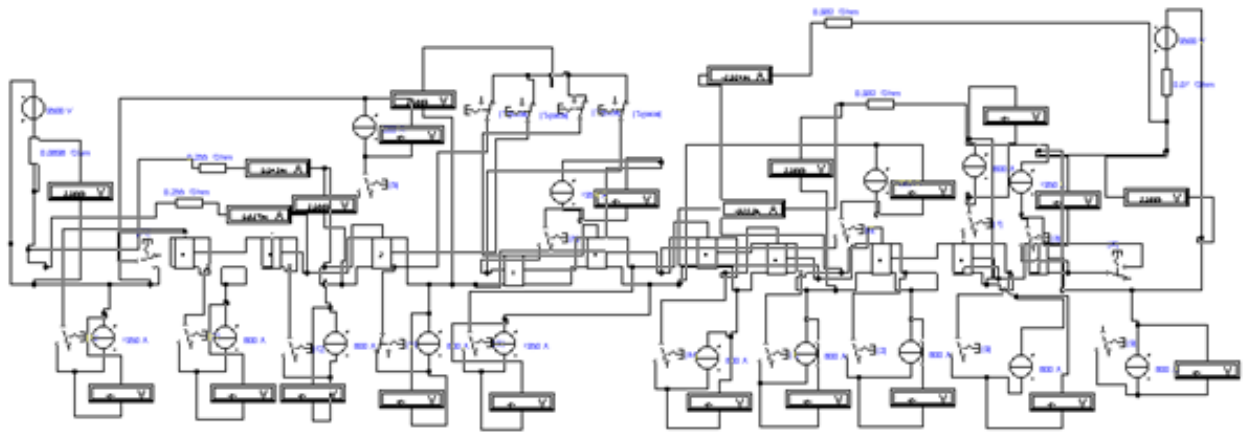


Рисунок 2.7 – Модель схеми електропостачання з виносними фідерами живлення 3,3 кВ

Виходячи з вивчених принципів роботи у програмі Electronics Workbench можна зробити такий висновок, що у програмі можна створити модель будь-якої схеми живлення та будь-якої міжпідстанційної зони.

3 РОЗГЛЯД ДВОКОЛІЙНОЇ ДІЛЯНКИ

3.1 Двоколійні ділянки при звичайній схемі живлення

Розглянемо кілька ділянок з різними довжинами міжпідстанційної зони для того, щоб потім порівняти їх з отриманими результатами при підключенні перетворювача напруги 6,6/3,3 кВ на посту секціонування контактної мережі та іншими способами підняття напруги тягової мережі.

За швидкості руху поїздів 60 км/год інтервал між поїздами становитиме 15 км (15 хвилин). За 1 годину по фідерній зоні завдовжки 15 км пройде чотири пари поїздів, отже за добу – 96 пар поїздів. Довжина міжпідстанційної зони 15 км, пост секціонування контактної мережі розташований на відстані 5 км від тягової підстанції №1.

Дослідження показали, що на зоні можуть перебувати два потяги. Потяги споживають струм 600 А [6].

Зробимо розрахунок витрати енергії та втрат потужності для миттєвих схем через кілька кілометрів. Дані для розрахунків отримано на імітаційної моделі (рисунок 2.5). При цьому згідно [17]:

$$W = U_{ш1} \cdot (I_{ф1} + I_{ф2}) + U_{ш2} (I_{ф3} + I_{ф4}) \quad (3.1)$$

де W - витрата енергії на фідерній зоні, кВт;

$U_{ш1}$, $U_{ш2}$ – напруги на шинах відповідно першої та другої підстанцій, кВ;

$I_{ф1}$, $I_{ф2}$ - струми фідер першої підстанції, А;

$I_{ф3}$, $I_{ф4}$ - струми фідер другої підстанції, А.

Втрати потужності визначимо за формулою [17]:

$$\Delta P = I^2 \cdot r \quad (3.2)$$

де I – струм відповідної ланки (контактної мережі, підстанції, перетворювального пункту, що підсилює дроти), А;
 r – опір відповідної ланки, Ом.

Отримані дані зведемо в таблицю 3.1, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.1 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 60 км/год на ділянці завдовжки 15 км

№ п/п	S км	U _{ш1} кВ	U _{ш2} кВ	U _{э1} кВ	U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,258	3,258	3,258	3,257	600	600	3909,6	0
2	1,5	3,258	3,258	3,226	3,223	600,49	599,51	3909,6	44,3
3	3	3,258	3,258	3,203	3,194	600,4	599,6	3909,6	88,5
4	5	3,259	3,257	3,19	3,166	586,2	613,8	3909,57	147,7
5	6	3,258	3,258	3,17	3,154	600,4	599,6	3909,57	177,12
6	7,5	3,258	3,258	3,152	3,152	600,4	599,6	3909,6	221,40
7	9	3,258	3,258	3,154	3,17	600,4	599,6	3909,6	177,12
8	10,5	3,259	3,257	3,166	3,19	586,2	613,8	3909,57	147,7
9	12	3,258	3,258	3,194	3,203	600,4	599,6	3909,6	88,5
10	13,5	3,258	3,258	3,223	3,226	600,49	599,51	3909,6	44,3
11	15	3,258	3,258	3,257	3,258	600	600	3909,6	0
12								375320,8	109117

При швидкості руху поїздів 120 км/год один поїзд пройде фідерною зоною завдовжки 15 км за 7,5 хвилин. За 1 годину по фідерній зоні завдовжки 15 км пройде вісім пар поїздів, отже за добу – 192 пари поїздів. Дослідження показали, що на зоні можуть перебувати два потяги. Потяги споживають струм 1000 А [16].

Отримані дані зведемо в таблицю 3.2, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.2 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 120 км/год на ділянці завдовжки 15 км

№ п/п	S км	U _{шт1} кВ	U _{шт2} кВ	U _{э1} кВ	U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,23	3,23	3,229	3,229	1000	1000	6460	0
2	1,5	3,23	3,23	3,176	3,172	1000,9	999,1	6460	123
3	3	3,23	3,23	3,139	3,123	1000,8	999,2	6460	246
4	5	3,232	3,228	3,116	3,077	977	1023	6459	410,2
5	6	3,23	3,23	3,083	3,057	1000,8	999,2	6459	492
6	7,5	3,23	3,23	3,053	3,053	1000,8	999,2	6460	615
7	9	3,23	3,23	3,057	3,083	1000,8	999,2	6460	492
8	10,5	3,232	3,228	3,077	3,116	977	1023	6459	410,2
9	12	3,23	3,23	3,123	3,139	1000,8	999,2	6460	246
10	13,5	3,23	3,23	3,172	3,176	1000,9	999,1	6460	123
11	15	3,23	3,23	3,229	3,229	1000	1000	6460	0
12								1240315	606220

При швидкості руху поїздів 140 км/год поїзд пройде міжпідстанційною зоною завдовжки 15 км за 6,43 хвилини. За 1 годину по фідерній зоні завдовжки 15 км пройде 9 пар поїздів, отже за добу – 216 пар поїздів. Дослідження показали, що на зоні знаходяться два потяги. Потяги споживають струм 1150 А [16].

Отримані дані зведемо в таблицю 3.3, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.3 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 140 км/год на ділянці завдовжки 15 км

№ п/п	S км	U _{шт1} кВ	U _{шт2} кВ	U _{э1} кВ	U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,22	3,22	3,219	3,218	1150	1150	7406	0
2	1,5	3,22	3,22	3,158	3,153	1150,8	1149,2	7406	162,7
3	3	3,22	3,22	3,114	3,096	1150,9	1149,1	7406	325,3
4	5	3,222	3,218	3,089	3,044	1123,6	1176,4	7405	542,5
5	6	3,22	3,22	3,05	3,02	1151	1149	7405	650,7
6	7,5	3,23	3,23	3,016	3,016	1151	1149	7429	813,3
7	9	3,22	3,22	3,021	3,05	1151	1149	7406	650,7
8	10,5	3,222	3,218	3,044	3,089	1123,6	1176,4	7405	542,5
9	12	3,22	3,22	3,096	3,114	1150,9	1149,1	7406	325,3
10	13,5	3,22	3,22	3,153	3,158	1150,8	1149,2	7406	162,7
11	15	3,22	3,22	3,218	3,219	1150	1150	7406	0
12								1658813	901951

При швидкості руху поїздів 160 км/год поїзд пройде міжпідстанційною зоною завдовжки 15 км за 5,625 хвилини. За 1 годину по фідерній зоні завдовжки 15 км пройде 11 пар поїздів, отже за добу – 264 пари поїздів. Дослідження показали, що на зоні знаходяться два потяги. Потяги споживають струм 1250 А [16].

Отримані дані зведемо в таблицю 3.4, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

При швидкості руху поїздів 180 км/год поїзд пройде міжпідстанційною зоною завдовжки 15 км за 4,99 хвилини. За 1 годину по фідерній зоні завдовжки 15 км пройде 12 пар поїздів, отже за добу – 288 пар поїздів. Дослідження показали, що на зоні знаходяться два потяги. Потяги споживають струм 1350 А [16].

Таблиця 3.4 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 160 км/год на ділянці завдовжки 15 км

№ п/п	S км	U _{ш1} кВ	U _{ш2} кВ	U _{э1} кВ	U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,213	3,213	3,212	3,211	1250	1250	8032	0
2	1,5	3,213	3,213	3,145	3,14	1250,6	1249,4	8032	192,2
3	3	3,213	3,213	3,098	3,079	1251	1149	7711	354,9
4	5	3,215	3,21	3,07	3,021	1221,2	1278,8	8031	640,9
5	6	3,213	3,213	3,029	2,997	1251	1249	8031	768,7
6	7,5	3,213	3,213	2,991	2,991	1251	1249	8032	960,9
7	9	3,213	3,213	2,997	3,029	1251	1249	8032	768,7
8	10,5	3,215	3,21	3,021	3,07	1221,2	1278,8	8031	640,9
9	12	3,213	3,213	3,079	3,098	1251	1149	7711	354,9
10	13,5	3,213	3,213	3,14	3,145	1250,6	1249,4	8032	192,2
11	15	3,213	3,213	3,211	3,212	1250	1250	8032	0
12								2046949	1286815

Отримані дані зведемо в таблицю 3.5, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.5 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 180 км/год на ділянці завдовжки 15 км

№ п/п	S км	U _{ш1} кВ	U _{ш2} кВ	U _{э1} кВ	U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,206	3,206	3,205	3,204	1351,5	1348,5	8656	0
2	1,5	3,206	3,206	3,133	3,127	1350,8	1349,2	8656	224,2
3	3	3,206	3,206	3,082	3,061	1351,1	1348,9	8656	448,3
4	5	3,208	3,203	3,052	2,99	1318,8	1381,2	8654	747,6

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	6	3,206	3,206	3,007	2,973	1351,2	1348,8	8654	896,7
6	7,5	3,206	3,206	2,966	2,966	1351,2	1348,8	8656	1120
7	9	3,206	3,206	2,973	3,007	1351,2	1348,8	8656	896,7
8	10,5	3,208	3,203	2,99	3,052	1318,8	1381,2	8654	747,6
9	12	3,206	3,206	3,061	3,082	1351,1	1348,9	8656	448,3
10	13,5	3,206	3,206	3,127	3,133	1350,8	1349,2	8656	224,2
11	15	3,206	3,206	3,204	3,205	1351,5	1348,5	8656	0
12								2497195	1657037

З проведених досліджень можна зробити висновок, що по маленькій ділянці, довжиною в 15 км можна пропускати будь-які поїзди, хоча напруга на струмоприймачі електровоза при пропуску швидкісних поїздів трохи нижче за розрахунковий, але допустимо.

3.2 Застосування перетворювача напруги 6,6/3,3 кВ дільниці

Одним із способів підвищення рівня напруги є метод підключення на посту секціонування контактної мережі перетворювача напруги 6,6/3,3 кВ.

Зробимо розрахунок витрати енергії та втрат потужності для миттєвих схем через кожні кілька кілометрів за формулами (4.2) – (4.3). Дані для розрахунків отримано на імітаційної моделі (рисунок 3.6).

При цьому:

$$W = U_{ш1} \cdot (I_{ф1} + I_{а2}) + U_{ш2} (I_{ф3} + I_{ф4}) + 2U_{уп} \cdot I_{уп} \quad (3.3)$$

де W - Витрата енергії на фідерній зоні, кВт;

$U_{ш1}$, $U_{ш2}$ – напруги на шинах відповідно першої та другої підстанцій, кВ;

$I_{ф1}$, $I_{ф2}$ - струми фідер першої підстанції, А;

$I_{ф3}$, $I_{ф4}$ - струми фідер другої підстанції, А;

$U_{уп}$ – напруга підсилювального дроту, кВ;

$I_{уп}$ - струм підсилювального дроту, А.

Отримані дані зведемо в таблицю 3.6, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.6 – Витрата енергії та втрати потужності при використанні перетворювача напруги при швидкості 60 км/год

№ п/п	S км	$U_{ш1}, U_{ш2}$ кВ	$U_{э1}, U_{э2}$ кВ	$I_{ф1}+I_{ф2}$ А	$I_{ф3}+I_{ф4}$ А	$I_{уп}$ А	$I_{мп}$ А	W кВт	$\Delta P_{кв}$ кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	3,282 3,275	3,281 3,274	569,5	598,2	16,15	32,3	4041,3	0
2	1,5	3,282 3,275	3,259 3,246	417,5	508,48	137,01	274,02	4844	26,6
3	3	3,282 3,275	3,246 3,222	256,99	418,76	262,12	524,25	5674,9	29,7
4	5	3,283 3,274	3,245 3,201	240,8	370,2	294,5	589	5889,9	39,9
5	6	3,282 3,275	3,221 3,194	255	355,76	294,62	589,24	5891	47,1
6	7,5	3,282 3,275	3,197 3,197	255	355,8	294,6	589,2	5890,8	58,9
7	9	3,282 3,275	3,194 3,221	255	355,76	294,62	589,24	5891	47,1
8	10,5	3,283 3,274	3,201 3,245	240,8	370,2	294,5	589	5889,9	39,9
9	12	3,282 3,275	3,222 3,246	256,99	418,76	262,12	524,25	5674,9	29,7
10	13,5	3,282 3,275	3,246 3,259	417,5	508,48	137,01	274,02	4844	26,6
11	15	3,282 3,275	3,274 3,281	569,5	598,2	16,15	32,3	4041,3	0
12								511187,4	33168

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.7, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 4.7 – Витрата енергії та втрати потужності при використанні перетворювача напруги при швидкості 120 км/год

№ п/п	S кМ	U _{ш1} , U _{ш2} кВ	U _{э1} , U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} , А	I _{ф3} +I _{ф4} А	I _{уп} А	I _{шп} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,252 3,247	3,253 3,246	994,2	997,1	4,35	8,7	6528	0
2	1,5	3,254 3,247	3,21 3,195	695,87	847,52	228,31	456,6 1	8029	73,9
3	3	3,255 3,247	3,152 3,182	652,4	753,45	297,075	594,1 5	8491	122
4	5	3,256 3,246	3,172 3,112	625,4	775	299,8	599,6	8509	203
5	6	3,255 3,247	3,135 3,098	649	751	300	600	8511	242
6	7,5	3,255 3,247	3,099 3,099	649	751	300	600	8511	302
7	9	3,255 3,247	3,098 3,135	649	751	300	600	8511	242
8	10,5	3,256 3,246	3,112 3,172	625,4	775	299,8	599,6	8509	203
9	12	3,255 3,247	3,152 3,182	652,4	753,45	297,075	594,1 5	8491	122
10	13,5	3,254 3,247	3,195 3,21	695,87	847,52	228,31	456,6 1	8029	73,9
11	15	3,254 3,247	3,246 3,253	994,2	997,1	4,35	8,7	6530	0
12								1547388	304089

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.8, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.8 – Витрата енергії та втрати потужності при використанні перетворювача напруги при швидкості 140 км/год

№ п/п	S км	U _{ш1} , U _{ш2} кВ	U _{з1} , U _{з2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	I _{уп} А	I _{шп} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,244 3,237	3,243 3,236	1143,2	1146,2	5,3	10,6	7488,8	0
2	1,5	3,244 3,237	3,191 3,176	803,66	974,66	260,84	521,7	9205,1	98,1
3	3	3,244 3,237	3,158 3,125	800,7	901,99	298,65	597,3	9459,5	178,93
4	5	3,246 3,235	3,145 3,079	769,6	926,9	301,75	603,5	9479,7	297,54
5	6	3,245 3,237	3,062 3,103	796,6	899,2	302,1	604,2	9483,4	355,01
6	7,5	3,245 3,237	3,063 3,063	796,6	899,2	302,1	604,2	9483,4	443,76
7	9	3,245 3,237	3,062 3,103	796,6	899,2	302,1	604,2	9483,4	355,01
8	10,5	3,246 3,235	3,079 3,145	769,6	926,9	301,75	603,5	9479,7	297,54
9	12	3,244 3,237	3,125 3,158	800,7	901,99	298,65	597,3	9459,5	178,93
10	13,5	3,244 3,237	3,176 3,191	803,66	974,66	260,84	521,7	9205,1	98,1
11	15	3,244 3,237	3,236 3,243	1143,2	1146,2	5,3	10,6	7488,8	0
12								2029863	497430

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.9, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.9 – Витрата енергії та втрати потужності при використанні перетворювача напруги при швидкості 160 км/год

№ п/п	S км	U _{ш1} , U _{ш2} кВ	U _{э1} , U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	I _{yn} А	I _{шп} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,237 3,23	3,236 3,228	1242,4	1246,3	5,65	11,3	8121,8	0
2	1,5	3,237 3,23	3,179 3,163	902,72	1059,02	269,13	538,26	9895,3	119
3	3	3,237 3,23	3,142 3,108	899,5	1001,12	299,69	599,38	10101	222
4	5	3,24 3,228	3,127 3,057	865,8	1028,1	303,05	606,1	10124	370,3
5	6	3,238 3,23	3,082 3,038	895,2	998,1	303,35	606,7	10127	442,2
6	7,5	3,238 3,23	3,038 3,038	895,2	998	303,4	606,8	10127	552,7
7	9	3,238 3,23	3,038 3,082	895,2	998,1	303,35	606,7	10127	442,2
8	10,5	3,24 3,228	3,057 3,127	865,8	1028,1	303,05	606,1	10124	370,3
9	12	3,237 3,23	3,108 3,142	899,5	1001,12	299,69	599,38	10101	222
10	13,5	3,237 3,23	3,163 3,179	902,72	1059,02	269,13	538,26	9895,3	119
11	15	3,237 3,23	3,228 3,236	1242,4	1246,3	5,65	11,3	8121,8	0
12								2487826	754960

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.10, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.10 – Витрата енергії та втрати потужності при використанні перетворювача напруги при швидкості 180 км/год

№ п/п	S км	U _{ш1} , U _{ш2} кВ	U _{э1} ,U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	I _{уп} А	I _{мп} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,23 3,223	3,229 3,221	1342,4	1346,5	5,55	11,1	8749	0
2	1,5	3,23 3,223	3,167 3,151	1001,88	1143,78	277,17	554,34	10581	142,19
3	3	3,231 3,223	3,126 3,09	998,4	1099,94	300,83	601,66	10742	271,42
4	5	3,233 3,221	3,109 3,034	962	1129,3	304,35	608,7	10765	451,16
5	6	3,231 3,223	3,06 3,014	993,6	1096,8	304,8	609,6	10769	538,79
6	7,5	3,231 3,223	3,013 3,013	993,6	1096,8	304,8	609,6	10769	673,49
7	9	3,231 3,223	3,014 3,06	993,6	1096,8	304,8	609,6	10769	538,79
8	10,5	3,233 3,221	3,034 3,109	962	1129,3	304,35	608,7	10765	451,16
9	12	3,231 3,223	3,09 3,126	998,4	1099,94	300,83	601,66	10742	271,42
10	13,5	3,23 3,223	3,151 3,167	1001,88	1143,78	277,17	554,34	10581	142,19
11	15	3,23 3,223	3,221 3,229	1342,4	1346,5	5,55	11,1	8749	0
12								29893386	1002416

3.3 Застосування виносних фідерів живлення 3,3 кВ на ділянці

Для підвищення напруги можна застосувати систему з виносними фідерами. Для виносних фідерів використовуємо такий підсилюючий провід –

2 А-185 з опором 0,085 Ом/км. Фідери розташовані на відстані 3 км та 10,5 км. Напряга холостого ходу на шинах тягової підстанції – 3,5 кВ.

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.11, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.11 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 60 км/год для системи з виносними фідерами

№ п/п	S км	U _{ш1} , кВ	U _{ш2} , кВ	U _{з1} , кВ	U _{з2} , кВ	I _{ф1} +I _{ф2} , А	I _{ф3} +I _{ф4} , А	W, кВт	ΔP _{кк} , кВт
1	0	3,363	3,369	3,34	3,312	328 328	272 272	4038,86	0
2	1,5	3,347	3,358	3,338	3,309	348,6 307,3	254 290,1	4022,38	81,308
3	3	3,347	3,362	3,347	3,312	369,3 286,7	236 308,1	4024,89	162,66
4	5	3,364	3,312	3,335	3,311	311,6 311,6	234,3 342,4	4006,47	244,67
5	6	3,362	3,324	3,314	3,298	316,8 316,8	253,7 312,7	4012,87	303,49
6	7,5	3,362	3,335	3,295	3,295	316,8 316,8	283,2 283,2	4019,10	379,36
7	9	3,362	3,324	3,298	3,314	316,8 316,8	312,7 253,7	4012,87	303,49
8	10,5	3,364	3,312	3,311	3,335	311,6 311,6	342,4 234,3	4006,47	244,67
9	12	3,347	3,362	3,312	3,347	286,7 369,3	308,1 236	4024,89	162,66
10	13,5	3,358	3,347	3,309	3,338	307,3 348,6	290,1 254	4023,61	81,308
11	15	3,363	3,369	3,34	3,312	328 328	272 272	4038,86	0
12								386018	188507

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.12, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.12 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 120 км/год для системи з виносними фідерами

№ п/п	S км	U _{ш1} , кВ	U _{ш2} , кВ	U _{э1} , кВ	U _{э2} , кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,266	3,282	3,233	3,186	546,6 546,6	453,4 453,4	6546,5	0
2	1,5	3,263	3,245	3,231	3,182	581 512,2	423,4 483,4	6509,67	225,871
3	3	3,245	3,229	3,245	3,187	615,3 477,9	393,4 513,4	6475,49	451,742
4	5	3,274	3,186	3,225	3,186	519,4 519,4	390,5 570,7	6463,41	679,836
5	6	3,27	3,267	3,19	3,164	528 528	422,9 531,1	6569,83	843,042
6	7,5	3,27	3,226	3,158	3,158	528 528	472 472	6498,46	1053,8
7	9	3,27	3,267	3,164	3,19	528 528	531,1 422,9	6569,83	843,042
8	10,5	3,274	3,186	3,186	3,225	519,4 519,4	570,7 390,5	6463,41	679,836
9	12	3,245	3,229	3,187	3,245	477,9 615,3	513,4 393,4	6475,49	451,742
10	13,5	3,263	3,245	3,182	3,231	512,2 581	483,4 423,4	6509,67	225,871
11	15	3,266	3,282	3,186	3,233	546,6 546,6	453,4 453,4	6546,5	0
12								1250240	1047318

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.13, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.13 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 140 км/год для системи з виносними фідерами

№ п/п	S км	U _{ш1} , кВ	U _{ш2} , кВ	U _{з1} , кВ	U _{з2} , кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,249	3,231	3,193	3,139	628,6 628,6	521,4 521,4	7453,93	0
2	1,5	3,228	3,206	3,19	3,134	668,1 589,1	486,9 555,9	7401,46	298,724
3	3	3,206	3,182	3,206	3,14	707,6 549,6	452,4 590,4	7348,77	597,449
4	5	3,24	3,139	3,184	3,138	597,3 597,3	449,1 656,3	7340,35	899,054
5	6	3,236	3,163	3,143	3,114	607,2 607,2	486,3 599,3	7363,55	1114,92
6	7,5	3,236	3,184	3,107	3,107	607,2 607,2	542,8 542,8	7386,35	1393,66
7	9	3,236	3,163	3,114	3,143	607,2 607,2	599,3 486,3	7363,55	1114,92
8	10,5	3,24	3,139	3,138	3,184	597,3 597,3	656,3 449,1	7340,35	899,054
9	12	3,206	3,182	3,14	3,206	549,6 707,6	590,4 452,4	7348,77	597,449
10	13,5	3,228	3,206	3,134	3,19	589,1 668,1	555,9 486,9	7401,46	298,724
11	15	3,249	3,231	3,139	3,193	628,6 628,6	521,4 521,4	7453,93	0
12								1652987	1558214

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.14, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.14 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 160 км/год для системи з виносними фідерами

№ п/п	S км	U _{м1} , кВ	U _{м2} кВ	U _{э1} , кВ	U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,228	3,208	3,166	3,105	683,2 683,2	566,8 566,8	8047,33	0
2	1,5	3,204	3,181	3,163	3,103	726,2 640,3	529,2 604,3	7983,93	352,924
3	3	3,181	3,154	3,181	3,109	769,2 597,3	491,7 641,8	7921,9	705,848
4	5	3,218	3,108	3,156	3,107	649,2 649,3	488,2 713,3	7912,84	1062,24
5	6	3,213	3,134	3,112	3,08	660 660	528,6 651,4	7939,28	1317,25
6	7,5	3,213	3,157	3,073	3,073	660 660	590 590	7966,42	1646,57
7	9	3,213	3,134	3,08	3,112	660 660	651,4 528,6	7939,28	1317,25
8	10,5	3,218	3,108	3,107	3,156	649,3 649,2	713,3 488,2	7912,84	1062,24
9	12	3,181	3,154	3,109	3,181	597,3 769,2	641,8 491,7	7921,9	705,848
10	13,5	3,204	3,181	3,103	3,163	640,3 726,2	604,3 529,2	7983,93	352,924
11	15	3,228	3,208	3,105	3,166	683,2 683,2	566,8 566,8	8047,33	0
12								2038792	2250097

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.15, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.15 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 180 км/год для системи з виносними фідерами

№ п/п	S км	U _{ш1} , кВ	U _{ш2} кВ	U _{з1} , кВ	U _{з2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,206	3,184	3,14	3,077	737,9 737,9	612,1 612,1	8629,27	0
2	1,5	3,181	3,155	3,136	3,071	784,3 691,5	571,6 652,6	8556,87	411,639
3	3	3,155	3,127	3,155	3,078	830,7 645,1	531 693,2	8484,22	823,279
4	5	3,195	3,076	3,129	3,076	701,2 701,2	527,2 770,4	8472,09	1239,04
5	6	3,19	3,104	3,081	3,047	712,8 712,8	570,9 703,5	8503,4	1536,45
6	7,5	3,19	3,13	3,039	3,039	712,8 712,8	637,2 637,2	8536,54	1920,56
7	9	3,19	3,104	3,047	3,081	712,8 712,8	703,5 570,9	8503,4	1536,45
8	10,5	3,195	3,076	3,076	3,129	701,2 701,2	770,4 527,2	8472,09	1239,04
9	12	3,155	3,127	3,078	3,155	645,1 830,7	693,2 531	8484,22	823,279
10	13,5	3,181	3,155	3,071	3,136	691,5 784,3	652,6 571,6	8556,87	411,639
11	15	3,206	3,184	3,077	3,14	737,9 737,9	612,1 612,1	8629,27	0
12								2460859	2863116

3.4 Підвищення напруги холостого ходу на тяговій підстанції

Підвищимо рівень холостого ходу на шинах тягової підстанції до 3,5 кВ і подивимося, як підвищиться напруга на струмоприймачі електровоза.

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.16, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.16 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 60 км/год на ділянці завдовжки 15 км із напругою холостого ходу на тяговій підстанції 3,5 кВ

№ п/п	S км	U _{шт1} кВ	U _{шт2} кВ	U _{э1} кВ	U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,458	3,458	3,458	3,457	598,5 1,999	0,601 598,9	4149,6	0
2	1,5	3,458	3,458	3,426	3,423	509 91,47	45,51 554	4149,6	44,3
3	3	3,458	3,458	3,403	3,394	419,5 180,9	90,38 509,1	4149,6	88,5
4	5	3,459	3,457	3,39	3,366	293,1 293,1	142,4 471,4	4149,572	147,7
5	6	3,458	3,458	3,37	3,354	300,2 300,2	210 389,5	4149,572	177,12
6	7,5	3,458	3,458	3,352	3,352	300,2 300,2	299,8 299,8	4149,6	221,4
7	9	3,458	3,458	3,354	3,37	300,2 300,2	389,5 210	4149,6	177,12
8	10,5	3,459	3,457	3,366	3,39	293,1 293,1	471,4 142,4	4149,572	147,7
9	12	3,458	3,458	3,394	3,403	180,9 419,5	509,1 90,38	4149,6	88,5
10	13,5	3,458	3,458	3,423	3,426	91,47 509	554 45,51	4149,6	44,3
11	15	3,458	3,458	3,457	3,458	1,999 598,5	598,9 0,601	4149,6	0
12								398360	109117

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.17, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.17 – Витрата енергії та втрати потужності при русі поїздів зі швидкістю 120 км/год на ділянці довжиною 15 км з напругою холостого ходу на тяговій підстанції 3,5 кВ

№ п/п	S км	U _{ш1} кВ	U _{ш2} кВ	U _{з1} кВ	U _{з2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,43	3,43	3,429	3,429	997,5 3,331	1,064 999	6860	0
2	1,5	3,43	3,43	3,376	3,372	848,4 152,5	75,84 923,4	6860	123
3	3	3,43	3,43	3,339	3,323	699,2 301,6	150,6 848,6	6860	246
4	5	3,432	3,428	3,316	3,277	488,5 488,5	237,3 785,7	6859,9	410,2
5	6	3,43	3,43	3,283	3,257	500,4 500,4	350,1 649,3	6859,9	492
6	7,5	3,43	3,43	3,253	3,253	500,4 500,4	499,6 499,6	6860	615
7	9	3,43	3,43	3,257	3,283	500,4 500,4	649,3 350,1	6860	492
8	10,5	3,432	3,428	3,277	3,316	488,5 488,5	785,7 237,3	6859,9	410,2
9	12	3,43	3,43	3,323	3,339	699,2 301,6	848,6 150,6	6860	246
10	13,5	3,43	3,43	3,372	3,376	152,5 848,4	923,4 75,84	6860	123
11	15	3,43	3,43	3,429	3,429	3,331 997,5	999 1,064	6860	0
12								1317115	606220

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.18, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.18 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 140 км/год на ділянці завдовжки 15 км із напругою холостого ходу на тяговій підстанції 3,5 кВ

№ п/п	S км	U _{ш1} кВ	U _{ш2} кВ	U _{э1} кВ	U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,42	3,42	3,419	3,418	1147 3,83	1,223 1148	7866	0
2	1,5	3,42	3,42	3,358	3,353	975,6 175,3	87,22 1062	7866	162,7
3	3	3,42	3,42	3,314	3,296	804,1 346,8	173,2 975,9	7866	325,3
4	5	3,42 2	3,418	3,289	3,244	561,8 561,8	272,9 903,6	7865,9	542,5
5	6	3,42	3,42	3,25	3,22	575,5 575,5	402,5 746,5	7865,9	650,7
6	7,5	3,42	3,42	3,216	3,216	575,5 575,5	574,5 574,5	7866	813,3
7	9	3,42	3,42	3,221	3,25	575,5 575,5	746,5 402,5	7866	650,7
8	10,5	3,42 2	3,418	3,244	3,289	561,8 561,8	903,6 272,9	7865,9	542,5
9	12	3,42	3,42	3,296	3,314	346,8 804,1	975,9 173,2	7866	325,3
10	13,5	3,42	3,42	3,353	3,358	175,3 975,6	1062 87,22	7866	162,7
11	15	3,42	3,42	3,418	3,419	3,83 1147	1148 1,223	7866	0
12								1761348	901951

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.19, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.19 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 160 км/год на ділянці завдовжки 15 км із напругою холостого ходу на тяговій підстанції 3,5 кВ

№ п/п	S км	U _{п1} кВ	U _{п2} кВ	U _{э1} кВ	U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,413	3,413	3,412	3,411	1247 4,163	1,33 1248	8532,5	0
2	1,5	3,413	3,413	3,345	3,34	1060 190,6	94,81 1154	8532,5	192,2
3	3	3,413	3,413	3,298	3,279	874 377	188,3 1061	8191,2	354,9
4	5	3,415	3,41	3,27	3,221	610,6 610,6	296,7 982,2	8531,1	640,9
5	6	3,413	3,413	3,229	3,197	625,5 625,5	437,5 811,5	8531,1	768,7
6	7,5	3,413	3,413	3,191	3,191	625,5 625,5	624,5 624,5	8532,5	960,9
7	9	3,413	3,413	3,197	3,229	625,5 625,5	811,5 437,5	8532,5	768,7
8	10,5	3,415	3,41	3,221	3,27	610,6 610,6	982,2 296,7	8531,1	640,9
9	12	3,413	3,413	3,279	3,298	377 874	1061 188,3	8191,2	354,9
10	13,5	3,413	3,413	3,34	3,345	190,6 1060	1154 94,81	8532,5	192,2
11	15	3,413	3,413	3,411	3,412	4,163 1247	1248 1,33	8532,5	0
12								2169014	1286815

Отримані дослідження зведемо в таблицю 3.20, де в останньому рядку представлені витрати енергії, втрати потужності контактної мережі за добу.

Таблиця 3.20 – Витрата енергії та втрати потужності під час руху поїздів зі швидкістю 180 км/год на ділянці завдовжки 15 км із напругою холостого ходу на тяговій підстанції 3,5 кВ

№ п/п	S км	U _{шт1} кВ	U _{шт2} кВ	U _{э1} кВ	U _{э2} кВ	I _{ф1} +I _{ф2} А	I _{ф3} +I _{ф4} А	W кВт	ΔP _{кв} кВт
1	0	3,406	3,406	3,405	3,404	1347 4,495	1,436 1347	9196,2	0
2	1,5	3,406	3,406	3,333	3,327	1145 205,8	102,4 1247	9196,2	224,2
3	3	3,406	3,406	3,282	3,261	944 407,1	203,3 1146	9196,2	448,3
4	5	3,408	3,403	3,252	3,199	659,4 659,4	320,4 1061	9194,7	747,6
5	6	3,406	3,406	3,207	3,173	675,6 675,6	472,4 876,4	9194,7	896,7
6	7,5	3,406	3,406	3,166	3,166	675,6 675,6	674,4 674,4	9196,2	1120
7	9	3,406	3,406	3,173	3,207	675,6 675,6	876,4 472,4	9196,2	896,7
8	10,5	3,408	3,403	3,199	3,252	659,4 659,4	1061 320,4	9194,7	747,6
9	12	3,406	3,406	3,261	3,282	407,1 944	1146 203,3	9196,2	448,3
10	13,5	3,406	3,406	3,327	3,333	205,8 1145	1247 102,4	9196,2	224,2
11	15	3,406	3,406	3,404	3,405	4,495 1347	1347 1,436	9196,2	0
12								2652985	1657037

Проектні рішення, які були запропоновані для підвищення рівня напруги на струмоприймачі електровоза при довжині міжпідстанційної зони 15 км - застосування перетворювача напруги на посаді секціонування контактної мережі 6,6/3,3 кВ; застосування системи з виносними фідерами

живлення 3,3 кВ; підвищення напруги холостого ходу на тяговій підстанції до 3,5 кВ.

Застосування перетворювача напруги 6,6/3,3 кВ на маленькій ділянці є неефективним, навіть при інтенсивному русі поїздів, оскільки втрати електроенергії великі, хоча втрати потужності контактної мережі і тягової підстанції значно зменшуються.

Підвищення напруги холостого ходу на тяговій підстанції є способом, що не вимагає додаткових витрат, і значно підвищує напругу на струмоприймачі електровоза, але при цьому значно збільшує витрати електроенергії в системі.

Найбільш економічно вигідним способом підвищення напруги на струмоприймачі електровоза є система з виносними фідерами живлення 3,3 кВ. Вона знижує витрати електроенергії в тяговій мережі, і згідно з економічними розрахунками під час руху поїздів зі швидкістю вище 60 км/год окупиться за кілька років.

3.5 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих заходів

Оцінка економічної ефективності системи з виносними фідерами живлення на ділянці довжиною 15 км може бути виконана шляхом порівняння цієї системи з системою тягового електропостачання 3,3 кВ за допомогою зіставлення різниці капітальних витрат і експлуатаційних витрат обох варіантів.

Для цього слід визначати капітальні вкладення та експлуатаційні витрати для різних швидкостей руху тільки в тій їхній частині, які в різних випадках неоднакові. Для судження про загальну оцінку ефективності аналізованих систем далі будемо оперувати усередненими даними та величинами. Відмінність капітальних витрат у випадках обумовлено різною вартістю 1 км контактної мережі. Для електрифікованої лінії завдовжки L км ці складові дорівнюють [28]:

$$K = K_k \cdot L$$

де L Довжина міжпідстанційної зони, км;

K_k - Вартість 1 км контактної мережі, грн;

$$K_{к3,3} = 252 \text{ тис. грн.}; K_{квф} = 290 \text{ тис. грн.}$$

Таким чином, різниця капітальних витрат між системою 3,3 кВ без виносних фідерів і системою з виносними фідерами живлення буде дорівнює:

$$\Delta K = L \cdot (K_{квф} - K_{к3,3})$$

$$\Delta K = 15 \cdot (290000 - 252000) = 570000 \text{ грн}$$

де α_k амортизаційна квота, відповідно для підстанцій та контактної мережі, %.

$$\alpha_k = 3 \text{ [29].}$$

Витрати на утримання тягових підстанцій та оплату за електроенергію, що споживається їх власними потребами, рівні і для системи 3,3 кВ без виносних фідерів та для системи з виносними фідерами живлення.

Вартість втрат електроенергії у тяговій мережі визначається:

$$Z_{екм} = C_e \cdot W_2$$

де W_2 річні втрати електроенергії на ділянці довжиною 15 км, кВт·год, у таблиці 5.1 наведено добовий витрата електроенергії на різні варіанти.

$$C_e \text{ вартість 1 кВт·год електроенергії, } C_e = 0,17 \text{ грн.; грн. [28].}$$

Система з виносними фідерами живлення має деякі особливості: напруга холостого ходу на тяговій підстанції досягає значення 3,5 кВ, тому можна її порівняти зі звичайною системою 3,3 кВ з напругою холостого на підстанції 3,3 кВ і з напругою холостого ходу на тяговій підстанції 3,5 кВ.

Різниця експлуатаційних витрат при системах 3,3 кВ без виносних фідерів і системі з виносними фідерами живлення буде рівна:

$$\Delta Z_3 = \Delta Z_{акс} + \Delta Z_{экс} = \frac{\alpha_k}{100} \cdot L \cdot (K_{к3,3} - K_{квф}) + C_3 \cdot (W_{23,3} - W_{2вф})$$

Таблиця 5.1 – Добові втрати електроенергії

№ п/п	Добові втрати електроенергії на ділянці 15 км.		
	кВтг		
Швидкість, км/год	Система постоянного тока 3,3 кВ	Система постійного струму 3,3 кВ (3,5 кВ х.х.)	Система з виносними фідерами живлення
60	375320,88	398360,87	386018,9
120	1240315	1317115	1250240
140	1658813	1761348	1652987
160	2046949	2169014	2038792
180	2497195	2652985	2460859

Вибір економічно ефективної системи електропостачання визначається за допомогою визначення терміну окупності та зіставлення його з допустимим при $E_n = 0,16$, $T_n = 6,25$ років

$$T = \frac{\Delta K}{\Delta Z_3} \leq T_n$$

Підрахуємо різницю експлуатаційних витрат і термін окупності системи з виносними фідерами живлення для різних швидкостей руху і різних

напруг холостого ходу на шинах тягової підстанції, розрахунки зведемо в таблицю 7.2 і таблицю 5.3.

Таблиця 5.2 – Економічна ефективність застосування системи з виносними фідерами живлення на ділянці 15 км

№ п/п	Економічна ефективність застосування системи на ділянці 15 км із напругою холостого на тяговій підстанції 3,5 кВ	
Швидкість, км/г	Різниця експлуатаційних витрат, грн.	Термін окупності системи з виносними фідерами, що живлять, роках
60	748719	0,76
120	4132493,75	0,13
140	6706700,05	0,08
160	8063175,1	0,07
180	11904318,3	0,04

Таблиця 5.3 – Економічна ефективність застосування системи з виносними фідерами живлення на ділянці 15 км

№ п/п	Економічна ефективність застосування системи на ділянці 15 км із напругою холостого на тяговій підстанції 3,3 кВ за високих швидкостей руху	
Швидкість, км/г	Різниця експлуатаційних витрат, грн.	Термін окупності системи з виносними фідерами, що живлять, роках
60	-	-
120	-	-
140	344403,3	1,65
160	489041,85	1,165
180	2237548,8	0,25

Висновок: застосування системи з виносними фідерами живлення на вже електрифікованих лініях при швидкостях нижче 140 км/год економічно не виправдано, якщо застосовується напруга холостого ходу на тяговій підстанції 3,3 кВ, але якщо підвищення рівня напруги в тяговій мережі постійного струму здійснюється підвищенням напруги холостого ходу на тяговій підстанції до 3,5 кВ, то доцільно буде застосувати систему з виносними фідерами живлення при інтенсивному швидкісному русі, причому витрати на додаткові дроти окуплять себе за 1 - 2 роки.

При застосуванні системи з виносними фідерами живлення значно знижують витрату електроенергії, як при підвищеному напрузі холостого ходу на тяговій підстанції, так і при номінальній напрузі холостого ходу на підстанції.

3.6 Питання охорони праці

Аналіз шкідливих та небезпечних факторів.

Пост секціонування контактної мережі розташований на перегоні та його обслуговування пов'язане з виїздом на місце роботи експлуатаційного персоналу. На посту секціонування знаходиться перетворювач напруги 6,6/3,3 кВ, до якого підходить провід живлення 6,6 кВ.

У зв'язку з тим, що основне обладнання поста секціонування та перетворювач напруги є аналогічним устаткуванню тягових підстанцій, на більшості ділянок енергопостачання його закріплюють за однією з прилеглих тягових підстанцій, експлуатаційний персонал якої здійснює нагляд за станом пристроїв та їх поточний утримання, а персонал ремонтно-ревізійного цеху виготовляє на обладнанні всі роботи. Перемикання секційних роз'єднувачів, їх регулювання, ревізію, огляд перетворювача напруги виконують працівники контактної мережі.

Небезпечними та шкідливими факторами є фізичні фактори: рухомі машини та механізми, незахищені елементи електрообладнання, підвищені

рівні шуму та вібрації при роботі обладнання, підвищені рівні напруги в електричному ланцюзі.

Небезпечна зона може утворитися всередині приміщення, так і поза ним, при виникненні випромінювань, за наявності зайвого шуму, вібрації, шкідливих пар, газів, пилу та інших. Головним небезпечним фактором є електричний струм, небезпека рухомого складу.

При експлуатації та ремонті електричного обладнання та мереж людина може опинитися у сфері дії електромагнітного поля або у безпосередньому зіткненні з провідниками електричного струму, що знаходяться під напругою. Внаслідок проходження струму через людину може відбутися порушення його життєдіяльних функцій.

Небезпека ураження електричним струмом посилюється тим, що, по-перше, струм не має зовнішніх ознак і, як правило, людина без спеціальних приладів не може завчасно виявити небезпеку, що загрожує йому; по-друге, вплив струму на людину в більшості випадків призводить до серйозних порушень найважливіших життєдіяльних систем, таких як центральна нервова, серцево-судинна та дихальна, що збільшує тяжкість ураження; по-третє, вплив струму викликає в людини різку реакцію відсмикування, а часом і втрату свідомості.

Електричний струм, проходячи через тіло людини, може надавати біологічну, теплову, механічну та хімічну дії. Біологічна дія полягає у здатності електричного струму дратувати та збуджувати живі тканини організму. Теплове - здатність викликати опіки тіла, механічне - призводити до розриву тканин, а хімічне - до електролізу крові.

Вплив електричного струму на організм людини може спричинити електротравму. Електротравма – це травма, спричинена впливом електричного струму або електричної дуги. Оцінювати небезпеку впливу електричного струму на людину можна за реакціями у відповідь організму. Зі збільшенням струму чітко виявляються три якісно відмінні реакції у відповідь. Це

насамперед відчуття, далі судомне скорочення м'язів (больовий ефект) та фібриляція серця.

Однією з основних причин підвищеної небезпеки праці є те, що робочі місця та робочі зони електромонтерів контактної мережі розташовані в безпосередній близькості від рухомого або готового до руху рухомого складу. Для виконання низки технологічних операцій працюючі змушені стикатися з рухомим складом.

Безперервне зростання перевезень, здійснюваних залізницями, призводить до збільшення інтенсивності руху поїздів, підвищення їхньої маси та швидкостей руху. Як наслідок відбувається збільшення протяжності гальмівних шляхів, зростає небезпека наїзду рухомого складу людей.

До особливостей роботи на коліях можна віднести: наявність колій з інтенсивним різнобічним рухом, протяжні гальмівні колії, обмежена відстань між осями суміжних колій, також рухомим складом і спорудами.

Проектні заходи. Перетворювач виконаний за схемою з широтно-імпульсним регулюванням напруги на накопичувальних дроселях. Перетворювач виконаний за безтрансформаторною схемою і включає шість тиристорних ключів, три діодні ключі, три накопичувальні дроселі і фільтруючі ланцюги.

Перетворювач обладнаний швидкодіючими запобіжниками у кожній гілці для відключення коротких замикань, передбачена сигналізацію, що реагує на перегорання запобіжників. Захистом зняття імпульсів управління або зсуву імпульсів управління у бік збільшення кута регулювання тиристорних перетворювачів для запобігання надструмам.

Перетворювач знаходиться в термостатованому модулі, де є захисна огорожа. Двері огорожі повинні бути забезпечені блокуванням, що відключає перетворювач з боку високої та низької напруги і не дозволяють увімкнути його при відкритих дверях.

На корпусі перетворювача повинні бути нанесені попереджувальні знаки із зазначенням напруги перетворювача під час холостого ходу.

Електронний захист перетворювача управління тиристорів здійснюється за допомогою датчиків струму.

Для блокування зворотної напруги використовують шунтуючі діоди, що з'єднують контактну мережу з вхідною мережею підвищеної напруги.

При короткому замиканні на виході перетворювача вимикається швидкодіючий вимикач.

Конструкція перетворювача побудована за допомогою організованих повітряних каналів для охолодження напівпровідникових приладів. Охолодження здійснюється за допомогою радіаторів на теплових трубах із примусовим повітряним охолодженням.

Організаційні та технічні заходи. До робіт в електроустановках допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли медичний огляд, навчені безпечним методам праці, які склали іспити в кваліфікаційній комісії, що мають посвідчення на право виконання робіт з відповідної групи II—V.

При знаходженні на роботі електрик повинен мати при собі посвідчення про перевірку знань з талоном попередження та пред'являти їх на першу вимогу особам, які здійснюють контроль за виконанням вимог техніки без небезпеки.

Електрик повинен бути забезпечений за встановленими нормами спецодягом, спецвзуттям, а також справними випробуваними захисними монтажними засобами, сигнальним приладдям.

Відповідальними за безпеку під час виконання робіт є особа, яка видає наряд або віддає розпорядження на виконання робіт, черговий енергодиспетчер, керівники робіт, що спостерігає, члени бригади.

Спостерігач відповідає за безпеку працюючих та дотримання ними вимог інструкцій щодо безпечного виконання робіт. При призначенні спостерігачем електрик повинен вести невідступний нагляд за прикріпленими працюючими, вимагаючи від них строго виконання заходів безпеки.

Кожен член бригади відповідає за дотримання ним інструкцій, а також вказівок, одержуваних при інструктажі, та зобов'язаний вживати необхідних заходів у разі, якщо їм буде помічено порушення, допущене іншими членами бригади. У процесі роботи член бригади повинен виконувати вказівки керівника або спостерігача.

Організаційними заходами щодо забезпечення безпеки роботи з експлуатації перетворювача напруги є:

- видача наряду чи розпорядження;
- Видача дозволу на підготовку місця роботи, поточний інструктаж, допуск на роботу;
- нагляд під час роботи;
- Оформлення перерв у роботі, переходів на інше робоче місце, закінчення роботи.

Всі роботи на контактній мережі, та пов'язаному з нею обладнанні - перетворювач напруги - виконуються за нарядами та розпорядженнями. Приступати до підготовки місця роботи за нарядом або розпорядженням допускається лише після отримання наказу від енергодиспетчера або повідомлення його про місце та характер роботи.

Перед допуском до роботи за нарядом або розпорядженням безпосередньо на місці роботи електромонтер зобов'язаний отримати поточний інструктаж, в якому керівник повинен зазначити:

- умови виконання робіт (її категорію, технологію),
- точні межі зони та місця роботи членів бригади,
- розташування поблизу нейтральних частин та частин, що залишилися під робочою або наведеною напругою (при роботах поблизу напруги або зі зняттям напруги та заземленням), а також розташування заземлених та нейтральних частин (при роботах під напругою),
- місця проходу ПЛ з іншим потенціалом або іншим родом струму (освітлення, телеуправління та ін.),
- місця секціонування,

місця, у яких забороняється робота, і навіть місця підвищеної небезпеки,

- місця встановлення заземлювальних штанг із виділенням спеціальних осіб для їх встановлення,

- особливості у огорожі місця робіт,

- Порядок переміщення в зоні роботи.

Після поточного інструктажу усі члени бригади мають розписатися у спеціальній графі вбрання. Оформлення поточного інструктажу під час розпорядження не потрібно.

У тих випадках, коли має бути робота зі зняттям напруги та заземленням, поточний інструктаж дається до встановлення першої заземлюючої штанги, а розписуватися за нього слід після того, як керівник робіт перевірить правильність установки заземлювальних штанг та здійснить допуск до роботи.

У разі короткочасного «вікна» (до 60 хв) для виконання робіт допускається проведення поточного інструктажу та розпис у наряді до отримання наказу енергодиспетчера.

Допуск здійснює керівник робіт після того, як виконано всі необхідні заходи щодо забезпечення безпеки робіт безпосередньо на місці (в зоні) роботи.

Нагляд за працюючими має здійснювати керівник робіт.

Якщо робота виконується по одному наряду двома або більше групами, у кожній групі призначається при виписці наряду окремий спостерігач.

При виявленні порушень спостерігач має право призупинити подальше виконання роботи і повідомити про це керівника. Особи, відсторонені спостерігачем від роботи, можуть продовжити роботу за цим нарядом або розпорядженням лише після проведення повторного інструктажу та допуску керівником робіт.

Про початок та закінчення всіх робіт на ділянці повинен бути повідомлений енергодиспетчер.

Технічними заходами щодо забезпечення безпеки робіт під час експлуатації перетворювача напруги є:

- закриття колій перегонів та станцій для руху поїздів, видача попереджень на поїзди та огорожу місця робіт;
- зняття робочої напруги та вжиття заходів проти помилкового подання його на місце роботи;
- перевірка відсутності напруги;
- накладання заземлень, переносних шунтуючих штанг або перемичок, включення роз'єднувачів;
- Висвітлення місця роботи у темний час доби.

Щодо заходів безпеки встановлено такі чотири категорії робіт:

Зі зняттям напруги та заземленням вважається така робота, при якій у зоні (місці) її виконання знято напругу та заземлено ті дроти та пристрої на яких виконуватиметься ця робота.

Наближення до дротів, що знаходяться під робочою або наведеною напругою, а також до нейтральних елементів на відстань менше 0,8 м заборонено.

Під напругою вважається така робота, при якій дроти та обладнання в зоні (місці) роботи знаходяться під робочою або наведеною напругою. Безпека працюючих забезпечується застосуванням засобів захисту (ізолюючі вежі, робочі майданчики дрезин та автомотріс, ізолюючі штанги та ін.) та спеціальними заходами (завішування стаціонарних та переносних шунтуючих штанг, шунтуючих перемичок та ін.) Наближення до заземлених та нейтральних 8м заборонено.

Поблизу частин, що знаходяться під напругою, вважається така робота, при якій працюючому на постійно заземленій конструкції в зоні (місці) роботи необхідно наближатися безпосередньо або через неізольований інструмент до небезпечних елементів (у тому числі до проводів освітлювальної мережі) на відстань менше 2м. Наближення до небезпечних елементів на відстань менше ніж 0,8 м заборонено.

Вдалині від частин, що знаходяться під напругою, вважається така робота, при якій працюючому в зоні (місці) роботи немає потреби або заборонено наближатися до небезпечних елементів на відстань менше 2 м.

При виконанні комбінованих робіт потрібно дотримуватись організаційних та технічних заходів, що відповідають кожній з категорій, що входять до цієї роботи.

При всіх категоріях робіт, щоб уникнути ураження електричним струмом, слід виконувати основне правило електробезпеки:

всі елементи (частини) контактної мережі, ПЛ та пов'язаного з нею обладнання на місці роботи повинні знаходитися під одним потенціалом, для чого вони електрично з'єднуються один з одним заземлюючими або шунтуючими штангами, роз'єднувачами, шунтуючими перемичками тощо.

Вимоги до утримання та використання засобами захисту, сигнальним приладдям та монтажними пристроями: перед виїздом на роботу, а також безпосередньо перед її виконанням зовнішнім оглядом слід переконатися у справності використовуваного засобу захисту або монтажного пристосування.

Заборонено застосовувати для роботи засоби захисту та монтажні пристрої:

- що не відповідають напрузі електроустановки та механічному навантаженню;
- без тавра випробування або з простроченою датою випробування;
- із пошкодженою або забрудненою ізолюючою частиною;
- з надрином канатів поліспастних блоків або струбцин;
- з надрином мідних жил тросів заземлювальних або шунтуючих штанг, шунтуючих перемичок (більше 5% загального перерізу жил), з порушенням (ослабленням) контактів цих тросів у місцях приєднання або наявністю скруток;
- з тріщинами в несучих елементах стяжних муфт, гакових клем та натяжних затискачів, гаках поліспастних блоків;

- без блокування або з несправним блокуванням безпеки штанги, що заземлює, порушенням роботи пружини її черевика або пружини контактної головки;

- з надривами або пошкодженнями на запобіжному поясі, його ланцюзі (стропі), карабіні або застібці.

При огляді перетворювача перевіряють:

- Відсутність видимих пошкоджень;
- відповідність положення апаратури управління та сигнального покажчика режиму перетворювача;
- відсутність стороннього шуму, тріску, розрядів у ланцюгах РС;
- Стан швидкодіючих запобіжників;
- плавність роботи тиристорів, рівень нагрівання, відсутність вібрації;
- Показ реєструючих приладів.

Технічне обслуговування виконує персонал 1 раз на місяць з оформленням робіт нарядом або розпорядженням.

Роботи з технічного змісту включають:

- перевірку стану обладнання, зовнішні контактні з'єднання, ланцюги керування, захисту, автоматики;
- чищення від пилу обладнання та апаратури у приміщенні;
- перевірку відповідності сигналізуючого стану обладнання;
- експлуатаційне випробування з перевіркою роботи схем управління, захисту, автоматики.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було розглянуто питання підвищення рівня напруги двоколіїної ділянки тягової мережі постійного струму за різних швидкостей руху поїздів.

Застосування перетворювача напруги 6,6/3,3 кВ на ділянці довжиною 15 км є не вигідним варіантом, оскільки підвищує рівень напруги незначно та збільшує витрати електроенергії, але знижується втрата потужності в контактній мережі.

Підвищення напруги холостого ходу на тяговій підстанції до 3,5 кВ збільшує напругу на струмоприймачі електровозу, але значно збільшується і витрата електроенергії.

Застосування системи з виносними фідерами живлення 3,3 кВ є оптимальним варіантом для ділянки довжиною 15 км, оскільки збільшується напруга на струмоприймачі електровоза, знижується витрата електроенергії, економічна окупність системи при пропуску поїздів зі швидкістю вище 60 км/год становить кілька років порівняно зі звичайною системою 3,3 кВ.

Було розглянуто ділянку постійного струму завдовжки 50 км. Проводилися дослідження щодо того, яку краще застосувати систему для пропуску кількох швидкісних поїздів ділянкою, тому що звичайна система 3,3 кВ не витримає пропуску навіть одного прискореного поїзда зі швидкістю 120 км/год. Для ділянки довжиною 50 км доцільніше застосування системи з перетворювачем напруги 6,6/3,3 кВ, що значно збільшує пропускну здатність ділянки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила устройства электроустановок.- М.: Энергоатомиздат,1985. -463 с
2. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 348 с.
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию / Под ред. А.А. Федорева. Т.1. Электроснабжение. Т . 2 . Электрооборудование . – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 89 с.
4. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий / Под ред. А.С. Овчаренко и др. – К.: Техника, 1987. – 63 с.
5. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 78 с.
6. Указания по проектированию компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий. – М.: Тяжпромэлектропроект, 1984. – 455 с.
7. Неклепаев Б.Н. Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. 4-е изд. – М.: Энергоатомиздат 1989.- 389 с.
8. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Эпергоатомиздат, 1991.– 178 с.
9. Денисов В.И. Техничко-економические расчеты в энергетике: Методы экономического управления вариантов. – К.:Техника, 1991. – 165 с.
10. Овчаренко А.С., Розинский Д.И. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий. – К.: Техника, 1989. – 276 с.
11. Методика обчислення плати за перетінення реактивної електроенергії / Наказ міністерства палива та енергетики України № 19 від 17.01.2002.

12. Копалова Л.Л., Рожкова Л.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 528 с.
13. Б.М. Островский Ю.С. Громадский. Проектирование и монтаж систем учёта электроэнергии. -К.: Будивельник 1999.- 159с.
14. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1/ Под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 26 с.
15. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.2/ Под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 26 с.
16. Корниенко В.В., Котельников А.В., Доманский В.Т. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. К.: Транспорт Украины. 2004. - 196 с.
17. Электрификация и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте. Материалы второго международного симпозиума, 21-24 октября 2003 г. Санкт-Петербург, 2003. - 501 с.
18. Транспорт Дніпропетровщини: європейський шлях розвитку/ Під заг. ред. Г. М. Кірпи. – Д.: ТОВ «ЕНЕМ», 2003. – 112 с.
19. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985.
20. Марквардт К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1965.
21. Журнал Залізничний транспорт України, № 1, 2002.
22. Экономика железнодорожного транспорта/ Под ред. В.А. Дмитриева, Ф.П. Мулюкина. – М.: Транспорт, 1985. – 438 с.
23. Бойник А.Б., Кошевой С.В. Система интервального регулирования движения поездов на перегонах: Учебное пособие: - Харьков 2005, 244 с.
24. Коршиков В.Г. Восстановление изоляции обмоток тяговых электродвигателей: - Москва 2005, 123 с.

25. Постол Б.Г. Нормирование расхода топлива и электрической энергии на тягу поездов за поездку. Методические указания Дальневосточный государственный университет путей сообщения, - 2002, 34 с.

26. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. -176с.

27. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.: Под ред. В.Н. Казанцева. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 268с.

28. Цирель Я.А., Поляков В.С. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электросетях. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.-264с.

29. ГКД 34.20.507 «Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила» Введ 2003 - К.:Вид. Об'єднання енергетичних підприємств «галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики» - 597с.

30. НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок»

31. «Вимоги до окремих видів пристроїв» ГОСТ 12.2.007.3-75 (2001) «ССБТ. Электротехнические устройства на напряжение свыше 1000 В. Требования безопасности».