

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.О. завідувача кафедри

Босий Д.О

_____ (підпис)

«__» _____ 2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо - професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Втрати електроенергії при обмеженому керуванні пристроїв тягового електропостачання**

Theme **Electricity losses with limited control of traction power supply devices**

Керівник дипломної роботи

професор

(посада)

(підпис)

Д. О. Босий

(ПІБ)

Нормоконтролер

доцент

(посада)

(підпис)

В. М. Ляшук

(ПІБ)

Студентка групи ЕС1926

студент

(посада)

(підпис)

І. А. Тертишна

(ПІБ)

Student

Tertyshna Iryna

(Family name)

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»

Завідувач кафедри:

_____ Сиченко В.Г
(підпис)

«20» січня 2020 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття освітнього ступеня магістр

студент групи ЕС 1926 Тертишна І.А.

1 Тема дипломної роботи: «Втрати електроенергії при обмеженому керуванні пристроїв тягового електропостачання».

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 дипломної роботи: Допустимий рівень напруги на шинах тягової підстанції, обмеження значення напруги на струмоприймачеві електровозу, потужність електровозу, графік руху

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки)

4.1 Перспектива розвитку швидкісного залізничного транспорту. Проблематика існуючої системи електропостачання.

4.2 Розробка методу розрахунку розподіленої системи керованого електропостачання.

4.3 Оптимізація параметрів системи керованого електропостачання. Розробка закону управління напругою на підсилюючих пунктах.

4.4 Аналіз отриманих результатів та оцінка енергетичної ефективності.

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу)

Розробка методології розрахунку розподіленої системи електропостачання.

Модель оптимізації. Постановка задачі, числовий метод.

Результати закону керування напругою на тягових підстанціях – графік зміни напруги.

Аналіз та графіки втрат електричної енергії в порівнянні.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу дипломної роботи	Термін виконання	Обсяг розділу, %
1	Вступ	23.09	5
2	<u>Перспектива розвитку швидкісного залізничного транспорту. Проблематика існуючої системи електропостачання.</u>	15.10	25
3	<u>Розробка методу розрахунку розподіленої системи керованого електропостачання.</u>	11.11	30
4	<u>Оптимізація параметрів системи керованого електропостачання. Розробка закону управління напругою на підсилюючих пунктах.</u>	25.11	30
5	<u>Аналіз отриманих результатів та оцінка енергетичної ефективності.</u>	04.12	5
6	<u>Список використаних джерел</u>	07.12	5

Дата видачі завдання: «20» січня 2020 р.

Керівник дипломного проекту: професор _____
(підпис)

Д. О. Босий

Завдання прийняв до виконання: магістрант _____
(підпис)

І. А. Тертишна

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 75 сторінки, складається з 4 розділів та містить 56 ілюстрацій, 7 таблиць, 10 бібліографічних джерел.

Мета роботи – 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.

Режим напруги в тяговій мережі, за відсутності експлуатаційних обмежень, визначає провізну та пропускну здатність електрифікованої залізниці при введенні швидкісного руху, для підвищення показників провізної та пропускну здатності вирішується завдання стабілізації рівня напруги при пропусканні рухомого складу зі споживаною потужністю 10...12 МВт.

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.ШВИДКІСНИЙ РУХ НА ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЯХ	9
1.1.Світовий досвід розвитку швидкісного руху на залізницях	9
1.2.Збільшення керованості пристроїв тягового електропостачання	15
1.3.Система керованого електропостачання для пропуску швидкісних поїздів	18
2.МЕТОД РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ПОСТАЧАННЯ З КЕРОВАНИМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯМ	22
2.1.Постановка задачі розрахунку	22
2.2.Розрахунок на основі методу накладання	23
2.3.Приклад розрахунку розподіленої системи	30
3.ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДВИЩЕННЯ КЕРОВАНОСТІ НА ВТРАТИ	43
3.1.Розрахунок ділянки з одним навантаженням	43
3.2.Критерії, обмеження, параметри оптимізації	51
3.3.Числовий метод оптимізації	52
4.АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОПТИМІЗАЦІЇ	56
4.1.Результати оптимізації рівномірного навантаження	56
4.2.Аналіз техніко-економічних показників оптимізації рівномірного навантаження	61
4.3.Моделювання та оптимізація змінного навантаження	63
5.ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	72
6.СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ	74

ВСТУП

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 и 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 «Електропостачання залізниць» Дніпропетровського 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.

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 електричних схем розподіленого електропостачання.
2. Встановлений закон управління значенням напруги на шинах тягових підстанцій в залежності від графіка руху, струмового навантаження та просторової координати знаходження навантаження.

Практичне значення отриманих результатів:

- При збільшенні швидкості руху на магістральних залізницях України побудові нової системи електропостачання запропонована методологія спростить розрахунок розподілених систем;
- Використання розподіленої системи дозволить почати перехід до інтелектуальних систем електропостачання.

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 X Междунар. Науч. - практ. конф. Проблеми безпеки на транспорті (Гомель, 26-27 ноября, 2020 г.)

Публікації

Босый Д.А., Тертышная И.А. Потери электроэнергии при ограниченном управлении устройствами тягового электроснабжения / 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 коммуникации Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Беларусь. гос. ун-т. трансп.; под. общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель; БелГУТ, 2020, - 229 с. ISBN 978-985-554-946-9 (ч.5)

1. ШВИДКІНИЙ РУХ НА ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЯХ

1.1. Світовий досвід розвитку швидкісного руху на залізницях

Розглянемо світовий досвід упровадження швидкісного залізничного руху на залізницях.

Досвід країн Західної Європи та Японії показує, що найбільшій швидкості руху – 200–350 км / год – можна досягти, організуючі швидкісний рух поїздів на спеціалізованих швидкісних магістралях. Проте їх будівництво і виробництво спеціалізованого рухомого складу вимагає великих капіталовкладень, бо їм має передувати будівництво окремих швидкісних магістралей.

У світі застосовують таку класифікацію швидкісних залізниць для перевезення пасажирів за трьома категоріями максимальної швидкості руху потягів:

- перша – 200–250 км/год;
- друга – 250–350 км/год;
- третя – понад 350 км/год.

Швидкісні залізниці (що також називаються Lignes Grande Vitesse, або швидкісні лінії LGV) визначаються Міжнародним союзом залізниць та ЄС як стандартні, з допустимою максимальною швидкістю понад 200 км/год, або як нові лінії, з передбаченою максимальною швидкістю понад 250 км/год.

Усі швидкісні залізниці LGV Великобританії, Франції, Німеччини, Бельгії, Голландії, Іспанії та Італії, прокладені протягом останніх 30 років, мають проектну швидкість лінії 300 км/год або більше. Французька національна залізниця є світовим рекордсменом зі швидкості із зареєстрованою швидкістю 575 км/год на показовому пробігу по лінії LGV Est у 2007 році між Парижем та Страсбургом. Ці лінії використовуються лише для денних перевезень швидкісними пасажирськими поїздами з відносно низьким навантаженням на вісь, а рух поїздів вночі відсутній.

На швидкісних лініях зазвичай немає вантажних перевезень (але є поодинокі випадки легких, наприклад, пошти і посилок, вантажних перевезень, які

створюють навантаження на вісь, порівнянне з пасажирськими потягами, і дозволяється на цих залізницях).

Швидкість найсучасніших поїздів перевищує 350 км/год, а на окремих ділянках досягає швидкості 486,1 км/год (магістраль Пекін–Шанхай). Загальна протяжність швидкісних залізничних магістралей у світі зараз 7000 км, зокрема 3750 км в Європі, причому швидкісні поїзди обслуговують також полігон протяжністю близько 20 тис.км звичайних залізничних ліній, реконструйованих під швидкісний рух. Але процес проектування й будівництва нових ліній швидкісного руху не припиняється: так, поряд з розвитком швидкісної залізничної мережі Південної Європи, довжина якої до 2021 р. може становити приблизно 10 тис.км, передбачається зростання кількості високошвидкісних ліній у країнах Азії.

Перше місце в рейтингу швидкісних магістралей займає Китай, де швидкість руху перевищує 350 км/год. В Китаї протяжність швидкісних ліній залізниць близько 45 тис.км. Влада Китаю планує пов'язати країну ще з 17 державами. Це надасть Китаю статусу світового лідера в галузі швидкісних залізничних перевезень, а протяжність швидкісних залізничних магістралей у країні перевищить 50% від загального обсягу подібних магістралей у всьому світі.

Сьогодні Китай залучив нову стратегію спрямовану на розвиток магістралей із різною швидкістю руху. Незважаючи на комфортабельність швидкісних експресів, вони виявляються недоступними для великої категорії людей з низьким рівнем доходів. На відносно коротких маршрутах перевага швидкісних поїздів зовсім нівелюється високою вартістю проїзду. Поява поїздів з різними швидкостями руху дасть змогу пасажирам купувати дешевші квитки на “повільні” потяги, а також збільшить кількість зупинок.

Підвищення швидкості руху пасажирських поїздів було і залишається однією з основних проблем розвитку залізниць у всіх індустріально розвинених країнах світу, що викликано прагненням забезпечити масові перевезення пасажирів у регіонах з високою щільністю населення; бажанням скоротити час

поїздок пасажирів; необхідністю збільшення провізної здатності існуючих залізничних ліній, економії ресурсів.

Світовий досвід свідчить, що підвищення швидкості руху поїздів реалізується поетапно:

- під швидкісний рух реконструюються існуючі залізничні магістралі, при цьому максимальна швидкість руху пасажирських поїздів не перевищує 160–200 км / год;
- створюються швидкісні спеціалізовані залізничні магістралі , які передбачають можливість руху пасажирських поїздів зі швидкістю 200–350 км / год.

На противагу поширеній думці, залізничні дороги зберігають свої позиції на ринку при часу поїздки, що перевищує 3 год.: їх частка становить 40–50% на маршруті Париж-Амстердам (час поїздки 4 год), 20–30% на маршрута Париж – Тулон, Париж – Тулуза (5 год.), 10–20% на маршрутах зі часом поїздки 6–6,5 годин.

Досягнення в освоєнні високих швидкостей руху привели в 1990-х роках до появи перших планів створення європейської швидкісної залізничної мережі на основі проектів національних швидкісних ліній. Мережі швидкісних повідомлень різних країн поступово інтегруються, утворюючи єдину європейську мережу. Вона має такі ланки:

- сполучення Eurostar – за допомогою цих сполучень Великобританія отримала постійний «сухопутний» зв'язок залізниці з країнами континентальної Європи через тунель під Ла-Маншем;
- сполучення Thalys – ці сполучення пов'язують великі міста чотирьох країн: Париж, Лілль (Франція), Брюссель, Антверпен, Льєж (Бельгія), Амстердам, Гаагу, Роттердам (Нідерланди), Ахен, Кельн, Дюссельдорф (Німеччина);
- сполучення Rbealys – швидкісний напрямок з Парижа у Страсбург, Люксембург та інші великі німецькі міста.

На відстанях між 500 і 1000 км існує інтенсивна конкуренція між залізничним та повітряним транспортом, і вирішальну роль при виборі пасажирями виду транспорту меншою мірою грають тривалість поїздки або польоту, а більшою – набір і якість послуг, що надаються, а також можливість адаптації до постійно змінюваних умов перевезень.

У залізничних сполучень є та перевага, що внаслідок збільшення кількості проміжних зупинок окремих потягів (навіть з деяким невеликим збитком для маршрутної швидкості) можна охопити швидкісним сполученням міста, що знаходяться між кінцевими пунктами маршруту і, отже, залучити додаткових пасажирів. Так, багато в чому завдяки цьому вдалося добитися, що поїзди TGV перевозять на маршрутах між Парижем і франкомовними регіонами Швейцарії утричі більше пасажирів, ніж літаки.

Ці два види транспорту нерідко прагнуть співпрацювати (доповнювати один одного) в певних сегментах ринку транспортних послуг. Це прагнення зумовлено тим, що поєднанням різних видів транспорту можна надати пасажирам можливість здійснити поїздки з більшими зручностями, ніж будь-яким з них окремо.

Під тиском міжнародних кредиторів український уряд нарешті зважився на реформу Укрзалізниці, яка була передбачена законодавчо ще два роки тому.

Планується, що з початку 2015 р. Держадміністрація залізничного транспорту стане публічним акціонерним товариством. Замість шести окремих залізниць і десятків підприємств (від вагоноремонтних і будівельних організацій до установ соціальної сфери) з'явиться один господарчий суб'єкт з 25 філіями.

У результаті утворяться вертикально інтегровані за видами діяльності структури (вантажні та пасажирські перевезення, ремонт рухомого складу і т. д.). Це допоможе скоротити дублювання функцій і, як наслідок, мінімізувати штат і витрати. Буде скасовано схему перехресного субсидування пасажирських перевезень за рахунок вантажних. Крім того, структура компанії стане прозорою та зрозумілою для інвесторів.

Акціонування Укрзалізниці – це ще й одна з вимог міжнародних кредиторів (ЄБРР, Світового банку, Європейського інвестиційного банку). Саме їхні гроші можуть допомогти відновити ряд програм. Зокрема, йдеться про кошти на оновлення рухомого складу, поліпшення залізничного господарства і подальшу електрифікацію доріг.

За два останні десятиліття залізничну інфраструктуру багатьох країн світу було реформовано, і скрізь була своя специфіка. Реформування Укрзалізниці може відбутися за однією з трьох моделей.

1. Перша модель – європейська – передбачає, що вагонами і локомотивами володіють приватні компанії, що конкурують між собою. Шляхами, вокзалами та іншою інфраструктурою володіє держава або держкомпанія, така як Укрзаліниця. Оператори-приватники платять за використання державної інфраструктури.

З 1991 року в Європейському союзі послідовно проводилася лібералізація ринку залізничних перевезень. Від 2010 р. вільну конкуренцію встановлено на ринку пасажирських перевезень. Тоді ж стали з'являтися перші приватні пасажирські поїзди і почалося проникнення на сусідні ринки (наприклад, німецьких перевізників – у Польщу та Францію). Перевізники самі встановлюють тарифи і залучають клієнтів. Наглядає за свободою конкуренції держава. Однак, враховуючи українські реалії, є ризик дискримінації одних компаній на користь інших.

2. Друга модель передбачає, що держава володіє й інфраструктурою, і рухомим складом, але на ринок залізничних перевезень допускаються приватні компанії, щоб завдяки конкуренції підвищити якість обслуговування.

3. Третя модель реалізована у США, Канаді, Бразилії та Мексиці. Вона передбачає існування кількох залізничних компаній, подібних Укрзалізниці. Тобто в їхньому володінні перебувають шляхи і поїзди, а конкурують вони між собою внаслідок того, що пропонують перевезення за альтернативними маршрутами (з точки А в точку Б можна проїхати різними дорогами) [10].

В Україні швидкісний рух (до 300 км/год) навряд чи буде можливий у близькому майбутньому. Для таких швидкостей потрібна окрема лінія, де руху поїздів не заважатимуть ні перетини з іншими магістралями, ні велика кількість поворотів малого радіуса. Її будівництво, враховуючи міжнародний досвід, коштуватиме кілька десятків, якщо не сотень, мільярдів доларів. Наприклад, в Китаї, де будівництво швидкісних доріг поставлено на промислову основу, вартість кілометра такої траси становить \$ 10–20 млн.

Тому найперспективніше для залізничного транспорту України розвивати так званий прискорений рух (до 160 км/год) на основі наявних шляхів. Йдеться про поступове впровадження швидкісного руху з адаптацією до нових вимог нинішньої інфраструктури.

Перші потяги для прискореного руху з'явилися в Україні до Євро-2012 і, незважаючи на всі поломки і труднощі на початку експлуатації, успішно стали конкурувати з авіакомпаніями на найбільш привабливих маршрутах: Київ – Донецьк і Київ – Харків.

На сьогодні в Україні курсують 10 швидкісних поїздів “ІНТЕРСІТІ+”, з рухомим складом корейського виробництва HYUNDAI та двома поїздами “ІНТЕРСІТІ” чеського виробництва “SKODA”. Максимальна швидкість обох видів рухомого складу становить 160км/год.

Найбільшим попитом користуються поїзди “ІНТЕРСІТІ+”, що курсують між Києвом та Харковом. На цьому напрямку курсують 3 швидкісні поїзди. Висока середня населеність поїздів пояснюється малим терміном поїздки (4 год. 36 хв. – 4 год. 48хв) та зручним графіком руху.

Найменшим попитом користуються поїзди “ІНТЕРСІТІ+”, що курсують між в Донецькому напрямку. Низька середня населеність поїздів в Донецькому напрямку пояснюється великим терміном поїздки – майже 7 годин, ціна квитків за цим напрямом на поїзди категорії “ІНТЕРСІТІ+” є найвищою, що пояснюється відстанню курсування. Враховуючи ергономічні особливості вагонів та

втомлюваність пасажирів, можна сказати, що люди віддають перевагу зручнішому та дешевшому нічному поїзду.

На напрямку Київ – Дніпро – Київ поїзд “ІНТЕРСІТІ+” їде швидше, ніж нічний швидкий поїзд, у 1,5 разу. Але оскільки до Києва здійснюють переважно ділові поїздки, то прибуття денним поїздом до столиці майже о 13.00 є незручно, оскільки людина може не встигнути завершити поїздку за один день.

За таких умов зручнішим є нічний швидкий поїзд, який прибуває в Київ о 7.00 годині ранку.

Перехід на перевезення пасажирів поїздами “ІНТЕРСІТІ+” стримується наявною кількістю швидкісних поїздів. Також на деяких напрямках денні швидкісні поїзди не можуть скласти конкуренцію нічним швидким поїздам. Причиною низької населеності денних швидкісних поїздів є незручний графік їх курсування, значна тривалість поїздки, висока вартість проїзду.

1.2 Збільшення керованості пристроїв тягового електропостачання

Впровадження швидкісного руху, збільшення вагових норм потягів зумовлює необхідність нарощування провізної здатності залізниць. Для цього здійснюються заходи зі збільшення швидкостей руху, створюються нові електровози великої потужності, застосовуються різні способи підсилення тягового електропостачання. Система тягового електропостачання постійного струму не завжди в змозі забезпечити передачу електроенергії необхідної потужності і високої якості для цих потягів. До виникаючих обмежень відносяться зниження напруги на струмоприймачеві електровоза нижче допустимого для нормальної експлуатації значення 2700 В (для швидкісного руху 2900 В) і нагрівання проводів контактної мережі, що сприяє втраті їх механічної міцності. Зниження напруги на струмоприймачі знижує швидкість руху поїздів, а за збереження споживаної потужності відбувається збільшення струму електровоза і втрат електричної енергії в тяговій мережі. З урахуванням того, що в Україні, так само як і на залізницях країн світу, за системою постійного струму

електрифіковано близько половини ліній з електричною тягою, очевидно, що необхідна реконструкція системи електричної тяги постійного струму, спрямована на підвищення пропускної і провізної здатності. При цьому мають бути максимально реалізовані переваги цієї системи з мінімальними додатковими капітальними вкладеннями. Досвід розробок і дослідження наукових і навчальних інститутів, залізниць, зарубіжних організацій і фірм показує, що усунення обмежень по напрузі і струмовим навантаженням в контактній мережі системи електротяги 3,0 кВ може бути вирішене з найменшими витратами за допомогою систем і пристроїв підвищення та автоматичного регулювання випрямленої напруги. Найпростішим рішенням підвищення напруги в контактній мережі є збільшення напруги холостого ходу вентильних перетворювачів за допомогою перемикачів числа витків (анцапф) силових і тягових трансформаторів. Однак підвищення напруги холостого ходу перетворювачів обмежує застосування електричного рекуперативного гальмування і, як наслідок, знижує безпеку руху поїздів. Іншим технічним рішенням, широко застосовуваним на тягових підстанціях і дозволяючим без збільшення напруги холостого ходу підвищити номінальну напругу перетворювального агрегату, стала заміна нульових і мостових шестипульсових схем випрямлення на дванадцятипульсову схему. Але і в цьому випадку підвищення номінальної напруги перетворювального агрегату на 100—120 В виявилось недостатнім для забезпечення суттєвого підвищення пропускної і провізної здатності електрифікованих ділянок постійного струму. Тому, на сьогодні запропоновано використовувати новий технологічний процес передачі електричної енергії — шляхом управління перерозподілом потужності тягових підстанцій, тобто, створення системи керованого електропостачання. До основних завдань керованої системи електропостачання, розробленої проф. Б. О. Аржанніковим відносяться: регулювання напруги в контактній мережі, зведення «зрівняльних струмів» на міжпідстанційних 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. Реконструкція СТЕ здійснюється шляхом використання існуючого та запровадження нового перспективного обладнання тягових підстанцій, в тому числі нових типів перетворювальних трансформаторів і вольтододавальних пристроїв з безконтактним автоматичним регулюванням випрямленої напруги. Зміною рівнів стабілізації напруги тягових підстанцій, тобто введенням примусового перерозподілу встановлених на підстанціях потужностей може бути здійснено пропуск великовагових і швидкісних поїздів без будівництва проміжних тягових підстанцій. За результатами проведених досліджень показано, що забезпечення необхідного режиму напруги в тяговій мережі за наявності існуючих обмежень може бути досягнуте із застосуванням алгоритму стабілізації напруги на струмоприймачах потягів. В Україні регулювальні можливості керування режимами напруги обмежуються застосуванням пристроїв РПН на тягових підстанціях. В реальних умовах експлуатації СТЕ це викликатиме певні проблеми.

Водночас регулювання напруги на шинах тягових підстанцій не вирішує існуючу проблему повною мірою, через збільшення втрат потужності на міжпідстанційній зоні та відповідних експлуатаційних витрат. Тому для підвищення техніко-економічних показників існуючих ділянок електричних залізниць постійного струму застосовується низка технічних та організаційних заходів: використання пунктів паралельного сполучення; збільшення перерізу проводів контактної мережі; будівництво додаткових тягових підстанцій; застосування блоків розподіленого живлення; повна заміна шестипульсових випрямлячів на дванадцятипульсові; розробка і випуск випрямлячів з оптимальною шкалою номінальних потужностей; розширення сфери рекуперативного гальмування і експлуатаційне освоєння дванадцятипульсових випрямно-інверторних перетворювачів; експлуатаційне освоєння ефективних схем згладжувальних фільтрів тягових підстанцій постійного струму; встановлення на

фідерній зоні вольтододаткових пристроїв ВДП з регулюванням напруги; збільшення потужності тягових підстанцій і зменшення відстані міжпідстанційних зон; підсилення зовнішнього електропостачання і обмеження відхилення рівня напруги на вводах тягових підстанцій. Ефект від застосування окремих заходів різний і, як правило, є недостатнім. Для підсилення тягового електропостачання конкретної лінії з метою досягнення необхідних показників якості електропостачання високошвидкісних поїздів потрібно здійснювати комплекс заходів. Поряд з технічними заходами, зниження втрат напруги в тяговій мережі може бути досягнуто за рахунок раціональної організації руху. Наприклад, шляхом застосування пакетного графіка руху швидкісних поїздів з інтервалами, рівними часу ходу по найдовшій ділянці між тяговими підстанціями, що забезпечує знаходження на кожній міжпідстанційній зоні тільки одного поїзда. Електрифіковані високошвидкісні магістралі (ВСМ) Японії, Франції, Іспанії, Італії та інших країн побудовані з урахуванням зазначених вимог, із застосуванням нових технологій електрозабезпечення високошвидкісних поїздів. В Україні ж із зазначених способів використовуються тільки деякі: використання пунктів паралельного сполучення; збільшення перерізу проводів контактної мережі; заміна шестипульсових випрямлячів на дванадцятипульсові.

1.3 Система керованого електропостачання для пропуску швидкісних поїздів

При організації швидкісного та важковагового руху на лініях постійного струму однією з найважливіших вимог до тягового електропостачання є забезпечення необхідного рівня питомої потужності тягової мережі в межах 1,5 – 2,0 МВт/км водночас з підтриманням напруги на струмоприймачі поїзда не нижче ніж 2,9 кВ. Однак виконання поставлених вимог неможливе без вдосконалення системи електричної тяги, її модернізації та реконструкції. Підвищення техніко-економічних показників існуючих ділянок електричних залізниць постійного струму може бути досягнуто з впровадженням певних технічних та організаційних заходів :

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

Основні концепції і принципи підсилення системи тяги постійного струму 3,0 кВ описані ще в 60 – 80 роках минулого сторіччя . Сучасне підсилення СТЕ 3,0 кВ не зазнало значних структурних змін: змінювалася лише елементна база, зумовлена розвитком науки, техніки та технологій.

Для підсилення тягового електропостачання конкретної лінії з метою досягнення необхідних показників питомої потужності для забезпечення руху швидкісних поїздів потрібно впроваджувати цілий комплекс заходів. Тому все частіше пропонується застосування розподілених систем живлення електрифікованих залізниць. Під розподіленою схемою живлення контактної мережі розуміють таку, за якої споживачі на найбільш завантажених зонах отримують живлення не лише від найближчих, але й від низки віддалених пунктів живлення [15]. Участь таких пунктів в живленні суміжних міжпідстанційних зон виходить тим більшою, чим менша потужність встановлених на одній підстанції тягових агрегатів. Забезпечення належного режиму потужності та напруги в тяговій мережі при швидкісному русі, підвищення енергоефективності та

зниження енергоємності залізничної галузі згідно з можливе також за рахунок впровадження систем електричної тяги з використанням накопичувачів (ESS – energy storage system), розподілених вздовж електрифікованої ділянки та призначених для запасання енергії рекуперації й компенсації піків струму та втрат напруги при поверненні її в контактну мережу.

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.

Концепція розподіленого живлення забезпечує високі показники економічності та надійності, дозволяє зняти обмеження пристроїв електропостачання. При такій системі зберігається можливість використання існуючого рухомого складу, а також не потрібні великі витрати на переобладнання контактної мережі (необхідно лише додатково розмістити живлячий провід і, якщо необхідно, підсилити опори). Для забезпечення розподілу навантаження між рядом підсилюючих пунктів необхідно забезпечити між ними зв'язок за режимом напруги на первинній стороні. Тому всі підсилюючі пункти повинні отримувати живлення від однієї лінії електропередачі, що йде вздовж залізниці. Зазначене й зумовлює основну відмінність від схеми централізованого електропостачання. Засоби сучасної силової електроніки дозволяють створювати потужні перетворювачі постійно-постійного струму з первинною напругою порядку десятків кіловольт. У цьому випадку розподілена система живлення найбільш ефективна при спорудженні головних перетворювальних підстанцій з потужними керованими випрямлячами і живлячими лініями постійного струму 24 кВ, прокладеними по опорах контактної мережі. При реалізації системи розподіленого живлення з поздовжньою лінією постійного струму на існуючих тягових підстанціях 3,3 кВ встановлюють замість резервних випрямних агрегатів (або

додатково) високовольтні керовані випрямлячі. Пункти живлення постійно-постійного струму виконуються за типом перетворювача постійнопостійного струму з проміжним контуром змінного струму. Перетворювальні пункти включають: першу сходинку перетворення постійного струму високої напруги в змінний струм (автономний інвертор); другу сходинку перетворення змінного струму високої напруги в постійний струм напругою 3,3 кВ (випрямний агрегат). На опорах контактної мережі прокладається поздовжня живляча лінія постійного струму (високовольтний фідер). Така лінія може прокладатися для парного й непарного напрямку, що забезпечує її резервування. Як високовольтна лінія може використовуватися один з підсилюючих проводів існуючої контактної мережі. Перетворювальний пункт у розподіленій системі з живлячою лінією змінного струму являє собою звичайну одноагрегатну тягову підстанцію. Живляча лінія змінного струму може бути прокладена як по опорах контактної мережі, так і на окремих опорах вздовж залізниці. До живлячої лінії на міжпідстанційній зоні залежно від її довжини, профілю колії і реальних струмових навантажень поїздів підключаються в необхідній кількості автоматичні пункти живлення в розріз лінії, причому на кожному пункті поздовжня лінія секціонується вимикачами, які виконують функцію захисту. Зі сторони 3,3 кВ перетворювальні пункти підключаються до контактної мережі загальноприйнятим способом. Для того щоб при схемі розподіленого живлення з однією відключеною підстанцією можна було забезпечити необхідні розміри руху, потрібно, щоб підстанції розташовувалися значно ближче одна до одної, ніж у схемі централізованого живлення. Відповідно потужність кожної підстанції буде нижчою, а їх кількість більшою. Тому така схема стає доцільною за умови максимальної уніфікації тягових підстанцій, що легко досягається при одноагрегатних підстанціях. Розглянута система потребує значно меншого перерізу проводів контактної мережі й при цьому зменшуються втрати енергії і напруги. Ці якості є найважливішими перевагами системи розподіленого живлення. Крім того, значно полегшується захист контактної мережі від струмів короткого замикання, знижуються потенціали

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

2.МЕТОД РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ПОСТАЧАННЯ З КЕРОВАНИМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯМ

2.1 Постановка задачі розрахунку

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

Апріорі 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 струмі 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

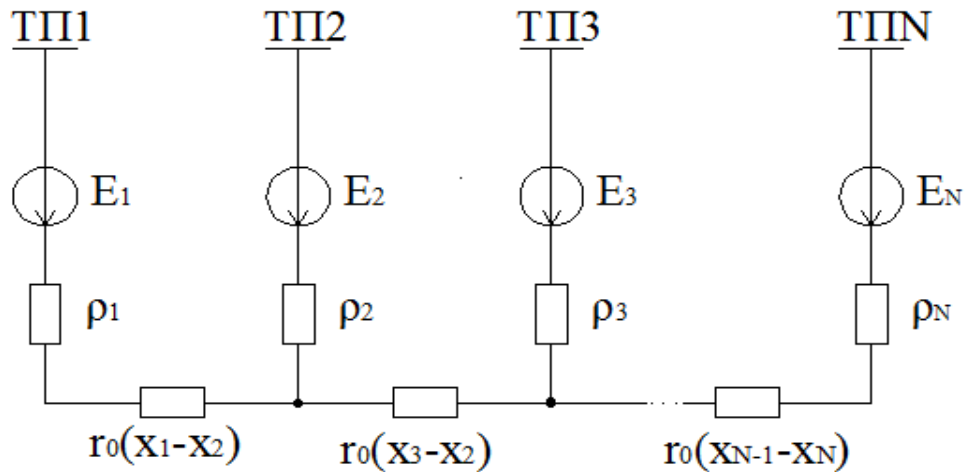


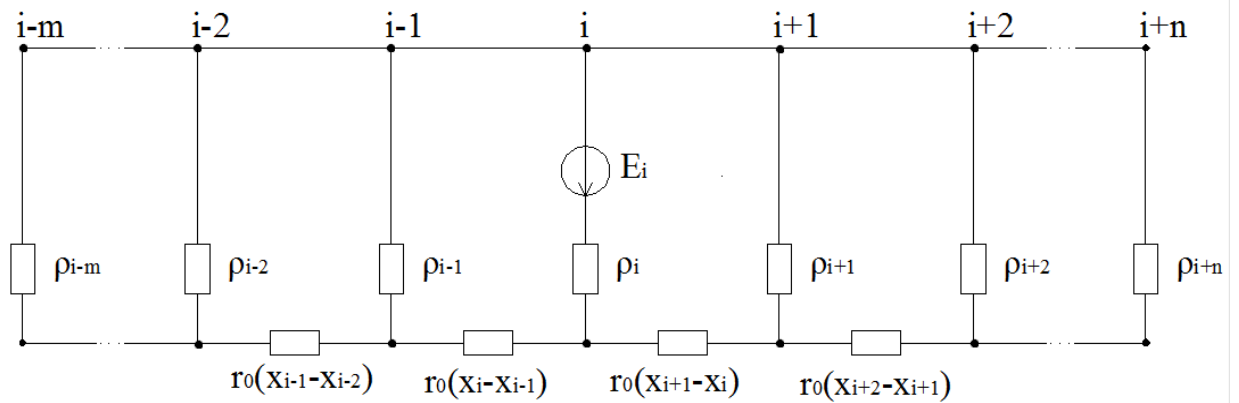
Рисунок 2.1 Принципова схема живлення розподіленої системи

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.

2.2 Розрахунок на основі методу накладання

2.2.1 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 на рис. 3



ρ_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 2.2 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:

$$I_i = \frac{E_i}{r_{ekv}}, \quad (2.1)$$

де: r_{ekv} - еквівалентний опір до струму i -тої одноагрегатної ТП.

2.2.2 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 прийемо як r_L та r_R відповідно. Тоді розрахункова схема має вигляд як на рисунку 2.3:

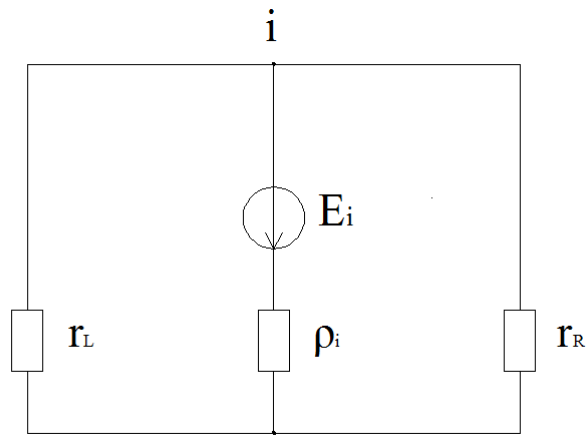


Рисунок 2.3 Розрахункова схема для визначення еквівалентного опору

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 ρ_1 - внутрішній опір першого ТП та опір контактної мережі першої ділянки r_1 , який в свою чергу визначається по формулі:

$$r_1 = r_0 \cdot (x_2 - x_1), \quad (2.2)$$

$$r_{Lekv_1} = r_1 + \rho_1, \quad (2.3)$$

Цей етап розрахунку виконується лише раз при складанні ρ_1 та r_1

2. Наступною дією стане паралельне складання отриманого результату з ρ_2 - внутрішній опір другого ТП

$$r_{Lekv_2} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{r_{Lekv_1}}}, \quad (2.4)$$

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

$$r_{Lekv_3} = r_2 + r_{Lekv_2}, \quad (2.5)$$

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 ρ_{i-n} - внутрішній опір останнього ТП та опір контактної мережі ділянки r_{i-n} , який в свою чергу визначається по формулі:

$$r_{i-n} = r_0 \cdot (x_{i-n} - x_{i-n+1}), \quad (2.6)$$

$$r_{Rekv_1} = r_{N-1} + \rho_N, \quad (2.7)$$

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

ρ_N

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

$$r_{Rekv_2} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{N-1}} + \frac{1}{r_{Rekv_1}}}, \quad (2.8)$$

3. Наступною дією стане послідовне складання вже отриманого результату з

r_{N-2} - опором контактної мережі

$$r_{Rekv_3} = r_{N-2} + r_{Rekv_2}, \quad (2.9)$$

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

$$r_{ekv}(i) = \begin{cases} \rho_i + r_L(i), & i = N; \\ \rho_i + r_R(i), & i = 1 \\ \rho_i + \frac{1}{\frac{1}{r_R(i)} + \frac{1}{r_L(i)}}, & (i \neq 1) \cdot (i \neq N) \end{cases}, \quad (2.10)$$

2.2.3. Визначення струму в контактній мережі за відсутності навантаження

Далі за формулою (2.1) 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 2.4

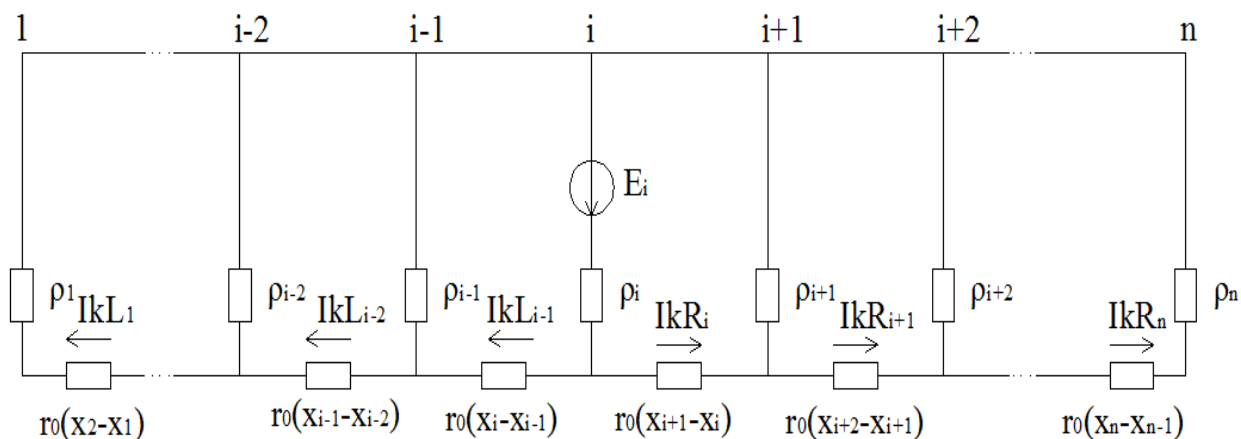


Рисунок 2.4 Струми в контактній мережі від i -тої одно агрегатної ТП

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

- 1) Визначення $I_{kL_{i-1}}$ за формулою (2.11), виконується першою дією та тільки один раз в розрахунку:

$$I_{kL_{i-1}} = \begin{cases} I_i \cdot \frac{r_R(i)}{r_R(i) + r_L(i)}, & i \neq N \\ I_i, & i = N \end{cases} \quad (2.11)$$

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

$$I_{kL_{i-2}} = I_{kL_{i-1}} \cdot \frac{\rho_{i-1}}{\rho_{i-1} + r_L(i-1)}, \quad (2.12)$$

Так дія 2 за формулою (2.12) виконується до розрахунку I_{kL_1} , з кожною дією значення j зменшується на одиницю як i індекс при ρ та зменшується на одиницю абсцис в залежності r_L .

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

1. Визначення $I_{kL_{i-1}}$ формулою (2.13), виконується першою дією та тільки один раз в розрахунку:

$$I_{kR_i} = \begin{cases} I_i \cdot \frac{r_L(i)}{r_R(i) + r_L(i)}, & i \neq 1 \\ I_i, & i = 1 \end{cases}, \quad (2.13)$$

2. Визначення значення $I_{kR_{i+1}}$ формулою (2.14), використовуючи формулі розкиду:

$$I_{kR_{i+1}} = I_{kR_i} \cdot \frac{\rho_{i+1}}{\rho_{i+1} + r_R(i+1)}, \quad (2.14)$$

Так дія 2 формулою (2.14), виконується до розрахунку I_{kR_n} , з кожною дією значення j збільшується на одиницю як i індекс при ρ 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. 2.1 та 2.2.

Таблиця 2.1 - 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 2.2 - 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 кількістю стовпців якої буде дорівнювати j , а кількість рядків буде дорівнювати N , покажемо це в табл. 2.3 та 2.4..

Таблиця 2.3 - 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 2.4 - 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 2.4, розрахунок вкочуємо за формулою (2.15)

$$I_{k_j} = I_{kR_j} - I_{kL_j}, \quad (2.15)$$

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. 2.5.

Таблиця 2.5 - Значення струму в контактній мережі I_{k_j}

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

2.3 Приклад розрахунку розподіленої системи

2.3.1 Вихідні дані

Для прикладу розрахуємо ділянку з параметрами:

$$S = 40 \text{ км} \quad \rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = \rho_5 = 0,14 \text{ Ом}, \quad N = 5, \quad r_0 = 0,05 \text{ Ом}$$

ТП на ділянці розмітимо рівномірно через кожні 10 км. так там як показано на рисунку 2.5

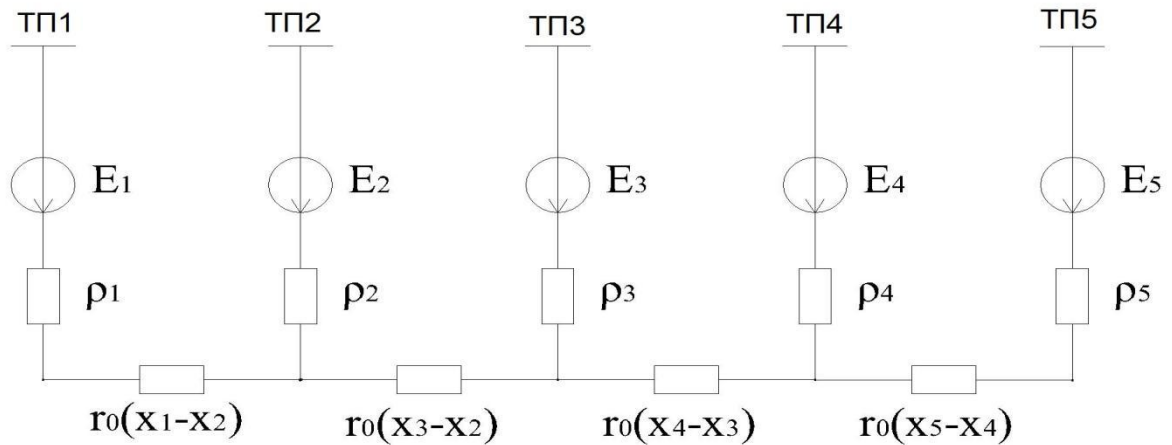


Рисунок 2.5 Розподілена система з кількістю одно агрегатних ТП рівному п'яти

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 2.6:

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

Рисунок 2.6 ЕРС першого варіанту розрахунку

Варіант №2 вектор значення ЕРС має вигляд як на рисунку 2.7:

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

Рисунок 2.7 ЕРС другого варіанту розрахунку

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

2.3.2 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 ρ_1 - внутрішній опір першого ТП та опір контактної мережі першої ділянки r_1 , який в свою чергу визначається по формулі (2.2):

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

Перша дія як за формулою (2.3):

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

Цей етап розрахунку виконується лише раз при складанні ρ_1 та r_1

2. Наступною дією стане паралельне складання отриманого результату з

ρ_2 - внутрішній опір другого ТП формулою (2.4):

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

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 (2.5):

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

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

Розрахунок r_L в моделі MathCAD покажемо на рис 2.8

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

$$R_L(3) = 0.6149$$

Рисунок 2.8 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 (2.6):

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

Перша дія як за формулою (2.7):

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

Цей етап розрахунку виконується лише раз при складанні r_{N-1} та ρ_N

2. Наступною дією стане паралельне складання отриманого результату з ρ_{N-1} - внутрішній опір ТП за формулою (2.8):

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

3. Наступною дією стане послідовне складання вже отриманого результату з r_{N-2} - опором контактної мережі за формулою (2.9):

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

4. Наступною дією стане паралельне складання отриманого результату з ρ_{N-2} - внутрішній опір ТП за формулою (2.8):

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

5. Наступною дією стане послідовне складання вже отриманого результату з r_{N-3} - опором контактної мережі за формулою (2.9):

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

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 $r_R(2) = r_{Rekv_5}$.

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

$$R_R(2) = 0.614035$$

Рисунок 2.9 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 (2.10).

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

Розрахунок r_{ekv} в моделі MathCAD покажемо на рис. 2.10

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

$$R(3) = 0.447436$$

Рисунок 2.10 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.

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

Далі за формулою (2.1) 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 (2.11):

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

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

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

Рисунок з моделі в MathCAD на рисунку 2.11

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

$$I_L(3) = (661.891117 \ 3687.$$

Рисунок 2.11 - 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 2.12:

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

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

Рисунок 2.12 - 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. 2.13:

$$I_k_sum_L := \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..rows(p) - 1 \\ \quad \text{sum} \leftarrow 0 \\ \quad \text{for } j \in 1..rows(p) \\ \quad \quad \text{sum} \leftarrow \text{sum} + I_K_L_{j,i} \\ \quad \text{res}_{1,i} \leftarrow \text{sum} \\ \text{res} \end{array}$$

$$I_k_sum_L = (4376.62 \ 4527.33 \ 4527.33 \ 4376.62)$$

Рисунок 2.13 - 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. 2.14

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

$$I_R(3) = (0 \quad 0 \quad 3687.68 \quad 661.89)$$

Рисунок 2.14 – 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. 2.15:

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

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

Рисунок 2.15 - Розрахунок всіх значень від і-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:

$$I_k_sum_R := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..rows(p) - 1 \\ \quad \text{sum} \leftarrow 0 \\ \quad \text{for } j \in 1..rows(p) \\ \quad \quad \text{sum} \leftarrow \text{sum} + I_K_R_{j,i} \\ \quad \text{res}_{1,i} \leftarrow \text{sum} \end{array} \right|_{\text{res}}$$

$$I_k_sum_R = (4376.62 \ 4527.326 \ 4527.326 \ 4376.62)$$

Рисунок 2.16 – 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} :

$$I_k = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

$$I_k := -I_k_sum_L + I_k_sum_R$$

Рисунок 2.16 – Розрахунок I_k в моделі MathCAD

2.3.4 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 (2.11)-(2.14).

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

3) Визначення $I_{kL_{i-1}}$, виконується першою дією за формулою (2.11) та тільки один раз в розрахунку:

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

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

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

Розрахунок в моделі MathCAD зображений на рис. 2.17

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

$$I_L(3) = (681.948 \quad 3799.427 \quad 0 \quad 0)$$

Рисунок 2.17 - 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 :

$$I_K_L := \begin{cases} I_k \leftarrow I_L(1) \\ \text{for } i \in 2.. \text{rows}(p) \\ I_k \leftarrow \text{stack}(I_k, I_L(i)) \\ I_k \end{cases}$$

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

Рисунок 2.18 - 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. 2.19:

$$I_k_sum_L := \begin{cases} \text{for } i \in 1.. \text{rows}(p) - 1 \\ \quad \text{sum} \leftarrow 0 \\ \quad \text{for } j \in 1.. \text{rows}(p) \\ \quad \quad \text{sum} \leftarrow \text{sum} + I_K_L_{j,i} \\ \quad \text{res}_{1,i} \leftarrow \text{sum} \\ \text{res} \end{cases}$$

$$I_k_sum_L = (4560.55 \ 4649.51 \ 4583.61 \ 4376.62)$$

Рисунок 2.19 – 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. 2.20 з моделі в MathCAD алгоритм для розрахунку

I_{kR_j} :

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

$$I_R(3) = (0 \quad 0 \quad 3799.43 \quad 681.95)$$

Рисунок 2.20 – Розрахунок I_{kR} для i -тої ТП в моделі MathCAD

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

$$I_K_R := \begin{cases} I_k \leftarrow I_R(1) \\ \text{for } i \in 2.. \text{rows}(p) \\ \quad I_k \leftarrow \text{stack}(I_k, I_R(i)) \\ I_k \end{cases}$$

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

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

Рисунок 2.21 – 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:

$$I_k_sum_R := \begin{cases} \text{for } i \in 1.. \text{rows}(p) - 1 \\ \quad \begin{cases} \text{sum} \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 1.. \text{rows}(p) \\ \quad \text{sum} \leftarrow \text{sum} + I_K_R_{j,i} \\ \text{res}_{1,i} \leftarrow \text{sum} \end{cases} \\ \text{res} \end{cases}$$

$$I_k_sum_R = (4641.87 \ 4745.425 \ 4679.523 \ 4457.938)$$

Рисунок 2.22 – 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. 2.23:

$$I_k := -I_{k_sum_L} + I_{k_sum_R}$$
$$I_k = (81.318 \ 95.913 \ 95.913 \ 81.318)$$

Рисунок 2.23 – Розрахунок суми I_{kR} для всіх ТП в моделі MathCAD

Як бачимо з рисунком 2.23 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.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДВИЩЕННЯ КЕРОВАНОСТІ НА ВТРАТИ

3.1 Розрахунок ділянки з одним навантаженням.

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

Таблиця 3.1 - **Значення рівня напруг на кожній ТП**

	Значення напруги, В
ТП 1	3682
ТП 2	3312
ТП 3	3449
ТП 4	3428
ТП 5	3424
ТП 6	3391
ТП 7	3447
ТП 8	3318
ТП 9	3317

Параметри розрахункової ділянки:

$$S = 126,2 \text{ км}; \rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_{N-1} = \rho_N = 0,1 \text{ Ом}; N = 11; r_0 = 0,072 \text{ Ом}.$$

Розрахункова схема ділянки графічно має вигляд як на рис. 3.1

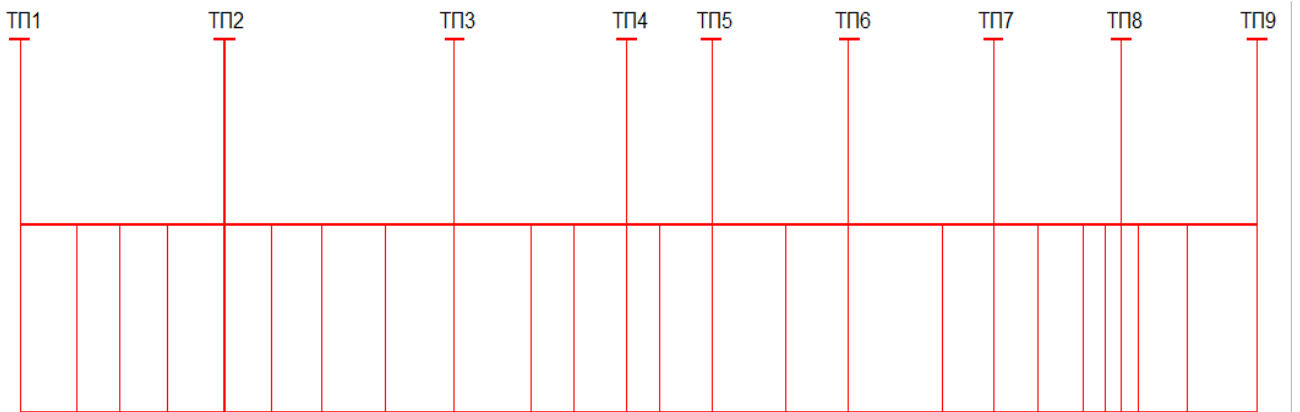


Рисунок 3.1 Схема ділянки Ніжньодніпровськ-Вузол-Пятихатки

За допомогою пакету MathCAD та відомою методологією методу накладання визначимо значення струмів в контактній мережі при відсутності навантаження за формулою (2.15) та покажемо в таблиці 3.2., прийнявши додатній напрямок протікання струму I_{kR_j} :

Таблиця 3.2 – Значення струмів в контактній мережі за відсутності навантаження

Ділянка №	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення струмів, А	378.67	-93.54	16.31	19.51	43.07	-44.74	190.71	28.66

Для знаходження наруги холостого ходу на шинах ТП з урахуванням зрівнюючі струмів скористаємось формулою (3.1):

$$U_{xx} = U_i - (I_{k_i} - I_{k_{i-1}}) \cdot \rho_i, \quad (3.1)$$

Лінійно інтерполюючи по всій розрахунковій ділянці отримаємо значення наруги холостого ходу в контактній мережі по всій ділянці, результат покажемо на малюнку 3.3:

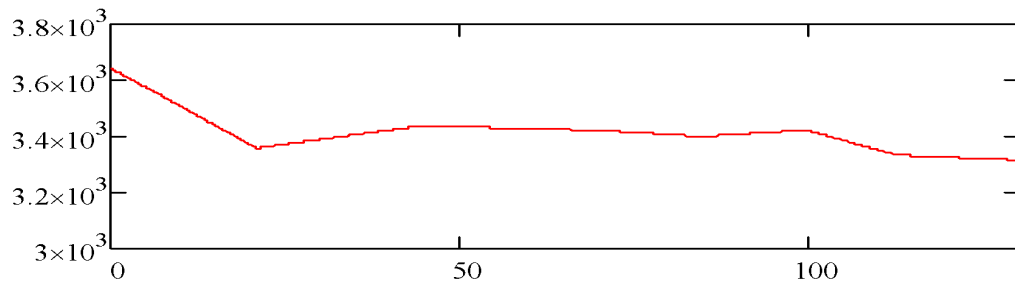


Рисунок 3.2 Наруга холостого ходу

Нехай рухомий склад рухається без зупинок, споживаючи струм 1000 А та реалізує по всій ділянці постійну потужність.

За відомою методологією розрахунку миттєвих схем зі споживанням постійної потужності [7] можна визначити наругу на струмоприймачеві за формулою (3.2)

$$U_{xx} = U_e - I \cdot f(x), \quad (3.2)$$

Де: I_e - струм електровозу;

$f(x)$ - результуючий опір відносно знаходження навантаження;

U_e - наруга на струмоприймачеві електровозу.

Рухомий склад рухаючись змінює свої просторові координати, та в кожній точці змінюється еквівалентний опір тягової мережі відносно рухомого складу. Для розрахунку еквівалентного опору в кожній координаті x визначимо функцію опору тягової мережі, яке для кожного значення x можна розрахувати як результуючий

опір всіх віток для даної координати. Методологію розрахунку $f(x)$ зобразимо у вигляді алгоритму .

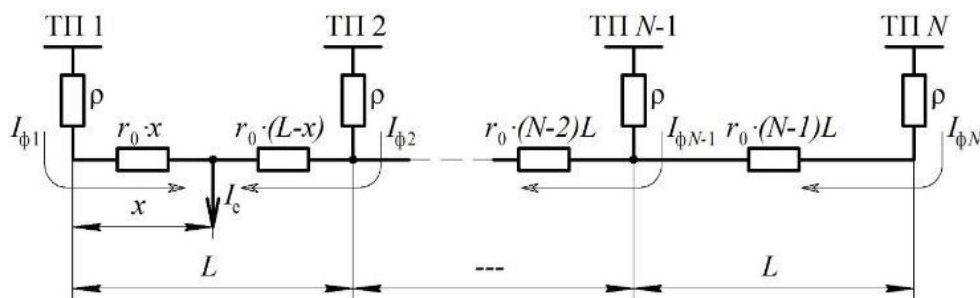


Рисунок 3.3 - Схема заміщення результуючого опору без ПСК та ТПС

Так для двохстороннього живлення без ПСК та ТПС:

1. Знаходимо опір лівої частини схеми відносно знаходження навантаження за формулою (3.4)

$$r_1(x) = \begin{cases} \rho_1 + r_0(x - l_1), & i = 1; \\ \rho_i + \frac{1}{\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_L(i)}} + \rho_1 + r_0(x - l_i), & i \neq 1, \end{cases} \quad (3.4)$$

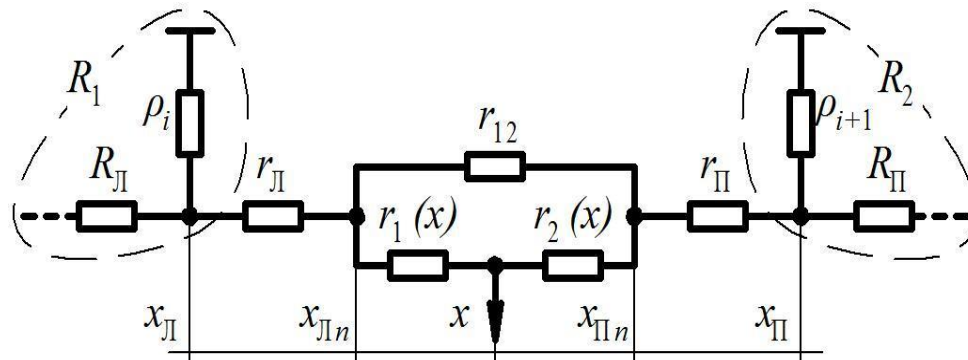
2. Знаходимо опір правої частини схеми відносно знаходження навантаження за формулою (3.5)

$$r_2(x) = \begin{cases} \rho_n + r_0 \cdot (l_n - x), & i = n; \\ \rho_i + \frac{1}{\frac{1}{r_{i+1}} + \frac{1}{r_R(i+1)}} + r_0 \cdot (l_{i+1} - x), & i \neq n, \end{cases} \quad (3.5)$$

3. Знаходимо результуючий опір за формулою (3.6)

$$f(x) = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}, \quad (3.6)$$

В випадку двоколійної ділянки з ПСК та ТПС розрахунок буде ускладнюватись, необхідно врахувати вузлову схему, паралельну та неповну паралельну. Загальна схема заміщення для визначення результуючого опору має вигляд як на малюнку 3.5:



$R_{Л}$ - опір лівої частини схеми, який розраховується за алгоритмом (2.2)- (2.5); $R_{П}$ - опір правої частини схеми, який розраховується за алгоритмом (2.6)- (2.9); R_1, R_2 – опір зліва і праворуч від ТП; $r_1(x), r_2(x)$ – опір тягової мережі до ближнього вузла; r_{12} – опір між ближніми вузлами; $r_{Л}, r_{П}$ – опір тягової мережі двох ниток, між двома вузлами і ближніми ТП.

Рисунок 3.4 - Схема заміщення результуючого опору з ПСК та ТПС

Результуючий опір для вузлових, паралельних схем в загальному випадку розраховується за формулою (3.7)

$$f(x) = \frac{r_1(x) \cdot r_2(x)}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{r_1(x) \cdot r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + R_{П} + r} + \frac{1}{\frac{r_2(x) \cdot r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + R_{П} + r}}, \quad (3.7)$$

Тепер за формулою (3.2) можна визначити значення напруги на струмоприймачеві під час руху електровозу розрахунковою ділянкою. Значення напруг покажемо графіком на малюнку 3.6:

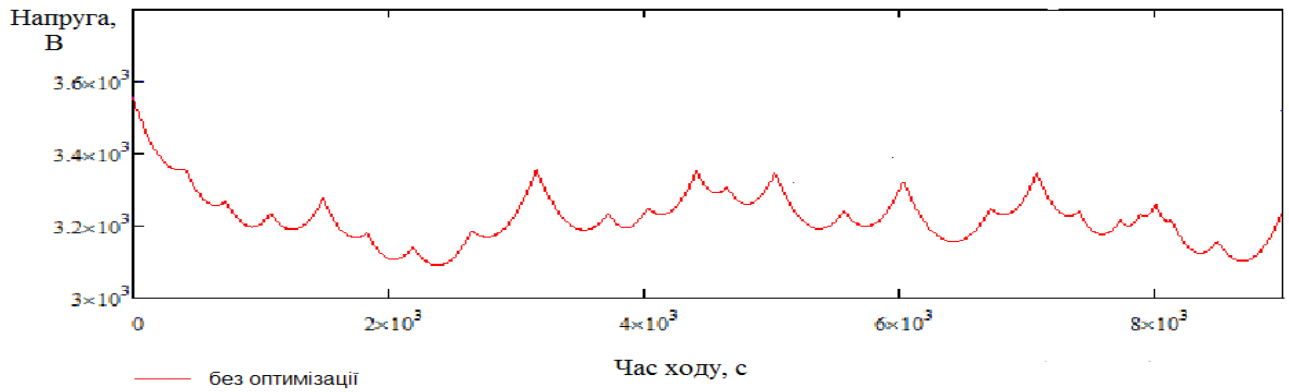


Рисунок 3.5 - Напруга на струмоприймачеві

Для визначення втрат в контактній мережі обхідно розрахувати струморозподіл при русі електровозу. Для цього необхідно визначити функцію струморозподілу, яка показує відношення опору для даного фідера i -тої ТП до суми опорів всіх фідерів кожної ТП і розраховується за формулою (3.8)

$$\varphi_i = \frac{f_{\sum f}(x)}{f_f(x)}; \quad (3.8)$$

Де: $f_f(x)$ - функція опору фідера від i -тої ТП;

$f_{\sum f}(x)$ - функція опору всіх живлячих фідерів.

Функція опору фідера має три варіанти розрахунку, в залежності від знаходження електровоза відносно фідера, в загальному вигляді розраховується за формулою (3.9)

$$f_f(x) = \begin{cases} \frac{r_1(x) \cdot r_2(x)}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + \frac{r_1(x) \cdot r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + R_{II} + r, & x_f < x \\ \frac{r_1(x) \cdot r_2(x)}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + \frac{r_1(x) \cdot r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + R_{II} + r, & x_f > x, \\ \rho_f, & x_f = x \end{cases} \quad (3.9)$$

Всі фідери живлять навантаження паралельно, тому логічно, що сума струмів всіх фідерів дорівнює струму електровозу, як це показано на малюнку 3.7

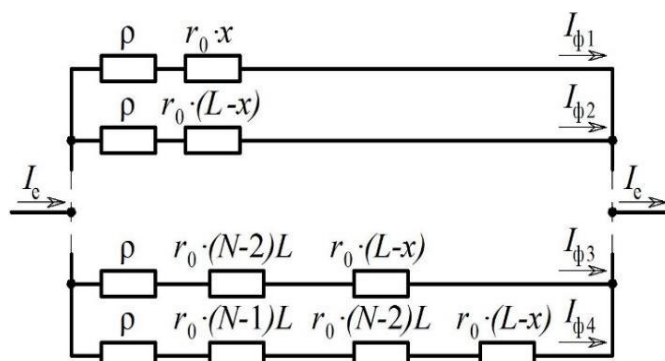


Рисунок 3.6 - Схема живлення електровоза.

Для знаходження функції опору всіх живлячих фідерів достатньо розрахувати значення функції опору кожного фідера як на малюнку 3.8 та за формулою (3.9), та скласти їх паралельно за формулою (3.10)

$$f_{\sum f}(x) = \frac{1}{\sum_1^N f_f(x)} \tag{3.10}$$

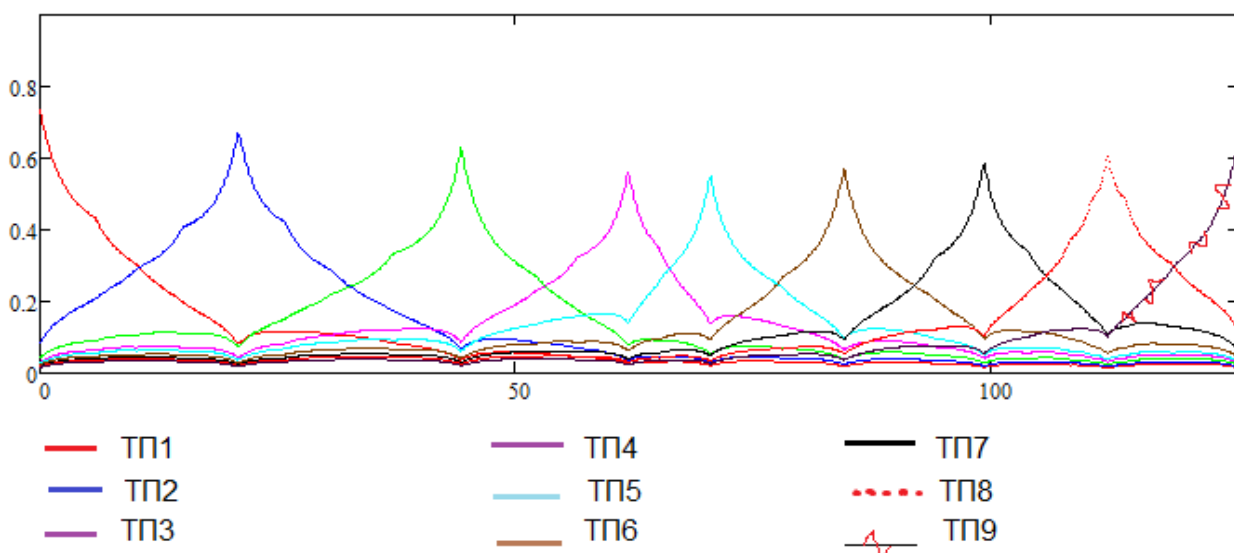


Рисунок 3.7 - Функція струморозподілу.

Для розрахунку значень струмів фідерів достатньо функцію струморозподілу для даного фідера помножити на значення струму електровоза, як це показано в формулі (3.11)

$$I_{fi}(px) = I_e \cdot i \quad (3.11)$$

Для прикладу графічно покажемо значення струму фідера від часу ходу електровоза розрахунковою ділянкою для першої та п'ятої одноагрегатної ТП на малюнку 3.8 та 3.9 відповідно.

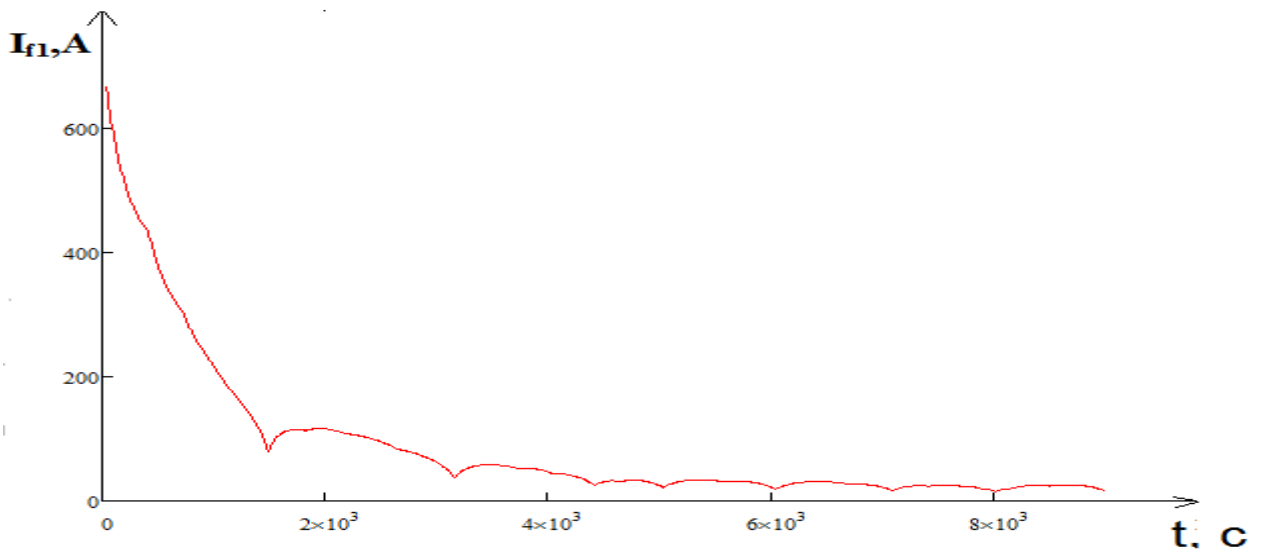


Рисунок 3.8 - Значення струму фідера першої ТП

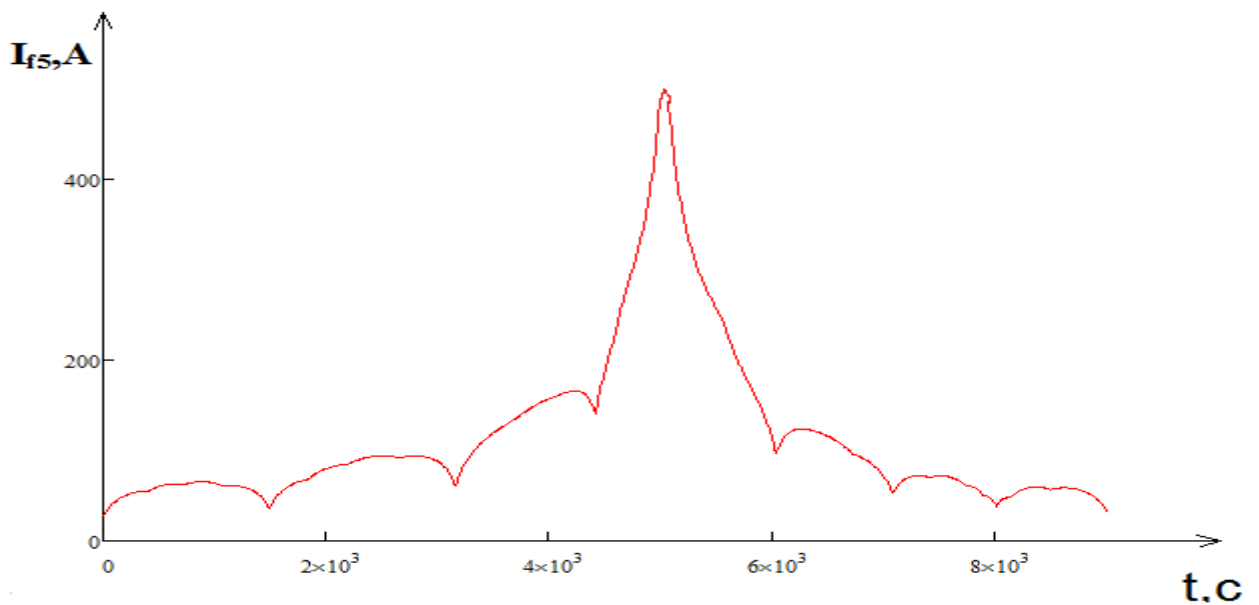


Рисунок 3.9 Значення струму фідера п'ятої ТП

Два головних техніко-економічних показників роботи системи електропостачання є мінімальна напруга на струмоприймачеві, яка для даного експерименту показана на рисунок 3.5, 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 (3.12) визначимо втрати потужності для нашого експерименту:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N S_{ТП_i} - S_e, \quad (3.12)$$

Де: $S_{ТП_i}$ - потужність яку віддає і-та ТП;

S_e - потужність яку споживає електровоз.

Для розрахунку потужності яку споживає електровоз є всі необхідні дані, і розраховується за формулою (3.13)

$$S_e = U_e \cdot I_e, \quad (3.13)$$

Де: U_e - напруга на струмоприймачеві розраховується за формулою (3.2), В;

I_e - струм електровозу прийнятим рівним 1000 А.

Для розрахунку потужності яку віддає і-та ТП необхідно визначити струм який віддає ТП в тягову мережу. Він складається з струму що живить електровоз, цей струм розраховано за формулою (3.11) та зрівнюючий струм, який викликаний різницею значень напруг на шинах ТП, він розрахований за формулою (2.15) та

зведений до таблиці 3.2. Тому визначимо струм який віддає ТП, розраховується він за формулою (3.14)

$$I_{ТП_i} = \begin{cases} I_{f_i}(x) + I_{k_i}, i = 1 \\ I_{f_i}(x) + I_{k_i} - I_{k_{i+1}}, (i \neq 1) \cdot (i \neq N), \\ I_{f_i}(x) + I_{k_i}, i = N \end{cases} \quad (3.14)$$

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 (3.15)

$$S_{ТП_i} = (U_i - I_{ТП_i} \cdot \rho_i) \cdot I_{ТП_i}, \quad (3.15)$$

Значення втрат потужності розрахуємо за формулою (3.12) і зведемо до графіку, який покажемо в рисунку 3.10

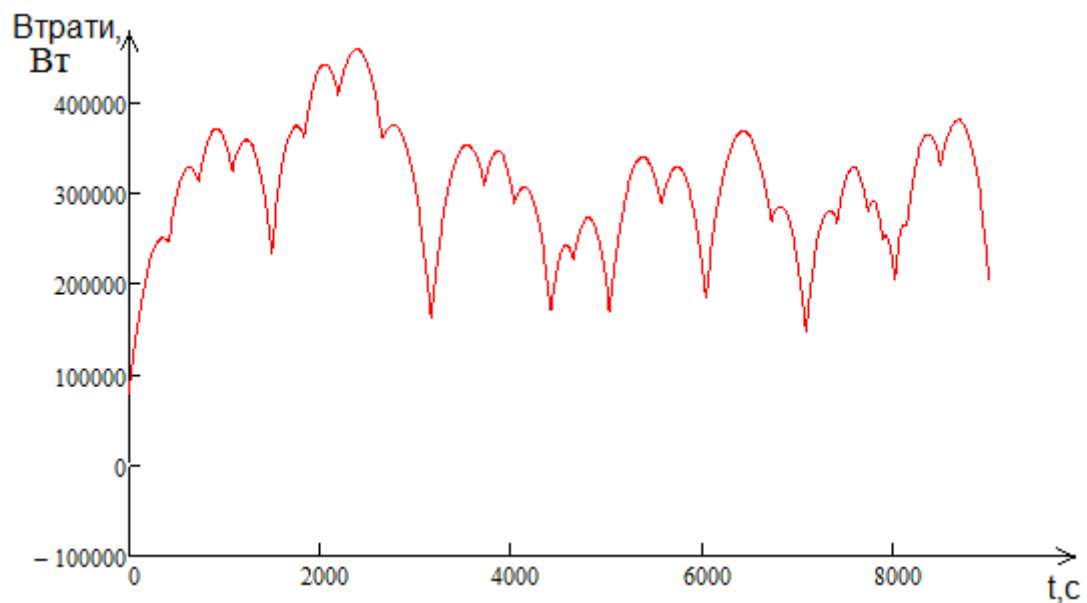


Рисунок 3.10 – Втрати потужності

3.2 Критерії, обмеження, параметри оптимізації

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, яка показана на рисунку 3.5, 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 перемикання напруги, технічно можлива дискретність перемикання 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 (3.16)

$$3000 \leq U \leq 3900, \text{ В} \quad (3.16)$$

Всі необхідні данні для проведення оптимізації є, необхідно тільки визначитись з методом оптимізації, тобто числовим методом оптимізації, що і буде виконано далі.

3.3 Числовий метод оптимізації

При вирішенні завдань оптимізації можуть використовуватися як аналітичні, так і чисельні методи.

При вирішенні зазначених завдань рідко вдається скористатися аналітичними методами, так як аналітичні рішення можливі лише в рідкісних випадках при вирішенні інженерних задач, коли оптимізуються функції представлені в аналітичній формі. Крім того, математичні моделі часто задаються не у вигляді формул, а за допомогою оператора і знаходження значень функцій f

(x_1, x_2, \dots, x_n) здійснюють алгоритмічно, шляхом обчислення по деякому, наприклад ітераційного, алгоритму. У цьому випадку застосування аналітичних методів неможливо.

Чисельні методи оптимізації різноманітні і їх можна класифікувати наступним чином:

- Методи спрямованого пошуку екстремуму.
- Методи випадкового пошуку екстремуму.

Зупинимося на методах спрямованого пошуку екстремуму. Серед них можна виділити наступні види:

- Методи нульового порядку, або методи пошуку. Ці методи вимагають для своєї реалізації тільки обчислення значень функції.
- Методи першого порядку, або градієнтні методи. Дані методи вимагають для своєї реалізації обчислення значень функції і її перших похідних.
- Методи другого порядку, або методи Ньютона. Зазначені методи вимагають для реалізації додаткової інформації про другі похідні.

Необхідно відзначити, що при чисельному обчисленні похідних за допомогою кінцевих різниць всі ці методи можна трактувати як методи пошуку.

Суть чисельних алгоритмів оптимізації при знаходженні мінімуму функції (x) складається в побудові мінімізуючій послідовності за формулою (3.17) :

$$x_{k+1} = x_k + a_k \cdot p_k; x_0 = x; k = 0, 1, \dots, \quad (3.17)$$

Де x_0 – початкові значення;

p_k - напрямок пошуку мінімуму на k -му кроці;

a_k - величина кроку в зазначеному напрямку.

Якщо для всіх k виконується умова (3.18) і мінімум функції існує, то послідовність значень $x_{k+1}, k = 0, 1$ сходиться до вирішення завдання мінімізації \min .

$$f(x_{k+1}) = f(x_k), \quad (3.18)$$

На практиці домагаються досить малої заданої величини різниці між значеннями аргументів і (або) значень функцій на двох послідовних ітераціях.

Суть всіх чисельних методів мінімізації полягає в способах вибору вектора напрямку мінімізації p_k і величини кроку в цьому напрямку. Завдання знаходження максимуму або мінімуму функції за формулою (3.19):

$$\min f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*), \quad (3.19)$$

Де: x_1, x_2, \dots, x_n – змінні досліджуваної функції $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$;

$x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ – значення змінних, при яких функція досягає екстремуму (максимуму або мінімуму).

Однією з чудових спроб прискорити збіжність градієнтних методів, зберігши при цьому мінімальні вимоги до пам'яті та обсягом обчислень на кожній ітерації, був метод сполучених градієнтів. Цей метод був запропонований в 1952 для вирішення систем лінійних рівнянь з позитивно визначеної симетричною матрицею A за рівнянням (3.20)

$$A \cdot x = b, \quad (3.20)$$

Такі матриці виникають, наприклад, при дискретизації еліптичних рівнянь математичної фізики та породжують лінійні системи великий або дуже великий розмірності. Для цих систем характерно також велика кількість нульових елементів в матриці системи A , а стандартна процедура виключення Жордана-Гаусса викликає зростання заповнення матриці і достатньо але швидко вимоги до пам'яті починають перевершувати навіть можливості сучасних комп'ютерів. Крім цього, процедура Жордана-Гаусса виключає можливість легкого рестарту, при якому можна було б уточнювати попереднє, можливо вже досить непогане, рішення. У прагненні подолати вказані недоліки і був запропонований метод сполучених градієнтів, який є однією з різновидів більш загальної схеми пов'язаних напрямків[8].

В основі цього методу лежить таке просте спостереження: якщо $A > 0$, то рішення системи $Ax = b$ еквівалентно завданню мінімізації квадратичної функції (3.21)

$$Q(x) = \frac{1}{2} \cdot x \cdot A \cdot x - b \cdot x, \quad (3.21)$$

Для багатьох завдань, де оптимізується функція має складну будову обчислення матриці других похідних $f''(x^k)$. Може виявитися надмірно трудомістким, що затрудняє застосування методу Ньютона. З іншого боку метод сполучених градієнтів показав себе недостатньо стійким, особливо при мінімізації функцій, сильно відрізняються від квадратичних. Для таких випадків відповідною альтернативою можуть бути квазіньютонівські методи, що визначаються за формулою (3.22)-(3.23), що нагадує метод Ньютона:

$$x^{k+1} = x^k + \lambda_k \cdot d^k, \quad (3.22)$$

$$d^k = -D_k f'(x^k), \quad (3.23)$$

Де: D_k - матриця яка замінює $(f''(x_k))^{-1}$;

λ_k - параметр кроку вибирається з умов точного або наближеного мінімуму вздовж напрямку d_k .

Послідовність D_k можна побудувати різними способами, можна представити у вигляді формули (3.24)

$$D_{k+1} = D_k + \Delta_k, \quad (3.24)$$

Де: Δ_k - матриця корекції.

Квазіньютонівський метод є ефективним методом вирішення задач безумовної оптимізації. Його відрізняє висока швидкість сходимості, не має необхідності вираховувати другі похідні чи обернені матриці, але одночасно він потребує багато оперативної пам'яті через потребу переховувати та зберігати значення D_k для всіх k .

Для нашого завдання цей метод підходить тому скористаємось ним для вирішення задачі оптимізації за D_k приймається матриця значень втрат потужності.

4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОПТИМІЗАЦІЇ

4.1 Результати оптимізації рівномірного навантаження

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 (4.1)

$$k = \frac{t}{d} + 1 = \frac{9000}{10} + 1 = 901, \quad (4.1)$$

Для першої ТП графік зміни напруги має вигляд як на рисунку 4.1

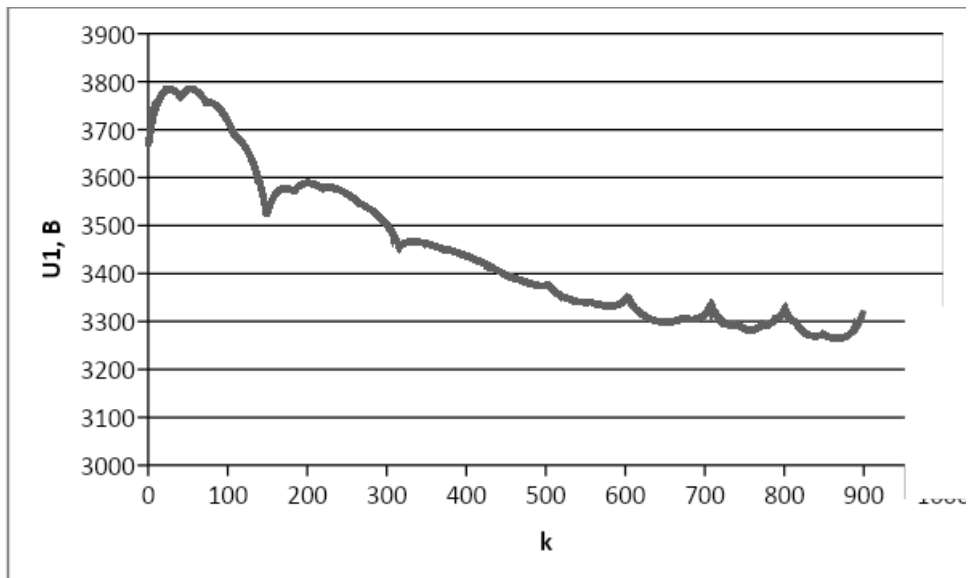


Рисунок 4.1 - Графік зміни напруги першої ТП

Для другої ТП графік зміни напруги має вигляд як на рисунку 4.1

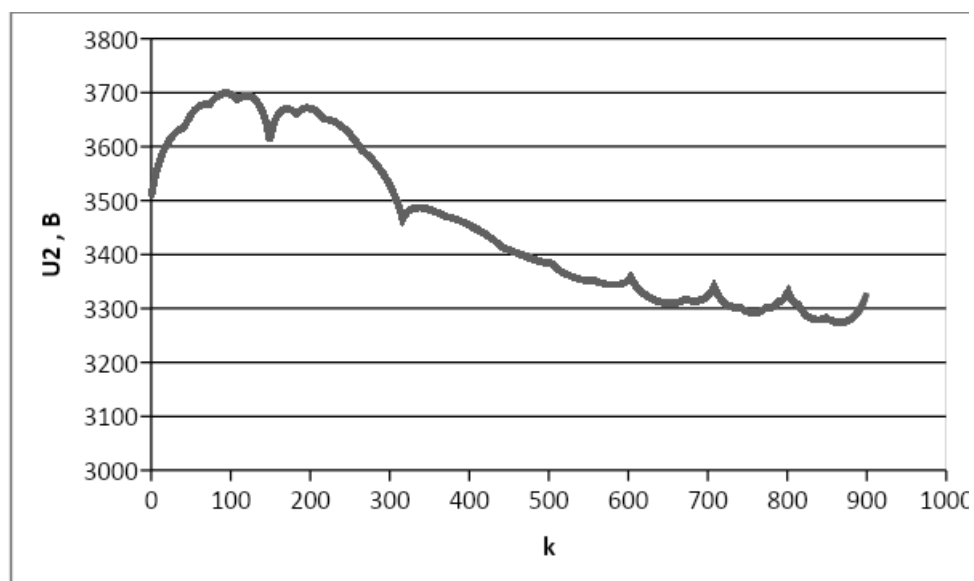


Рисунок 4.2 - Графік зміни напруги другої ТП

Для третьої ТП графік зміни напруги має вигляд як на рисунку 4.3

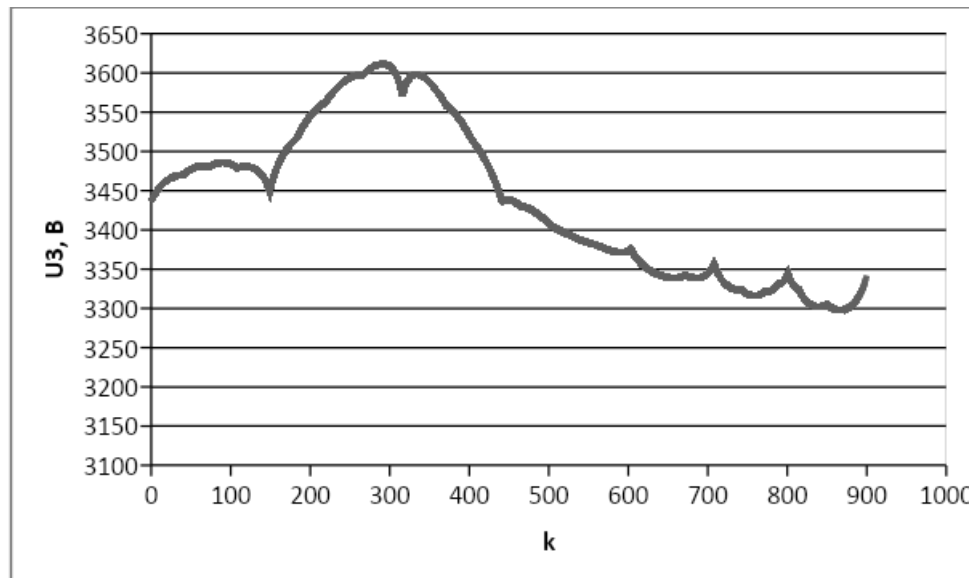


Рисунок 4.3 - Графік зміни напруги третьої ТП

Для четвертої ТП графік зміни напруги має вигляд як на рисунку 4.4

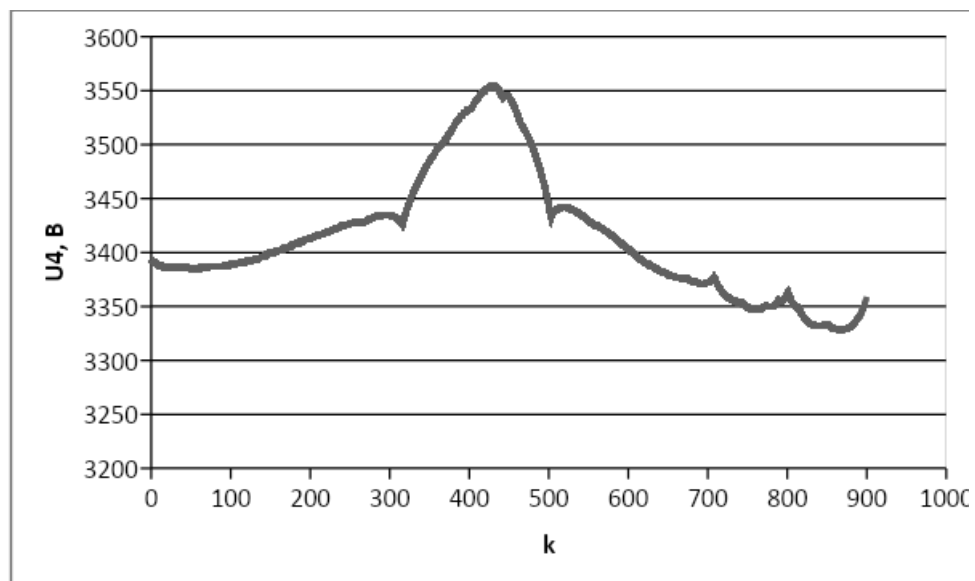


Рисунок 4.4 - Графік зміни напруги четвертої ТП

Для п'ятої ТП графік зміни напруги має вигляд як на рисунку 4.5

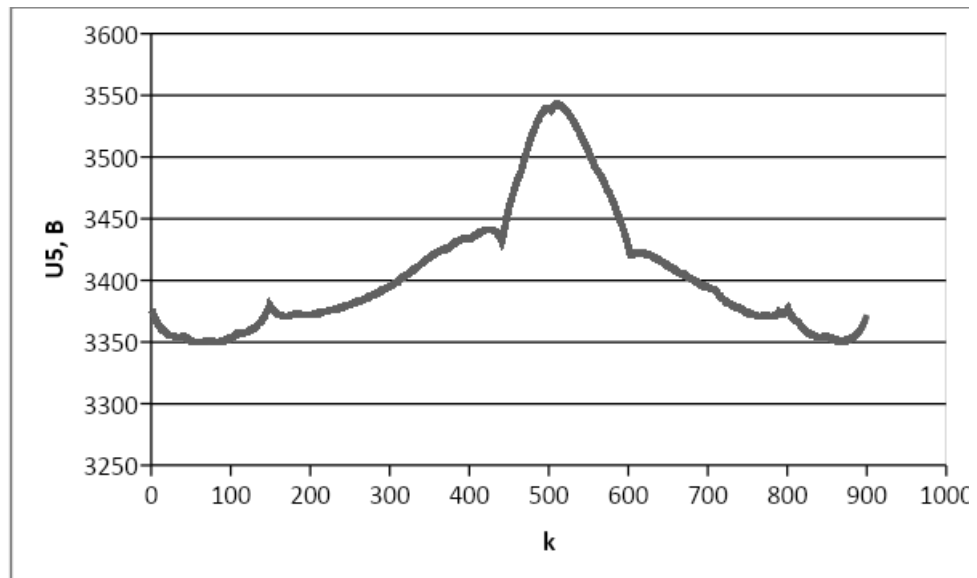


Рисунок 4.5 - Графік зміни напруги п'ятої ТП

Для шостої ТП графік зміни напруги має вигляд як на рисунку 4.6

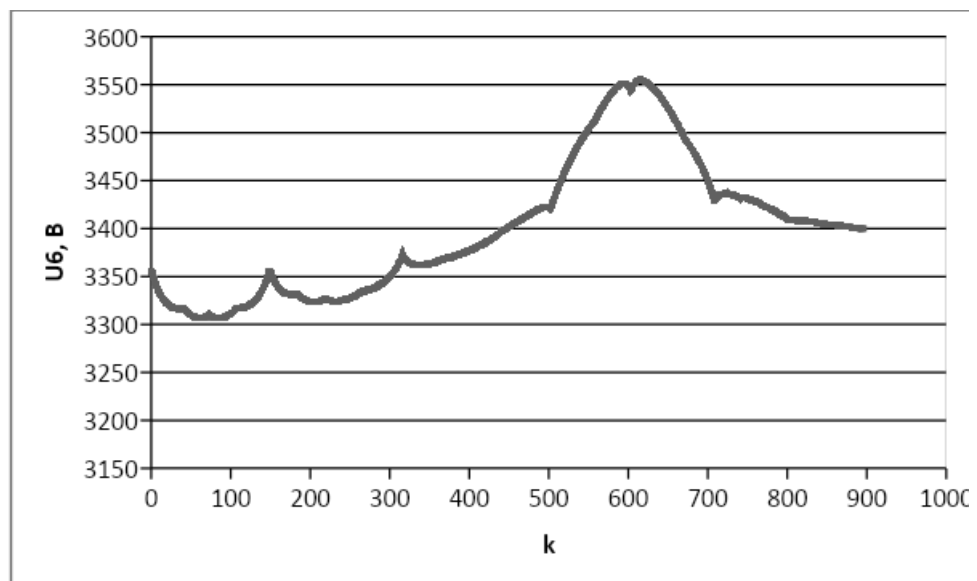


Рисунок 4.6 - Графік зміни напруги шостої ТП

Для сьомої ТП графік зміни напруги має вигляд як на рисунку 4.7

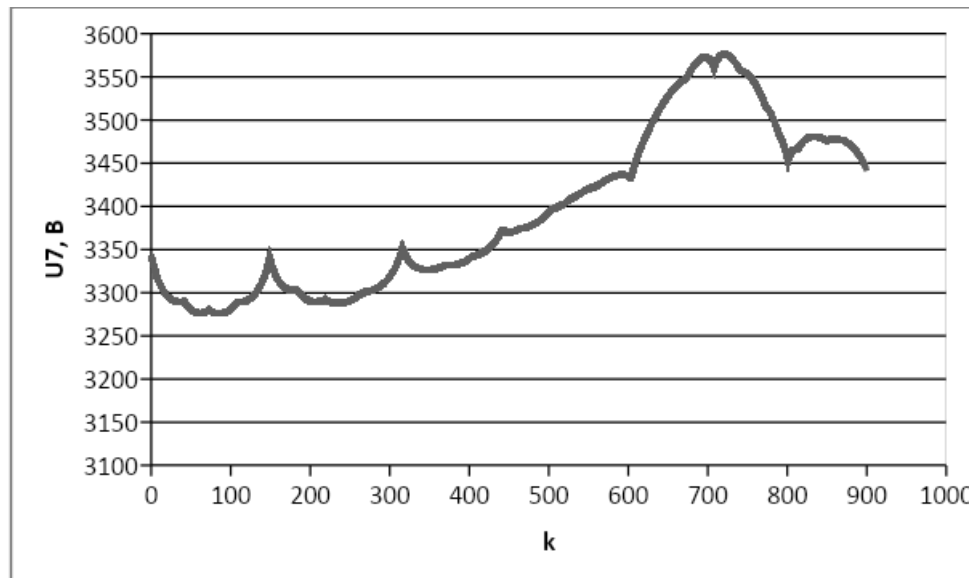


Рисунок 4.7 - Графік зміни напруги сьомої ТП

Для восьмої ТП графік зміни напруги має вигляд як на рисунку 4.8

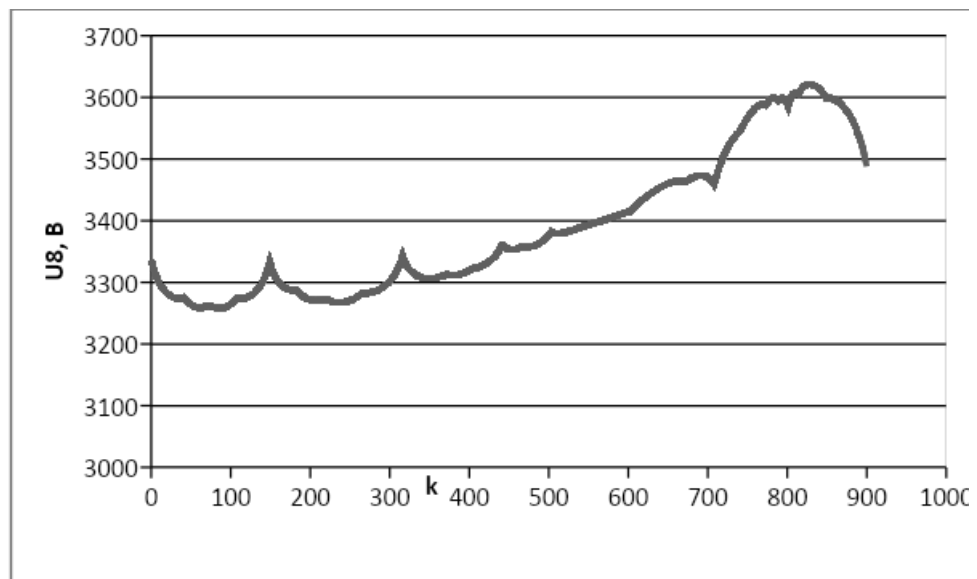


Рисунок 4.8 - Графік зміни напруги восьмої ТП

Для дев'ятої ТП графік зміни напруги має вигляд як на рисунку 4.9

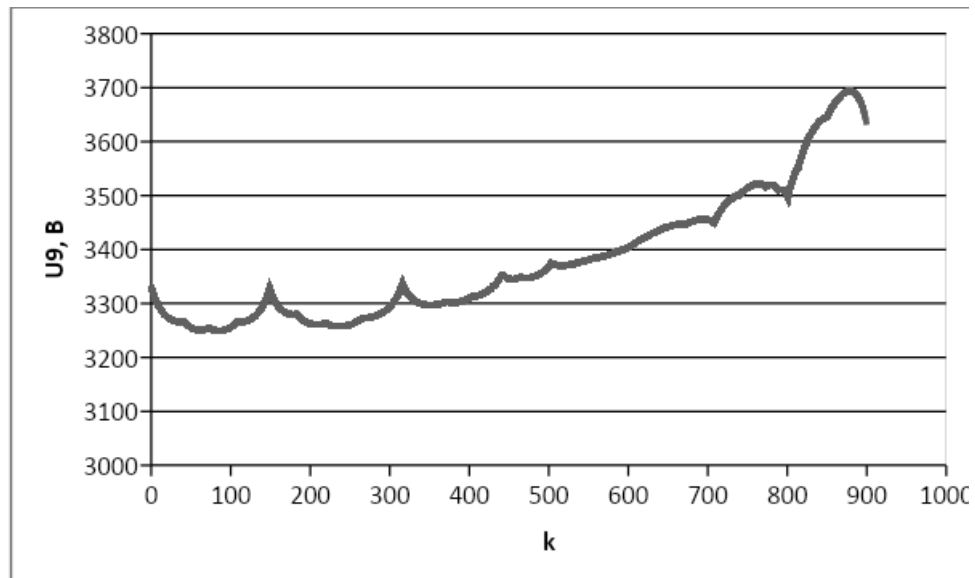


Рисунок 4.9 - Графік зміни напруги дев'ятої ТП

4.2 Аналіз техніко-економічних показників оптимізації рівномірного навантаження.

Порівняємо зміну значення напруги на струмоприймачеві з оптимізацією і без. Для цього за формулою (3.2) визначимо напруги з оптимізацією, тобто підставимо значення отриманих та показаних на рисунках 4.1-4.9 напруг в формулу (3.1) як U_i . Розрахувавши в моделі, зобразимо значення напруги на струмоприймачеві в порівнянні на рисунку 4.10

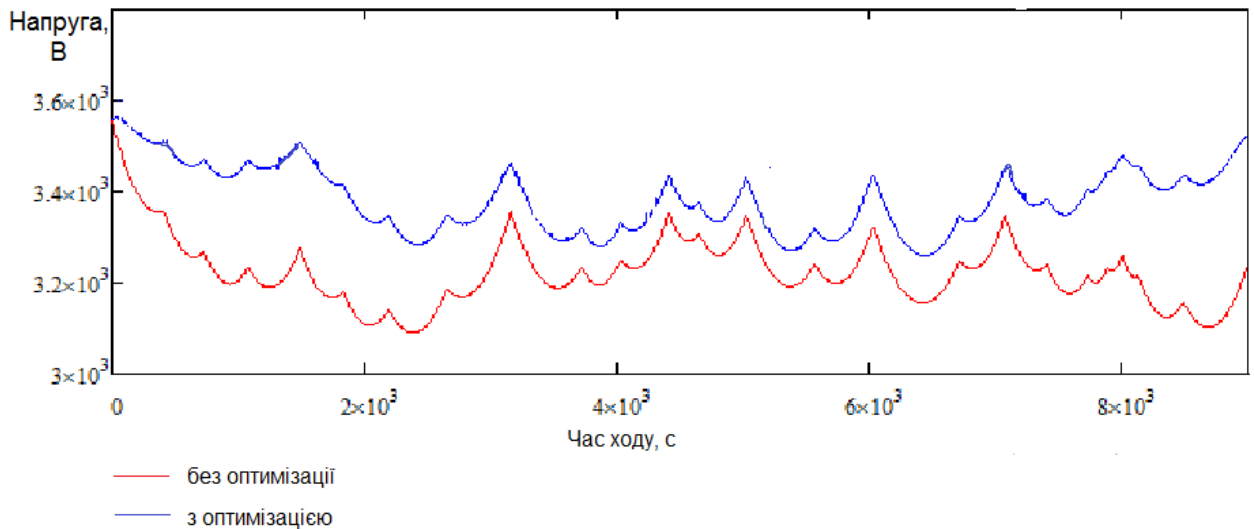


Рисунок 4.10 Напруга на струмоприймачеві в порівнянні

Як бачимо система керованого електропостачання в найбільших міжпідстанційних зонах, які можна побачити на рисунку 3.1 ефективно підняла напругу і тримала її на рівні 3300 В, мінімум становить 3275 В. Без оптимізації мінімум 3090 В. Проаналізувавши графік можна зробити висновок про кращий діапазон зміни напруги, він вузьчий, в межах 3550-3275 В, в порівнянні зі звичайною системою 3544-3090 В, що дозволяє найбільш ефективно використовувати енергетичні ресурси системи електропостачання.

Критерієм оптимізації було зниження втрат, порівнявши два розрахунку цих втрат за формулою (3.12) можна зробити висновок про ефективність керованої системи електропостачання.

Розрахунок втрат зроблений в моделі, покажемо на рисунку 4.11 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, що показані в таблиці 3.1

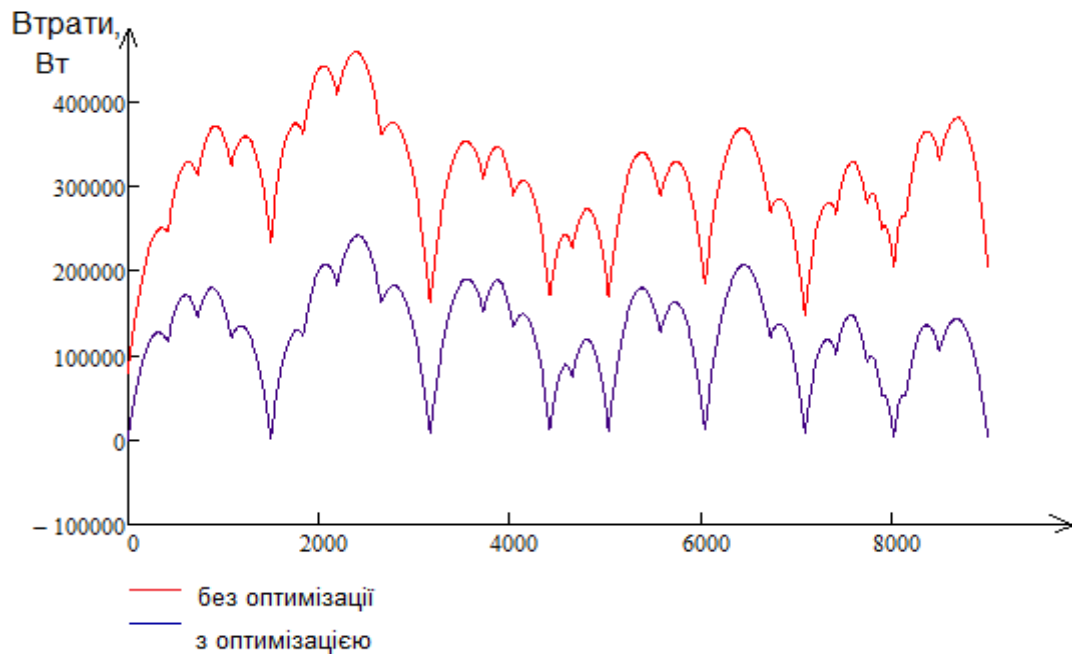


Рисунок 4.11 Втрати електричної енергії

Для порівняльної оцінки зменшення втрат за формулами (4.2) та (4.3) визначимо суму втрат для не керованої системи та керованої системи відповідно:

$$\Delta P_{\Sigma NoControl} = \int_0^t \Delta P \Delta t, \quad (4.2)$$

Де: $\Delta P_{\Sigma NoControl}$ - сума втрат потужності протягом всього руху не керованої системи, Вт.

$$\Delta P_{\Sigma Control} = \int_0^t \Delta P \Delta t, \quad (4.3)$$

Де: $\Delta P_{\Sigma Control}$ - сума втрат потужності протягом всього руху керованої системи, Вт.

За графіком, що показаний на рисунку (4.11) в кожний момент t в моделі визначимо значення втрат електричної енергії, що дорівнює 2773855835,42 Вт для не керованої системи електропостачання і 1149913496,44 Вт для керованої системи електропостачання.

Визначимо зменшення втрат електричної енергії в системі тягового електропостачання, за допомогою відсоткового співвідношення виражений формулою (4.4)

$$e = \frac{|\Delta P_{\Sigma NoContrl} - \Delta P_{\Sigma Contrl}|}{\Delta P_{\Sigma NoContrl}} \cdot 100\%, \quad (4.4)$$

Де: e – відсоток економії електричної енергії, %.

Визначимо за формулою (4.4) економію:

$$e = \frac{|2773855835,42 - 1149913496,44|}{2773855835,42} \cdot 100 = 58,54\%,$$

Зменшення втрат на 58,8% 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.

4.3 Моделювання та оптимізація змінного навантаження

Для більш точного та прикладного дослідження роботи системи керованого розподіленого живлення, скористаємось даними, які були добуті в результаті, запису значень струму електровозу по точкам протягом всього руху на ділянці яка показана на рисунку 3.1, але з напрямком руху від ТП 9 до ТП 1, значення напруг як в таблиці 3.1. Крива руху електровоза показана на рисунку 4.12.

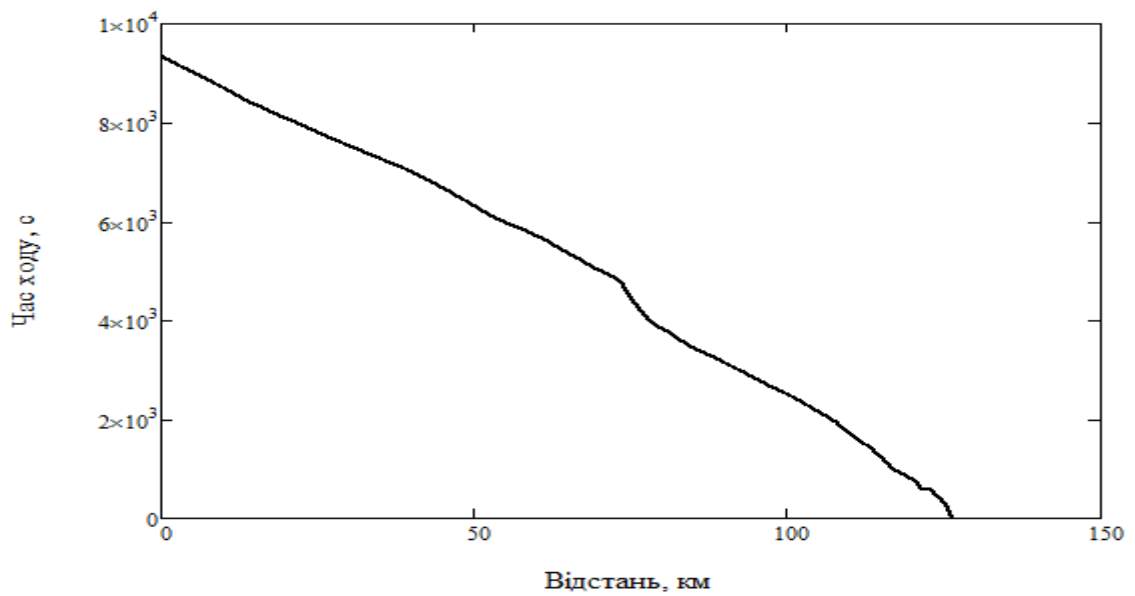


Рисунок 4.12 – Графік руху електровоза розрахунковою ділянкою

Електровоз рухався зі змінною швидкістю и значенням струму, різними режимами роботи, різними позиціями збудження, зі значенням струму рекуперації, як і є в експлуатаційній роботі системи тягового електропостачання, графік струму електровоза покажемо на рисунку 4.13.

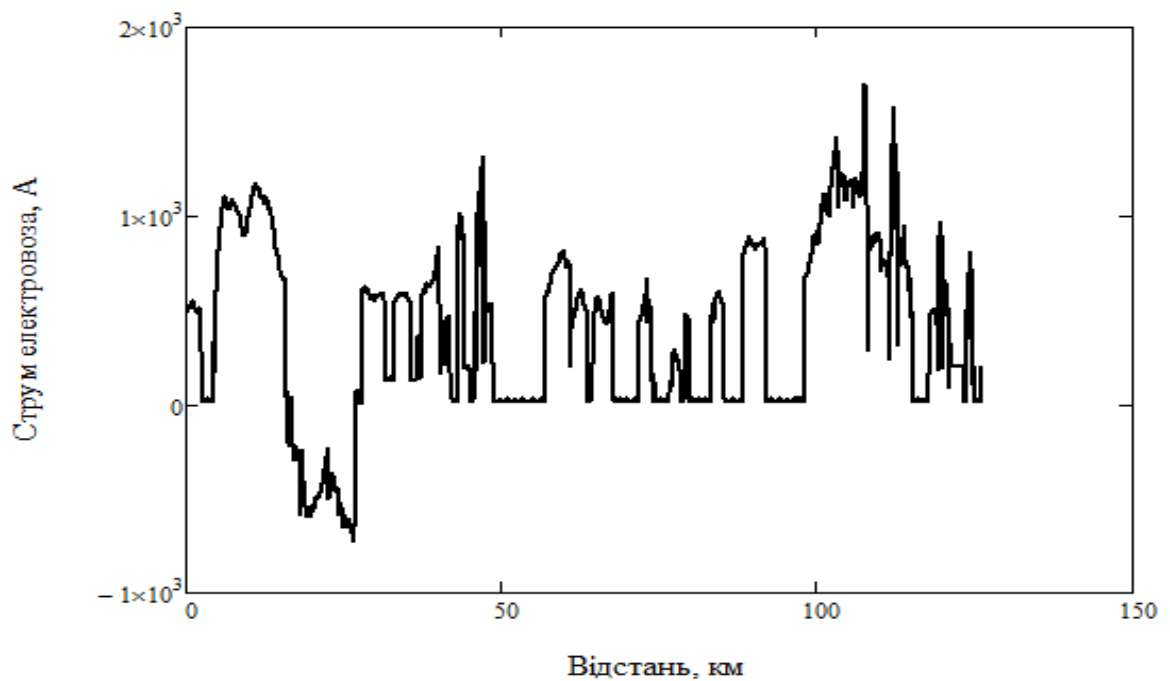


Рисунок 4.13 – Графік струму електровоза розрахунковою ділянкою

За допомогою комп'ютерної моделі оптимізуємо значення напруг на ТП, з критерієм мінімізації – втрати електричної енергії. Після цього визначимо значення напруги на струмоприймачеві та втрати для двох варіантів розрахунку – з оптимізацією, та без неї.

На рисунках 4.14 – 4.23 зображено зміна напруги на шинах ТП для електровоза зі змінною швидкістю та режимом роботи.

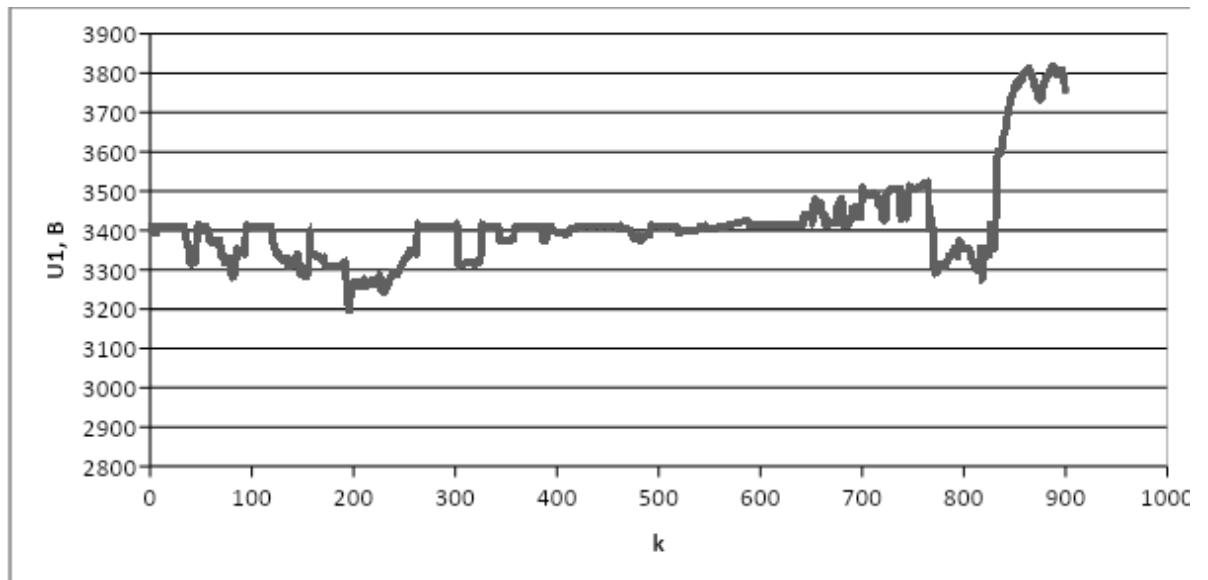


Рисунок 4.14 Графік зміни напруги на ТП № 1

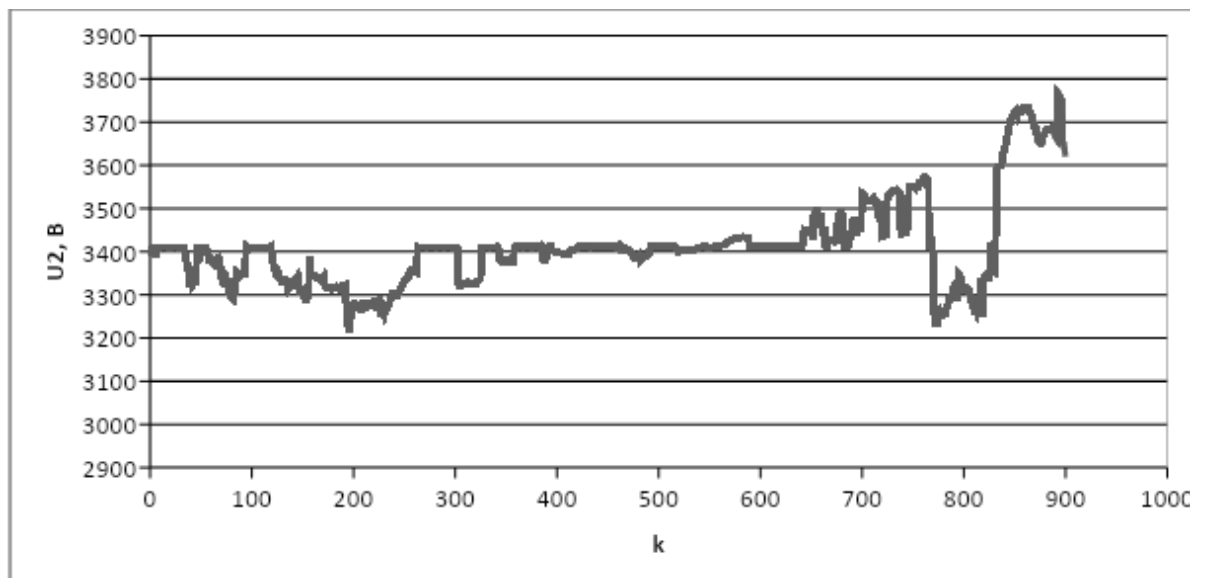


Рисунок 4.15 Графік зміни напруги на ТП № 2

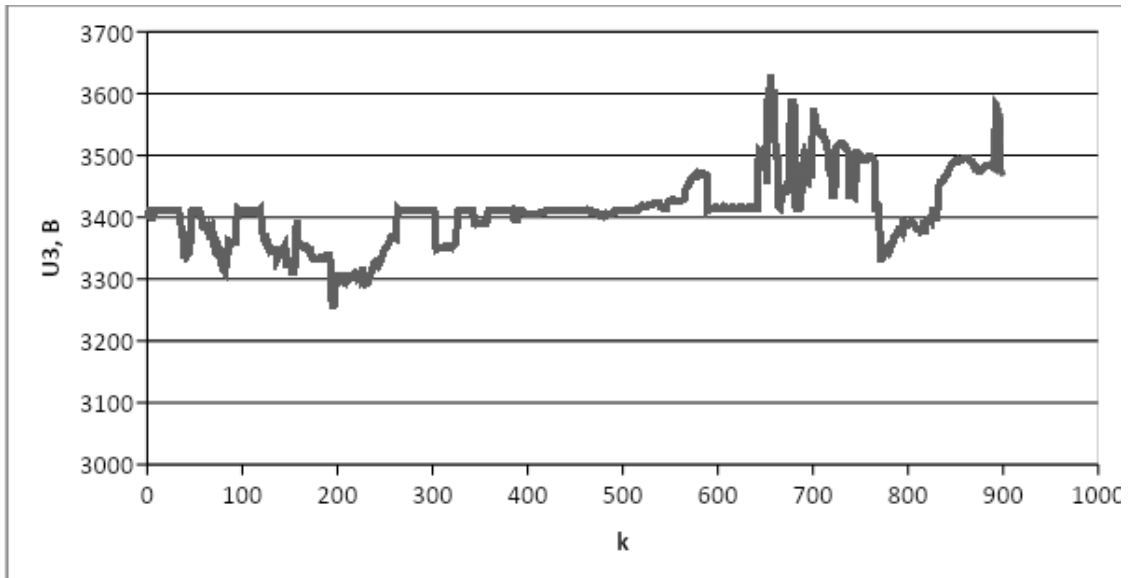


Рисунок 4.16 Графік зміни напруги на ТП № 3

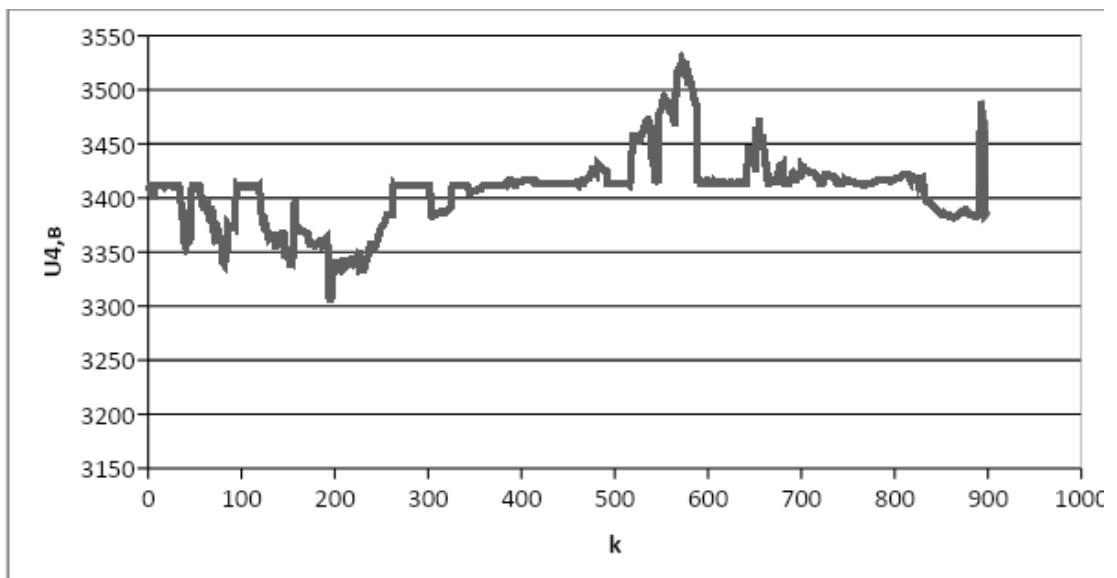


Рисунок 4.17 Графік зміни напруги на ТП № 4

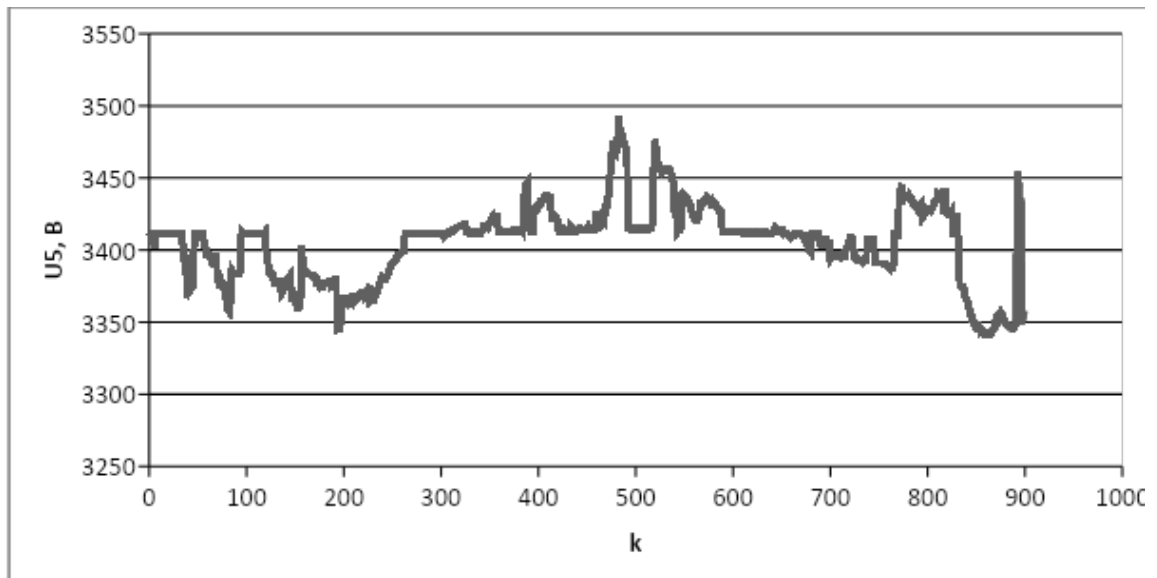


Рисунок 4.18 Графік зміни напруги на ТП № 5

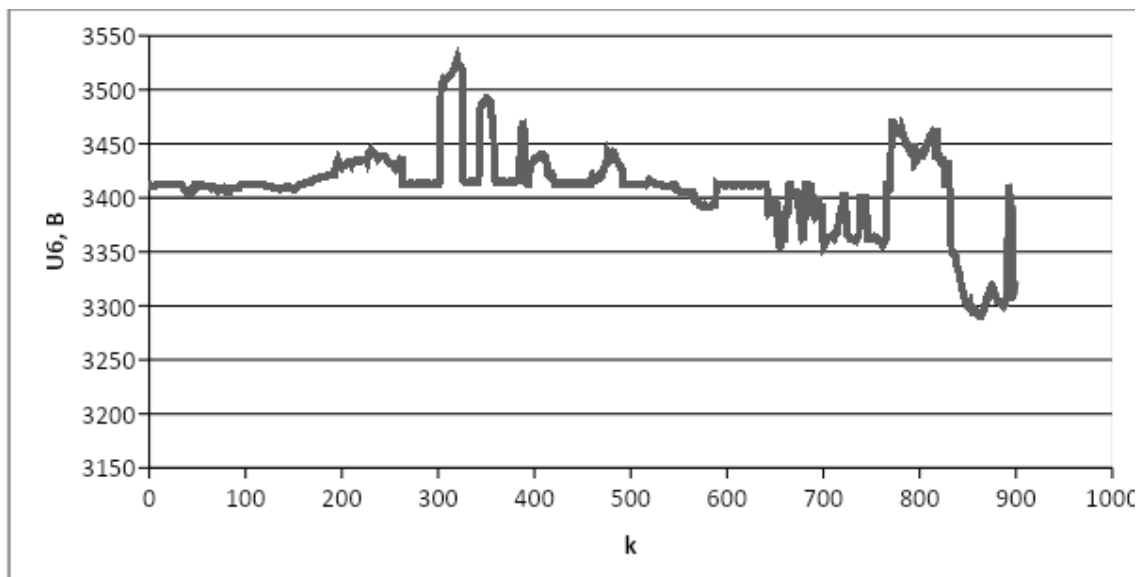


Рисунок 4.19 Графік зміни напруги на ТП № 6

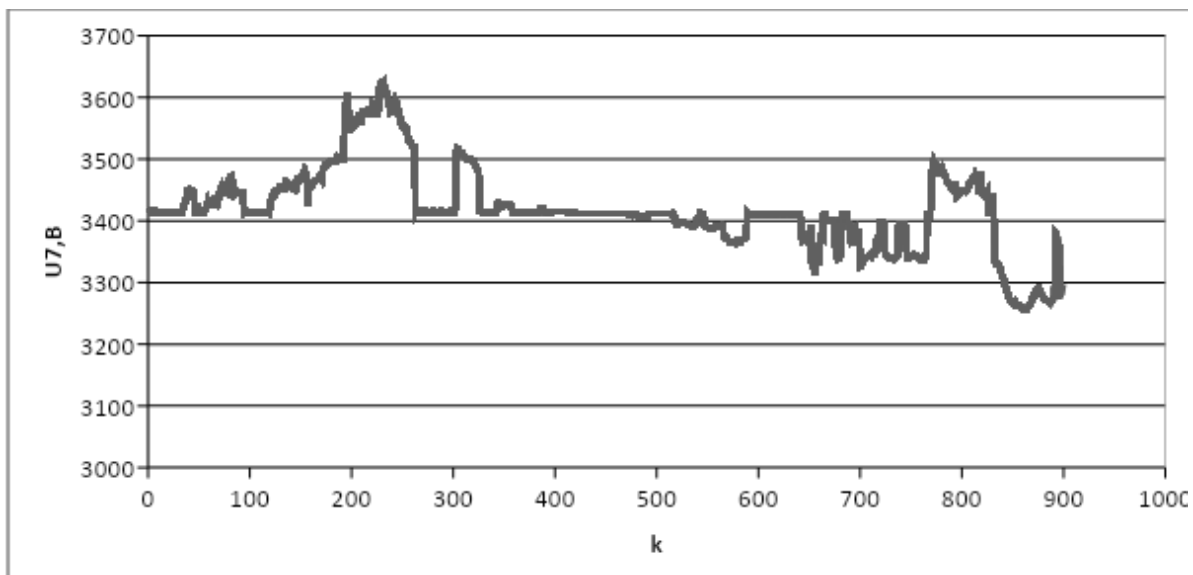


Рисунок 4.20 Графік зміни напруги на ТП № 7

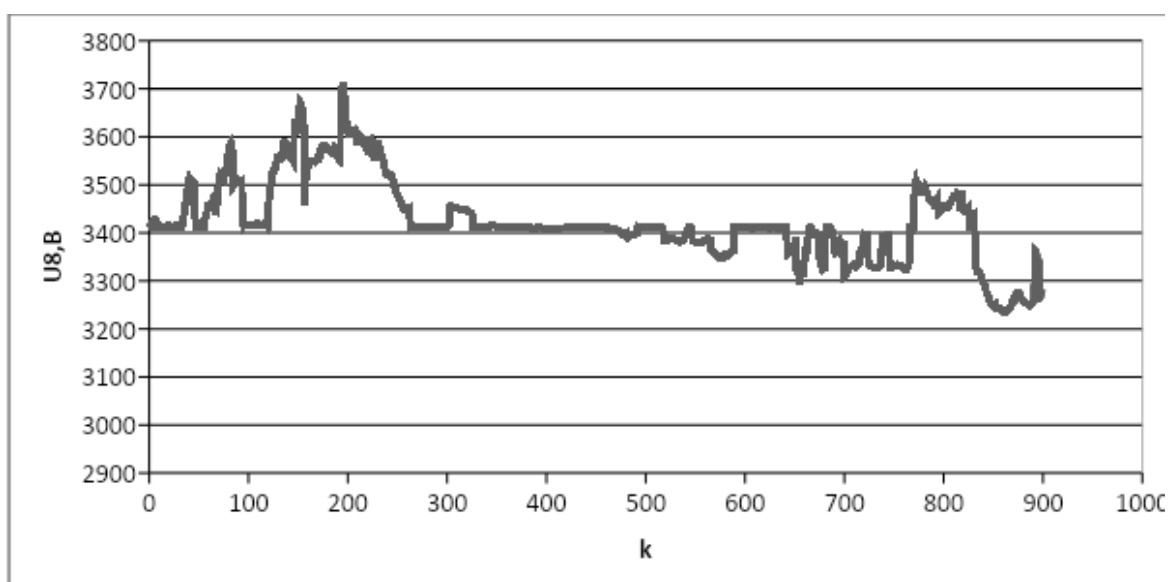


Рисунок 4.21 Графік зміни напруги на ТП № 8

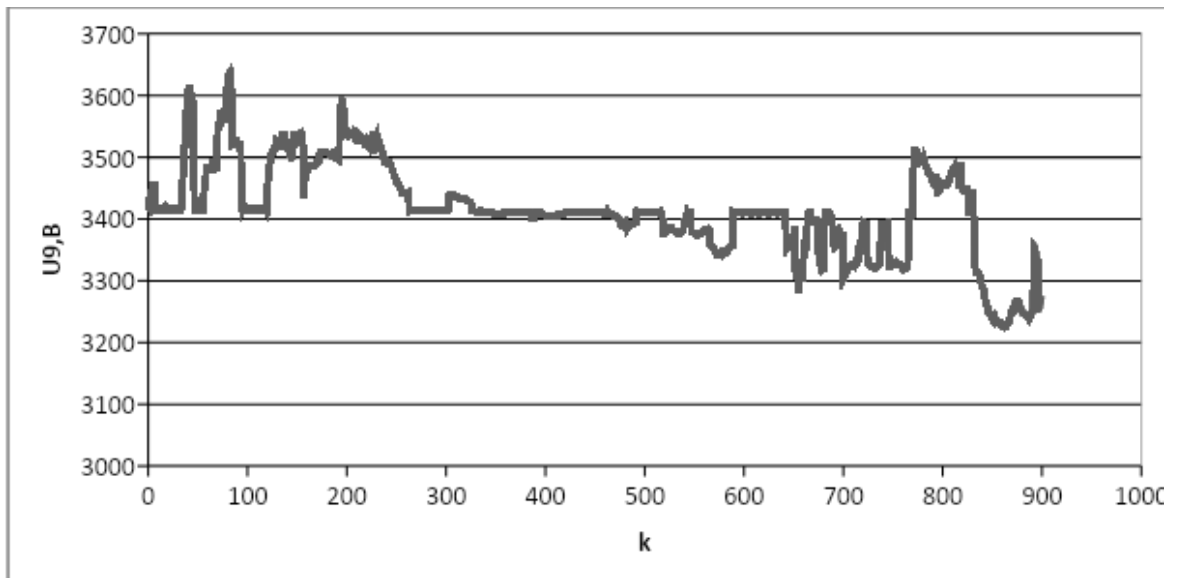


Рисунок 4.22 Графік зміни напруги на ТП № 9

Порівняємо зміну значення напруги на струмоприймачеві з оптимізацією і без. Для цього за формулою (3.2) визначимо напруги з оптимізацією, тобто підставимо значення отриманих та показаних на рисунках 4.14-4.22 напруг в формулу (3.1) як U_i . Розрахувавши в моделі, зобразимо значення напруги на струмоприймачеві в порівнянні на рисунку 4.23

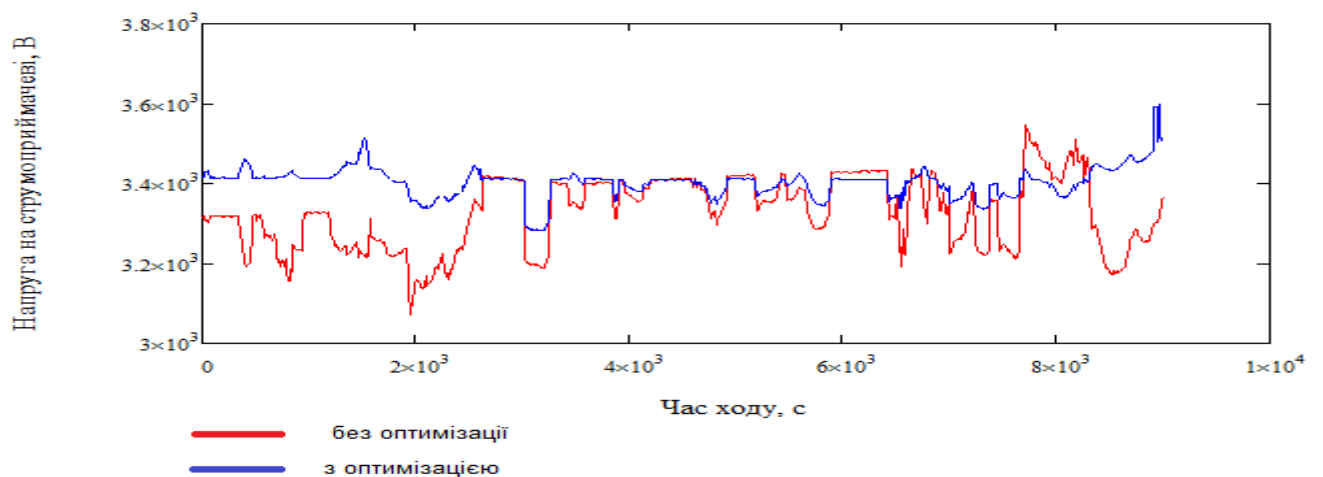


Рисунок 4.23 Напруга на струмоприймачеві при змінному навантаженні

Як бачимо система керованого електропостачання в найбільших міжпідстанційних зонах, які можна побачити на рисунку 3.1 ефективно підняла

напругу і тримала її на рівні 3400 В, мінімум становить 3180 В, а без оптимізації мінімум становить 3070 В. Проаналізувавши графік можна зробити висновок про кращий діапазон зміни напруги, він вужчий, в межах 3590-3180 В, в порівнянні зі звичайною системою 3546-3070 В, що дозволяє найбільш ефективно використовувати енергетичні ресурси системи електропостачання.

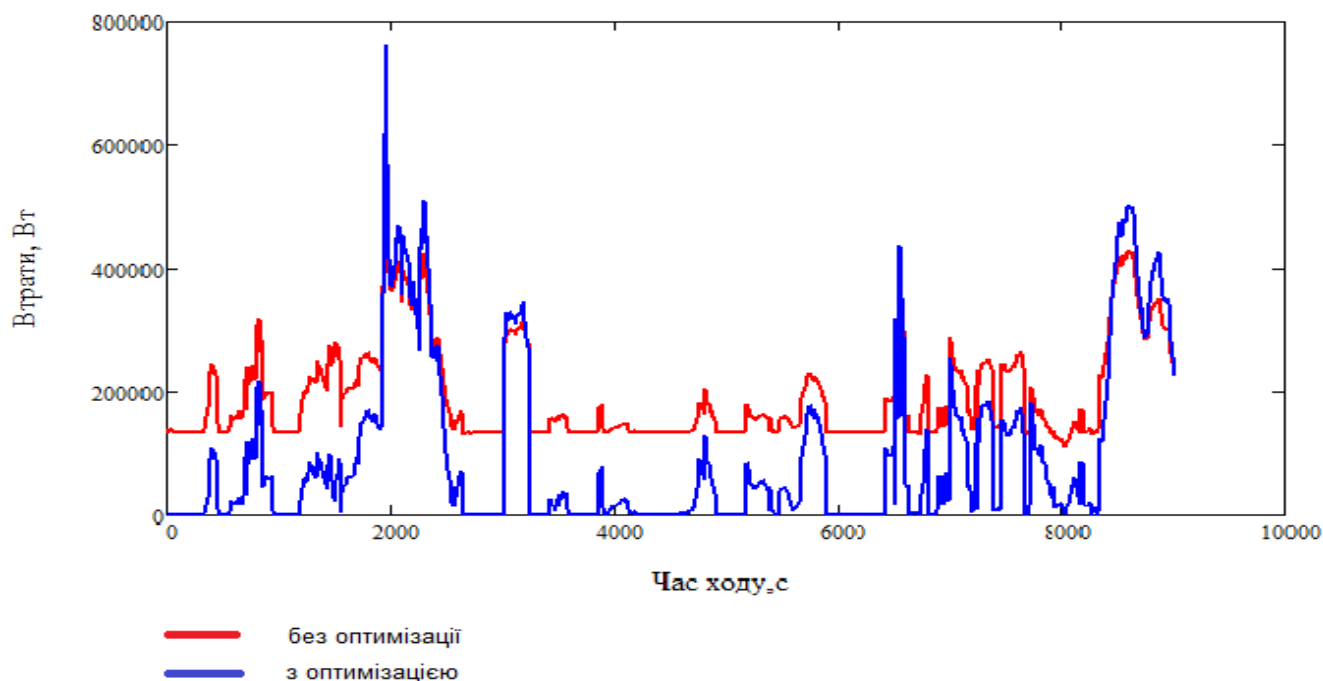


Рисунок 4.24 Втрати енергії при змінному навантаженні

Втрати як і при першому моделюванні нижчі, але постає питання, про поводження системи при рекуперації електричної енергії, модель проведена для одного навантаження не враховує, гасіння або використання енергії рекуперації. Тому як бачимо на рисунку 4.13 при координатах 20-31 км., або в момент руху в інтервалі 1800-2700 с. електровоз знаходиться в режимі рекуперації, що збільшило втрати в керованій розподіленій системі.

За формулами (4.2) і (4.3) визначимо втрати електричної енергії без оптимізації, та з оптимізацією відповідно.

$$\Delta P_{\sum NoControl} = \int_0^{9000} \Delta P \Delta t = 1750804483 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{\Sigma Control} = \int_0^{9000} \Delta P \Delta t = 896696743 \text{Вт}$$

Визначимо зменшення втрат електричної енергії в системі тягового електропостачання, за допомогою відсоткового співвідношення виражений формулою (4.4)

$$e = \frac{|1750804483 - 896696743|}{1750804483} \cdot 100 = 48,78\%,$$

Як бачимо в порівнянні з рівномірним рухом втрати зменшились, це викликано тим, що в другому варіанті розрахунку використовувався режим вибігу, який і зменшив загальні втрати електричної енергії. Відсоткове співвідношення втрат без оптимізації та з оптимізацією змінилось, через рекуперацію.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНАЦІЇ

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 3300 В 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.

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.

СПИСОК БІБЛОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Международный проект «Высокоскоростные железные дороги». / И.П. Киселёв, Е.А. Сотников, В.С Суходоев. - Санкт-Петербург: ПГУПС, 2001 – 51 с.
2. Лекции по дисциплине «ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ», / Кафедра «Электроснабжение железных дорог» - Санкт-Петербург ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015 – 40с.
3. Аржанников, Б.А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока./ Б.А.- Аржанников. - Екатеринбург: УрГУПС, 2010 - 176 с.
4. Марикин, А.Н. Стабилизация напряжения на токоприемнике подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока. / А.Н. Марикин. - Санкт-Петербург: ПГУПС, 2008 – 255 с.
5. Босий, Д. О. Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності / Д. О. Босий // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 8. – С. 15.
6. 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.
7. Методы оптимизации. Курс лекций. / Е.А. Нурминский - ДВГУ-ДВФУ . 2015 г. – 40 с
8. Бараш Ю.С. Аналіз роботи швидкісного руху в Україні / Ю.С. Бараш, О.М. Гненний, А.В. Момот // Залізничний транспорт – 2014 – С. 53–62.; 8. Сазанов С.Л. Динамичное развитие высокоскоростных железных дорог Китая / С.Л.Сазанов.// Экономика железных дорог 2011-№ 8, С.82-92.; 9. А.С.Шерстобитов. Мировой опыт организации скоростного железнодорожного пассажирского сообщения [Електронний ресурс] – Режим доступа –<http://www.sworld.com.ua/konfer35/446.pdf>; 10. Кореспондент. И помчат поезда.

Чего ждать от реформирования железнодорожной отрасли [Электронный ресурс]-
Режим доступа -
<http://korrespondent.net/business/3392689-korrespondent-y-pomchat-poezda-cheho-zhd-at-otreformirovaniya-zheleznodorozhnoi-otrasly>)

9. Аржанников Б. А. Автоматическое регулирование напряжения в системе электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ / Б. А. Аржанников, Л. А. Фролов. — Екатеринбург, 2009. — 48 с.

10. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока : моногр. / Борис Алексеевич Аржанников. — Екатеринбург : УрГУПС, 2010. — 176 с