

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерних технологій і систем»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

на тему: Дослідження кондуктивного впливу тягової мережі на пристрої залізничної автоматики (комплексна)

(назва теми на українській мові з наказу про затвердження тем за магістрами)

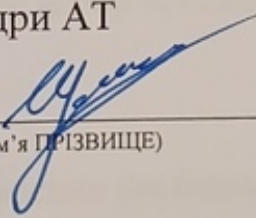
за освітньою програмою «Автоматика та автоматизація на транспорті»
зі спеціальності: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

Виконав: студент групи АТ2321


(підпис студента) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

/ Денис СОЛОВЙОВ /

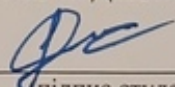
Керівник: доцент кафедри АТ


(підпис керівника) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

/ Вадим ШЕКА /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень
з праць інших авторів без відповідних посилань

Студент


(підпис студента)

Дніпро – 2025 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies
Faculty of Computer Technologies and Systems
Department of Automation and Telecommunication

Explanatory Note
to Master's Thesis
master
(higher education degree)

on the topic: Study of the conductive influence of the traction network on railway automation devices

(назва теми на англійській мові з наказу про затвердження тем за магістрами)

according to educational curriculum «Automatic machinery and automation in transport industry»

in the Specialty: 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics

Done by the student of the group AT2321

/ Denys SOLOVIOV /

Scientific Supervisor: associate professor

/ Vadym SHCHEKA /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем
 Кафедра: Автоматика та телекомунікації
 Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
 Освітня програма: Автоматика та автоматизація на транспорті
 Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри АТ

_____ Володимир ГАВРИЛЮК
 (підпис)

«_____» _____ 202__ р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу _____ магістр _____
 (ступінь вищої освіти)

студенту _____ Соловйов Денис Сергійович _____
 (Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема роботи: Дослідження кондуктивного впливу тягової мережі на пристрої залізничної автоматики (комплексна)

Керівник роботи: доцент Вадим ЩЕКА _____
 (Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "05" січня 2024 р. № 20ст

2. Строк подання студентом роботи: 13 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Структурні і принципові схеми рейкових кіл,
 Структурні і принципові схеми систем тягового електропостачання,
 довідкова література

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина:
 Особливості роботи рейкових кіл на ділянках з електричною тягою

4.2 Основна частина:
 Дослідження розповсюдження потенціалів і струмів в рейках на ділянках постійного та змінного струму

4.3 Охорона праці та захист навколишнього середовища: не передбачена

4.4 Економічна частина: не передбачена

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
 Залежність тягового струму та потенціалу в рейках від координати при декількох локомотивах на фідерній зоні для ділянок з тягою постійного та змінного струмів

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та по-сада консультанта	Завдання ви-дав: (підпис Консульта-нта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк вико-нання етапів роботи	Примітка
1	Особливості роботи рейкових кіл на ділянка з елек-тричною тягою	1.06.23	Вик.
2	Дослідження розповсюдження потенціалів і струмів в рейках на ділянках постійного струму	4.11.2024	Вик.
3	Дослідження розповсюдження потенціалів і струмів в рейках на ділянках змінного струму	9.12.2024	Вик.
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	13.01.2025	Вик.
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаме-наційної комісії		

Студент

_____ (підпис)

Денис СОЛОВЙОВ

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Вадим ЩЕКА

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

53 сторінки, 12 рисунків, 1 таблицю, 15 джерел літератури.

Об'єкт розробки – електромагнітні процеси в системі рейкова лінія – тягова мережа.

Мета роботи – дослідження кондуктивного впливу тягової мережі на пристрої залізничної автоматики для визначення ступеню його небезпечності.

Методи дослідження – математичного моделювання електричних та фізичних процесів в рейковій лінії та тяговій мережі, чисельні методи, методи оцінки, методи порівняльного аналізу.

У першому розділі проведено огляд умов та особливостей роботи рейкових кіл на ділянках з електротягою.

У другому розділі за допомогою математичного моделювання проведено дослідження розповсюдження постійного тягового струму вздовж рейкової лінії.

В третьому розділі підкреслено особливості роботи рейкових кіл на ділянках з електротягою змінного струму, розглянуто особливості математичного моделювання таких процесів. За допомогою математичного моделювання проведено дослідження розповсюдження змінного тягового струму вздовж рейкової лінії.

Висновок. Найвищі значення зворотного тягового струму в рейках спостерігаються в районі тягової підстанції та біля локомотива, що рухається. З підвищенням опору ізоляції рейкової лінії зворотній тяговий струм починає менше відгалужуватися в землю і його рівень в рейках досягає великих значень навіть в зоні між тяговою підстанцією на локомотивом. Таким чином можна зробити висновок, що підвищення опору ізоляції рейкової лінії призводить до погіршення умов роботи рейкових кіл через постійну присутність в рейках зворотного тягового струму.

Ключові слова: КОНДУКТИВНИЙ ВПЛИВ, РЕЙКОВЕ КОЛО, ТЯГОВА МЕРЕЖА, ЗВОРОТНІЙ ТЯГОВИЙ СТРУМ.

Зміст

ВСТУП.....	7
1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ РЕЙКОВИХ КІЛ НА ДІЛЯНКА З ЕЛЕКТРИЧНОЮ ТЯГОЮ.....	9
1.1. Особливості електропостачання електрифікованих залізниць	9
1.2 Визначення електромагнітної сумісності (ЕМС).....	11
1.3 Перешкоди в системі тягового електропостачання	13
1.4 Параметри рейкової лінії	19
2. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛІВ І СТРУМІВ В РЕЙКАХ НА ДІЛЯНКАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	28
2.1 Тягові струми в рейках на ділянках з електротягою постійного струму	28
2.2 Дослідження розповсюдження постійного тягового струму вздовж рейкової лінії	35
3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛІВ І СТРУМІВ В РЕЙКАХ НА ДІЛЯНКАХ ЗМІННОГО СТРУМУ	39
3.1 Особливості роботи рейкових кіл на ділянка з електричною тягою змінного струму	39
3.2 Дослідження розповсюдження змінного тягового струму вздовж рейкової лінії	43
3.2 Результати дослідження.....	45
ЛІТЕРАТУРА.....	52

ВСТУП

В даний час в Україні спостерігається складна економічна ситуація. Вона супроводжується падінням об'єму перевезень, що продовжується, і вимагає значного скорочення в першу чергу експлуатаційних витрат, зниження норм оборотних коштів і капітальних витрат підприємств залізниці.

Сучасні умови роботи залізниць, підвищення швидкостей та інтенсивності руху поїздів вимагають все більшою мірою автоматизації управління процесом перевезень. Для чого необхідне підвищення стійкості електропостачання пристроїв залізничної автоматики і телемеханіки, яка визначається надійністю роботи пунктів електропостачання та ліній живлення автоблокування, а також окремих їх елементів. Стратегія програми розвитку залізниць завжди передбачала повне і надійне енергозабезпечення обсягів перевезень вантажів і пасажирів при неухильному зниженні енергоємності перевізного процесу, мінімізації енергетичних складових собівартості перевезень та забезпечення життєдіяльності інфраструктури залізничного транспорту.

Такі вимоги можливо задовольнити тільки за умови впровадження в експлуатацію нових сучасних систем автоблокування, електричної централізації, переїзної сигналізації, та ін. В умовах експлуатації існуючих та впровадженні нових систем не слід забувати про електромагнітний вплив системи тягового електропостачання на їх роботу.

Дослідження кондуктивного впливу тягової мережі на пристрої залізничної автоматики є важливим аспектом забезпечення безпеки та надійності функціонування залізничних систем. У сучасних умовах, коли зростають вимоги до швидкості, ефективності та енергозбереження, взаємодія електромагнітних полів, створюваних тяговою мережею, з обладнанням залізничної автоматики набуває особливого значення.

Збої у функціонуванні автоматичних систем через вплив тягових струмів можуть призводити до зниження точності роботи сигнальних систем, ризику виникнення аварійних ситуацій та підвищення витрат на технічне обслуговування. Особливо актуальним є питання мінімізації негативного впливу поблизу тягових підстанцій, де рівень електромагнітних завад є найбільш інтенсивним.

Вивчення цього впливу дозволяє розробити ефективні методи селективної компенсації перешкод, оптимізувати технічні рішення для підвищення надійності систем управління залізничним рухом, а також знизити енергоспоживання і витрати на експлуатацію.

1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ РЕЙКОВИХ КІЛ НА ДІЛЯНКА З ЕЛЕКТРИЧНОЮ ТЯГОЮ

1.1. Особливості електропостачання електрифікованих залізниць

Електрифіковані залізниці є одним із найбільших споживачів електроенергії, забезпечення якої здійснюється через тягові підстанції (ТП). Конструкція та обладнання ТП визначаються системою електричної тяги, що використовується на залізниці, залежно від типу струму та напруги. У сучасному будівництві перевага надається перспективній системі електропостачання змінного струму. Контактна мережа (КМ) залізниць зі змінним струмом є джерелом потужних електромагнітних завад, які створюють проблеми сумісності з прилеглими лініями різного призначення, що призводить до значних наведених напруг [5, 8].

Система тягового електропостачання є складною інженерною структурою, що включає такі основні елементи: зовнішнє електропостачання, тягові підстанції (ТП), живильні та відсмоктуючі фідери, тягову мережу (ТМ) і зворотну тягову (рейкову) мережу (ЗТМ).

Електрорухомий склад (ЕРС) отримує живлення від ТП через ТМ, що складається з контактної мережі (КМ), рейкових кіл (РК), живильних та відсмоктуючих фідерів, а також інших ліній і пристроїв (рис. 1.1). Середня довжина високовольтних ліній (ВЛ) становить 20–40 км. На тягових підстанціях зазвичай встановлюються трифазні силові трансформатори потужністю 25–40 МВА [5, 16].

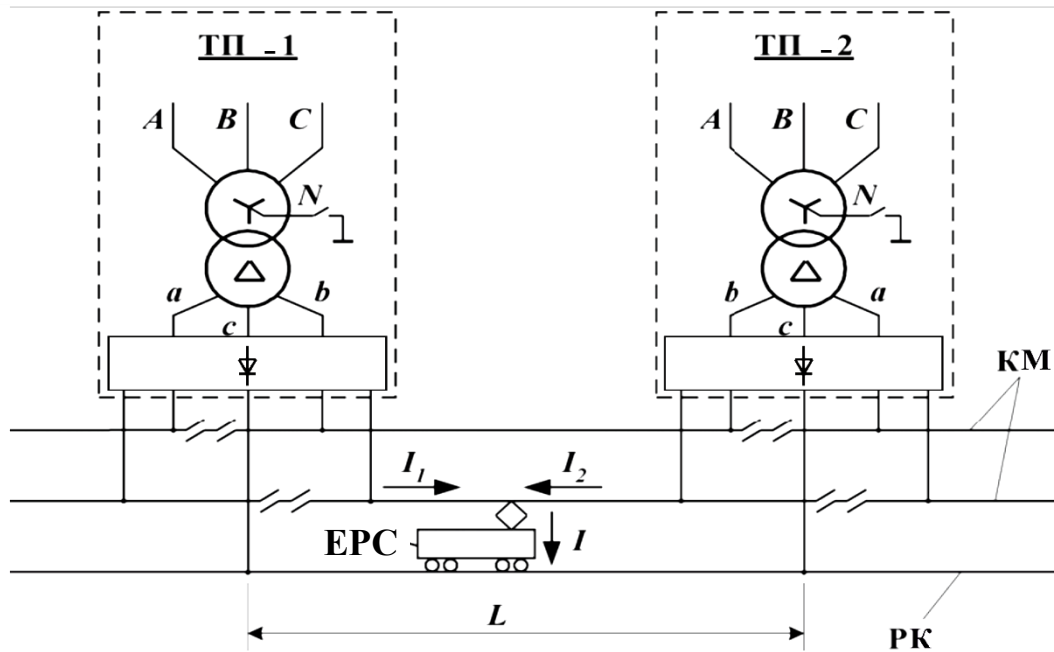


Рисунок 1.1 – Спрощена схема двоколіїної ділянки залізниці при її двосторонньому живленні

Навантаження тягової підстанції є двофазним (рис. 1.1): одна з фаз трансформатора на стороні 27,5 кВ (фаза «с») підключається до рейкової колії, тоді як інші дві фази («а» і «б») з'єднуються з контактною мережею через вимикачі. Таким чином, електрорухомий склад (ЕРС) живиться лінійною напругою U_{ac} і U_{bc} , яка формується трансформатором. Значення напруг U_{ac} і U_{bc} залежить від напруг U_{AN} і U_{CN} на високовольтній стороні трансформатора. У результаті фази «А» і «С» зазнають навантаження, тоді як фаза «В» залишається ненавантаженою, що створює несиметричність навантаження підстанції [5].

Для тягових підстанцій постійного струму виходи трансформаторів підключаються до випрямних схем, що побудовані на напівпровідникових елементах за мостовою, 12-ти або 24-х пульсною схемою. Випрямлена напруга проходить через фільтри, побудовані на основі реактивних елементів, після чого провід із додатнім потенціалом з'єднується з контактним проводом, а з від'ємним – з рейковою лінією [5].

Контактна мережа (КМ) у найпростішому вигляді складається з несучого троса і контактного проводу. Несучий трос забезпечує рівномірне натягнення контактного проводу, запобігаючи провисанню. Контактний провід і несучий трос з'єднуються між собою по всій довжині системи за допомогою струн, а трос кріпиться до опори через ізолятори [5].

Основу зворотної тягової мережі (ЗТМ) становлять рейкові лінії, які також використовуються для створення рейкових кіл. Рейкові кола виконують функції датчиків, що контролюють положення поїзда (зайнятість або вільність блок-ділянок), забезпечують цілісність рейкових ниток, а також слугують каналом передачі сигнальної частоти та кодів автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) від колійних пристроїв до локомотива. Отже, рейкові кола є ключовим елементом забезпечення безпеки руху поїздів [4, 8]. Електромагнітні завади від системи тягового електропостачання мають прямий вплив на їх роботу.

Крім рейкових ліній, до зворотної тягової мережі належить також земля, через яку частина зворотного тягового струму повертається на тягові підстанції, минаючи рейкові лінії. Оскільки ЗТМ взаємодіє із землею через баластний опір, виникають проблеми, пов'язані з блукаючими струмами та необхідністю захисту від електромагнітного впливу.

1.2 Визначення електромагнітної сумісності (ЕМС)

Будь-яке електричне коло за наявності в ньому змінної напруги і струму створює в навколишньому середовищі змінне електромагнітне поле і внаслідок цього стає джерелом сторонньої напруги і струмів індукції в колах, що знаходяться в цьому середовищі.

Ступінь впливу залежить від симетричності впливаючих і схильних до впливу ліній. Коло вважається симетричним, якщо його проводи мають однакові первинні (активний опір, індуктивність, ємність між проводами і відносно землі, провідність ізоляції) і вторинні параметри (волновий опір і коефіцієнт розповсюдження хвилі). Струми і напруги в усіх проводах такого кола однакові по величині

і протилежні по фазі. В цьому випадку векторна сума струмів і напруги всіх проводів кола дорівнює нулю. Таке коло створює мінімальний вплив на суміжні. Але оскільки абсолютно однаковими параметрами проводи кола не володіють, то практично всі електричні кола є повністю або частково несиметричними.

Якщо залишкова напруга (векторна сума напруги всіх проводів) ліній дорівнює робочій нарузі і струм в землі дорівнює робочому струму, то така лінія є повністю несиметричною. До повністю несиметричних ліній можна віднести: тягову мережу електричних залізниць, лінії передачі однофазного струму з використанням землі як зворотнього проводу, лінії, які працюють за системою «два дроти – рейка» (ДПР).[4, 5]

Відповідно до визначення Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК), а також згідно з Міждержавною Радою із стандартизації, метрології і сертифікації під електромагнітною сумісністю розуміється здатність технічного засобу (електротехнічного устаткування, приладу) функціонувати із заданою якістю в заданій електромагнітній обстановці і не створювати неприпустимих електромагнітних перешкод іншим технічним засобом.

Найбільший електромагнітний вплив створюють лінії з більшим ступенем несиметрії, оскільки напруженість електромагнітного поля біля такої лінії буде максимальною, тоді як напруженість електромагнітного поля біля симетричної лінії буде мінімальною.

Значний електромагнітний вплив створюють мережі з високим рівнем передачі електроенергії на лінії з меншим рівнем передачі, наприклад, тягова мережа електричних залізниць або високовольтні лінії електропередачі – на лінії зв'язку, рейкові кола, низьковольтні електричні мережі і ін. Зворотний вплив ліній низького рівня передачі електроенергії на мережі з високим рівнем передачі зазвичай невеликий, і його практично можна не враховувати.

До електромагнітного впливу схильні практично будь-які електричні лінії (як повітряні, так і кабельні) з меншим рівнем передачі енергії, прокладені поблизу від електричної залізниці: лінії телефонного і телеграфного зв'язку, радіомовлення,

телекерування і телесигналізації, рейкові ланцюги автоблокування, силові і освітлювальні електричні мережі, низьковольтні лінії електропередачі.

Електрифікована залізниця включає наступні впливаючі лінії, які створюють електромагнітний вплив на суміжні слабкострумкові системи [4, 5]:

- тягова мережа, повністю несиметрична за параметрами. Вона передає енергію з несинусоїдальними змінними або пульсуючими постійними струмами і напругами;

- розподільні лінії змінного струму для повздовжнього електропостачання автоблокування і не тягових споживачів з несиметричними і несинусоїдальними (із-за електричної тяги) напругами і струмами;

- а також лінії ДПР з несиметричними параметрами.

1.3 Перешкоди в системі тягового електропостачання

Рейкові кола є основним колійним датчиком, контролюючим положення поїзда (зайнятість/вільність блок-участків), цілісність рейкових ниток, а також виконують функції каналу передачі коду автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) від колійних пристроїв на локомотив. Таким чином, рейкові кола є первинним елементом, що безпосередньо визначає безпеку руху поїздів. Одночасно, рейкові лінії входять до складу тягової мережі і пропускають зворотний тяговий струм від локомотива на живлячі підстанції. Відповідно на роботу рейкових кіл впливає безліч дестабілізуючих чинників, зокрема електромагнітні перешкоди з боку системи тягового електропостачання.

Електромагнітна перешкода – електромагнітне явище, процес, які знижують або можуть понизити якість функціонування технічного засобу.

За походженням перешкоди розділяються на природні і штучні. Природні перешкоди головним чином є атмосферними перешкодами Землі. Штучні перешкоди: індустриальні і промислові (випромінювання промислового устаткування і ліній електропередач), комутаційні (перешкоди, що виникають при перехідних процесах). Перешкоди з боку системи тягового електропостачання можна віднести до

штучних, а грозові розряди до природних потужних імпульсних перешкод.

Перешкоди можуть бути власними, тобто створюватися усередині самої системи, наприклад, струми витоку з сусідніх рейкових кіл, або зовнішніми – гармонійні або імпульсні перешкоди в зворотному тяговому струмі.

Причиною появи гармонійних складових в мережі тягового струму є перетворення на тягових підстанціях або на електрорухомому складі електричної енергії змінного струму в енергію випрямленого струму і навпаки за допомогою статичних напівпровідникових перетворювачів. Це пов'язано із значним споживанням реактивної енергії перетворювальними агрегатами. Крім того, напівпровідникові перетворювачі відносяться до класу навантажень, що мають нелінійні вольт-амперні характеристики, і споживають з мережі несинусоїдальний струм, спотворюючи криву напруги живлячих електросистем.

Електрична тяга змінного струму є не тільки потужним споживачем реактивної енергії і несинусоїдального струму, але і потужним несиметричним однофазним навантаженням, що приводить до появи несиметрії напруги в живлячих електричних трифазних системах.[13]

Причиною виникнення імпульсних перешкод є комутаційні перемикання на тягових підстанціях, зміна режимів ведення електровозів, грозові розряди.

Перешкоди можуть розповсюджуватися або радіаційним шляхом, коли немає безпосереднього з'єднання між джерелами і рецепторами, або кондуктивним, тобто по проводах або провідних частинах.

Розрізняють такі види впливу перешкод на рейкові кола:

- безперервні, які пов'язані із зміною параметрів рейкової лінії під дією зовнішніх чинників (температури, старіння, вологості і ін.);
- дискретні, такі, що змінюють структуру схеми заміщення рейкової лінії при накладенні поїздового шунта, зламі рейки або пошкодження якого-небудь вузла рейкової лінії;
- сумарні (і безперервні, і дискретні).

Поява гармонік в кривих струму і напруги тягової мережі приводить до утворення змінних електромагнітних полів, які створюють на суміжні лінії електричний, магнітний і гальванічний вплив. Електричний вплив виявляється в наведенні в суміжній лінії потенціалу по відношенню до землі під впливом електричного поля, яке створюється за наявності напруги в контактній мережі.

Магнітний вплив полягає у виникненні подовжньої ЕРС в суміжній лінії, що індукується магнітним полем, яке створюється струмом контактної мережі. Подовжня ЕРС, при розподілі уздовж лінії, створює в ній напругу відносно землі, що змінюється по довжині лінії, а також викликає в ній струм, який замикається через розподілену ємність лінії відносно землі. У двопровідних лініях подовжні ЕРС, індуквані в кожному дроті, створюють в кінці лінії неоднакову напругу кожного дроту відносно землі унаслідок подовжньої і поперечної асиметрії ліній (наприклад: неоднакові опори рейок, викликаний обривом стикових з'єднувачів, неоднаковий опір ізоляції уздовж лінії). В результаті цього з'являється струм асиметрії. При струмі асиметрії більше 12 А перенапруження на живлячих кінцях РЦ досягають 600 В і вище. Подібні перенапруження з'являються також на приймальних кінцях РЦ, що супроводжується різким зростанням змінного струму, який тривало (іноді декілька годин) протікає по різних елементах РЦ (ДТ, колійні трансформатори, резистори, вхідні трансформатори фільтрів ФП-25 і ін.). Ще до спрацьовування автоматичного вимикача АВМ-1 ці елементи перегріваються і виходять з ладу.

Також тягова мережа створює гальванічний вплив на лінії, робочі заземлення яких знаходяться у сфері протікання блукаючих струмів, і на заземлені споруди і комунікації.

Наведені струми і напруга в схильних до впливу лініях можуть досягати величин, що представляють небезпеку для нормальної роботи і цілісності апаратури цієї лінії, а також для здоров'я і життя людей, обслуговуючих цю лінію. У такому разі впливи називають небезпечними. Якщо індуквані в колі напруги і струми приводять до спотворення корисних електричних сигналів, що передаються по ній, погіршують нормальну роботу кола, то такі впливи називають заважаючими.

В підсумку можна зробити висновок що, при обґрунтуванні електромагнітної сумісності, необхідної при проектуванні і експлуатації тягового електропостачання, слід враховувати наступні взаємовпливаючі чинники: несиметрію і несинусоїдальність трифазної живлячої напруги, несиметрію ліній схильних до впливу, значний рівень реактивної енергії, споживаної тяговими навантаженнями з живлячої електричної системи, якість випрямленої напруги, перенапруження, рівні наведеної напруги і струмів індукції в суміжних системах.

Невиконання вимог електромагнітної сумісності призводить до появи в рейках тягових струмів високого рівня на різних частотах, в тому числі й близьких до сигнальних. Таким чином створюються несприятливі умови для роботи колійних приймачів рейкових кіл, які відповідають за безпеку руху на залізниці. Завданням науково дослідницького розділу є дослідження роботи колійних пристроїв рейкових кіл в умовах протікання в рейках великих тягових струмів.

На електрифікованих залізницях, рейкові нитки одночасно використовують для пропуску зворотного тягового струму від рухомих електровозів до тягової підстанції і сигнального струму рейкових кіл.

Для захисту рейкових кіл від дії тягових струмів, які на 2-3 порядки перевищують сигнальний струм, частота сигнального струму повинна відрізнятися від частоти тягового струму і його гармонік. Постійний тяговий струм отримують випрямленням змінного струму промислової частоти за допомогою потужних випрямлячів, що включаються за шестифазною схемою. Окрім постійної складової, крива випрямленої напруги містить гармоніки змінного струму, тобто складові з частотою 300 Гц і кратні їй гармоніки (600, 900, 1200 Гц і т. д.). Ці гармоніки надають дію, що заважає нормальній роботі на рейкових кіл. Для фільтрування цих гармонік на тягових підстанціях застосовують згладжуючі фільтри, що знижують пульсації гармонік в кривій тягового струму (див. рис. 1.2).

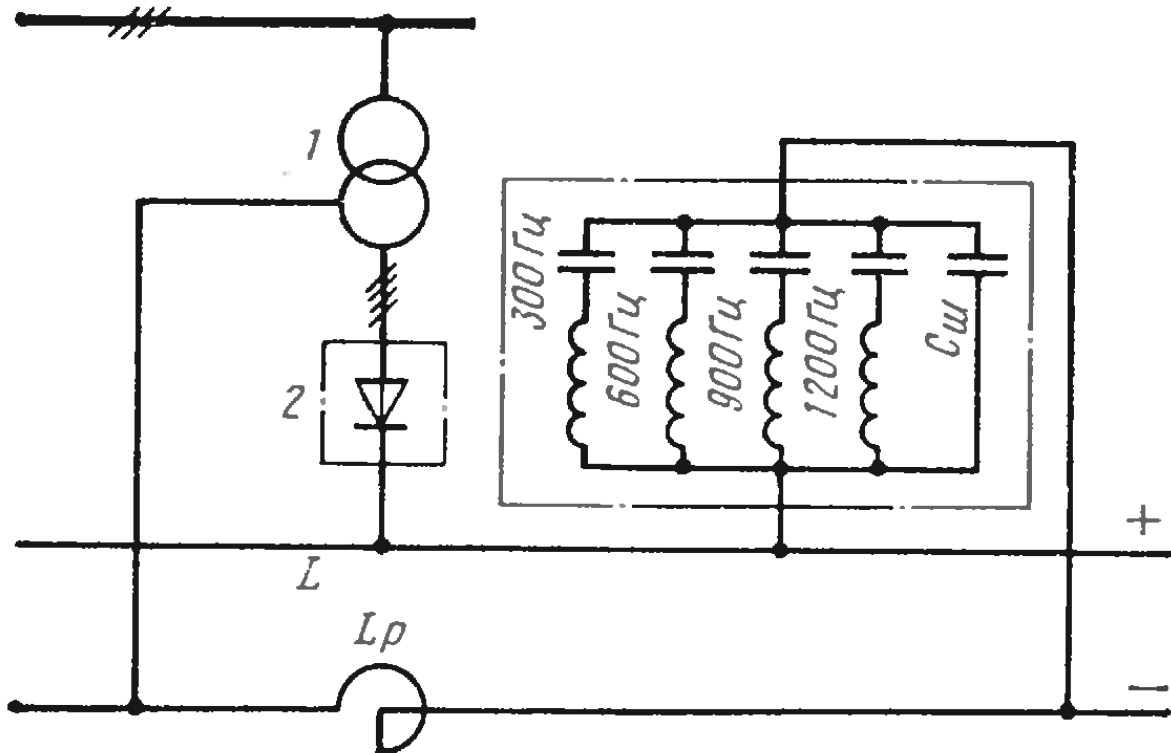


Рисунок 1.2 - Схема згладжуючих фільтрів на підстанції постійного струму.

Вони складаються з реактора: L_p (4,5-6,5 мГн), декількох резонансних контурів, налаштованих на частоти 300, 600, 900, 1200 Гц, і конденсатора $C_{ш}$, що шунтує високочастотні гармоніки. Гармонійні складові в основному замикаються через фільтр і не виходять за межі підстанцій в тягову мережу.

При деяких несправностях на тягових підстанціях у випрямленій напрузі з'являються гармоніки, кратні частоті 50 Гц (50, 100, 150, 200 і т. д.).

Гармонійний склад тягового струму може бути охарактеризований коефіцієнтом гармонік k_G , що показують, яка частина загального тягового струму I_T припадає на частку даної гармоніки I_G ; $k_G = I_G / I_T$.

Рейкове коло має бути захищене від небезпечних дій тягового струму, що заважають. Небезпечним впливом вважають такий вплив, який може привести до помилкового збудження колійного приймача при фактичній зайнятості рейкового кола. Вплив, що заважає, виявляється в тому, що при вільності рейкового ланцюга колійний приймач помилково фіксує її зайнятість.

На лініях з електротягою постійного струму застосовують рейкові кола з ізолюючими стиками частотою 50 і 25 Гц, а також за відсутності ізолюючих стиків частоти 420, 480, 580, 720 і 780 Гц.

Зворотний тяговий струм пропускається по одній або по обох рейкових нитках кожної колії. Залежно від цього рейкові кола підрозділяють на однопітківих і двопітківих. У двопітківих рейкових колах (див. рис. 1.3) обхід ізолюючих стиків тяговим струмом здійснюється за допомогою дросель-трансформаторів.

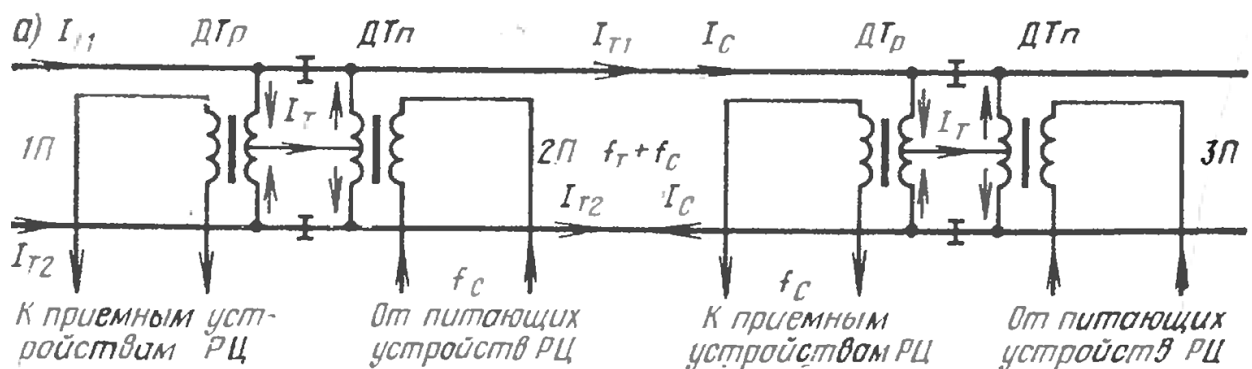


Рисунок 1.3 - Схема протікання тягового струму в обхід ізолюючих стиків

При цьому загальний тяговий струм I_T проходить по двох рейкових нитках, розділяючись приблизно на рівні струми I_{T1} і I_{T2} . Для пропуску тягового струму з одного рейкового кола в інше на їх межі біля ізолюючих стиків встановлюють два дросель-трансформатори ДТр і ДТп. Їх основні обмотки великого перетину підключають до рейкових ниток, а середні точки основних обмоток сполучають між собою. Тягові струми I_{T1} , I_{T2} проходять з ниток одного рейкового кола по обох половинах основної обмотки ДТр і сполучному тросу і потрапляють до середньої точки основної обмотки ДТп суміжного рейкового кола. Тут струми знов розгалужуються і протікають по рейкових нитках цього кола. Аналогічно здійснюється обхід тяговим струмом ізолюючих стиків здовж всього перегону. Оскільки тягові струми I_{T1} і I_{T2} проходять по двох половинах основних обмоток дросель-трансформаторів в протилежних напрямках, то магнітні потоки, утворені цими струмами, віднімаються. Тому сердечник дросель-трансформатора підмагнічується тяговим

струмом від результуючого різницевого потоку. Апаратура релейного і живлячого кінців пов'язана з рейковою лінією через додаткову обмотку дросель-трансформатора. Цим зменшується вплив постійної складової тягового струму на роботу апаратури рейкового кола. Зазвичай дросель-трансформатори мають великий коефіцієнт трансформації, що дозволяє використовувати їх як погоджуючи трансформатори.

1.4 Параметри рейкової лінії

Умови передачі сигналів в рейковій лінії визначаються її первинними параметрами: електричним опором рейок і опором ізоляції між ними, який також називають опором баласту.

Електричний опір рейок. Рейкова лінія складається з окремих рейкових ланок, електрично сполучених між собою в межах одного рейкового ланцюга. Довжина ланки 12,5 або 25 м, застосовують також ланки завдовжки 800 м. Рейки сполучають між собою стиковими з'єднувачами і стиковими накладками, що створюють паралельний ланцюг для пропуску струму.

На основі дослідних даних встановлені наступні межі зміни питомого километричного опору рейковій лінії на постійному струмі (рейкової петлі довжиною 1 км.) в залежності від стану стиків і температури довкілля: при штепсельних з'єднувачах 0,3—0,6 Ом/км, а при сталевих приварних з'єднувачах 0,1—0,2 Ом/км. Максимальні і мінімальні значення питомого опору враховують при розрахунку відповідних режимів роботи рейкових кіл.

Для проведення дослідження необхідно представлення первинних параметрів ліній (контактного проводу, рейкових ліній і так далі) залежно від конструкційних параметрів, електричних режимів системи, зовнішніх умов і ін. Контактний провід для спрощення вважаємо ідеальним (постійна поширення хвилі дорівнює нулю), а параметри рейкової лінії задамо окремо. Відомо, що активний опір рейок залежить від частоти та рівня струму, який проходить крізь них.

При протіканні змінного струму по масивному провідникові виникає явище поверхневого ефекту [12]. Це явище позначається тим сильніше, чим більше частота струму, поперечний перетин провідника, чим менше його поверхня і, нарешті, чим більше магнітна проникність матеріалу, з якого виготовлений провідник. Для мідних і алюмінієвих проводів, вживаних в контактній мережі, і при тих частотах, які мають місце на електрифікованих дорогах змінного струму, явищем поверхневого ефекту можна нехтувати і вважати активний електричний опір проводів рівним електричному.

Найбільш складним є завдання визначення активного електричного опору провідників з феромагнітних матеріалів і, зокрема, рейок. Складність ця пояснюється тим, що магнітна проникність матеріалу рейок залежить від значення струму, що по ним протікає. Струм же в рейках не однаковий по їх довжині, оскільки у фідерній зоні нормально знаходиться декілька споживачів (поїздів), до того ж частина струму протікає по землі. Значення струму, що протікає по рейках, залежить від їх опору, і чим воно більше, тим менше струм в рейках, тобто тим більша частина струму відгалужується в землю. У зв'язку з цим визначення струму в рейках зводиться до важкого завдання розрахунку струморозподілу в складній мережі з нелінійними параметрами. Для спрощення практичних розрахунків приймають ряд допущень.

Розглянемо залежність активного опору рейки від струму, що протікає по ньому. Для визначення активного опору масивних сталевих проводів використовуються емпіричні формули, хоча є і теоретичні роботи з цього питання. Для розрахунків активного опору рейок зазвичай використовують емпіричні формули Циклера. Ці формули були перевірені дослідями, проведеними в лабораторіях Всесоюзного електротехнічного інституту (ВЕІ), відхилення від досвідчених даних не перевищувало 5—10% [12,16].

Згідно цих формул маємо:

$$\begin{cases} k = 1 + 0,84 \cdot \beta^4, & \text{при } \beta < 1; \\ k = 0,758 + \sqrt{1,343 \cdot \beta^2 - 0,183} & \text{при } 1 \leq \beta \leq 3; \\ k = 0,758 + 1,159 \cdot \beta & \text{при } \beta \geq 3 \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\text{де } \beta = 2 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{S}{P} \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}} \cdot \mu,$$

де S – площа поперечного перетину рейок, см^2 ;

P – периметр перетину рейки, см ;

f – частота струму, Гц ;

ρ – питомий опір рейкової сталі, $\text{Ом} \cdot \text{м}$;

μ – відносна магнітна проникність матеріалу рейки.

Остання величина залежить від напруженості поля H (А/см) на поверхні рейки: $H = \frac{I_p}{P}$, де I_p – струм, що протікає по рейці, А .

Точні результати можна було б отримати, маючи графіки залежності $\mu(H)$, побудовані для даного сорту сталі на основі спеціальних проведених дослідів. Проте при великій невизначеності інших параметрів, що беруть участь в розрахунку, можна обмежитися наявними в літературі даними. На рис. 1.4 дані такі графіки для гарячекатаної сталі з різним змістом вуглецю.

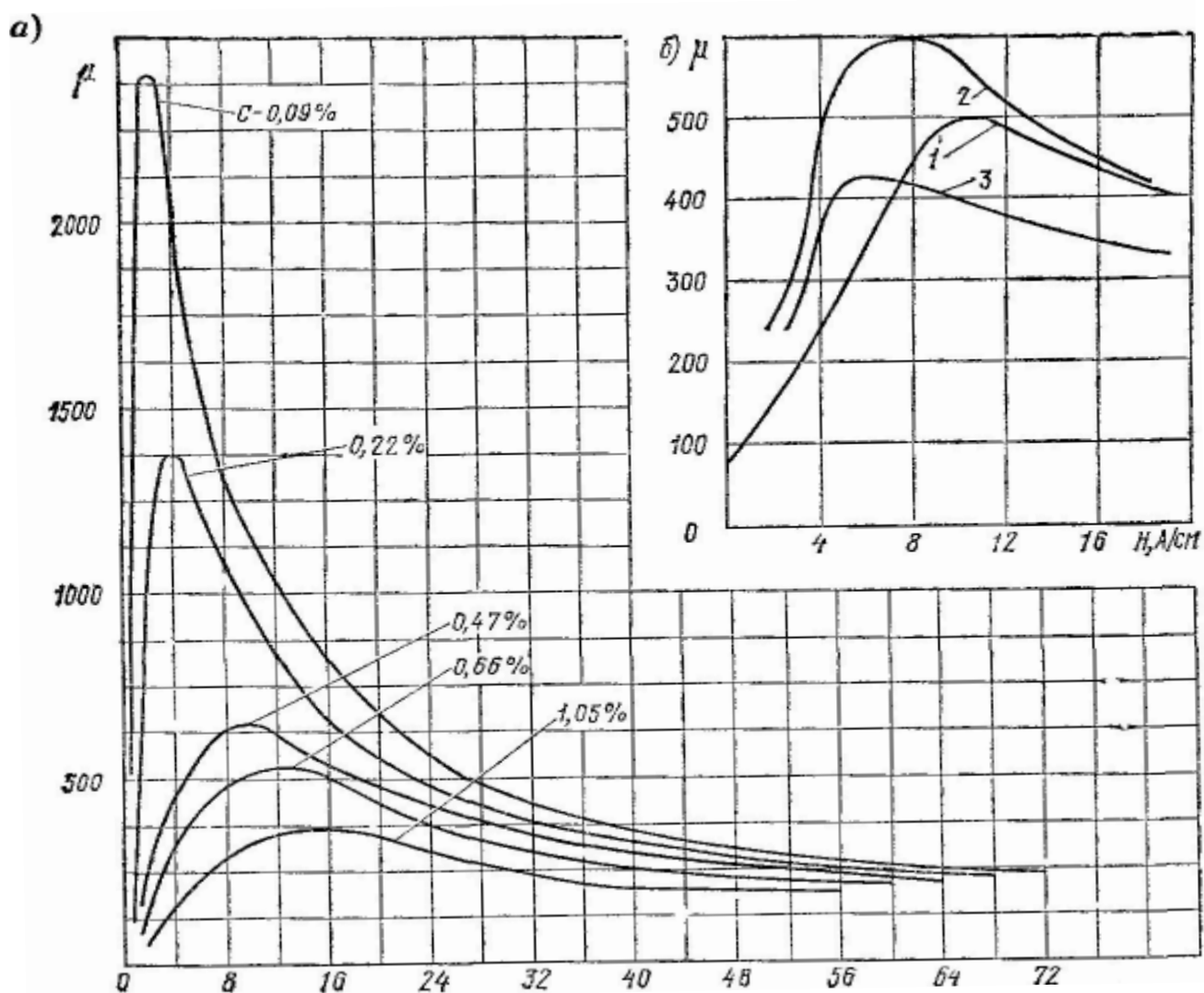


Рисунок 1.4 - Залежність відносної магнітної проникності μ від напруженості магнітного поля H для провідників із сталі з різним змістом вуглецю (а) і для залізничних рейок (б)

Як показує досвід, струм в рейках може змінюватися в широких межах (практично від нуля до декількох сот ампер), а отже в таких же широких межах може змінюватися і напруженість.

Як видно з кривих $\mu(H)$ (див. рис. 1.4, а), магнітна проникність збільшується при збільшенні I (а отже, і струму в рейках) в зонах малого насичення, тобто до досягнення максимуму магнітної проникності, і навпаки, за межами цього максимуму падає при збільшенні струму. Цікаво встановити, яка частина кривої $\mu(H)$ використовується для розрахунків активного опору рейок в практичних умовах. На

рис. 1.4, а для рейкової сталі (зміст вуглецю близько 0,5%) крива $\mu(H)$ має максимум для $H = 10 - 12$ А/см. Струм в рейці, відповідний цим значенням H , можна знайти для різних типів рейок, використовуючи формулу $I_p = H \cdot P$. Тоді отримаємо, що максимум μ відповідає струму в рейці від 450 до 670 А. У двох рейках одного шляху виходять значення струму від 900 до 1340 А і ще удвічі більше — для двоколіїної ділянки. Такі значення струмів в рейках значно перевищують робочі струми, спостережувані на залізницях змінного струму.

З цього можна зробити висновок, що рейки на електрифікованих ділянках однофазного струму працюють в зоні відносно слабких полів, отже із збільшенням струму в рейках їх магнітна проникність і активний опір зростають. На рис. 1.4, б дані криві, що зняті для цієї частини напруженості магнітного поля. Крива 1, крива 2, крива 3 побудовані за результатами досліджень різних наукових установ [12,16].

Існують також теоретичні дослідження, які присвячені визначенню активного опору феромагнітних провідників. На їх основі була отримана наступна розрахункова формула:

$$r_{pa} = \frac{0,28}{P} \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho \cdot f}$$

де P - периметр перерізу рейки;

ρ - питомий опір рейкової сталі, $0,21 \cdot 10^{-6}$ Ом·м [11];

μ - відносна магнітна проникність;

Розрахунки за вище приведеними формулами показують, що активний опір рейок перевищує електричний опір постійному струму в 5 – 10 разів залежно від того, який по ним протікає струм.

Приблизно можна прийняти, що внутрішній індуктивний опір рейок складає 75% їх активного опору, тобто:

$$x_p = 0,75 \cdot r_{pa}$$

У розрахунки зазвичай вводять значення опору, яке відповідає середньому струму.

В загальному випадку повний опір рейкової лінії (на 1 км довжини) можна обчислити за формулою:

$$Z_{ii} = (r_i + r_c) + X_i$$

в якій R_i, X_i – відповідно, активний і реактивний опір рейкової нитки довжиною 1 км (без рейкових з'єднувачів), r_c – опір рейкових з'єднувачів на 1 км рейкової нитки. Значення активного и реактивного опору рейкової нитки для тягового і сигнального струмів залежать від значення частоти струмів. Аналітичні вирази для опорів запропоновано Л. Непманом:

$$R = \frac{l}{u} \sqrt{\mu_e \rho \omega}, \quad X_l = 0.6 \frac{l}{u} \sqrt{\mu_e \rho \omega},$$

де l – довжина провідника,

u – периметр його перерізу,

ρ – питомий опір сталі,

$\omega = 2\pi f$ – кругова частота,

μ_e – магнітна проникність рейкової сталі, яка визначається експериментально за кривою намагнічення.

Якщо порівняти між собою начебто різні формули то можна побачити, що у них є багато спільного. Звернемо увагу на те, що в усіх приведених формулах чітко прослідковується пропорціональна залежність активного (і реактивного теж) опору рейки від квадратного кореню з магнітна проникність рейкової сталі, тобто $R \propto \sqrt{\mu}$

При протіканні змінного струму по рейковій лінії утворюється магнітний потік, частина якого знаходиться в межах кожної рейки, а частина — між рейками. Відповідно до цього повну питому індуктивність двопровідної лінії можна представити в наступному вигляді:

$$L_r := L_e + 2 \cdot (L_i + L_{st})$$

де L_e – зовнішня індуктивність двопровідної лінії, Гн/км;

L_i – внутрішня індуктивність цілої рейкової нитки, Гн/км;

L_{st} – індуктивність стикових з'єднувачів на один км рейкової нитки, Гн/км.

Внутрішня індуктивність, так само як і активний опір рейок, залежить від частоти електричного струму і магнітної проникності сталі [12]: $L_i = 0.0955 R/f$, Гн/км

Питома зовнішня індуктивність двопровідної лінії визначається суто геометричними розмірами системи [12]:

$$L_e := 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot \ln\left(\frac{a-b}{b}\right)$$

де b – радіус еквівалентного круга з довжиною кола, що дорівнює периметру перетину рейки;

a – відстань між осями рейок;

При оцінці повної індуктивності рейкової петлі згідно експериментальним вимірам для стикового приварного з'єднувача індуктивність приймається рівною $1,27 \cdot 10^{-6}$ Гн, а для стикового штепсельного з'єднувача $1,9 \cdot 10^{-6}$ Гн. Активний опір приварного стику приймається рівним $300 \cdot 10^{-6}$ Ом.

Опір ізоляції рейкової лінії є розподіленим параметром. Зазвичай його виражають через питомий опір, включений між рейками, віднесений до 1 км. рейкової лінії. Нормативний мінімальний питомий опір ізоляції рейкової лінії 1 Ом·км.

Найсприятливіші метеорологічні умови, при яких опір ізоляції лінії мінімальний, бувають влітку при високій температурі довкілля і вологості повітря, оскільки підвищується інтенсивність електрохімічних процесів. Засмічення баласту солями покращує умови протікання електрохімічних процесів, що призводить до істотного зниження опору ізоляції. З пониженням вологості повітря і температури довкілля знижується інтенсивність електрохімічних процесів і опір ізоляції рейкової лінії збільшується. При негативних температурах опір ізоляції $r_u = 10 \sim 100$ Ом·км, що дозволяє в розрахунках приймати його рівним нескінченності.

Частина струму витоку, потрапляючи в баласт і землю, розтікається в них, тому при розриві рейкової нитки безперервність електричного ланцюга не порушується, оскільки зберігаються шляхи протікання струму в подовжньому напрямі через землю. Протікання струму може бути показане на еквівалентній схемі опору ізоляції (рис. 1.5), Опори r_{u1} і r_{u2} характеризують перехідні опори між кожною рейкою і землею, опір якої як дроти з дуже великою площею поперечного перетину приймаються рівним нулю. Опір r_{u12} характеризує частину струму витоку, який проходить як би безпосередньо з рейки в рейку по верхньому шару баласту і шпалам.

У розрахунках рейкових кіл використовується також провідність ізоляції g , яка являє собою величину, зворотну до опору ізоляції, тобто $g = 1/r_u$; аналогічно

$$g_1 = 1/r_{u1}; \quad g_2 = 1/r_{u2}; \quad g_{12} = 1/r_{u12} \cdot$$

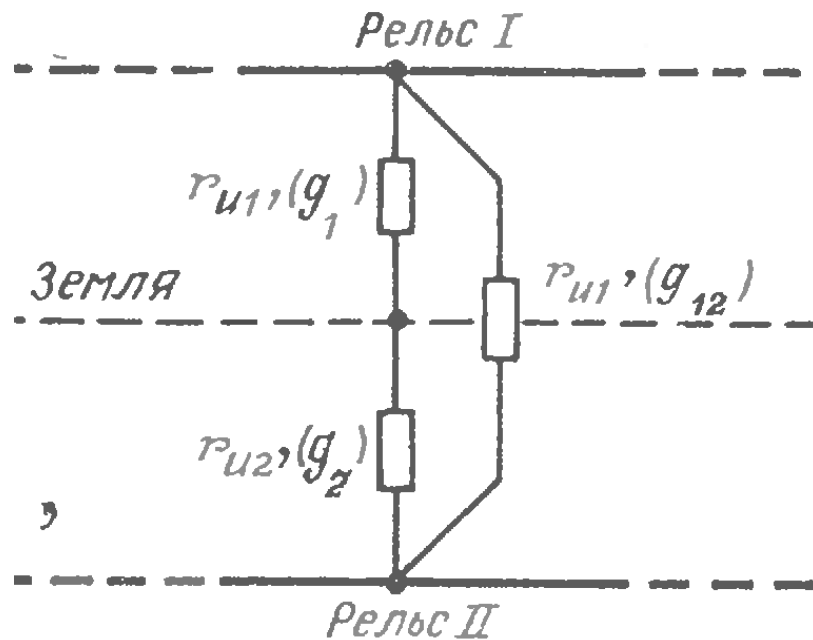


Рисунок 1.5 - Еквівалентна схема опору ізоляції

Нерівність провідності між кожною рейкою і землею (поперечна асиметрія рейкової лінії) обумовлена підключенням до однієї з рейок опор контактної мережі. Найбільше значення поперечна асиметрія рейкової лінії має взимку. Провідність

однієї рейкової нитки по відношенню до землі g_1 і провідність між рейками g_{12} зазвичай незначні, а інша рейкова нитка має високу провідність g_2 за рахунок опор контактної мережі, сполучених з рейками.

За відсутності сторонніх підключень до рейок, наприклад опор контактної мережі, $r_{u1} = r_{u2}$; $g_1 = g_2$, тобто рейкові лінії симетричні.

Провідність ізоляції рейкової лінії від землі можна взяти нормативну: 1 Ом·км. Ємність ізоляції приймаємо рівною 1 мкФ·км.

Виходячи з первинних параметрів рейкового кола, можна визначити вторинні параметри, які також необхідні при розрахунках:

$$\gamma_r := \sqrt{(Rr + j \cdot \omega \cdot Lr) \cdot (Gr + j \cdot \omega \cdot Cr)} \quad Z_v := \sqrt{\frac{(Rr + j \cdot \omega \cdot Lr)}{(Gr + j \cdot \omega \cdot Cr)}} .$$

2. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛІВ І СТРУМІВ В РЕЙКАХ НА ДІЛЯНКАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Рейкові кола є ключовими елементами залізничної інфраструктури, які виконують функцію контролю положення поїзда (визначають зайнятість чи вільність блок-ділянок), забезпечують цілісність рейкових ниток, а також служать каналом передачі кодів автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) від колійних пристроїв до локомотива. Таким чином, рейкові кола є основним компонентом, що гарантує безпеку руху поїздів.

Крім того, рейкові нитки є частиною тягової мережі, через яку проходить зворотний тяговий струм від локомотива до живильних підстанцій. На функціонування рейкових кіл впливають різноманітні дестабілізуючі фактори, зокрема електромагнітні перешкоди, що виникають у системі тягового електропостачання. Це може негативно позначатися на їхній функціональній надійності й загальній безпеці руху.

2.1 Тягові струми в рейках на ділянках з електротягою постійного струму

Живлення електричних локомотивів здійснюється через проводи контактної мережі і рейкові лінії. На залізниці прийнято, що позитивний полюс підстанції приєднаний до контактної мережі, а негативний до рейок. Оскільки рейки не ізолювані від землі, то струм проходить і по землі. Ця обставина робить істотний вплив на багато явищ, зокрема, на опір тягової мережі та роботу рейкових кіл.

Якби рейки були ізолювані від землі, то увесь струм локомотиву I протікав би по рейках. Струм витоку з рейок в землю залежить від різниці потенціалів між рейками і землею і від опору ланцюга, по якому протікає цей струм. Цей ланцюг складається як би з двох послідовно сполучених частин. Опір першої частини це опір місця переходу струму з рейок до шпал і баласту називають перехідним опором, а опір другої частини самої землі на шляху струму витоку називають опором розтіканню.

Розглянемо загальну картину протікання струму по рейках і землі для простого випадку: одностороннє живлення одного потягу. По мірі поширення струму в землі він захоплює все більші і більші її простори, і щільність струму в землі з віддаленням його від рейок зменшується. Зважаючи на це найбільший опір протіканню струмів витоку зосереджений поблизу виходу їх з рейок. Це дозволяє без відчутної погрішності при розрахунках струмів і потенціалів рейок включити опір розтіканню в перехідний опір і вважати потім, що опір землі дорівнює нулю.

Таким чином, навіть при одній підстанції струм електровоза розтікається по рейках в обидві сторони (вліво і управо). При цьому на частині ділянки найближчої до навантаження, струм з рейок витікає в землю, а потім на іншій частині повертається в рейки і на підстанцію. В середині цієї ділянки струм в рейках має мінімальне значення, він буде тим менше, чим менше опір переходу до землі і самої землі. Струм, що йде по рейках вправо від навантаження, врешті-решт повністю витікає в землю. Цей струм, так само як і струм, що витікає з рейок на найближчій до навантаження частині ділянки, повертається в рейки на іншій частині цієї ділянки і на ділянці зліва від підстанції. Струми, що протікають по землі, називають блукаючими струмами, а струми, що відгалужуються з рейок в землю струмами витоку.

Відгалуження частини струму в землю призводить до того, що опір зворотного проводу (рейки, що шунтуються перехідним опором і землею) менше опору ізолюваного від землі рейкового шляху.

Для проведення аналізу розтікання тягового струму по рейках в незалежності від поїзної ситуації і складності ділянки необхідно визначити навантаження підстанцій.

Для спрощення цього розрахунку можна прийняти деякі допущення, які не внесуть відчутної погрішності. При хорошій ізоляції рейок від землі, за відсутності витоку струмів в землю, навантаження потягів можуть бути розподілені між підстанціями звичайним способом - обернено пропорційно відстаням до сусідніх підстанцій (при незмінній площі перерізу дротів контактної мережі і однакової напрузі тягових підстанцій). Якщо ж перехідний опір від рейок до землі буде мінімальним,

то значна частина струму протікатиме по землі і при розподілі навантажень між підстанціями можна нехтувати опором зворотного проводу (рейки, що шунтуються землею), оскільки воно набагато менше опору проводів контактній мережі. Саме значення опору проводів контактній мережі і визначатиме в основному струморозподіл у такому разі. Іншими словами, можна вважати, що блукаючі струми не роблять істотного впливу на струморозподіл між підстанціями.

Після того, як навантаження усіх підстанцій знайдені, можна перейти до розрахункової схеми на якій підстанції замінені їх навантаженнями (струмами відсмоктуючих фідерів).

У розрахунках велику роль грають наступні опори: r_p опір 1 км рейкової колії, Ом·км; r_n - перехідний опір від рейок до землі на довжині 1 км, Ом/км; r_z - опір землі. Одиниця виміру опору : Ом км пояснюється тим, що зі збільшенням довжини рейкової лінії загальний перехідний опір падає, тоді як загальний опір рейок росте.

Якщо опори r_p і r_n постійні по усій довжині, то отримуємо ланцюг з постійними параметрами, тобто лінійний ланцюг. При розрахунку таких ланцюгів може бути використаний метод накладення. В цьому випадку складний контур, що містить декілька підстанцій і навантажень, можна замінити рядом контурів, в кожному з яких протікає певний струм. Це призводить до розрахункової схеми з одним навантаженням при видаленому в нескінченність заземлювачі. При цьому по черзі будуть розглянуті усі навантаження включаючи і струми підстанцій.

Розглянемо елементарну ділянку dx на відстані x від навантаження. Тут I_{px} — струм в рейках на відстані x від навантаження; I_z — струм в землі на тій же відстані від навантаження; ϕ_x - потенціал рейки на відстані x від навантаження. Опір елементу рейкового ланцюгу на довжині рівний $r_p dx$. Тоді приріст потенціалу рейок на цьому ж елементі довжини, очевидно, рівно і протилежно по знаку до падіння напруги на ньому:

$$d\phi_x = -I_{px} r_p dx$$

тоді можна записати

$$\frac{d\varphi_x}{dx} = -I_{px} r_p \quad (2.1)$$

Витік струму уздовж елемента довжини dx визначиться потенціалом рейки φ_x і перехідним опором між рейками і землею на довжині dx . Останнє вийде, якщо перехідний опір на довжині 1 км розділити на довжину даної ділянки, т. е. буде рівне - r_{Π}/dx . Оскільки приріст струму dI_{px} в рейках на довжині dx дорівнює струму витоку і назад йому по знаку, то можна написати:

$$dI_{px} = -\frac{\varphi_x}{r_{\Pi}} dx$$

чи

$$\frac{dI_{px}}{dx} = -\frac{\varphi_x}{r_{\Pi}} \quad (2.2)$$

Знак мінуса показує, що зі збільшенням x струм в рейках падає. Два диференціальні рівняння (2.1) і (2.2) є системою рівнянь з двома невідомими. Для виключення з них одного невідомого продиференціюємо рівняння по x :

$\frac{d^2\varphi_x}{dx^2} = -r_p \frac{dI_{px}}{dx}$, тоді можна буде записати в наступному виді:

$$\frac{dI_{px}}{dx} = -\frac{1}{r_p} \frac{d^2\varphi_x}{dx^2}$$

Підставимо значення $\frac{dI_{px}}{dx}$ в рівняння (3.2) :

$$-\frac{1}{r_p} \frac{d^2\varphi_x}{dx^2} = -\frac{\varphi_x}{dx}$$

$$\frac{d^2\varphi_x}{dx^2} - \alpha^2 \varphi_x = 0$$

де $\alpha = \sqrt{r_p / r_{\Pi}}$

Загальним рішенням такого диференціального рівняння буде наступний вираз:

$$\varphi_x = A \cdot e^{\alpha x} + B \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.3)$$

Струм в рейках можна знайти з рівняння (3.1)

$$I_{px} = -\frac{1}{r_p} \frac{d\varphi_x}{dx}$$

Але враховуючи (3.3) :

$$\frac{d\varphi_x}{dx} = \alpha \cdot (A \cdot e^{\alpha x} - B \cdot e^{-\alpha x})$$

Отже:

$$I_{px} = -\frac{1}{R_v} \cdot (A \cdot e^{\alpha x} - B \cdot e^{-\alpha x}) \quad (2.4)$$

$$\text{де } R_v = \sqrt{r_p \cdot r_{\Pi}}$$

Формули (2.3) і (2.4) є загальними. Для різних випадків конкретного розташування навантажень встановлюють значення постійних А і В за відповідними граничними умовами. Величини α і R_v для рейкових ліній аналогічно за термінологією, прийнятою для довгих ліній, можна назвати відповідно коефіцієнтом поширення і хвилевим опором.

Розглянемо схему з одним навантаженням. Якщо допустити, що ділянки за підстанцією і за локомотивом нескінченно довгі, то постійні інтегрування запишуться таким чином: $A = 0$ і $B = IR_v/2$. Підставивши ці значення в рівняння (2.3) і (2.4), отримаємо відповідно:

$$\varphi_x = \frac{IR_v}{2} \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.5)$$

$$I_{px} = -\frac{I}{2} \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.6)$$

Сума струмів в землі і рейках у будь-якому перерізі вертикальною площиною контактної мережі має дорівнювати $0,5 I$ тоді:

$$I_{zx} = \frac{I}{2} - I_{px}$$

Використовуючи рівняння (2.6) можна знайти рівняння для визначення струму в землі:

$$I_{zx} = \frac{I}{2} (1 - e^{-\alpha x}) \quad (2.7)$$

Формули (2.5), (2.6) і (2.7) є основними для розрахунку потенціалів рейок і струмів в рейках і землі. Необхідно враховувати, що струми в рейках, так само як і в землі, по різні сторони від навантаження матимуть різні напрями. Якщо за позитивний напрям струму прийняти напрям ліворуч від навантаження, то струми в землі і рейках вправо від навантаження матимуть негативні значення. Діаграма струму в рейках показана на рис. 2.1. Якщо навантаження матиме напрям, протилежний до вказаного (наприклад, якщо це буде струм підстанції), то у формули (2.5) - (2.7) струм I потрібно підставляти з негативним знаком.

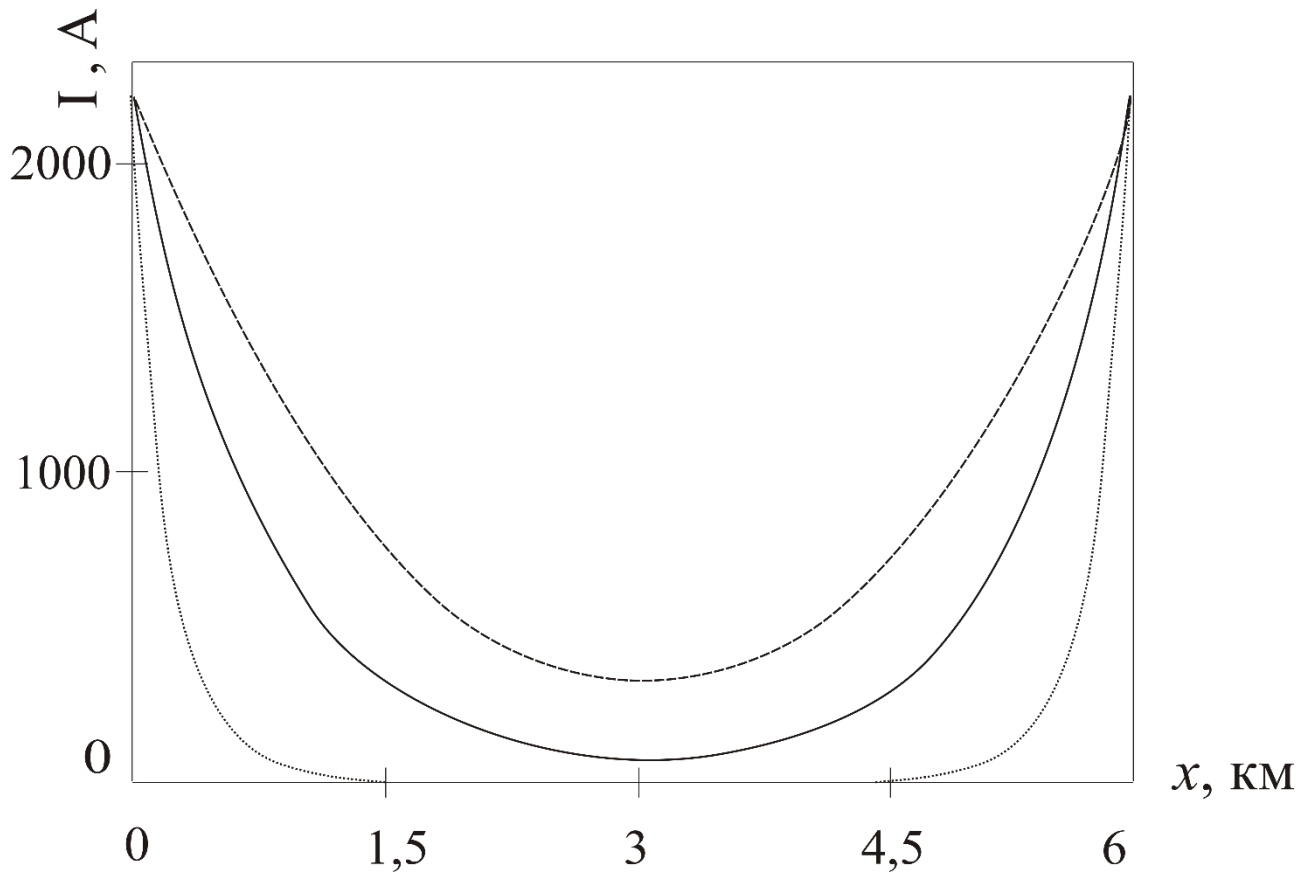


Рисунок 2.1 - Струм в рейках між підстанцією та локомотивом

Застосувавши метод накладення, легко побудувати діаграми потенціалу і струму для будь-якої схеми навантажень. По приведених формулах будують діаграми для окремих навантажень (з урахуванням напрямку струмів і знаків потенціалу), а потім визначається результуюча діаграма алгебраїчним додаванням ординат окремих діаграм. Наприклад, для схеми з одним навантаженням і однією підстанцією побудована діаграма струму в рейках на рис. 2.1. При побудові складових діаграм за початок координат береться місце розташування відповідного навантаження. Аналогічно будуються діаграми для навантаження в іншій точці, звичайно, з урахуванням знаку навантаження.

2.2 Дослідження розповсюдження постійного тягового струму вздовж рейкової лінії

Якщо за проектом використовується тяга постійного струму, то відстань між тяговими підстанціями буде меншою ніж при тязі змінного струму. Враховуючи це для дослідження приймемо, що відстань між тяговими підстанціями становить 25 км. Ордината початку перегону (світлофор Ч, Чд) на тяговій дільниці має координату 0 км, координата другої тягової підстанції відповідно – 25 км.

Перед проведенням дослідження треба визначити навантаження тягових підстанцій. Позначимо струм першої підстанції як I_1 , другої як I_5 , струм локомотивів – I_2, I_3, I_4 . Відстані від підстанції до локомотива відомі. Тоді навантаження тягових підстанцій (їх струми) можна знайти виходячи з відстаней від локомотива до кожної з підстанцій. Отже тяговий струм першої підстанції визначається:

$$I_1 := \frac{14 - 11}{14} \cdot I_2 + \frac{14 - 12}{14} \cdot I_3 + \frac{14 - 13}{14} \cdot I_4$$

Аналогічним чином визначимо навантаження (тяговий струм) другої підстанції:

$$I_5 := \frac{11}{14} \cdot I_2 + \frac{12}{14} \cdot I_3 + \frac{13}{14} \cdot I_4$$

Знаючи навантаження фідерної зони, тобто струми локомотивів, та координати локомотивів відносно першої підстанції, можна визначити струми тягових підстанцій з приведених вище рівнянь:

$$I_1 = 2,06 \text{ кА}$$

$$I_5 = 2,44 \text{ кА}$$

Слід відзначити, що згідно закону Кірхгофа загальний тяговий струм двох підстанцій дорівнює тяговому струму, що споживається локомотивом з контактної мережі.

Визначивши струми підстанцій можна, скориставшись вище наведеними формулами визначити струм в рейках на ділянці.

Результат дослідження отримуємо методом додавання графіків розповсюдження тягового струму окремих одиниць.

На рис. 2.2 зображена діаграма, що отримана в результаті дослідження, і яка показує характер розповсюдження зворотного тягового струму вздовж ділянки між підстанціями при наявності на тяговій ділянці трьох потягів з координатами 6, 14 та 18 км відповідно. Дослідження проводилося для опору ізоляції баласту рівному 0,5; 1 та 5 Ом/км.

З отриманого графіка видно, що найбільші значення тягового струму припадають на ділянки біля тягових підстанції та біля потягів. Також з графіків видно, що при зменшенні опору ізоляції рейкових ліній тяговий струм більшим чином протікає крізь землю, зменшуючи тим самим навантаження на пристрої СЦБ і на дросель-трансформатори в тому числі.

На рис. 2.3 зображена діаграма розповсюдження потенціалу вздовж фідерної зони при наявності на тяговій ділянці трьох потягів з координатами 6, 14 та 18 км відповідно. Дослідження проводилося для опору ізоляції баласту рівному 0,5; 1 та 5 Ом/км.

З отриманого графіка видно, що найбільші значення потенціалів рейок спостерігаються біля тягових підстанції та біля потягів. Також з графіків видно, що при зменшенні опору ізоляції рейкових ліній потенціал рейок значно зменшується, зменшуючи тим самим навантаження на рейкові кола та поліпшуючи умови обслуговування пристроїв автоматики.

Таким чином можна зробити висновок, що для забезпечення нормальної роботи пристроїв СЦБ та дросель-трансформатори в тому числі необхідно використовувати найнижчий опір ізоляції рейок, який задовольняє роботі рейкових кіл. Враховуючи, що тональні рейкові кола мають можливість працювати при зниженому опорі ізоляції, то відзначимо перспективність переобладнання даної ділянки системою АБТЦ, та й взагалі доцільність проектування цієї системи на ділянках з гірським профілем та сильно навантажених ділянках залізниці.

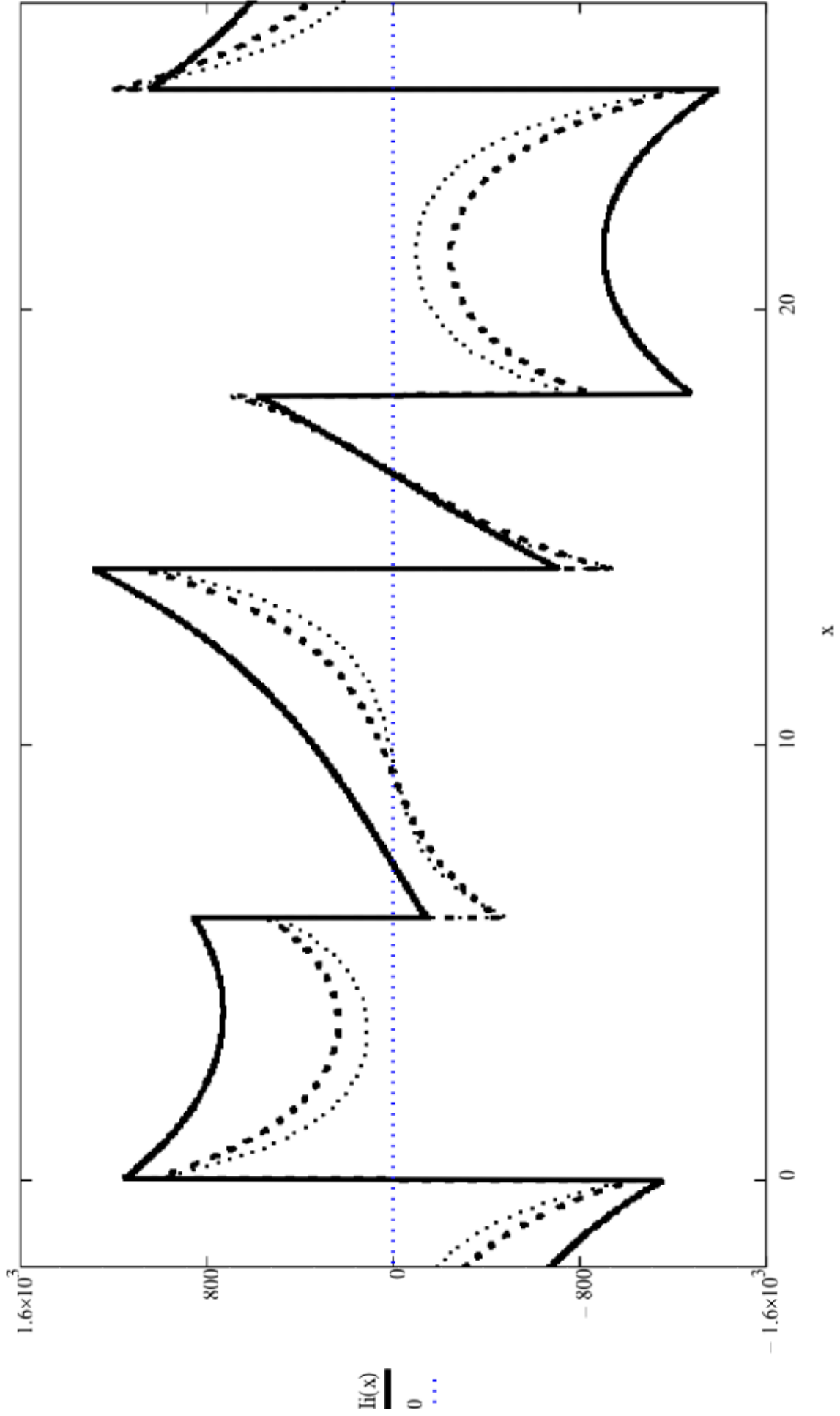


Рисунок 2.2 - Залежність тягового струму в рейках від координати при декількох локомотивах на тяговій ділянці

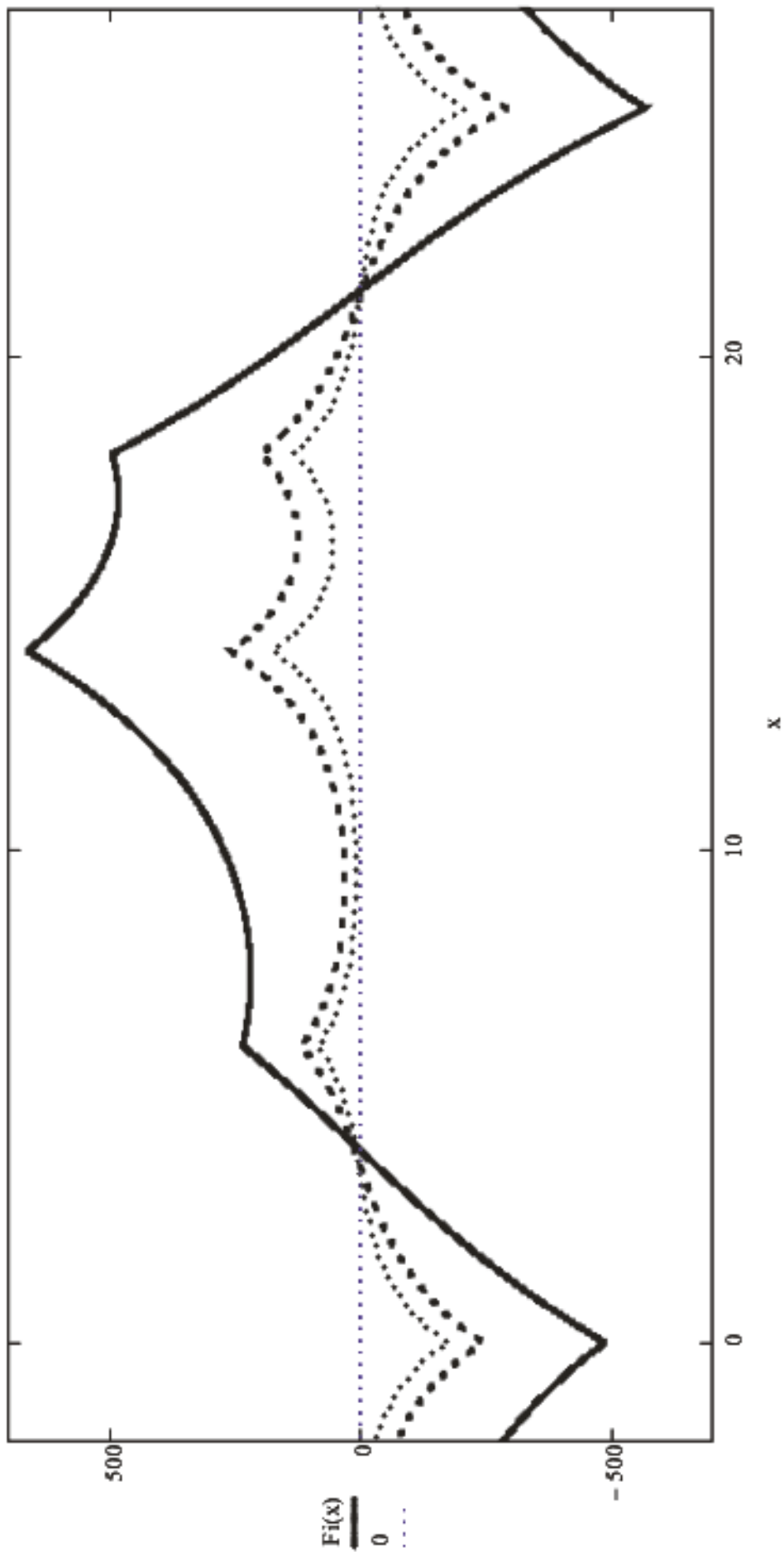


Рисунок 2.3 - Залежність потенціалу в рейках від координати при декількох локомотивах на тяговій дільниці

3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛІВ І СТРУМІВ В РЕЙКАХ НА ДІЛЯНКАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1 Особливості роботи рейкових кіл на ділянках з електричною тягою змінного струму

Протікання тягового струму в рейках на ділянках з електропостачанням змінного струму супроводжується рядом особливостей, які пояснюються наявністю електромагнітної зв'язку між окремими контурами, складовими тягової мережі.

Струм в контактній підвісі дорівнює сумі всіх струмів в рейках і землі, умовно позначених I_1 , I_2 , I_3 , I_4 . Таким чином, тягова мережа представляє собою ряд накладених один на одного контурів: контур струму I_1 , контур струму I_2 і т. д. При цьому одна частина ланцюга для всіх контурів є загальною і складається з підстанції, контактної мережі та електровоза. Друга частина ланцюга для кожного контуру своя. Вона складається з деякої довжини рейки, перехідного опору рейки-грунт і опору відповідної частини землі.

Відомо, що будь-які лінії змінного струму володіють як активним, так і індуктивним опором. Індуктивний опір складається з внутрішнього та зовнішнього індуктивних опорів. Останній залежить від розміру контурів. Чим більше відстань між «прямим» струмом (в контактній підвісі) і «зворотним» (в землі), тим більше індуктивність цього контуру. Отже, складова струму I_1 визначає меншу індуктивність, ніж I_2 і т. д. (див. рис. 3.1).

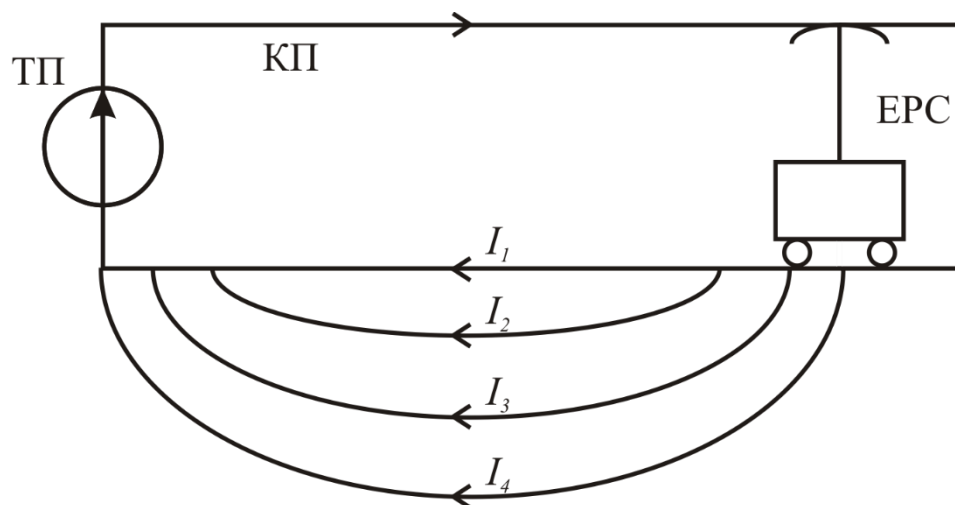


Рисунок 3.1 - Схема протікання струмів на ділянці змінного струму

Оскільки контури мають різну індуктивність, то й струми I_1, I_2, I_3, I_4 будуть зсунені по фазі один щодо одного. З тієї ж причини щільність струму в землі падає з віддаленням від поверхні землі і тим швидше, чим вище його частота. Наприклад, струм лінії при частоті 50 Гц, проходячи по землі, поширюється в ній в сторони і в глибину на кілька кілометрів, а струми звукової частоти - лише то на кілька сотен метрів.

Таким чином, при збільшенні частоти струму глибина протікання струмів зменшується, отже, зі збільшенням частоти струму зростає опір землі. При протіканні по землі постійного струму він охоплює велику глибину і ширину землі (у кілька кілометрів), тому опір землі тут не відіграє суттєвої ролі. При протіканні ж змінного струму опір землі, як зазначалося, збільшується. Залежність опору землі (як «зворотного» проводу) від частоти струму [13]:

Таблиця 3.1 - Залежність опору землі від частоти

Частота струму, Гц	25	50	150	500	5000
Перехідний опір рейки - земля	0,025	0,05	0,15	0,5	5,0

При збільшенні питомого опору землі росте падіння напруги в ній і падає щільність струму а отже, збільшується глибина і ширина області протікання струмів. У свою чергу збільшення цієї зони протікання струмів призводить до збільшення індуктивності контуру провід - земля.

Якщо лінія контактної мережі змінного струму йде по кривій або навіть робить петлю, зворотний струм у землі слідує за тією ж кривою, тобто не йде по найбільш короткому шляху. Це пояснюється тим, що струм в землі внаслідок магнітного взаємодії підтягується до проводу і тримається поблизу нього на відстанях, як це було зазначено, що залежать від його частоти. Це положення особливо цікаво

при розрахунках складних вузлів. Воно вказує на те, що схему розподілу струмів в землі можна вважати аналогічною схемою з'єднання проводів різних ліній, що сходяться в даній точці.

Присутність рейок на поверхні землі додатково ускладнює картину. Рейки на всьому протязі з'єднані через перехідний опір з верхнім шаром землі, де струм має найбільшу щільність. Наявність рейок змінює опір верхнього шару землі, а звідси і опір всіх контурів, в яких наводиться ЕРС. Струм, що протікає в цих умовах по рейках, залежить від перехідного опору рейки - ґрунт і від опору самих рейок. Останнє ж у свою чергу залежить від струму в рейках (як у всякому масивному сталевому провіднику). Так як струм в рейках падає в міру наближення до середини ділянки (див. рис. 3.1), то і опір рейок по його довжині змінюється.

Таким чином картина розподілу струмів між рейками і землею досить складна. Якщо ж врахувати, що насправді є не одне навантаження, а декілька і живляться вони від ряду підстанцій, та до того ж навантаження безперервно переміщуються і число їх змінюється. Тому для вирішення завдання розподілу струмів між рейками і землею доводиться вдаватися до різних спрощень.

Якщо всі струми в землі замінити одним еквівалентним струмом, то в схемі одностороннього живлення одного навантаження (див. рис. 3.3) можна розглядати три окремі складові струму, що протікають по трьох контурах: контактна мережа - рейка $I_{крр}$, контактна мережа - земля $I_{кзз}$, рейки - земля $I_{рз}$.

Таким чином, струм в рейках визначається як геометрична сума двох складових: струм контуру 2 (тягової складової струму, яка є частиною струму, споживаного електровозом) і струму контуру 3 - наведеної складової.

При протіканні струму по рейках на ділянках постійного струму і відстанях між підстанцією і навантаженням 12-20 км на середній частині ділянки струм в рейках близький до нуля. При змінному струмі тягова складова струму в рейках падає значно швидше, ніж при постійному, так як повний опір рейок набагато більше опору для постійного струму (особливо в зоні великих струмів, тобто близько під-

станцій і споживачів). Крім того, довжина фідерних зон при змінному струмі значно більша. Таким чином, при досить великій відстані від навантаження до підстанції в рейках, за винятком невеликих ділянок, прилеглих до підстанції і навантажень, буде протікати тільки наведений струм $I_{p3} = I_e$, і в такому випадку можна вважати, що струм в рейках пропорційний струму в контактній мережі. При цьому для розрахунків можуть бути використані коефіцієнти самоіндукції і взаємоіндукції, виведені для ліній нескінченно великої довжини.

Струм контактної мережі I_{KM} викликає в контурі рейки - земля ЕРС взаємної індукції E_{p3} . Ця ЕРС в свою чергу викликає в землі наведений струм I_{pE} , зменшуючи потік, що пронизує контур контактний провід - земля. Наведений струм призводить до збільшення щільності струму в поверхневих шарах і зменшенню у віддалених від поверхні шарах землі.

Оскільки частина вихрового струму відводиться в рейки і для цього струму контура рейки - земля буде володіти великим індуктивним опором, то вектор струму в рейках I_p відхилиться від E_{p3} на великий кут. Сумарний же струм в рейках і землі залишається рівним I_{KM} , а різниця між струмами I_{KM} і $I_{p3}=I_E$ дає еквівалентний струм в землі I_z .

Якщо розглядати ситуацію для точки, розташованої поблизу підстанції або навантаження, де в рейках зберігається деяка частина тягового струму I_m , то сума струмів $I_{p3} + I_z$ повинна була б дорівнювати $I_{KM} - I_m$.

Для спрощення розподілу тягового струму між рейками і землею приймемо, що опір землі дорівнює нулю. При цьому розподіл струму буде визначатися опором рейок і перехідним опором від рейок до землі, який включає в себе опір землі і приймається (для спрощення) не залежним від розташування навантажень відносно підстанцій. Оскільки цей вплив невеликий, то для практичних розрахунків допущення в незалежності перехідного опору від розташування навантажень на ділянці цілком виправданий.

Струм, що протікає по контактній мережі, наводить ЕРС в контурі рейки - земля. Позначивши коефіцієнти взаємоіндукції між контурами: перша рейка - земля і контактний провід - земля, несучий трос - земля і рейки - земля, перша рейка - земля і друга рейка - земля відповідно через $M_{кр}$, $M_{тр}$, M_{p12} . Тоді для одноколійного ділянки струм в одній рейці буде дорівнює $0,5 I_p$. Тому ЕРС, наведена в контурі рейки - земля, віднесена до 1 км:

$$E_{pz} = -j\omega \cdot (M_{кр} I_{кр} + M_{тр} I_m + 0,5 \cdot M_{p12} I_p) \quad (3.1)$$

3.2 Дослідження розповсюдження змінного тягового струму вздовж рейкової лінії

При дослідженні розповсюдження тягового струму вздовж рейкової лінії треба враховувати, що рейкова лінія є лінією з розповсюдженими параметрами і процеси в них описуватимуться системою наступних диференціальних рівняннями:

$$\begin{aligned} u_p - (u_p + du_p) &= R_p i_p dx + L_p \frac{di_p}{dt} + i_{кп} R_{кпр} dx + L_{кпр} \frac{di_{кп}}{dt} dx, \\ i_p - (i_p + di_p) &= G_p u_p dx + C_p \frac{du_p}{dt} + G_{кпр} (u_p + u_{кп}) dx + C_{кпр} \frac{d(u_p + u_{кп})}{dt} dx. \end{aligned} \quad (3.2)$$

де u_p , i_p - миттєві значення напруги та струму в рейковій лінії;

R_p , L_p , G_p , C_p , - первинні параметри рейкової лінії;

$u_{кп}$, $i_{кп}$ - миттєві значення напруги та струму в контактному поводі;

$M_{кпр} = R_{кпр} + j\omega L_{кпр}$ - параметр магнітного зв'язку контактного проводу з рейками;

$Y_{кпр} = G_{кпр} + j\omega C_{кпр}$ - параметр електричного зв'язку контактного проводу з рейками;

При переході від миттєвих значень до діючих комплексних отримуємо наступну систему:

$$\begin{aligned}
-\frac{d\dot{U}_p}{dx} &= R_p \dot{I}_p + L_p \frac{d\dot{I}_p}{dt} + L_{кп} \frac{d\dot{I}_{кп}}{dt} + R_{кп} \dot{I}_{кп}, \\
-\frac{d\dot{I}_p}{dx} &= G_p \dot{U}_p + C_p \frac{d\dot{U}_p}{dt} + G_{кп} (\dot{U}_p - \dot{U}_{кп}) + C_{кп} \frac{d(\dot{U}_p - \dot{U}_{кп})}{dt}.
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Так як $\dot{U}_p = |U_p| e^{j(\omega t + \varphi)}$, $\dot{I}_p = |I_p| e^{j(\omega t + \varphi - \alpha)}$, то звідси можна записати

$$\frac{d\dot{U}_p}{dt} = j\omega |U_p| e^{j(\omega t + \varphi)}, \quad \frac{d\dot{I}_p}{dt} = j\omega |I_p| e^{j(\omega t + \varphi - \alpha)}, \quad \text{тоді справедливі наступні вирази}$$

$$\frac{d\dot{U}_p}{dt} = j\omega \dot{U}_p; \quad \frac{d\dot{I}_p}{dt} = j\omega \dot{I}_p; \quad \frac{d\dot{I}_{кп}}{dt} = j\omega \dot{I}_{кп}. \quad \text{Підставимо їх у систему (3.3):}$$

$$\begin{aligned}
-\frac{dU_p}{dx} &= (R_p + j\omega L_p) I_p + j\omega L_{кп} I_{кп} + R_{кп} I_{кп}, \\
\frac{dI_p}{dx} &= (G_p + j\omega C_p) U_p - (G_{кп} - j\omega C_{кп}) (U_{кп} - U_p).
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Отримали систему диференціальних рівнянь, яка за методом суперпозицій має відомі загальні рішення:

$$\begin{aligned}
u_1 &= Ae^{\gamma_p x} + Be^{-\gamma_p x} \\
i_1 &= -\frac{1}{Z_B} \cdot (Ae^{\gamma_p x} - Be^{-\gamma_p x}) - m \cdot I_0
\end{aligned} \tag{3.5}$$

де γ_p - постійна розповсюдження хвилі у рейковій лінії;

Z_B - хвильовий опір рейкової лінії;

m - параметр магнітного зв'язку.

Так як в нашому випадку використовується тягова мережа змінного струму, то індуктивні та ємнісні складові не будуть дорівнювати нулю, тому часткові рішення системи (3.4) також не будуть нульовими. Постійна розповсюдження

$\gamma_p = \sqrt{\frac{Z_p}{Z_n}}$ та хвильовий опір $Z_B = \sqrt{Z_p \cdot Z_n}$ визначаються відношенням повних комплексних опорів:

Z_p - опір рейкової лінії;

Z_n - перехідний опір від рейок до землі;

Параметр магнітного зв'язку m характеризує струм в рейках, який протікає під дією наведеної ЕРС, тобто складова $m \cdot I_0$ являє собою струм, наведений в рейках тяговим струмом в контактному проводі. Залежить цей параметр від геометричних розмірів контуру контактний провід – рейки, взаємного опору між рейками, та опору рейок [5-8]:

$$m = \frac{Z_{кпр}}{Z_p + Z_{p21}}$$

Постійні інтегрування А та В визначаються з початкових умов наявної ситуації. Для нашого випадку за умови відсутності заземлення біля локомотива та його відстані від тягової підстанції рівній l отримуємо наступні вирази для струму та потенціалу рейок:

$$\phi_p = I_0 \cdot (1 - m) \cdot Z_B \cdot \frac{sh\gamma_p \cdot (x - 0,5 \cdot l)}{ch\gamma_p \cdot 0,5 \cdot l}$$

$$I_p = -I_0 \cdot (1 - m) \cdot \frac{ch\gamma_p \cdot (x - 0,5 \cdot l)}{ch(0,5\gamma_p \cdot l)} - m \cdot I_0$$

де I_0 – струм у точці підключення тягової підстанції або локомотива.

3.2 Результати дослідження

Враховуючи всі параметри, визначені вище, проведемо моделювання розповсюдження тягового струму в рейковій лінії, результати якого відображено на графіках.

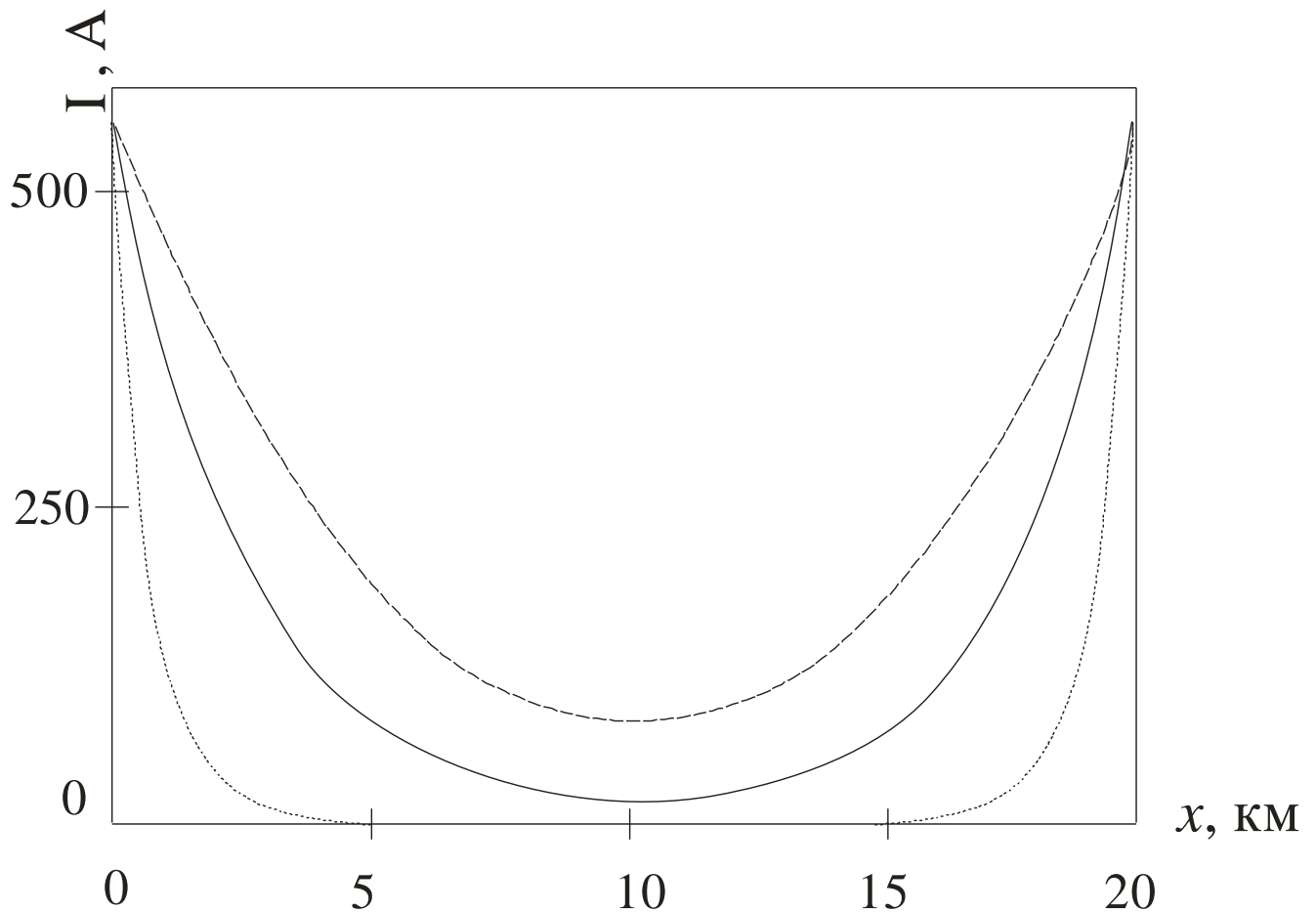


Рисунок 3.2 - Струм в рейках між підстанцією та локомотивом на ділянці електроживлення змінним струмом

На рис. 3.2. зображено результат моделювання характеру розповсюдження лише тягового струму (без урахування наведеної складової) в рейках на ділянці між тяговою підстанцією (координата $x=0$) та локомотивом (координата $x=20$). На графіку приведені криві, які визначають розтікання тягового струму для різних умов, а саме для різного стану ізоляції рейок від землі. В якості фіксованих значень опору ізоляції для дослідження були вибрані наступні: 0,1 Ом·км; 1 Ом·км (нормативне значення) та 10 Ом·км.

Виходячи з приведених графіків можна зробити висновок, що найвищі значення зворотного тягового струму в рейках спостерігаються в районі тягової підстанції та біля локомотива, що рухається. Ці зони найбільшим чином підпадають під

негативний вплив зворотного тягового струму, а рейкові кола в цих зонах працюють у найбільш напружених та несприятливих умовах, що потребує ретельного їх захисту.

Також з графіків видно, що з підвищенням опору ізоляції рейкової лінії зворотній тяговий струм починає менше відгалужуватися в землю і його рівень в рейках досягає великих значень навіть в зоні між тяговою підстанцією на локомотивом. Таким чином можна зробити висновок, що підвищення опору ізоляції рейкової лінії призводить до погіршення умов роботи рейкових кіл через постійну присутність в рейках зворотного тягового струму.

На рис. 3.3 наведено діаграму розповсюдження тягового струму в рейках на ділянці довжиною 60 км. Одна тягова підстанція має координату $x=0$, інша $x=60$. Розглядається випадок, коли на тяговій ділянці одночасно рухаються три локомотиви. Координати локомотивів відповідно: $x=20$, $x=25$, $x=40$. При такій ситуації на тяговій ділянці в рейках присутній зворотній тяговий струм від усіх трьох локомотивів і його значення визначається сумою цих струмів.

Як видно з діаграми найбільш напруженими ділянцями є зони в районі тягових підстанцій та біля локомотивів. Рівень тягового струму в конкретній точці на тяговій ділянці залежатиме від положення рухомих одиниць на ділянці.

На рис. 3.4 наведено діаграму розтікання потенціалів в рейках на ділянці довжиною 60 км. З діаграми видно, що найбільш напруженими ділянцями з високим рівнем потенціалів в рейках є зони в районі тягових підстанцій та біля локомотивів. Крім того на рис. 3.3 та 3.4 можна спостерігати велику наведену складову тягового струму (наприклад, ділянка 40-60 км), яка викликає наявність досить високого потенціалу в рейках, незважаючи та відсутність в них кондуктивної складової зворотного тягового струму. При такій ситуації значно ускладнюється експлуатація систем автоматики та погіршуються умови роботи рейкових кіл.

Зменшення опору ізоляції призводить до більш стрімкого переходу кондуктивної складової з рейок в землю, проте на рівень наведеної складової опір ізоляції майже не впливає.

Таким чином, з приведених графіків можна зробити висновок, що при збігу декількох негативних обставин (високий рівень опору ізоляції; велика кількість рухомих одиниць на дільниці; великий рівень споживаємого тягового струму, що може бути наслідком руху на дільниці важких товарних потягів, або наявністю ділянок з крутим профілем; зближення двох тягових ділянок; несприятливі погодні умови; и т.п.) зворотний тяговий струм та потенціал в рейках можуть досягати небезпечних значень, негативно впливати на роботу рейкових кіл, або навіть вивести з ладу апаратуру сигналізації та зв'язку.

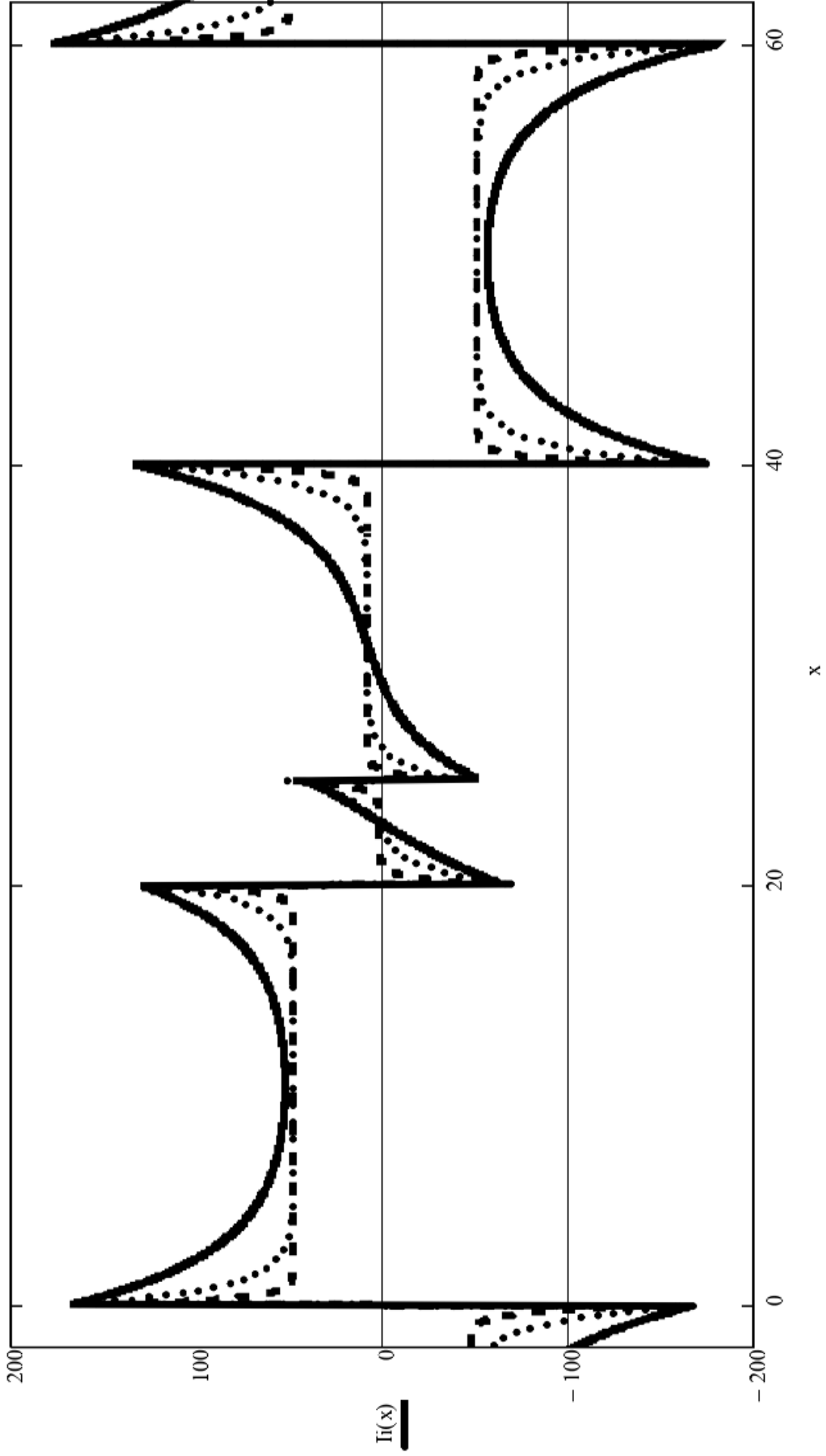
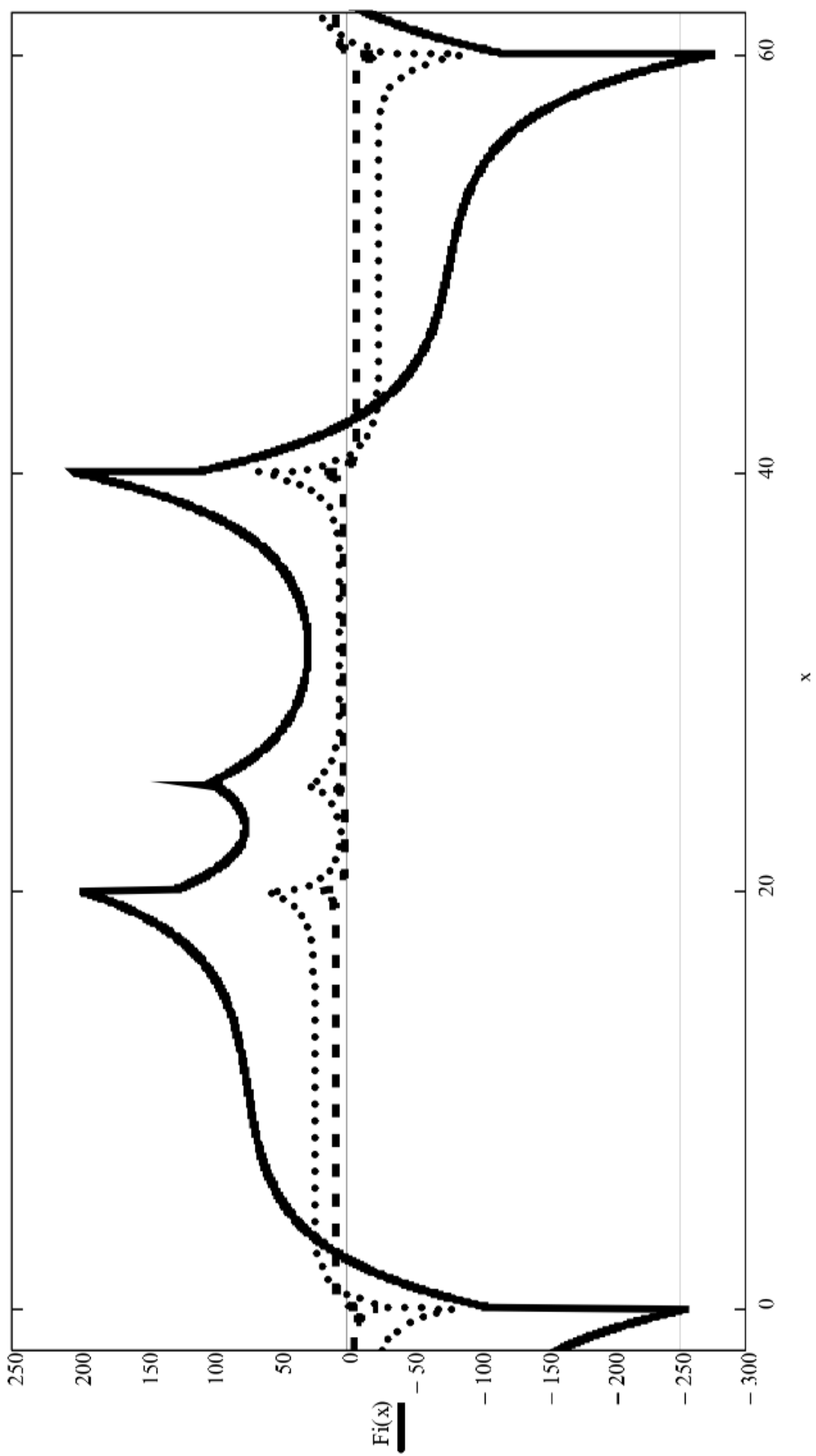


Рисунок 3. 3 - Залсжність тягового струму в рсйковій лінії від координати x



ВИСНОВКИ

В результаті дослідження виявлено, що найбільш напруженими ділянками є зони в районі тягових підстанцій та біля локомотивів. Рівень тягового струму в конкретній точці на тяговій ділянці залежатиме від положення рухомих одиниць на ділянці. Також можна зробити висновок, що при збігу декількох негативних обставин (високий рівень опору ізоляції; велика кількість рухомих одиниць на ділянці; великий рівень споживаного тягового струму, що може бути наслідком руху на ділянці важких товарних потягів, або наявністю ділянок з крутим профілем; зближення двох тягових ділянок; несприятливі погодні умови; и т.п.) зворотний тяговий струм в рейках може досягати небезпечних значень, негативно впливати на роботу рейкових кіл, або навіть вивести з ладу апаратуру сигналізації та зв'язку.

Виявлено, що найвищі значення зворотного тягового струму в рейках спостерігаються в районі тягової підстанції та біля локомотива, що рухається. Ці зони найбільшим чином підпадають під негативний вплив зворотного тягового струму, а рейкові кола в цих зонах працюють у найбільш напружених та несприятливих умовах, що потребує ретельного їх захисту.

Також з роботи можна зробити висновок, що з підвищенням опору ізоляції рейкової лінії зворотній тяговий струм починає менше відгалужуватися в землю і його рівень в рейках досягає великих значень навіть в зоні між тяговою підстанцією на локомотивом. Таким чином можна зробити висновок, що підвищення опору ізоляції рейкової лінії призводить до погіршення умов роботи рейкових кіл через постійну присутність в рейках зворотного тягового струму.

Для забезпечення нормальної роботи пристроїв СЦБ та дросель-трансформатори в тому числі необхідно використовувати найнижчий опір ізоляції рейок, який задовольняє роботі рейкових кіл. Враховуючи, що тональні рейкові кола мають можливість працювати при зниженому опорі ізоляції, то відзначимо перспективність переобладнання даної ділянки системою АБТЦ, та й взагалі доцільність проектування цієї системи на залізничних ділянках з високим навантаженням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кулик, П. Д., Ивакин, Н. С., Удовиков, А. А. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности / П.Д. Кулик, В.С. Ивакин, А.А. Удовиков. - К. : Мануфактура, 2004. - 286 с.
2. Дмитрієв, В. С., Воронін, В. А. Рейкові кола тональної частоти (автоматика телемеханіка та зв'язок). - 1996. - №6.
3. Типовий альбом АБ –II-K-25-50-ЭТ-82. Типовий альбом ПС-II-25-73.
4. Про електромагнітну сумісність електрифікованих ліній постійного струму / І. В. Анохов, М. П. Бадьор, В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко // Залізничний трансп. України. – 2000. –№ 2. – С. 10-12.
5. Щека В. І. Дослідження магнітного впливу контактної мережі на рейкові кола / В. І. Щека, В. І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті – 2011. – № 2. – С. 39-44.
6. Щека В. І. Дослідження механізмів впливу контактної мережі на рейкові кола / В. І. Щека // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 57 – С. 27-35.
7. Щека В. І. Дослідження особливостей роботи рейкових кіл в умовах електромагнітного впливу контактної мережі / В. І. Щека, В. І. Гаврилюк // Залізничний трансп. України. – 2015. – № 4. – С.16-19.
8. Сердюк Т. Н., Гаврилюк В. І. Електромагнітна сумісність системи тягового електропостачання з рейковими ланцюгами / Т. Н. Сердюк, В. І. Гаврилюк // Залізничний трансп. України. – 2005. – Спец. вип. 3/2. – С. 176-180.
9. ДСТУ ІЕС 60050-161:2003 Словник електротехнічних термінів. Глава 161. Електромагнітна сумісність (ІЕС 60050-161:1990, IDT)
10. ДСТУ-Н ІЕС Guide 107:2005 Електромагнітна сумісність. Настанова щодо розроблення нормативних документів (ІЕС Guide 107:1998, IDT) Щека, В. І. Розробка системи захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу контактної

мережі суміжної колії / В. І. Щека, О. В. Завгородній // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – № 36. – С. 156-160.

11. ДСТУ EN 50121-1:2010 Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Частина 1. Загальні положення

12. ДСТУ EN 50121-4:2019 Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Частина 4. Емісія завад і несприйнятливість сигнальної та телекомунікаційної апаратури

13. Інструкції з забезпечення безпеки руху поїздів при виконанні робіт з технічного обслуговування та ремонту пристроїв сигналізації, централізації та блокування на залізницях України.

14. ЦШЕОТ/0018, Інструкції з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) ЦШЕОТ/0012,

15. Методичні вказівки з перевірки пристроїв автоблокування АБТ, АБТЦ і АЛСО перед включенням в експлуатацію на залізницях України ЦШ-0025