

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

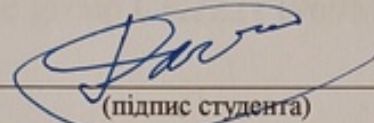
Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

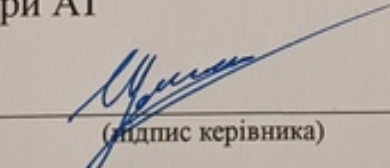
на тему: Дослідження електромагнітного впливу тягової мережі на режим роботи рейкових кіл
за освітньою програмою «Системи керування рухом поїздів»
зі спеціальності: 273 «Залізничний транспорт»

Виконав: студент(ка) групи СК2221 (969М)


(підпис студента)

/ Ігор ДАЙЛІДЕНКО /

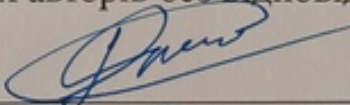
Керівник: доцент кафедри АТ


(підпис керівника)

/ Вадим ЩЕКА /

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

Студент


(підпис студента)

Дніпро – 2024 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)

Study of traction network electromagnetic influence on the track circuits operating data
Train movement control systems»
in the Specialty: 273 Railway transport

Dnipro – 2024

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерні технології та системи
Кафедра: Автоматика та телекомунікації
Рівень вищої освіти: магістр
Освітня програма: Системи керування рухом поїздів
Спеціальність: 273 Залізничний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри АТ

_____ Володимир ГАВРИЛЮК
(підпис)

Дата _____

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу _____ магістр
(ступінь вищої освіти),
студенту _____ Дайліденку Ігорю Сергійовичу
(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема роботи: Дослідження електромагнітного впливу тягової мережі на режим роботи рейкових кіл

Керівник роботи: _____ Щека Вадим Ігорович, к.т.н., доцент
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від _____ «__» _____ 2022 р. № _____

2. Строк подання студентом роботи: _____ .2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: _____ Принципові схеми рейкових кіл, методика розрахунку Режимів роботи рейкових кіл, довідкова література

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

4.1 Аналітична частина:

Аналіз електромагнітного впливу тягової мережі на рейкові кола та їх характеристики

4.2 Основна частина:

Залежність режимів роботи рк від опору рейкової лінії і опору ізоляції баласту
Дослідження кондуктивного впливу зворотного тягового струму на режими роботи рейкових кіл

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):

Залежності критеріїв роботи рейкових кіл від опору рейок при різному опорі ізоляції баласту

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз електромагнітного впливу тягової мережі на рейкові кола та їх характеристики	1.09.23	Вик.
2	Залежність режимів роботи рк від опору рейкової лінії і опору ізоляції баласту	1.10.23	Вик.
3	Дослідження кондуктивного впливу зворотного тягового струму на режими роботи рейкових кіл	1.12.23	Вик.
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	25.12.23	Вик.
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	24.01.24	

Студент

_____ (підпис)

Ігор ДАЙЛІДЕНКО

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Вадим ЩЕКА

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

60 сторінок, 17 рисунків, 2 таблиці, 23 джерела літератури.

Об'єкт розробки – електромагнітні процеси в системі «рейкове коло – тягова мережа».

Мета роботи - оцінка кондуктивного вплив зворотного тягового струму на режими роботи рейкових кіл.

Методи дослідження – методики розрахунку режимів роботи рейкових кіл, теорія чотирьохполосників, моделювання у математичному пакеті Mathcad,.

Виконано аналіз електромагнітного впливу електрорухомого складу на роботу рейкових кіл. Встановлено, що кондуктивний вплив (гальванічний зв'язок), який виникає за рахунок протікання зворотного тягового струму по рейковій лінії, є найбільш не безпечнішим з точки зору нормального функціонування рейкових кіл. Рівень впливу обумовлюється кількістю локомотивів у фідерній зоні, рівнем асиметрії рейкової лінії та її ізоляцією щодо землі. Максимальні струми завад в рейкових колах спостерігаються на частотах 25, 420, 480, 580, 780, 4545, 5000 Гц і в багатьох випадках амплітуди гармонік перевищують граничні значення. При цьому амплітуда гармонік значно збільшується при збільшенні тягового струму, тобто при прискоренні руху електровозом з асинхронним тяговим двигуном і ШІМ.

Висновок. В роботі виконано розрахунки режимів роботи рейкових кіл в умовах впливу зворотного тягового струму на опір рейкової лінії. В результаті дослідження виявлено, що великі рівні тягового струму в рейках погіршують умови виконання режимів роботи рейкових кіл.

Ключові слова: РЕЙКОВЕ КОЛО, КОНДУКТИВНИЙ ВПЛИВ, РЕЖИМИ РОБОТИ РЕЙКОВИХ КІЛ, ЗВОРОТНИЙ ТЯГОВИЙ СТРУМ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ НА РЕЙКОВІ КОЛА ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	8
1.1 Особливості електропостачання електрифікованих залізниць	8
1.2 Огляд досліджень гармонічного складу зворотного тягового струму при електричній тязі змінного струму і ЕРС з асинхронним тяговим двигуном	11
2. ЗАЛЕЖНІСТЬ РЕЖИМІВ РОБОТИ РК ВІД ОПОРУ РЕЙКОВОЇ ЛІНІЇ І ОПОРУ ІЗОЛЯЦІЇ БАЛАСТУ	15
2.2. Способи пропускання тягового струму	21
3. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНДУКТИВНОГО ВПЛИВУ ЗВОТНОГО ТЯГОВОГО СТРУМУ НА РЕЖИМИ РОБОТИ РЕЙКОВИХ КІЛ.....	23
3.1 Вихідні дані для розрахунку	24
3.2 Опір рейкової нитки.....	27
3.3 Опір ізоляції баласту.....	32
3.4 Вплив опору баласту та рейок на режими роботи рейкових кіл	33
3.5 Розрахунок нормального режиму	35
3.6 Шунтовий режим роботи рейкового кола	42
3.7. Контрольний режим роботи рейкового кола.....	48
3.8. Режим АЛСН	53
3.9. Режим короткого замикання	54
ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	58

ВСТУП

Електрифіковані залізниці виступають як значущий джерело просторово розподілених електромагнітних перешкод. Питання електромагнітної сумісності з системами автоматики та зв'язку вирішувалися під час електрифікації залізниць, але залишаються актуальними в контексті сучасних технологічних змін. Зокрема, впровадження нових типів рухомого складу з асинхронним тяговим приводом (АТП), збільшення швидкості руху поїздів та використання нових мікропроцесорних систем управління рухом підкреслюють актуальність проблеми [7, 10-12, 17].

Випробування нових типів електричного рухомого складу (ЕРС) на електромагнітну сумісність перед їх введенням в експлуатацію є необхідним етапом. Виникають проблеми через велику різноманітність систем електропостачання, сигналізації та зв'язку в європейських країнах, що вимагає проведення випробувань у кожній країні окремо з урахуванням її особливостей. Це призводить до збільшення вартості впровадження нових типів рухомого складу.

Національні нормативні документи визначають гранично допустимі рівні електромагнітних перешкод, створюваних ЕРС [5, 14]. В умовах розширеної співпраці українських залізниць щодо модернізації рухомого складу з використанням асинхронного тягового приводу, гармонізація національної нормативної бази з європейськими стандартами стає необхідною.

У Євросоюзі на даний час розробляються загальноєвропейські стандарти щодо електромагнітних перешкод, створюваних ЕРС. Незважаючи на те, що нормативні значення електромагнітних перешкод встановлені з великим запасом, на окремих ділянках залізниці виникають проблеми із роботою систем сигналізації та зв'язку при проходженні нових типів рухомого складу. Це особливо актуально у випадках екстремальних умов роботи залізничних систем. Таким чином, дослідження взаємодії електромагнітних полів від ЕРС залишається важливою темою.

1. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ НА РЕЙКОВІ КОЛА ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1 Особливості електропостачання електрифікованих залізниць

Електромагнітна сумісність (ЕМС) - це здатність електричного та електронного обладнання працювати без взаємодії або взаємовпливу на взаємно прийнятних рівнях електромагнітних сигналів. В інших словах, це забезпечення того, що електронні системи працюють належним чином, не порушуючи роботу інших систем, а також не стаючи джерелом перешкод для інших пристроїв чи систем у спільному електромагнітному середовищі.

ЕМС важлива для того, щоб уникнути небажаних перешкод, електромагнітних інтерференцій та зберегти працездатність електронних пристроїв в різних умовах.

Норми та стандарти ЕМС визначаються для керування випромінюванням електромагнітних сигналів і стійкістю пристроїв до зовнішніх електромагнітних впливів. Сертифікація відповідності цим нормам забезпечується виробниками, щоб їхні продукти відповідали вимогам щодо ЕМС.

Існує чотири способи передачі сигналів, які зв'язують джерело перешкод із приймачем: ємнісний, індуктивний, гальванічний та передача випромінюванням.

Ємнісний зв'язок виникає за участю електричного поля, що діє на короткі відстані (до декількох сантиметрів). Ризик виникає переважно при паралельному розташуванні дротів або кабелів, де є значна ємність між ними, зумовлюючи можливі джерела і приймачі перешкод.

Індуктивний зв'язок реалізується за допомогою магнітних полів. Струм, що протікає у дроті, створює магнітне поле, яке може наводити струм та напругу в сусідніх дротах.

Гальванічний зв'язок передбачає використання будь-яких струмопровідних з'єднань між джерелом перешкод і приймачем. Сюди також включають захисні з'єднувачі, які заземлюють та вирівнюють потенціал.

Електромагнітний зв'язок використовує електромагнітні поля і відомий своєю роботою на принципах радіо.

Отже, при аналізі взаємодії між електрорухомим складом і системою тягового електропостачання змінного струму 25 кВ 50 Гц і постійного струму 3 кВ, що широко використовуються на залізничному транспорті України, можна визначити наступні основні джерела впливу обладнання електропостачання на роботу рейкових кіл:

- кондуктивний вплив (гальванічний зв'язок) через протікання зворотного тягового струму по рейковій лінії. Рівень цього впливу залежить від кількості локомотивів у фідерній зоні, рівня асиметрії рейкової лінії та її ізоляції від землі.

- електромагнітний вплив, спричинений наведеною електрорушійною силою в рейкових лініях.

Залізниці, які працюють на електричному живленні, є одними з найбільших споживачів електроенергії. Електропостачання для електрифікованих залізниць надходить через тягові підстанції (ТП), які конфігуруються відповідно до системи електричної тяги, що використовується на конкретній залізниці (залежно від типу струму і напруги). При введенні нових об'єктів електротранспорту переважно використовується система електропостачання змінного струму. Контактна мережа (КМ) електрифікованих залізниць із змінним струмом представляє собою значне джерело електромагнітних перешкод, що породжує проблеми сумісності з сусідніми лініями різного призначення та викликає виникнення значної наведеної напруги. Основні компоненти системи тягового електропостачання включають зовнішнє електропостачання, тягові підстанції (ТП), фідера, що живлять і відсмоктують, тягову мережу (ТМ) та зворотню тягову (рейкову) мережу (ЗТМ).

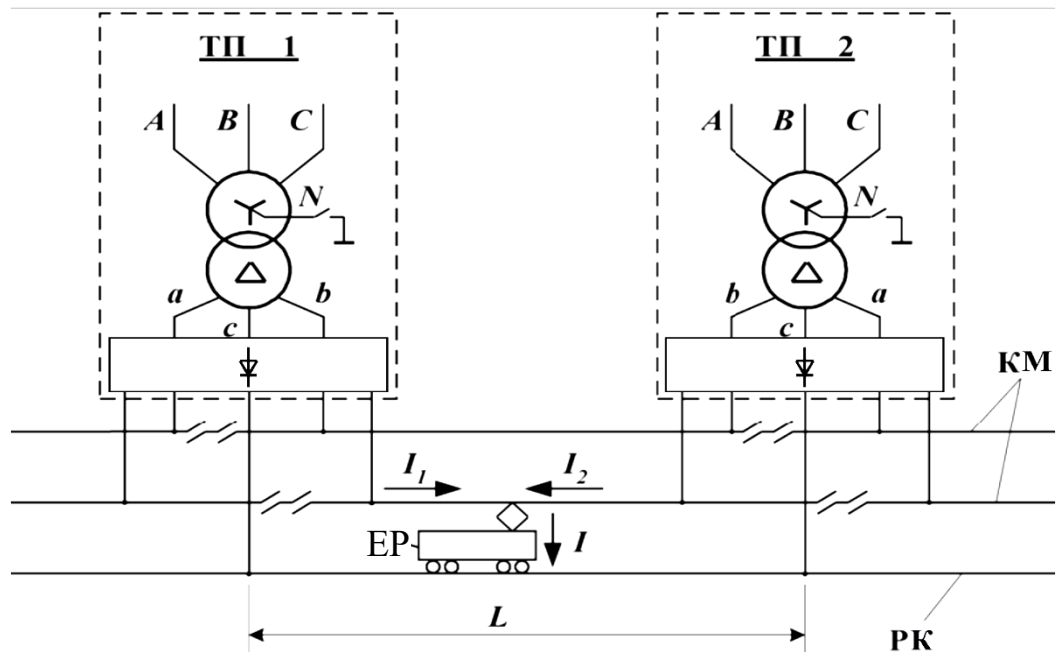


Рисунок 1.1 – Спрощена схема двоколіїної ділянки залізниці при її двосторонньому живленні

Електричний живильний склад (ЕРС) отримує електропостачання від тягової підстанції (ТП), яка включає в себе різноманітні компоненти, такі як тягова мережа (ТМ), контактна мережа (КМ), рейкові кола (РК), живильні та відсмоктуючі лінії (фідери), а також інші пристрої та лінії. Довжина відстані, яку пролягають лінії, в середньому становить 20-40 км. Тягові підстанції зазвичай обладнані потужними трифазними трансформаторами із потужністю 25-40 МВА [6].

Навантаження на тягову підстанцію є двофазним, де один фазний провід трансформатора, розташований на стороні 27,5 кВ (у нашому випадку - фаза «с»), пов'язаний з рейковою колією. Інші дві фази («а» і «b») з'єднуються через вимикачі із контактною мережею. Таким чином, ЕРС живиться лінійною напругою U_{ac} і U_{bc} , яка отримується від трансформатора. Значення напруги U_{ac} і U_{bc} визначається напругами U_{AN} і U_{CN} на високій стороні трансформатора. Фази «А» і «С» є навантаженими, в той час як фаза «В» залишається ненавантаженою. Таким чином, тягова підстанція має несиметричне навантаження [7].

Контактна мережа (КМ) у найпростішому випадку включає несучий трос та контактний провід. Несучий трос використовується для забезпечення рівномірного підвішування контактного проводу, уникнення провисань. По всій довжині системи електропостачання контактний провід та несучий трос паралельно з'єднуються за допомогою струн, тоді як несучий трос кріпиться до опори контактної мережі через ізолятор [7].

Основним компонентом зворотної тягової мережі (ЗТМ) є рейкові лінії, які також використовуються для формування рейкових колій. Рейкові кола виконують важливі функції: вони служать колійним датчиком, контролюючи положення поїзда та стан рейкових ниток; передають сигнальну частоту та код автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) від колійних пристроїв на локомотив. Таким чином, рейкові кола визначають безпеку руху поїздів [7]. Електромагнітні перешкоди від системи тягового електропостачання безпосередньо впливають на роботу рейкових колій.

Крім рейкових ліній, до складу зворотної тягової мережі входить земля, через яку частина зворотного тягового струму повертається на тягову підстанцію, оминаючи рейкові лінії. Оскільки ЗТМ має зв'язок із землею через опір баласту, виникає ряд проблем, пов'язаних із блукаючими струмами та захистом від електромагнітного впливу.

1.2 Огляд досліджень гармонічного складу зворотного тягового струму при електричній тязі змінного струму і ЕРС з асинхронним тяговим двигуном

На основі аналізу [17-21] було встановлено, що при русі електрорухомого складу з асинхронними тяговими двигунами у зворотньому тяговому струмі виникають різноманітні завади, які охоплюють широкий спектр, наведений у таблиці 1.1. Експериментальні дослідження проводилися для різних режимів руху електровозу, таких як прискорення, вибіг, гальмування (екстрене гальмування) та стоянка. Осцилограми та спектральний аналіз зворотного тягового струму в цих режимах можна побачити на рисунках 1.2-1.4 [17].

Таблиця 1.1 – Результати експериментальних досліджень спектрального складу зворотного тягового струму при електротязі змінного струму

Частота, Гц	Ширина спектру, Гц	Максимально допустимий струм завади, А	Максимально вимірний струм завади, А	Відповідність до стандартів
25	21...29	1	1,41	ні
420	408...432	0,35	0,37	ні
480	468...492	0,35	0,4	ні
580	568...592	0,35	0,55	ні
720	708...732	0,35	0,42	ні
780	768...792	0,35	0,52	ні
4545	4508...4583	0,2	0,5	ні
5000	4963...5038	0,2	0,15	так
5555	5518...5593	0,2	0,21	ні

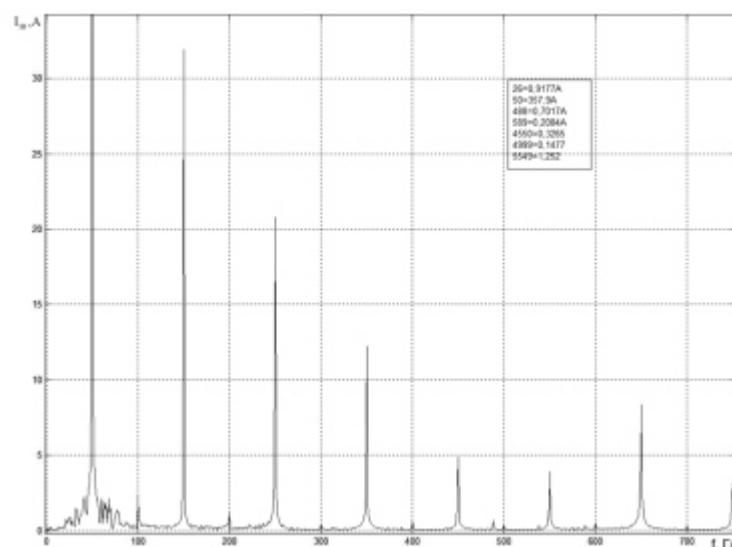
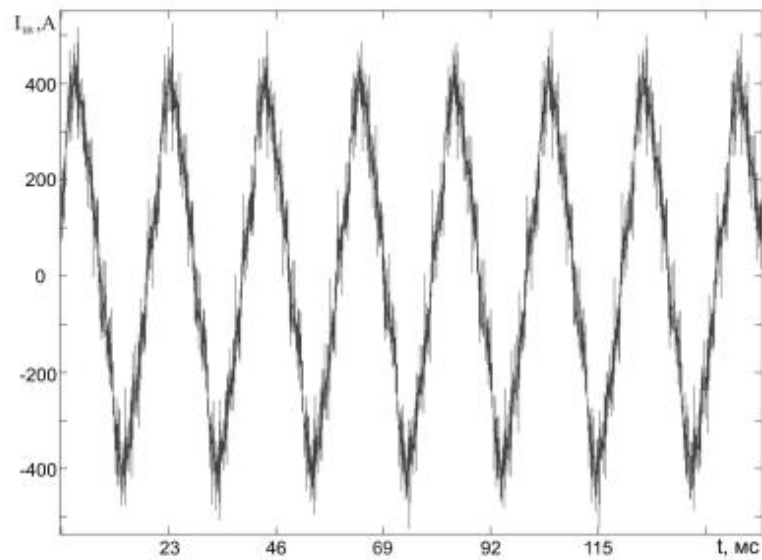


Рисунок 1.2 – Осцилограма та спектральний склад зворотного тягового струму в режимі тяги ЕРС з АТД і ШИМ при швидкості руху 140 км/год, ухил на дільниці 5‰

У режимі тяги відзначаються гармоніки з частотами 25, 480 і 580 Гц у зворотньому тяговому струмі. Зокрема, рівень амплітуди цих вмістів при частоті 25 Гц наближається до критичного рівня, який може призвести до активації колійного реле рейкового кола. Також варто відзначити, що при частотах 480 і 580 Гц амплітуда гармонійних вкрай вища за нормативні значення, перевищуючи їх удвічі.

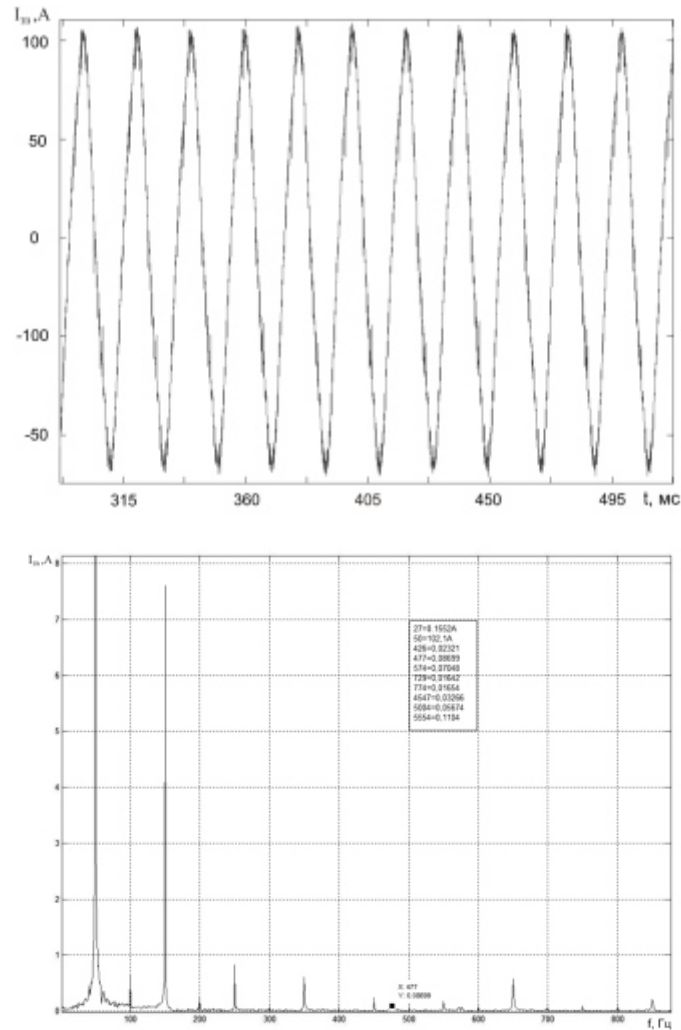


Рисунок 1.3 – Осцилограма та спектральний склад зворотного тягового струму в режимі вибігу ЕРС з АТД і ШИМ

Під час режиму вибігу зі швидкістю 120 км/год на ділянці з підйомом 5‰, де спостерігалось невелике прискорення, гармоніки у зворотньому тяговому струмі виявилися присутніми з тим самим спектром (див. Рисунок 1.3), але їх амплітуди були значно нижчі і не перевищували встановлені нормативи. Це можна пояснити низьким рівнем тягового струму в даному режимі.

У режимі екстреного гальмування на швидкості 140 км/год рівень зворотнього тягового струму не перевищував 20 А, але спектр гармонійних завад у цьому режимі став помітно ширшим. На частоті 480 Гц амплітуда гармоніки перевищувала нормативно встановлене значення. У випадку рекуперативного гальмування спектр зворотного тягового струму стає ще більш розширеним.

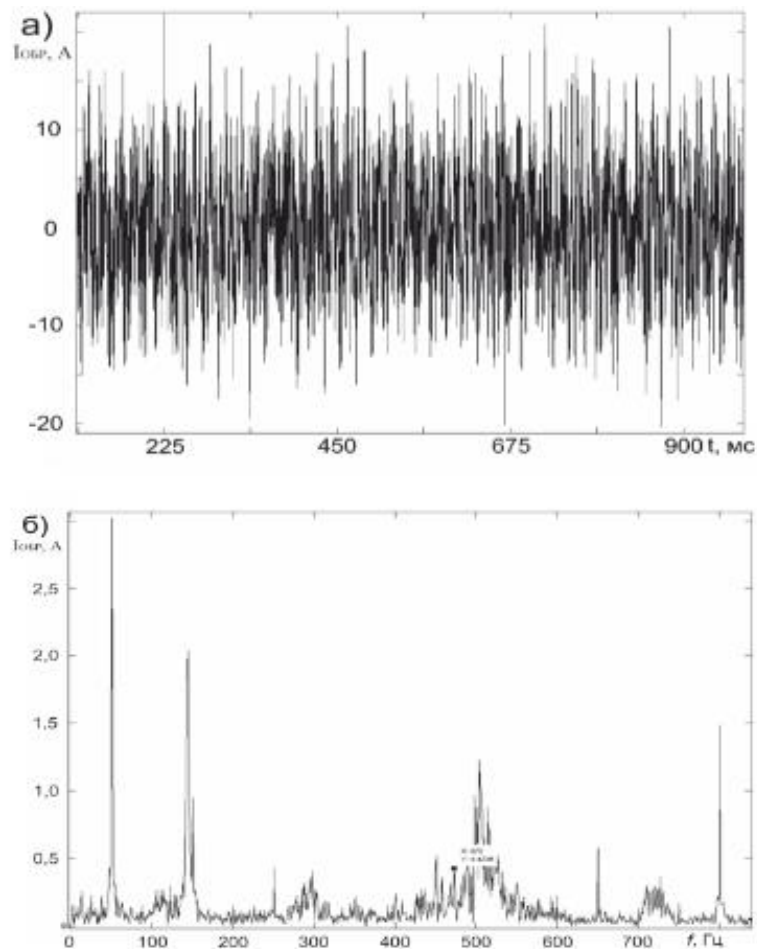


Рисунок 1.4 – Осцилограма та спектральний склад зворотного тягового струму в режимі екстреного гальмування ЕРС з АТД і ШИМ

Максимальні струми перешкод, спостережені в рейкових колах, виникають на частотах 25, 420, 480, 580, 780, 4545, 5000 Гц, і у багатьох випадках амплітуди цих гармонік перевищують нормативні значення. Варто відзначити, що амплітуда гармонік значно зростає при збільшенні тягового струму, що відбувається при прискоренні руху електровозу з асинхронним тяговим двигуном та модуляції широкої діапазонної мовчазної модуляції.

2. ЗАЛЕЖНІСТЬ РЕЖИМІВ РОБОТИ РК ВІД ОПОРУ РЕЙКОВОЇ ЛІНІЇ І ОПОРУ ІЗОЛЯЦІЇ БАЛАСТУ

На умови роботи РК в кожному з режимів впливають опір рейкової лінії, опір ізоляції і напруга живлення. Найбільш важкі умови для кожного режиму створюються при різних значеннях цих параметрів. Для забезпечення нормального режиму роботи найбільш несприятливими є такі значення параметрів, при яких струм у реле виходить мінімальним: максимальний опір рельсової лінії, мінімальний опір ізоляції і мінімальне значення напруги живлення. При пошкодженні рейки не відбувається повного електричного розмикання рейкового кола внаслідок витoku сигнального струму через баласт, в обхід місця розмикання. Критичним опором ізоляції називається опір, при якому струм в колійному реле максимальний. Це залежить від місця пошкодження рейкової лінії і різне для кожного рейкового кола. До параметрів приймача, які характеризують його роботу з точки зору високої надійності та захисту від перешкод тягового струму і електромагнітних полів, відносять вхідний опір, порогові параметри спрацювання і відпускання, коефіцієнта повернення та ін.

Стійка робота РК визначається головним чином стабільністю первинних параметрів рейкової лінії електричного опору рейок і опору ізоляції. При розрахунках використовують питомі значення цих параметрів. Питомий електричний опір рейок Z (Ом / км) змінного струму представляє собою електричний опір обох рейкових ниток (рейкової петлі) з урахуванням опору стикових з'єднувачів, по відношенню до 1 км рейкової лінії. Воно є комплексною величиною із наявністю активної і індуктивної складових і виражається модулем і аргументом (фазовим кутом). Питомим електричним опором ізоляції рейкової лінії r (Ом км) називається опір ізоляції, відношення на 1 км рейок прової лінії. Це опір визначається конструкцією і станом балласта. Повний опір ізоляції рейкової лінії довжиною L визначається за формулою.

$$R = r \cdot l$$

Відомий спосіб вимірювання опору ізоляції рейкових ліній, полягає в тому, що вимірюють струми, напруги і кути зсуву фаз між ними на початку рейкового кола при холостому ході і короткому замиканні, обчислюють вхідні опори Z_{xx} і Z_{kz} , а повним - хвильовий опір Z_v , коефіцієнт поширення γ .

Недоліком даного способу є значні похибки вимірювання при великих загасання в рейкових лініях, що має місце в реальних умовах.

Відомий також спосіб вимірювання опору ізоляції рейкових ліній, при якому в рейкову лінію на одному її кінці подають сигнал змінного струму, на тому ж кінці рейкової лінії вимірюють напругу U_0 , на відстані 0.5 км - $U_{0.5}$, і потім визначають опір ізоляції.

$$r_u = \frac{z_p \cdot \cos^2(\varphi/2)}{U_0/U_{0.5}}$$

Z_p - питомий опір рейок,

φ - аргумент опору рейок.

Недоліком даного способу є вимога однорідності опору ізоляції рейкових ліній по всій її довжині, так як від неї залежить точність обчислення, а також суб'єктивність результатів вимірювання, оскільки вимірювання проводяться вручну безпосередньо на рейкової лінії.

Для вирішення поставленої мети необхідно зробити вимір первинних параметрів (опір ізоляції) рейкових ліній, для чого використана ідея попередньої інтерполяції величин опору ізоляції рейкових ліній з вибором вузлів інтерполяції, що включають граничні значення опору ізоляції, і в подальшому, використовуючи інтерполяційну формулу зі знайденими коефіцієнтами, дистанційно визначати фактичний опір ізоляції рейкових ліній. Даний принцип відомий в теорії розпізнавання образів, але вперше застосований при вимірюванні первинних параметрів рейкових ліній. Сутність запропонованого способу полягає в тому, що в рейкову лінію на

одному її кінці подають сигнал змінного струму, на іншому кінці рейкової лінії попередньо вимірюють напруги і зрушення його фази не менш ніж при чотирьох станах опору ізоляції рейкової лінії

$\{R_{i31}(\min)\}$; $\{R_{i34}(\max)\}$, причому два з яких граничні, і, вирішуючи систему алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} R_{uz(\min)} = K_0 + K_1 U_{21} + K_2 \varphi_{21} + K_3 U_{21} \varphi_{21} \\ R_{uz2} = K_0 + K_1 U_{22} + K_2 \varphi_{22} + K_3 U_{22} \varphi_{22} \\ R_{uz3} = K_0 + K_1 U_{23} + K_2 \varphi_{23} + K_3 U_{23} \varphi_{23} \\ R_{uz(\max)} = K_0 + K_1 U_{24} + K_2 \varphi_{24} + K_3 U_{24} \varphi_{24} \end{cases}$$

де $U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}, \varphi_{21}, \varphi_{22}, \varphi_{23}, \varphi_{24}$ - відповідно напруги і зрушення фаз напруг при чотирьох станах опору ізоляції рейкової лінії, $i31(\min), R_{i32}, R_{i33}, R_{i34}(\max)$ - відповідні опору ізоляції рейкової лінії, причому $R_{i31}(\min), R_{i34}(\max)$ - граничні значення опору ізоляції рейкової лінії, визначають коефіцієнти K_0, K_1, K_2, K_3 , а потім, вимірюючи поточне значення напруги і зрушення фази напруги $U_2 \varphi_2$, визначають фактичну величину опору ізоляції рейкової лінії по формулі :

$$R_{i\varphi} = K_0 + K_1 U_2 + K_2 \varphi_2 + K_3 U_2 \varphi_2.$$

За рахунок використання рівня і зсуву фази напруги на виході рейкової лінії досягається об'єктивність оцінки і точність визначення величини опору ізоляції рейкової лінії, так як рівень напруги і його зсув фази при вільному стані рейкової лінії безпосередньо залежить від величини опору ізоляції, і вони є інформативними ознаками, характеризують стан опору ізоляції. Вимірювання рівня напруги і зсуву його фази можливо на посту електричної централізації або в релейних шафах, що дозволяє забезпечити дистанційність вимірювання поточної величини опору ізоляції. Визначення коефіцієнтів K_0, K_1, K_2, K_3 необхідно і достатньо для підвищення точності та достовірності визначення поточного значення опору ізоляції рейкової лінії. Застосування запропонованих прийомів і операцій дає наступні переваги в порівнянні з відомими способами виміру первинних параметрів рейкових

ліній і володіє "новизною" і "винахідницьким рівнем". Через те що фактичний опір ізоляції визначають по інтерполяційній формулі $R_{i\phi} = K_0 + K_1 U_2 + K_2 \varphi_2 + K_3 U_2 \varphi_2$, що має можливість додавання додаткових членів (квадратів, кубів і т.д.), з'являється можливість досягнення необхідної точності визначення величини фактичного опору ізоляції рейкової лінії. Завдяки тому що попередньо можна зробити не чотири, а набагато більшу кількість вимірів опору ізоляції та відповідних їм рівнів напруг і зсуву фаз відомими способами, можна істотно збільшити кількість вузлових точок інтерполяційної формули, що також дозволяє збільшити точність визначення величини опору ізоляції. Виміром величини рівня напруги і зсуву його фази безпосередньо з поста електричної централізації забезпечується дистанційність обчислення фактичної величини опору ізоляції. Спосіб здійснюється таким чином.

На вихідному кінці рейкової лінії циклічно вимірюється рівень напруги і зрушення його фази. Ця інформація надходить, як наприклад, в арифметичне вирішальний пристрій, який по інтерполяційній формулі $R_{i\phi} = K_0 + K_1 U_2 + K_2 \varphi_2 + K_3 U_2 \varphi_2$ обчислює фактичну величину опору ізоляції і виводить інформацію на вузол індикації. Коефіцієнти K_0, K_1, K_2, K_3 - попередньо неодноразово визначають наступним чином. Априорно вимірюють на виході рейкової лінії величину рівня напруги, зрушення фази і відповідне їм опір ізоляції. За отриманими даними, вирішуючи систему рівнянь методом Гаусса, визначають коефіцієнти. При цьому в вимірюваному діапазоні зміни опору ізоляції обов'язково включають значення напруги і зрушення його фази при граничних значеннях опору ізоляції, тобто $R_{уз(min)}$ і $R_{уз(max)}$. Чим більша кількість вимірювань, тим точніша формула інтерполяції. Система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} R_{из(\min)} = K_0 + K_1 U_{21} + K_2 \varphi_{21} + K_3 U_{21} \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ R_{из(\max)} = K_0 + K_1 U_{2n} + K_2 \varphi_{2n} + K_3 U_{2n} \varphi_{2n} \end{cases}$$

Якщо вимірних значень $U_2 \varphi_2$ при відповідних $R_{из}$ набагато більше, ніж число коефіцієнтів K_0, K_1, K_2, K_3 , то рішення системи рівнянь або визначення коефіцієнтів K_0, K_1, K_2, K_3 здійснюється за відомим правилом:

$$A^T \cdot A \cdot K = A^T \cdot R_{из}$$

де A - матриця, складена з вимірних значень $U_2 \varphi_2$, а A^T - транспонована матриця A . K - матриця шуканих коефіцієнтів, $R_{из}$ - матриця опорів ізоляції, відповідних матриці A . Збільшення числа коефіцієнтів у формулі інтерполяції, за якою визначається величина опору ізоляції, призводить до підвищення точності визначення фактичної величини опору ізоляції. Застосування представленої формули без квадратних і кубічних членів дозволяє виміряти фактичний опір ізоляції з точністю до 1% при довжині рейкового кола 1 км і діапазоні зміни опору ізоляції від 0.25 до 50 Ом • км. Технічно джерело живлення може бути реалізований у вигляді стандартного, застосовуваного на залізничному транспорті живильного трансформатора ПОБС або перетворювача частоти ПЧ 50/25; вимірник рівня напруги - у вигляді аналого-цифрового перетворювача; вимірник зсуву фаз - у вигляді тригера і лічильника імпульсів з вбудованим кварцовим генератором; арифметичне вирішальне пристрій - у вигляді мікропроцесора або мікроконтролера з внутрішньою пам'яттю і вузлом індикації. Застосування запропонованого способу вимірювання первинних параметрів рейкових ліній, зокрема опору ізоляції, за допомогою інтерполяційної формули має в порівнянні з існуючими способами наступні техніко-економічні переваги:

- Підвищується точність вимірювання опору ізоляції за рахунок раціонального вибору вузлів інтерполяції;

- Забезпечується дистанційність вимірювання опору ізоляції безпосередньо з поста електричної централізації за рахунок вимірювання зміни рівня напруги і зсуву його фази на релейному кінці, безпосередньо у подорожнього реле;
- Підвищується культура обслуговування підлогових пристроїв автоматики і телемеханіки за рахунок безперервного виміру фактичного опору ізоляції та ведення електронного журналу вимірювань фактичного значення опору ізоляції без участі людини;
- З'являється можливість виявлення предотказного стану пристроїв автоматики і телемеханіки за рахунок цілодобового вимірювання та фіксації динаміки зміни опору ізоляції.

Ходові рейки є провідниками зворотного тягового струму, що досягає великих значень (декілька тисяч ампер). У більшості випадків опору рейкових ниток в межах РК не рівні між собою. Це обумовлюється багатьма факторами і, насамперед, різницею довжин дросельних перемичок і перехідних опорів в місцях їх кріплення до рейок, нестабільністю опорів стикових струмопровідних з'єднувачів і т.д. На лініях зустрічаються і свідомо несиметричні РК, в яких опору електричному струму рейкових ниток не рівні між собою. До таких РК можна віднести двонитковий РК, в якій одна нитка на всьому протязі або на великій довжині має контррейки, що значно знижує її опір. Для вирівнювання опорів в таких рейкових кіл може застосовуватися метод транспозиції, коли всередині рейкового кола встановлюються ізолюючі стики, а перша і друга нитки з одного боку стиків за допомогою тягових з'єднувачів підключаються відповідно до другої та першої із зазначених ниток з іншого боку стиків.

Умови передачі енергії (сигналів) по рейковій лінії визначаються її первинними параметрами - питомим опором рейок і питомим опором баласту.

Під питомим опором рейок розуміється опір обох ниток зі стиковими з'єднувачами та накладками, віднесене до 1 км рейкової лінії (тобто опір

рейкової петлі довжиною 1 км). Одиниці виміру - Ом / км. Позначення - гр або Z_p (для рейкових кіл постійного струму Z_σ - дійсне число, для рейкових кіл змінного струму Z_p - комплексне число). Значення питомого опору рейок у рейкових колах постійного струму залежить від типу рейок і типу стикових з'єднувачів. Зі збільшенням номера типу рейок питомий опір рейок зменшується, так як збільшується площа поперечного перерізу рейки. Значення питомого опору рейок у рейкових колах змінного струму залежить від частоти сигнального струму і типу стикових з'єднувачів. Зі збільшенням частоти сигнального струму питомий опір рейок збільшується. Під питомим опором баласту (або опором ізоляції між рейковими нитками) розуміється опір току витoku з однієї рейкової нитки в іншу через шпали та баласт, віднесене до 1 км рейкової лінії. Одиниці виміру - Ом-км. Значення питомого опору баласту залежить від типу і стану баласту, типу і стану шпал. Стан баласту визначається температурою і вологістю повітря, а також ступенем забрудненості. Максимальний опір баласту буде при низьких температурі і вологості, мінімальне - при високій температурі і вологості. Забруднення баласту речовинами, що містять сіль (засолення), призводить до зниження його опору. Значення питомого опору баласту може змінюватися в широких межах. Нормативне розрахункове значення приймається: для двониткових рейкових кіл - 1 Ом-км, одностикових - 0,5 Ом-км, розгалужених - 0,5 Ом-км.

2.2. Способи пропускання тягового струму

За способом пропускання зворотного тягового струму рейкові кола поділяються на одностикові і двонитковий. В одностикових рейкових колах тяговий струм пропускається по одній нитці рейкової нитки. Одностикові рейкові кола прості по пристрою, однак мають ряд недоліків: вони неприйнятні при накладенні АЛС внаслідок сильного впливу перешкод при пропуску тягового струму по одній нитці рейкової нитки; тягові нитки суміжних колій об'єднуються мідними тросами в декількох точках, що

погіршує умови шунтового і особливо контрольного режиму (режиму ушкодження рейки).

Тому однониткові рейкові кола застосовують тільки на некодіруємих коліях станцій при довжині рейкового кола до 650 м і умови забезпечення пропуску тягового струму не менше ніж по шести паралельним рейковим ниткам на двоколійних лініях і по трьох - на одноколійних. В інших випадках на станціях, а також в межах перегонів застосовують двонитковий рейкові кола, в яких тяговий струм пропускається по обох рейкових ниток, а для пропуску зворотного струму в обхід ізолювальних стиків для створення безперервності ланцюга тягового струму використовують дросель-трансформатори.

Симетричний розподіл тягового струму по обох рейкових ниток створює хороші умови для дії АЛС, так як напруги перешкод, що наводяться в кожній з котушок, взаємно компенсуються. Перешкоди компенсуються і на обмотці дросель-трансформатора, так як через кожну його полуобмотки будуть протікати рівні, але протилежно спрямовані струми перешкод. Тому умови захисту апаратури від впливу тягового струму в двониткових рейкових колах краще, ніж в однониткових.

За місцем застосування рейкові кола поділяються на нерозгалужені та розгалужені. Останні застосовують при ізоляції стрілочних ділянок станцій. Розгалужені рейкові кола можуть мати кілька колійних приймачів (колійних реле) для контролю вільне і справності відгалужень. В схему контролю послідовно включають фронтові контакти всіх подорожніх реле розгалужених кіл.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНДУКТИВНОГО ВПЛИВУ ЗВОРОТНОГО ТЯГОВОГО СТРУМУ НА РЕЖИМИ РОБОТИ РЕЙКОВИХ КІЛ

Рейкове коло представляє собою збірку рейкових ниток залізничного шляху, які використовуються як провідники, а також апаратури, що з'єднується з ними на початку та в кінці. Це є ключовим компонентом багатьох систем залізничної автоматизації і телемеханіки. Рейкові кола, також відомі як "рельсові цепи" в російській термінології, використовуються для визначення вільності блок-ділянок на перегонах та станційних ділянках. Вони контролюють цілісність рейкових ниток, передають інформацію про стан колійних світлофорів на локомотив для автоматичної локомотивної сигналізації та використовуються для ряду інших завдань, таких як управління стрілками, сигналізація на переїздах і управління автошлагбаумами. Крім того, рейкові кола контролюються на диспетчерських постах для моніторингу стану блок-ділянок на перегонах та приймально-відправних коліях. Перше використання рейкових кол відзначено у 1872 році в США.

Рейкове коло включає в себе наступні компоненти:

- Рейкова лінія, що складається з рейкових ниток зі стиковими з'єднувачами та ізольованими з'єднаннями, які забезпечують електричну відокремленість суміжних рейкових колій.
- Апаратура живильного кінця, включаючи регульований резистор, що розташований в релейній шафі, а також пристрої живлення, такі як акумулятор і випрямляч, розміщені у батарейній шафі.
- Апаратура релейного кінця, яка містить приймач – колійне реле, розташоване в релейній шафі.

Апаратура живильних і релейних кінців у релейних шафах з'єднана з кабельними стійками, провідниками кабелю та далі зі сталевими тросами, які пов'язані з рейковими нитками.

При вільному стані рейкового кола, струм від акумуляторної батареї проходить через рейкову лінію і утворює замкнену ланку через обмотку колійного реле П. Реле в цьому стані знаходиться в збудженому стані, і його спільний та фронтний контакти залишаються замкнутими між собою, що свідчить про вільність і нормальну роботу ділянки рейкового кола, обмеженої ізолюваними стиками.

При введенні рухомого складу на рейкове коло, рейкові нитки стають короткими через низький опір колісних пар, що призводить до зменшення струму в обмотках колійного реле до рівня струму відпускання. Останнє призводить до відпускання якоря і, відповідно, замикання його спільного та тилового контактів. Процес зменшення струму в обмотках реле під дією колісних пар рухомого складу називається шунтовим ефектом, а колісні пари - поїзним шунтом. Таким чином, безпека руху поїздів залежить від ефективності рейкових кіл.

3.1 Вихідні дані для розрахунку

Вхідні дані для проведення розрахунків:

Тип рейкових колій - перегінні рейкові кола з частотою 25 Гц, оснащені двома дросель-трансформаторами. Ділянка обладнана електричною тягою змінного струму. Цей тип ділянок є широко поширеним на залізницях України, тому ми обрали його для проведення наших досліджень.

Довжина рейкового кола $L=2.1$ км

Мінімальний питомий опір ізоляції рейкового кола в роботі буде приймати три значення: 0,2; 1; 5 Ом км. Вибір таких значень зумовлено тим, що далеко не всі РК здатні працювати при більш низьких опорах ізоляції, а опір 5 Ом км наближений до максимального.

Коефіцієнт поверхневого утікання $m = 1.8$

Питомий опір заземлення контактних опор $r_0 = 2 \text{ Ом} \cdot \text{км}$

Опір з'єднувальних проводів між релейними ІТ і ДТ $r_{sr} = 0.3 \text{ Ом}$

Опір з'єднувальних проводів між ДТ і ІТ живлячого кінця $r_{sp} = 0.2 \text{ Ом}$

Нормативні параметри рейкових кіл:

Питомий опір рейок $Z = 0.5e^{j52^\circ} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Це значення представляє середню величину; у нашому дослідженні ми розглянемо вплив рівня тягового струму на опір рейок. Таким чином, питомий опір стане змінною величиною під час проведення наших досліджень і розрахунків режимів роботи рейкових кіл.

Питома взаємна індуктивність рейок $M = 0.0135e^{j(-6.7)^\circ} \text{ Гн/км}$

Критична постійна розповсюдження хвилі в рейковій лінії $\gamma L_{кр} = 1,13e^{j26^\circ} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Коефіцієнт схеми рейкового кола при наявності двох дросель-трансформаторів $S1 = S2 = 1$

Електричні характеристики обладнання рейкових кіл:

Опір колійного реле ІМВШ-110

Робоча напруга живлення колійного реле $U_r = 3.84 \text{ В}$

Робочий струм колійного реле $I_r = 0.023 \text{ А}$

Коефіцієнт запасу за спрацюванням колійного реле $K_z = 1.2$

Коефіцієнт повернення колійного реле $K_g = 0,75$

Припустимий коефіцієнт перевантаження колійного реле $K_{пер} = 3,7$

Опір фільтра ЗБФ-1 $Z_f = 200 \text{ Ом}$

Опір і коефіцієнти чотириполюсника захисного фільтра ЗБФ-1

$A_f = 0.333$, $B_f = 85 \text{ Ом}$, $C_f = 0.0026 \text{ См}$, $D_{dr} = 1$

Опір обмежувача $Z_0 = 200 \text{ Ом}$

Коефіцієнти чотириполюсника ДТ релейного кінця ДТ-1-150

$A_{dr} = 0.333$, $B_{dr} = 0.0525e^{40^\circ j} \text{ Ом}$, $C_{dr} = 0.49e^{-70^\circ j} \text{ См}$, $D_{dr} = 3$

Коефіцієнти чотириполюсника ДТ живлячого кінця ДТ-1-150

$A_{dp} = 3$, $B_{dp} = 0.05e^{35^\circ j} \text{ Ом}$, $C_{dp} = 0.302e^{-60^\circ j} \text{ См}$, $D_{dp} = 0.333$,

$$n = 3$$

Коефіцієнти чотириполосника ІТ живлячого кінця ПРТ-2А

$$A_{ip} = 9.15, B_{ip} = 2.4e^{36^\circ j} \text{ Ом}, C_{ip} = 0.06e^{-65^\circ j} \text{ СМ}, D_{ip} = 0.11$$

Коефіцієнти чотириполосника ІТ релейного кінця ПРТ-2А

$$A_{ir} = 0.11, B_{ir} = 2.4e^{36^\circ j} \text{ Ом}, C_{ir} = 0.06e^{-65^\circ j} \text{ СМ}, D_{ir} = 9.15$$

Нормативний струм автоматичної локомотивної сигналізації, $I_{als} = 1.4 \text{ А}$

Джерело живлення ПЧ-50/25

Номінальні характеристики живлення:

Напруга $U_{ist} = 0.606 \text{ А}$

Струм $I_{ist} = 0.606 \text{ А}$

Потужність $S_{ist} = 100 \text{ ВА}$

Градація регулювання напруги джерела живлення від номінального значення $n = 5$.

Коефіцієнт відхилення напруги джерела живлення від номінального значення $K_{otkl} = 1.025$.

Рейкове коло 25 Гц із підключенням обладнання на релейному та живильному кінцях представлено на Рисунку 3.1. Схема заміщення перегінного кодового рейкового кола 25 Гц з реле ІМВШ-110 наведена на Рисунку 3.2.

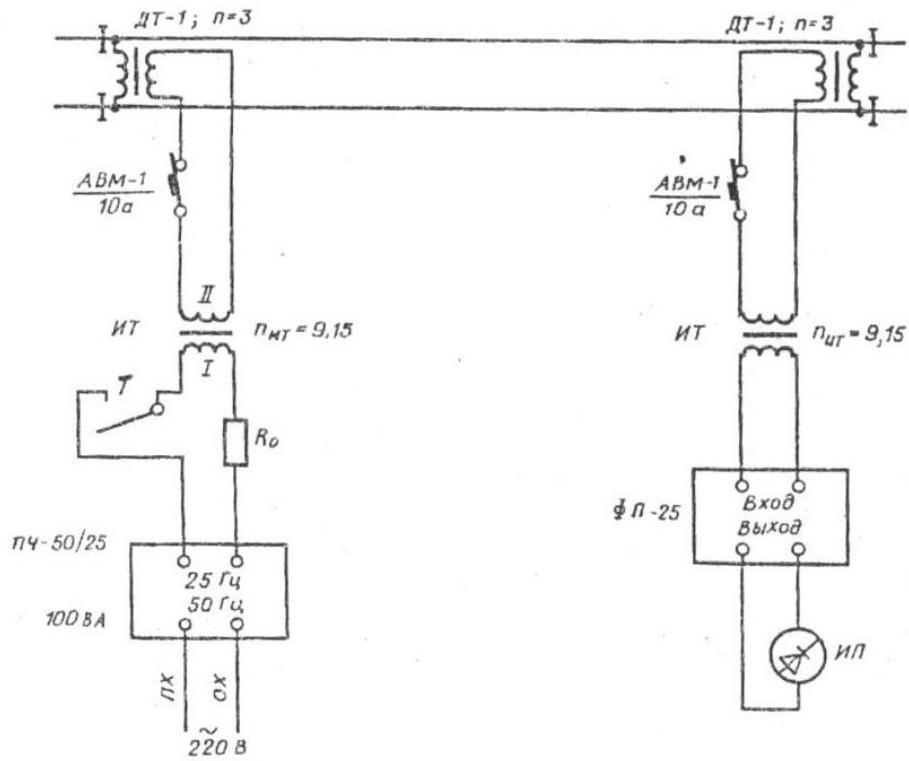


Рисунок 3.1 – Кодове перегінне кодове рейкове коло 25 Гц

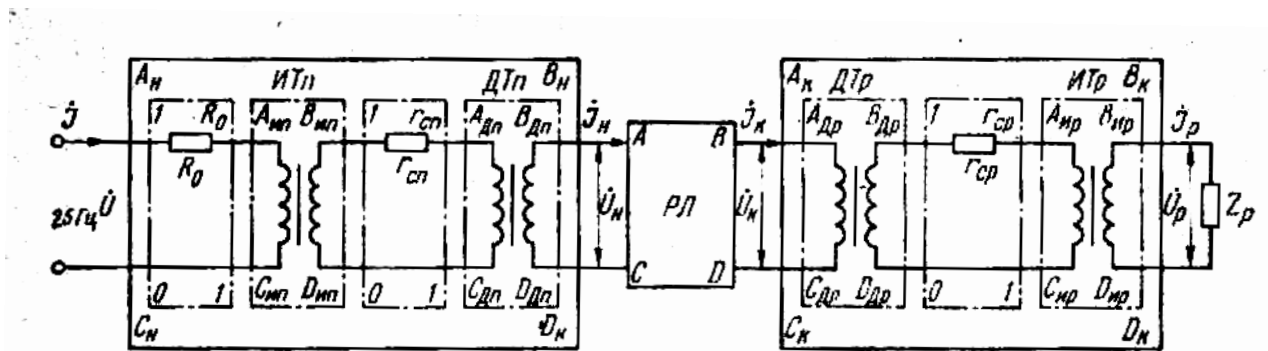


Рисунок 3.2 – Схема заміщення кодового рейкового кола 25 Гц з реле ІМВШ-110

3.2 Опір рейкової нитки

Електричний опір рейок значно залежить від характеру сигнального струму. В сучасних рейкових системах застосовується сигнальний струм різних частот від 0 до 10000 Гц. При подачі по рейковій лінії постійного сигнального струму втрати потужності в рейках виникають від нагрівання рейок та стиків, і визначаються опором їх постійного струму. При проходженні через рейки змінного сигнального струму, як зовні, так і

всередині рейок, а також біля стикових з'єднувачів, виникає змінне магнітне поле, що призводить до значного збільшення їхнього опору. Збільшення опору рейок при змінному струмі пояснюється поверхневим ефектом, який викликає додаткові активні втрати. Крім того, у колі утворюється додатковий індуктивний опір через магнітне поле рейок, зовнішню індуктивність між ними та наявність магнітного потоку всередині рейки (внутрішня індуктивність). Під час протікання змінного струму через стикові з'єднувачі в їхньому опорі також з'являються активна і індуктивна складові.

Питомий опір рейкової петлі сигнального струму будь-якої частоти виражається загальною формулою:

$$Z = 2 \left(k \cdot r_0 + \sum_0^n r_{cm} \right) + j\omega \left[L_e + 2 \left(kL_i + \sum_0^n L_c \right) \right] \cdot 10^{-3} \quad (3.1)$$

Де

r_a - активний опір цілої рейкової нитки *ом/км*;

$\sum_0^n r_{ac}$ - активний опір з'єднувачів на 1 км рейкової нитки *ом/км*;

n - число з'єднувачів на 1 км рейкової нитки,

$k = \frac{1000 - nl}{1000}$ - коефіцієнт, визначаючий відносну довжину рейкової нитки

на 1 км;

L_c - відстань в метрах між точками закріплення з'єднувачів;

L_e - зовнішня індуктивність рейкової петлі;

L_i - внутрішня індуктивність цілої рейкової нитки;

$\sum_0^n L_c$ - індуктивність з'єднувачів 1 км рейкової нитки;

ω - кутова частота сигнального струму.

Опір рейок зменшується лише на 20%. Таким чином, при розрахунках рейкових колій змінного струму не враховують відмінності між максимальним і мінімальним опором рейок, і завжди користуються нормативними значеннями. Отже, у рейкових колах змінного струму

неможливо суттєво знизити загальний опір рейок за рахунок використання з'єднувачів з низьким опором. З'єднувачі з малим опором застосовуються лише на електрифікованих ділянках для зменшення опору рейок для тягового струму. Залежності повного опору і фазового кута рейок від частоти в межах від 0 до 2000 Гц практично не змінюються, але у діапазоні від 500 до 2000 Гц повний опір рейок зростає майже пропорційно частоті, а фазовий кут змінюється незначно. Для постійного сигнального струму $\omega=0$, а величини r_a і r_{ac} визначаються опорами постійного струму відповідно до цілої рейкової нитки і рейкових стиків. Тому питомий опір рейок при постійному струмі виражається формулою:

$$Z = 2 \left(k \cdot r_0 + \sum_0^n r_{cm} \right) \quad (3.2)$$

Де r_0 - опір одинарної рейки постійного струму;

$\sum_0^n r_{cm}$ - опір рейкових з'єднувачів 1 км нитки постійного струму;

Опір цілої рейки r_0 значно менше опору з'єднувачів r_{cm} , і залежить лише від поперечного перерізу рейки.

Площа поперечного перерізу і опір одиночної рейки постійного струму в ом / км для основних типів рейок, вказано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Площа поперечного перерізу і опір одиночної рейки постійного струму

Тип рейок	S, см ²	P, см	S/P	r_0 , ом/км
P65	82,9	70	1,18	0,0254
P50	65,8	62	1,06	0,325

Значення площі поперечного перерізу рейок (S), периметра перерізу (P) і відношення S/P представлені в таблиці 3.1. Для отримання точних

результатів можна скористатися графіками залежності $\mu(H)$, побудованими для конкретного сорту сталі на основі спеціальних експериментів. Проте, у зв'язку з великою невизначеністю інших параметрів, які враховуються у розрахунках, можна використовувати літературні дані. На рис. 3.1 наведені відповідні графіки для гарячекатаної сталі з різним вмістом вуглецю. Досвід показує, що струм в рейках може змінюватися в широких межах (практично від нуля до декількох сотень ампер), а, отже, напруженість може змінюватися в значних межах.

Як видно з графіків $\mu(H)$, магнітна проникність збільшується при зростанні напруженості магнітного поля (H), що вказує на збільшення струму в рейках, в зонах малого насичення. Іншими словами, це спостерігається до досягнення максимального значення магнітної проникності. Навпаки, за межами цього максимуму, магнітна проникність зменшується при збільшенні струму.

Дуже цікаво визначити, яка частина кривої $\mu(H)$ служить основою для розрахунків активного опору рейок у реальних умовах. На рисунку 3.3 видно, що для рейкової сталі (з вмістом вуглецю близько 0,5%) крива досягає максимуму при напруженості магнітного поля приблизно 10-12 А/см. Струм в рейці, що відповідає цьому значенню напруженості, можна визначити для різних типів рейок, використовуючи дані з таблиці 3.1, за допомогою формули:

$$I_p = HP \quad (3.3)$$

Таким чином, отримуємо, що максимум кривої відповідає току в рейці від 450 до 670 А. Для двох рейок однієї колії значення струму виходять від 900 до 1340 А, а для двоколіїної ділянки це значення подвоюється. З першого розділу видно, що при русі сучасного електрорухомого складу можуть виникати тягові струми таких значень. Отже рейки на електрифікованих ділянках однофазного струму опиняються в області відносно слабких магнітних полів, і зі зростанням струму в рейках їх магнітна проникність і

активний опір також зростають. В роботі обмежимося ділянкою до 8 А/см, що для рейок Р65 буде складати близько 600 А. На цій ділянці магнітна проникність, а отже і опір рейок монотонно зростають., тому для спрощення подальшого аналізу припустимо що зростають вони лінійно. При струмі 600 А опір рейок буде складати приблизно 1,25 Ом км. Таким чином при подальшому моделюванні будемо використовувати діапазон зміни опору рейок від 0,5 до 1,25 Ом км.

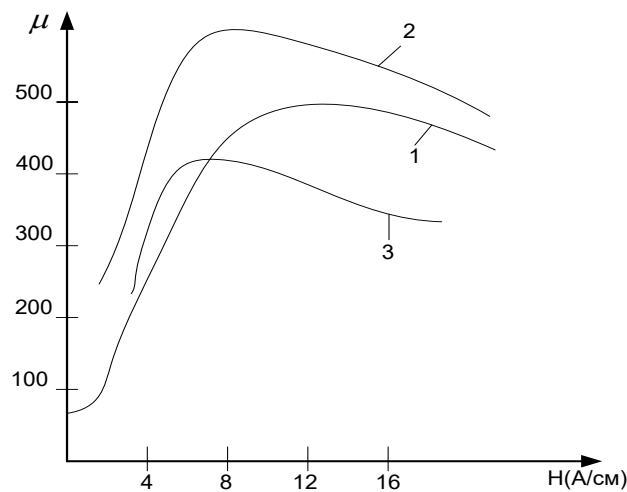


Рисунок 3.3 – Залежність відносної магнітної проникності μ від напруженості магнітного поля H для залізничних рейок

Нормативний опір рейок постійного струму визначається за результатами багатьох вимірювань, проведених на різних ділянках в реальних умовах. Для залізниць встановлено наступні стандартні значення опору рейок постійного струму:

1) максимальний r_{\max} - при штепсельних з'єднувачах 0,6 ом/км і при приварних 0,2 ом/км;

2) мінімальний r_{\min} - при штепсельних 0,3 ом/км і при приварних 0,1 ом/км;

Отже, за умов постійного струму опір рейок в реальних умовах може змінюватися приблизно вдвічі. Застосовуючи стикові з'єднувачі з низьким опором, можна значно зменшити і стабілізувати опір рейок.

3.3 Опір ізоляції баласту

Електричний опір баласту рейкової лінії визначається опором, який утворюється при протіканні тока від однієї рейкової нитки до іншої через шпали та баласт.

Опір ізоляції баласту рейкових ліній залежить від конструкції верхньої частини колії. Провідники рейкових ліній, або рейки, розташовані близько до поверхні землі і розміщені на шпалах, з якими вони мають ефективний електричний контакт через металеві елементи верхніх скріплень. Шпали вбудовані в баластний шар, який знаходиться на земляному полотні. Ця конструкція рейкової лінії створює складну електрохімічну систему, включаючи елементи іонної та електронної провідності. Рейки та всі металеві деталі верхніх скріплень володіють електронною провідністю, тоді як баласт, шпали, земляне полотно і ґрунт мають іонну провідність.

Отже, загальний опір ізоляції рейкової лінії залежить від опору, який виникає при витіку струму через шпали та баласт, а також від опору перехідних шарів на межі елементів електронної та іонної провідності.

Електрохімічні процеси, які відбуваються в рейковому колі, подібні до тих, що спостерігаються при ґрунтовій корозії. Це означає, що проходження струму через систему із електронною та іонною провідністю можливе лише при виникненні відповідних реакцій на межі розділу електрод-електроліт. Струм витоку через баласт пропорційний швидкості протікання цих реакцій. Таким чином, опір баласту залежить від різних зовнішніх факторів, які впливають на протікання електродних реакцій, зазвичай взаємодіючи з процесами поляризації електродів та зміною їх потенціалів.

Враховуючи це, можна визначити та виміряти опір баласту тільки експериментально, виконуючи складні та численні дослідження в реальних

умовах. Дослідження показало, що влітку загальний опір баласту залежить від прикладеної напруги до рейок і зменшується при збільшенні напруги постійного струму від 0,1 до 1,0 В. Крім того, встановлено, що опір баласту значно впливає вологість. Підвищення температури призводить до прискорення електродних процесів та зменшення опору електроліту, що призводить до падіння опору баласту. Таким чином, найвищий опір баласту спостерігається взимку, коли впливають два фактори одночасно: низька температура та низька вологість. З іншого боку, найнижчий опір, як правило, відзначається влітку під час спекотної погоди, через 8-10 хвилин після дощу, при високій температурі та високій вологості.

3.4 Вплив опору баласту та рейок на режими роботи рейкових кіл

Розрахунок стану рейкової лінії базується на її моделюванні як дво- або трьохпровідної електричної лінії з розподіленими параметрами. Питомі значення вихідних параметрів можуть змінюватися в залежності від просторової координати через неоднорідність, якість та стан шпал, висоту баластного шару, наявність міжколійних перемичок, які використовуються для тягового струму, відсмоктувальних фідерів тягового струму та інших факторів. При цьому поздовжні параметри включають питомий опір і індуктивність рейки, а поперечні параметри визначають провідність між рейками і ємність між ними. Рейкова лінія, яка моделюється як лінія з розподіленими параметрами, піддавалася впливу різноманітних внутрішніх і зовнішніх збурень.

Систематично визначають три категорії зовнішніх впливів на рейкову лінію, яка використовується як чутливий елемент автоматизованої системи:

1. Постійні впливи (такі як зміни в температурі та вологості), які змінюють параметри рейкової лінії.
2. Дискретні впливи (наприклад, накладання поїздного шунта або обрив рейкової лінії), що змінюють структуру її схеми заміщення.

3. Постійні та дискретні завади (такі як завади від тягового струму, блукання струмів та інші), які не змінюють параметри та структуру схеми заміщення, але впливають на приймач разом із основним сигналом.

Відгук рейкового кола на ці впливи проявляється у зміні параметрів сигналів на її вході та виході, які служать інформативними ознаками її стану.

Ці ознаки включають:

- Амплітуди і фази напруги і струму на вході рейкової лінії.
- Амплітуда і фаза напруги на виході навантаженої рейкової лінії.

При аналізі рейкових колів під впливом змінного синусоїдального струму рейкову лінію спрощено до лінії з рівномірно розподіленими параметрами для отримання результатів, що добре корелюють із реальними даними.

Для автоблокування рейкових колів використовуються частоти у діапазоні 50-100 Гц, і максимальна довжина рейкового кола складає 2000 м. При цьому шунтовий і контрольний режими можуть бути забезпечені за умови, що опір ізоляції рейкової лінії не менше 0,55 Ом.

Рейкові кола частотного автоблокування, які використовують сигнальні струми в діапазоні 100-400 Гц, більш чутливі до зниження опору ізоляції рейкової лінії порівняно з частотами 25-75 Гц, що використовуються в числовій кодовій автоблокуванні. Тому при проектуванні максимальна довжина рейкових колів частотного автоблокування не повинна перевищувати 1500 м. Крім того, для нормальної роботи приймальних пристроїв частотного автоблокування, які виділяють низьку різницеву частоту електропостачання сигнальних установок, електропостачання перегону повинно здійснюватися від єдиної енергетичної системи для стабілізації різницевої частоти, що в деяких випадках може викликати труднощі, наприклад, при електропостачанні від резервних дизель-генераторних установок.

Фіксація введення та виведення з експлуатації блок-релейних центрів (БРК) не відбувається в момент проходження поїздом точок підключення апаратури. Замість цього вона встановлюється на певній відстані від кінців

БРК, яка визначає зони додаткового шунтування Іш при наближенні та віддаленні поїзда. Наявність цих зон пояснюється відсутністю ізоляції. Наприклад, коли поїзд наближається до БРК, напруга на живильному кінці, а отже, і на вході приймача 2П1, знижується через поїзний шунт. На певній відстані внаслідок шунтування рейковою петлею поїзним шунтом напруга на вході приймача опускається до значення, що відповідає відпусканню якоря колійного реле. Також, спрацьовування колійного приймача і збудження колійного реле, наприклад, П, відбувається після віддалення поїзда на відстань Іш від БРК. Таким чином, тактична довжина БРК виявляється більше її фізичної довжини, яка визначається точками підключення апаратури.

Довжина зони шунтування залежить від частоти сигнального струму, напруги сигналу на вході приймача, опору баласту рейкової лінії, коефіцієнта відбиття колійного приймача, реального опору поїзного шунта та довжини БРК. На залізницях при частоті сигнального струму 420 Гц значення зони шунтування в умовах експлуатації знаходиться в межах від 40 до 120 м. При збільшенні частоти сигнального струму, напруги на вході приймача, опору баласту і опору рейок довжина зони шунтування зменшується, а при зменшенні цих параметрів значення Іш зростає.

3.5 Розрахунок нормального режиму

Для забезпечення нормальної роботи РЦ (рейкового кола вільного і справного) важливо враховувати дві граничні умови:

1) При мінімальній напрузі джерела живлення та у найгірших умовах передачі сигналу необхідно, щоб напруга (або струм) на вході колійного приймача були не менше значень, при яких шляховий приймач надійно спрацьовує.

2) При максимальній напрузі джерела живлення та у найкращих умовах передачі сигналу необхідно, щоб напруга (або струм) на вході колійного приймача не перевищували значень допустимого перевантаження.

Критеріями першої умови є напруга, струм і потужність джерела живлення, при яких колійний приймач надійно спрацює. Критерієм для даної умови може бути відповідне співвідношення $K_{пер\max} \leq K_{пер\доп}$, де $K_{пер\max}$ - максимальний, а $K_{пер\доп}$ - допустимий коефіцієнт перевантаження колійного приймача. Основною характеристикою роботи РК в нормальному режимі є коефіцієнт перевантаження $K_{пер}$, що представляє собою відношення фактичного значення сигналу на вході приймача ($U_{вх}$) до робочого значення.

$$K_{пер} = U_{вх} / U_p \quad (3.4)$$

Для проведення розрахунків формується схема заміщення РК (рис. 3.4), а параметри чотирьохполосників, що входять до неї - Н (апаратура живильного кінця), РЛ (рейкова лінія) і К (апаратура приймального кінця), визначаються.

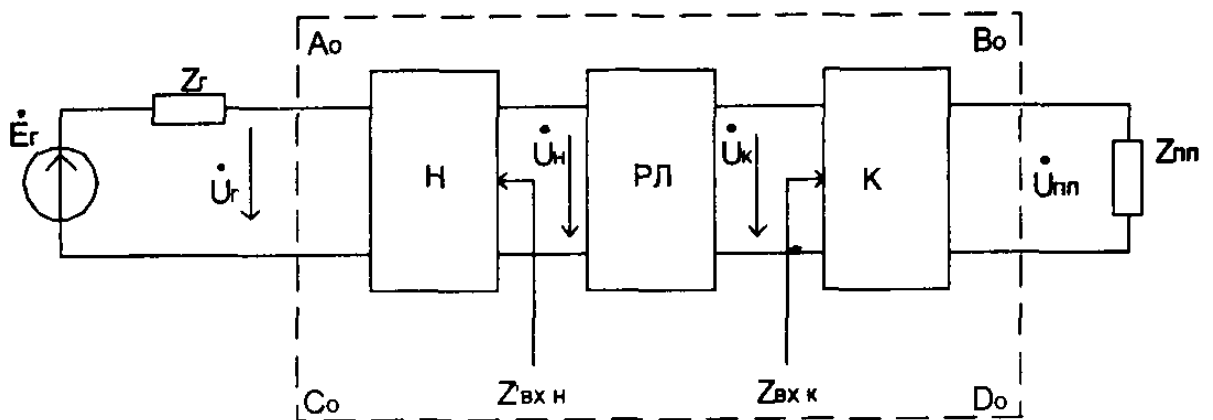


Рисунок 3.4 – Загальна схема заміщення рейкової лінії

Потім знаходяться параметри загальної матриці еквівалентного чотирьохполосника

$$\begin{pmatrix} A_0 & B_0 \\ C_0 & D_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A_{рл} & B_{рл} \\ C_{рл} & D_{рл} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Коефіцієнти чотирьохполосника РЛ визначаються з урахуванням найгірших умов для передачі сигналу, таких як мінімальний опір ізоляції та максимальний опір рейок. На ділянках з електротягою опір ізоляції

розглядається з урахуванням заземлення контактних опор. З відомими значеннями напруги і ШСР, а також струму спрацьовування колійного приймача, мінімальна напруга і струм джерела живлення знаходяться з виразів:

$$U_{\min} = A_0 U_{\text{пнсп}} + B_0 I_{\text{пнсп}}, \quad I_{\min} = C_0 U_{\text{пнсп}} + D_0 I_{\text{пнсп}} \quad (3.6)$$

З урахуванням коливань напруги в мережі живлення, номінальна напруга джерела $U = K_{\text{нс min}} U_{\min}$ де $K_{\text{нс min}}$ - коефіцієнт нестабільності мережі, що враховує допустиме зменшення напруги в порівнянні з номінальною. Для рейкових кіл змінного струму номінальну напругу мережі приймається рівним 230 В, мінімально допустимий - 197 В, максимальний - 245 В. Таким чином, $K_{\text{нс min}} = 230/197 = 1,17$, а $K_{\text{нс max}} = 245/230 = 1,07$.

Фактична напруга живлення U_{ϕ} визначається конструктивними особливостями джерела. У випадку, коли рейкове коло живиться від колійного трансформатора із секціонованими вихідними обмотками, фактична напруга вибирається не менше номінальної з урахуванням ступінчастого регулювання напруги (для трансформаторів ПОБС-3 ці градації становлять 5,5 В). У рейкових колах тональної частоти забезпечується плавне регулювання вихідної напруги генератора, фактична напруга встановлюється рівною номінальній (розрахунковій). Для розрахунку фактичного перевантаження колійного приймача необхідно визначити максимальну напругу на його вході $U_{\text{пн max}}$ при найкращих умовах для передачі сигналу. Для розрахунку фактичного перевантаження колійного приймача необхідно визначити максимальну напругу на його вході $U_{\text{пн max}}$ при найкращих умовах для передачі сигналу. При цьому напруга джерела $U_{\phi \text{ max}} = K_{\text{нс max}} U_{\phi \text{ max}}$, де $K_{\text{нс max}} = 1,07$ - коефіцієнт нестабільності мережі, що враховує допустиме збільшення напруги в порівнянні з номінальною. Параметри загальної матриці еквівалентного

чотириполюсника $A_0 < B_0, C_0, D_0$ повинні визначатися з урахуванням максимального опору ізоляції РЛ і мінімального опору рейок. Зазвичай з цієї метою беруть $A_{pl} = D_0 = 1, B_{pl} = Z_p \cdot l, C_{pl} = 0$, де l - довжина РЛ.

Тоді

$$U_{nn \max} = \frac{U_{\phi \max}}{A_0 + B_0 / Z_{nn}}, \quad (3.7)$$

де Z_{nn} - вхідний опір колійного приймача.

Максимальна вхідна напруга колійного приймача повинна залишатися в межах припустимого (паспортного) значення. Для оцінки функціонування приймача також розглядається максимальний коефіцієнт перевантаження.

$$K_{nep \max} = U_{nn \max} / U_{nncp}, \quad (3.8)$$

який може бути розрахований через опору передачі еквівалентного чотириполюсника при різних умовах розповсюдження сигналу. Повна потужність джерела живлення

$$S_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi}, \quad (3.9)$$

де I_{ϕ} - пов'язаний комплекс фактичного струму джерела живлення.

Розрахункова потужність має залишатися в межах гранично допустимого значення для вибраного джерела живлення. У випадку, якщо під час розрахунку виявляється, що рейкове коло не може працювати в нормальному режимі, здійснюється уточнення вихідних даних, таких як довжина рейкової лінії та мінімальний опір ізоляції. При необхідності коригуються параметри елементів апаратури. Остаточні результати розрахунку нормального режиму використовуються як основа для подальших розрахунків рейкового кола в інших режимах роботи.

У розрахунках нормального режиму рейкового кола не враховується наявність захисних елементів, оскільки їх опір для сигналів рейкового кола значно перевищує вхідний опір рейкової лінії та опір кінця рейкового кола.

Вихідні кола передавальних пристроїв АЛС також майже не впливають на передачу і прийом сигналів на частотах сигналів рейкового кола, тому вони не враховуються під час розрахунків нормального режиму.

У нормальному режимі рівень сигналу на вході приймача повинен відповідати рівню надійного спрацювання. Критичним для цього режиму є такий набір значень незалежних змінних, при якому утворюються найбільш складні умови для передачі сигналів по рейковій лінії, тобто тоді, коли загасання сигналу буде максимальним: $Z_{\max}, Y_{\max}, U_{\min}$.

Для нормального режиму поняття про критичну координату прямого сенсу не має, так як при вільному і справному РК на рейковій лінії немає ні шунта, ні пошкодженої рейки. У цьому случаї можна вважати, що для даного РК шунт і місце пошкодження рейки знаходяться поза межами рейкової лінії, тобто $0 > p > 1$.

Нормальний (регульовальний) режим відповідає стану рейкового кола, який не має рухомого складу. У разі безперервного живлення обмотки колійного реле повинна мати напругу, при якій якір надійно притягується до сердечника реле. При імпульсному (кодовому) живленні реле повинно притягувати якір і замикати фронтний контакт при кожному імпульсі струму, навіть в найнесприятливіших умовах.

Умови, які знижують струм в шляховому приймачнику, вважаються несприятливими для нормального режиму. Це включає в себе мінімальну напругу джерела живлення рейкового кола, оскільки зниження цієї напруги призводить до меншої напруги на затискачах реле; мінімальний опір ізоляції, який може збільшити витік струму через баласт і зменшити напругу на затискачах реле; та максимальний опір рейок, що викликає додатковий спад напруги в рейкових нитках і зменшення напруги на затискачах реле.

Якщо за цих умов забезпечено нормальну роботу колійного приймача, то в інших умовах ця робота буде ще більше гарантована. Таким чином, важливо враховувати вплив вхідного опору приймачного пристрою суміжного рейкового кола. На релейному і живильному кінцях рейкового

кола для досягнення необхідного входного опору в умовах їх роботи можуть встановлюватися додаткові резистори. R_d .

Незначна зміна входного струму приймальних пристроїв при зміні довжини кабелю в широких межах дозволяє робити розрахунок за еквівалентною схемою заміщення, представленою на Рисунку 2.5 при $R_d = R_{d \max}$.

На рис. 3.5 прийняті наступні позначення: N_1^{PK} - чотирьохполюсник рейкового кола завдовжки l ; N^{c3}_e , N^{c3}_p - чотирьохполюсники погоджую чого елементу відповідно на живлючому та релейному кінцях; $R_{вх}$ -вхідний опір приймальних пристроїв ($R_{вх} = 140 \text{ Ом}$); r , C , L - активний опір, місткість і індуктивність фільтру; $n = W_1 / W_2$ - коефіцієнт трансформації на виході фільтру рейкового кола ($n = 1,3$).

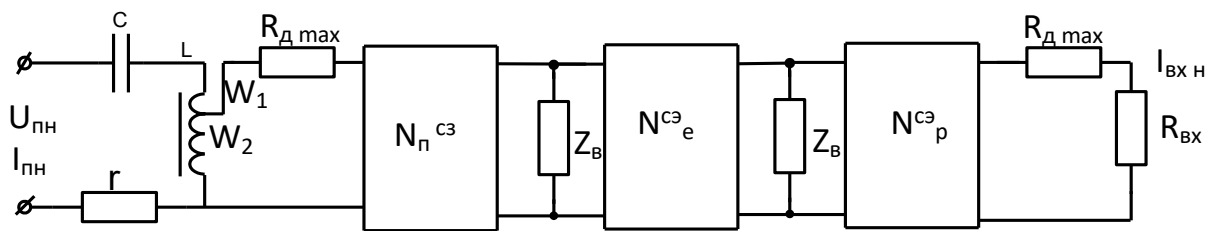


Рисунок 3.5 - Схема заміщення рейкового кола в нормальному режимі

В розрахунках нормального режиму можна виділити два випадки щодо напруги джерела: перший - коли напруга не визначена і може змінюватися в широких межах (це типово для РК змінного струму з колійними трансформаторами або параметричними перетворювачами частоти), і другий - коли напруга джерела задана (зазвичай в РК постійного струму, які живляться від одного акумулятора).

Теоретично виділяють два класи РК за трактом передачі з одноразовим і дворазовим використанням, і методики їх розрахунків відрізняються. РК змінного струму може бути представлений як з одноелементним, так і з двоелементним приймачем. Розрахунки нормального режиму РК ведуться за загальною схемою заміщення (див. рис. 3.2). При цьому схема заміщення для

РК з одноелементним приймачем відрізняється від схеми заміщення з двоелементним приймачем тільки схемою заміщення приймачів, підключеної до затискачів. Розглянемо спочатку методику розрахунку РК з одноелементним приймачем, а потім розглянемо особливості розрахунку РК з двоелементним приймачем.

Вихідними величинами для розрахунку РК з одноелементним приймачем є струм I_{np} і напруга U_{np} , при цьому зазвичай аргумент комплексу I_{np} приймається рівним нулю, а аргумент комплексу U_{np} дорівнюватиме аргументу комплексу вхідного опору приймача Z_{np} .

Для РК з фазочутливими приймачами (ФЧП), які мають два елементи, розрахунок нормального режиму виконується аналогічно розрахунку для РК з одноелементними нефазочутливими приймачами. При цьому визначаються номінальні значення напруги і струму спрацьовування, які взяті з паспорта реле, і враховуються за ідеальних фазових співвідношень.

Потім за даними попереднього розрахунку визначаємо кут відхилення вектору комплексу U від ідеального, який дорівнює куту розсогласування реле β_U в нормальному режимі:

$$\beta_U = \varphi_U - \lambda_{ид}$$

де φ_U - аргумент комплексу напруги джерела

$\lambda_{ид}$ - кут ідеальних фазових відношень

При розрахунку нормального режиму РК постійного струму, в яких напруга джерела задана, визначається опір обмежувача за формулою

$$R_0 = \frac{U_{\min} - U_n}{I_n} - r_{cn} \quad (3.10)$$

де U_{\min} - мінімальне значення напруги джерела постійного струму 1;

U_n, I_n - напруга до ток на початку рейкової лінії;

r_{cn} - опір з'єднувальних проводів і кабелю ка живильному кінці.

При використанні формул рівняння чотирьохполюсника слід враховувати, що для схеми заміщення

$$\begin{aligned} A_H &= 1, B_H = R_0 + r_{cn}, C_H = 0 \\ A_K &= D_K = 1, B_K = r_{cp}, C_K = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

У зв'язку з тим що напруга джерела в РК постійного струму задана, опір початку $R_H = R_0 + r_{cn}$ обчислюється за формулою вказаною вище, виходить, особливо в коротких РК, більше мінімально допустимого значення $R_{H \min} - 1,5$ Ом за умовами всіх основних режимів. Завдяки цьому з'являється можливість поставити опором початку $R_H = 1,5$ Ом і перерахувати опір кінця з тим, щоб в цілях економії кабелю збільшити опір з'єднувальних проводів на цьому кінці.

Критерієм нормального режиму роботи є коефіцієнт перевантаження реле, залежність якого від опору рейок приведено на рис. 3.6.

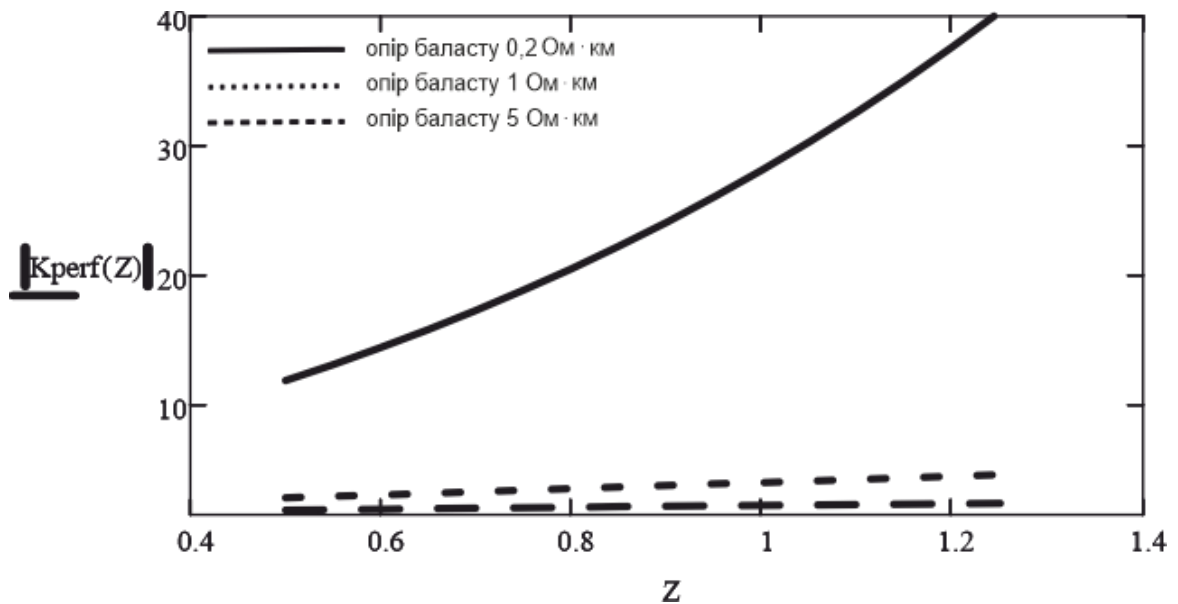


Рисунок 3.6 – залежність коефіцієнту перевантаження від опору рейок при різних опорах ізоляції баласту

3.6 Шунтовий режим роботи рейкового кола

Шунтовий режим виникає при проходженні рухомого складу по рейковому колу. При безперервному живленні колійне реле відпускає якір, а

при імпульсному (кодовому) живленні відключається від реагування на імпульси струму в умовах найбільшого напруження джерела живлення, найменшого опору рейок та найбільшого опору ізоляції, тобто при відсутності витoku струму через шпали та баласт.

Якщо умови для шунтового режиму виконуються, то він працюватиме надійно при будь-яких інших умовах. При в'їзді рухомого складу на рейкове коло струм у шляховому приймачі зменшується, що викликає шунтовий ефект. Цей процес зменшення струму в шляховому приймачі відомий як шунтовий ефект, і враховує опір колісної пари з урахуванням перехідного опору між колесами та рейками-опором поїзного шунта.

Опір поїзного шунта є змінною величиною, яка залежить від числа колісних пар на рейковому колі, тиску на осі, швидкості руху поїзда, стану поверхні головок рейок та бандажів коліс. Чим менший опір поїзного шунта, тим ефективніше працює шунтовий ефект, і навпаки. Максимальний припустимий опір поїзного шунта визначається як 0,06 Ом, і його вважають нормативним. Цей опір більший за опір однієї колісної пари в найневигодніших умовах. При використанні нормативного поїзного шунта 0,06 Ом на рейках будь-якої частини рейкового кола колійне реле відпускає якір (при безперервному живленні рейкового кола), а в імпульсному або кодовому рейковому колі колійне реле не притягує якір під час імпульсів струму. Якщо забезпечено шунтовий ефект при використанні нормативного поїзного шунта на рейковому колі, то при шунтуванні рейкового кола колісними парами рухомого складу шунтовий ефект буде забезпечений з великим запасом.

Шунтовий ефект кількісно оцінюється за допомогою шунтової чутливості, яка визначається за найбільшим опором, включення якого між рейками призводить до відпускання або непритягання якоря колійного реле. Нормативна шунтова чутливість становить 0,06 Ом, відповідно до максимального опору поїзного шунта. Порівнюють цю нормативну чутливість з конкретною шунтовою чутливістю кожного рейкового кола.

Якщо шунтова чутливість конкретного рейкового кола перевищує нормативну, то таке рейкове коло гарантовано забезпечить шунтовий ефект і, отже, безпеку руху поїздів.

Під час руху поїзда по рейковому колу колійне реле повинно відпускати свій якір. Хоча струм продовжує протікати через обмотку реле, його амплітуда значно зменшується через дію шунта, який представлений колісними парами з опором, значно меншим, ніж опір обмотки колійного реле. Таким чином, колійне реле відпускає якір не через відключення джерела живлення, а завдяки накладенню шунта і зменшенню струму через обмотку реле нижче рівня струму, при якому відпускається якір реле. У цьому випадку надійне відпускання якоря реле залежатиме від параметрів колійного реле. З двох шляхових реле з однаковими струмами тягача якоря, те, у якого якір відпускається при більшому струмі, фіксує зайняття рейкового кола більш надійно.

Процес шунтування рейкового кола при імпульсному або кодовому живленні відбувається інакше, ніж при безперервному живленні. У випадку безперервного живлення при шунтуванні рейкового кола колійне реле відпускає якір і замикає тиловий контакт, в той час як в імпульсному або кодовому рейковому колі якір не повинен перемикатися в робочий стан. Під час кожного імпульсу вільного рейкового кола струм протікає не менше робочого рівня, і поляризований якір перемикається, замикаючи фронтний контакт. Для шунтування рейкового кола з імпульсним живленням необхідно, щоб струм в обмотках реле зменшився не менше, ніж на 10% робочого струму. Отже, рейкове коло з імпульсним живленням буде шунтуватися при більш високому опорі поїзного шунта, ніж при безперервному живленні, що означає більшу чутливість до шунтового ефекту, ніж у рейкового кола з безперервним живленням. У зв'язку з цим рейкові кола з імпульсним живленням мають значно більшу довжину.

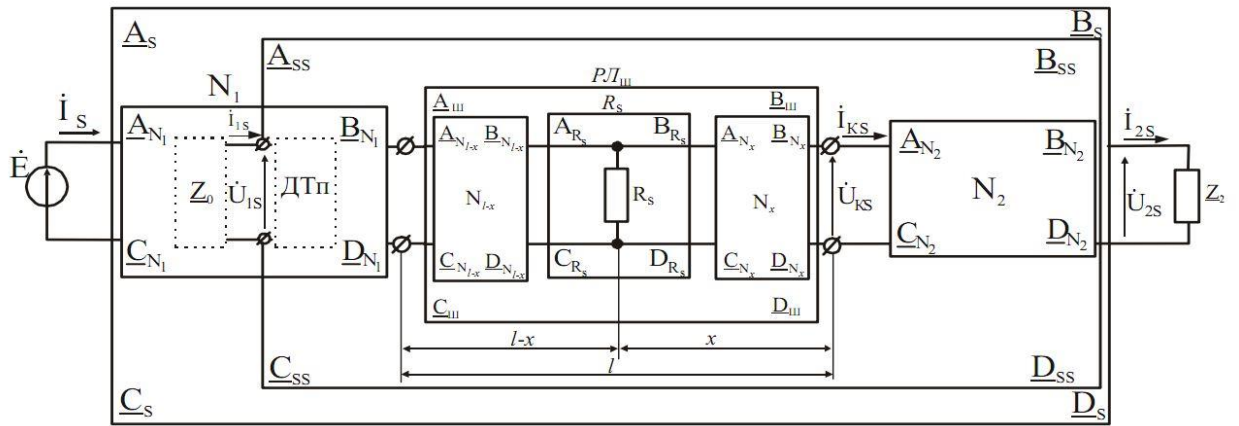


Рисунок 3.7 – Схема замощення рейкового кола при шунтовому режимі

На Рисунку 3.7 представлена узагальнена схема замощення РК при шунтовому режимі.

Так як на шунтовий режим роботи рейкового кола впливає не тільки t° , χ , $R_{из}$, ξ , а й дискретний вплив у виді шунта з кінцевим опором R_S , то узагальнений чотириполюсник рейкової лінії $PЛ_{III}$ визначимо як

$$[A]_m = \begin{bmatrix} A_{N_{l-x}} & B_{N_{l-x}} \\ C_{N_{l-x}} & D_{N_{l-x}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_S} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{N_x} & B_{N_x} \\ C_{N_x} & D_{N_x} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$A_{III} = (A_{N_{l-x}} + B_{N_{l-x}}/R_S) \cdot A_{N_x} + B_{N_{l-x}} \cdot C_{N_x} \quad (3.13)$$

$$B_{III} = (A_{N_{l-x}} + B_{N_{l-x}}/R_S) \cdot B_{N_x} + B_{N_{l-x}} \cdot D_{N_x} \quad (3.14)$$

$$C_{III} = (C_{N_{l-x}} + D_{N_{l-x}}/R_S) \cdot A_{N_x} + D_{N_{l-x}} \cdot C_{N_x} \quad (3.15)$$

$$D_{III} = (C_{N_{l-x}} + D_{N_{l-x}}/R_S) \cdot B_{N_x} + D_{N_{l-x}} \cdot D_{N_x} \quad (3.16)$$

де $A_{N_{l-x}}$, $B_{N_{l-x}}$, $C_{N_{l-x}}$, $D_{N_{l-x}}$ коефіцієнти чотириполюсника N_{l-x} рейкової лінії довжиною $l - x$ км від її початку до місцезнаходження поїзного шунта R_S

$$A_{N_{l-x}} = \text{ch}((1 - x) \cdot \gamma) \quad (3.17)$$

$$B_{N_{l-x}} = z_b \cdot \text{sh}((1 - x) \cdot \gamma) \quad (3.18)$$

$$C_{N_{l-x}} = \frac{1}{z_b} \cdot \text{sh}((1 - x) \cdot \gamma) \quad (3.19)$$

$$D_{N_{l-x}} = A_{N_{l-x}} = \text{ch}((1 - x) \cdot \gamma) \quad (3.20)$$

$A_{N_x}, B_{N_x}, C_{N_x}, D_{N_x}$ - коефіцієнти чотирьохполосника N_x рейкової лінії, довжиною x км від місцезнаходження поїзного шунта R_S до кінця рейкової лінії.

$$A_{N_x} = \text{ch}(x \cdot \gamma) \quad (3.21)$$

$$B_{N_x} = z_b \cdot \text{sh}(x \cdot \gamma) \quad (3.22)$$

$$C_{N_x} = \frac{1}{z_b} \cdot \text{sh}(x \cdot \gamma) \quad (3.23)$$

$$D_{N_x} = A_{N_x} = \text{ch}(x \cdot \gamma) \quad (3.24)$$

Таким чином, коефіцієнти чотирьохполосника з урахуванням попередніх формул матимуть такий вигляд:

$$A_{\text{ш}} = (\text{ch}((1-x) \cdot \gamma) + z_b \cdot \text{sh}(x \cdot \gamma)/R_S) \cdot \text{ch}(x \cdot \gamma) + z_b \cdot \text{sh}((1-x) \cdot \gamma) \cdot \frac{1}{z_b} \cdot \text{sh}(x \cdot \gamma) \quad (3.25)$$

$$B_{\text{ш}} = (\text{ch}((1-x) \cdot \gamma) + z_b \cdot \text{sh}((1-x) \cdot \gamma)/R_S) z_b \cdot \text{sh}(x \cdot \gamma) + z_b \cdot \text{sh}((1-x) \cdot \gamma) \cdot \text{ch}(x \cdot \gamma) \quad (3.26)$$

$$C_{\text{ш}} = \left(\frac{1}{z_b} \cdot \text{sh}((1-x) \cdot \gamma) + \text{ch}((1-x) \cdot \gamma)/R_S\right) \cdot \text{ch}(x \cdot \gamma) + \text{ch}((1-x) \cdot \gamma) \cdot \frac{1}{z_b} \cdot \text{sh}(x \cdot \gamma) \quad (3.27)$$

$$D_{\text{ш}} = (\text{ch}((1-x) \cdot \gamma) + z_b \cdot \text{sh}((1-x) \cdot \gamma)/R_S) \cdot z_b \cdot \text{sh}(x \cdot \gamma) + \text{ch}((1-x) \cdot \gamma) \cdot \text{ch}(x \cdot \gamma) \quad (3.28)$$

Матриця коефіцієнтів чотирьох $[A_S]$ полюсника всього РК при шунтовому режимі

$$[A]_S = \begin{Bmatrix} A_S & B_S \\ C & D_S \end{Bmatrix} = \|N_1\|^* \|P_{\text{ш}}\|^* \|N_2\| \quad (3.18)$$

$$A_S = (A_{N_1} \cdot A_{\text{ш}} + B_{N_1} \cdot C_{\text{ш}}) \cdot A_{N_2} + (A_{N_1} \cdot B_{\text{ш}} + B_{N_1} \cdot D_{\text{ш}}) \cdot C_{N_2} \quad (3.29)$$

$$B_S = (A_{N_1} \cdot A_{\text{ш}} + B_{N_1} \cdot C_{\text{ш}}) \cdot B_{N_2} + (A_{N_1} \cdot B_{\text{ш}} + B_{N_1} \cdot D_{\text{ш}}) \cdot D_{N_2} \quad (3.30)$$

$$C_S = (C_{N_1} \cdot A_{\text{ш}} + D_{N_1} \cdot C_{\text{ш}}) \cdot A_{N_2} + (C_{N_1} \cdot B_{\text{ш}} + D_{N_1} \cdot D_{\text{ш}}) \cdot C_{N_2} \quad (3.31)$$

$$D_S = (C_{N_1} \cdot A_{\text{ш}} + D_{N_1} \cdot C_{\text{ш}}) \cdot B_{N_2} + (C_{N_1} \cdot B_{\text{ш}} + D_{N_1} \cdot D_{\text{ш}}) \cdot D_{N_2} \quad (3.32)$$

Для схеми рис. 3.1. справедливі співвідношення

$$\begin{cases} \dot{E} = \dot{U}_{2S} \cdot A_S + \dot{I}_{2S} \cdot B_S \\ \dot{I}_S = \dot{U}_{2S} \cdot C_S + \dot{I}_{2S} \cdot D_S \end{cases} \quad (3.33)$$

При подальших розрахунках система рівнянь прийме наступний вид

$$\dot{U}_{2S} = |U_{2S}|e^{-j\varphi_{U_{2S}}} = \dot{E} \cdot \frac{Z_2}{A_S \cdot Z_2 + B_S} \quad (3.34)$$

Зв'язок напруги \dot{U}_{1S} і струму \dot{I}_{1S} на вході чотириполюсника A_{SS} з напругою \dot{U}_{2S} і струмом \dot{I}_{2S} на його виході описується системою рівнянь вида

$$\begin{cases} \dot{U}_{1S} = \dot{U}_{2S} \cdot A_{SS} + \dot{I}_{2S} \cdot B_{SS} \\ \dot{I}_{1S} = \dot{U}_{2S} \cdot C_{SS} + \dot{I}_{2S} \cdot D_{SS} \end{cases} \quad (3.35)$$

де

$$\begin{cases} A_{SS} = (A_{ш} \cdot A_{N_2} + B_{ш} \cdot C_{N_2}) \cdot A_{дп} + (C_{ш} \cdot A_{N_2} + D_{ш} \cdot C_{N_2}) \cdot B_{дп} \\ B_{SS} = (A_{ш} \cdot B_{N_2} + B_{ш} \cdot D_{N_2}) \cdot A_{дп} + (C_{ш} \cdot B_{N_2} + D_{ш} \cdot D_{N_2}) \cdot B_{дп} \\ C_{SS} = (A_{ш} \cdot A_{N_2} + B_{ш} \cdot C_{N_2}) \cdot C_{дп} + (C_{ш} \cdot A_{N_2} + D_{ш} \cdot C_{N_2}) \cdot D_{дп} \\ D_{SS} = (A_{ш} \cdot B_{N_2} + B_{ш} \cdot D_{N_2}) \cdot C_{дп} + (C_{ш} \cdot B_{N_2} + D_{ш} \cdot D_{N_2}) \cdot D_{дп} \end{cases} \quad (3.36)$$

Рівняння (3.34) та (3.35) представляють собою математичні моделі інформативних характеристик шунтового режиму.

Критерієм шунтового режиму роботи є коефіцієнт шунтової чутливості реле, залежність якого від опору рейок приведено на рис. 3.8. На рис. 3.8 приведено окремо залежність коефіцієнт шунтової чутливості на релейному та на живлячому кінцях для трьох різних значень опору ізоляції баласту: 0,2; 1; 5 Ом км.

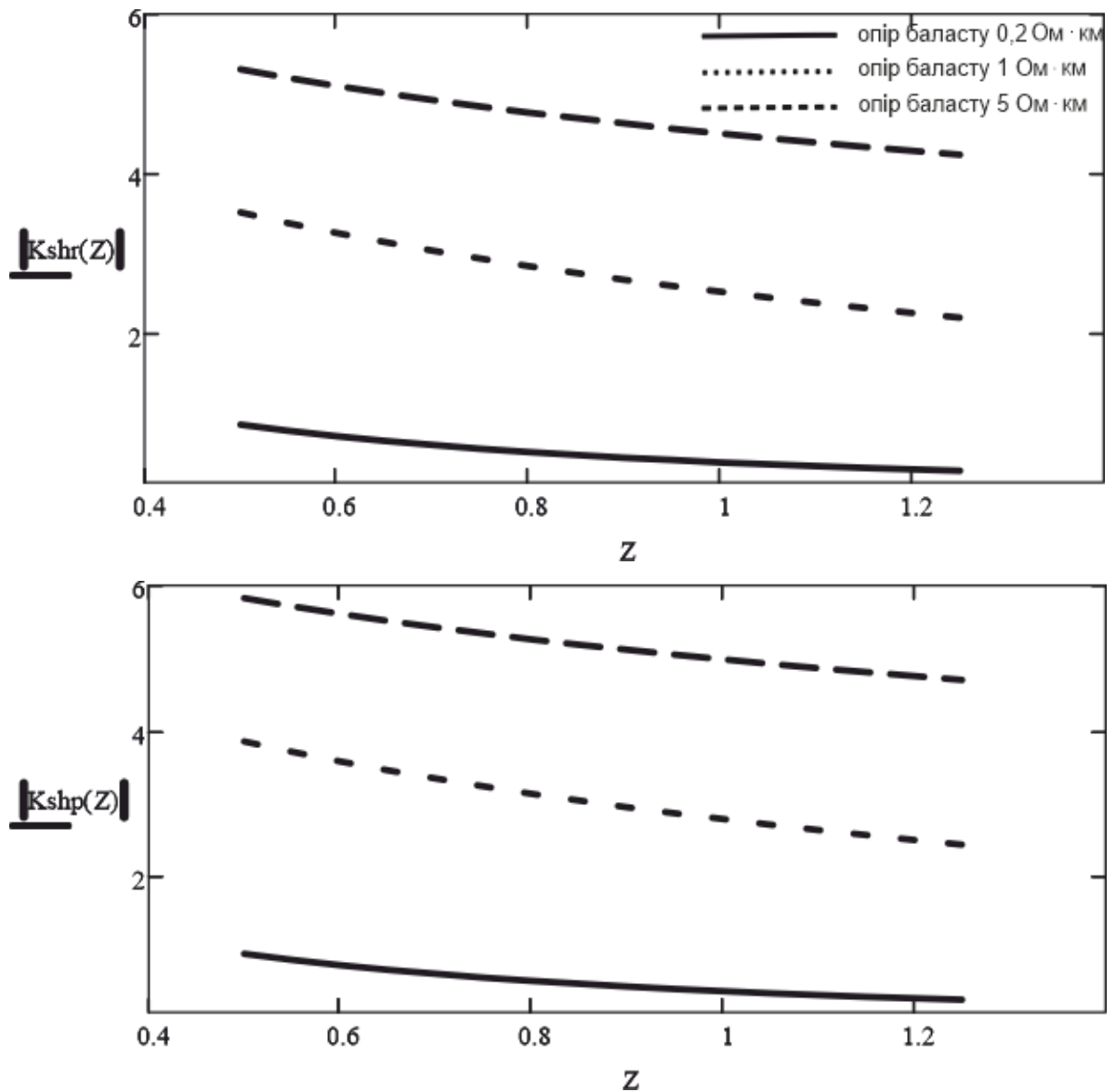


Рисунок 3.8 – залежність коефіцієнту шунтової чутливості на релейному та на живлячому кінцях від опору рейок при різних опорах ізоляції баласту

3.7. Контрольний режим роботи рейкового кола

Контрольний режим або режим пошкодженого рейки відповідає порушення цілості рейкової нитки (лопнув або вилучений рейок). У цьому режимі через обмотку реле продовжує протікати струм, замикається через опір ізоляції (баласту).

Незважаючи на зменшення цього струму, він може виявитися достатнім для утримання якоря колійного реле або продовження імпульсної роботи реле, в результаті чого на світлофорі залишиться горіти дозволяє вогонь і

місце пошкодження шляху не буде огорожено заборонним показанням сигналу.

В рейкових колах з безперервним живленням слід розглядати контрольний режим при лопнула рейці (злам рейки) і контрольний режим при вилученому рейці.

Злам рейки зазвичай відбувається при вступі поїзда на рейкове коло і її шунтування, коли якір колійного реле відпущений. В цьому випадку, якщо рейкове коло звільниться, реле не повинно притягувати якір. Вилучення рейки зазвичай відбувається при вільному від рухомого складу стані рейкового кола. При цьому колійне реле має відпустити якір. В імпульсних і кодових рейкових колах випадки зламу та вилучення рейки розглядають як рівноцінні.

Несприятливими умовами контрольного режиму будуть такі, які призводять до збільшення струму в колійному реле: найбільша напруга джерела живлення і найменший опір рейок, критичне опір ізоляції. На відміну від шунтового режиму несприятливі умови створюються не в разі найбільшого опору ізоляції, а при деякому, так званому критичному його значенні. Це пояснюється тим, що при нескінченному опорі ізоляції в разі лопнув або вилученого рейки струм у реле знижується до нуля і реле відпускає якір. Якщо опір ізоляції буде найменшим, що відповідає найгіршим умовам нормального режиму, то струм у реле буде також найменшим, і в разі вилучення або зламу рейки незначне зниження струму в реле призводить до відпускання якоря або припинення його роботи. Отже, несприятливі умови створюються при деякому критичному значенні опору ізоляції, коли при пошкодженні рейки ланцюг струму зберігається (за рахунок протікання струму через баласт) і в той же час опір ізоляції досить велике, що зменшує витік струму через баласт і збільшує струм в реле.

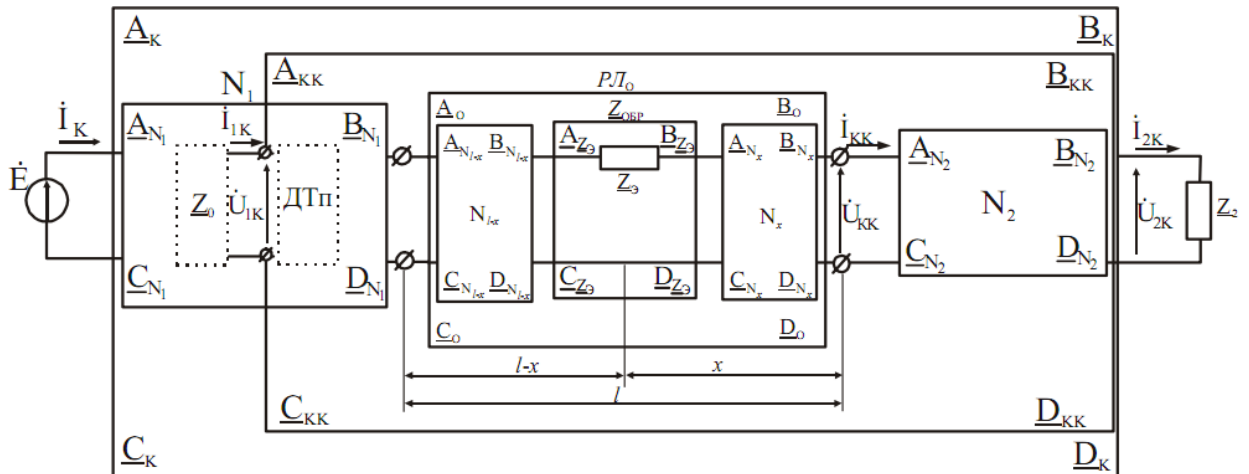


Рисунок 3.9 – Схема заміщення рейкового кола при контрольному режимі

Розрив рейкової нитки еквівалентний включенню в місці обриву опору Z_3 , величина якого визначається виразом

$$Z_3 = E_X Z_B \sqrt{1 + 2\rho} (cth\gamma_1 l_1 + cth\gamma_1 l_2) \quad (3.27)$$

де l_1 і l_2 участки рейкової лінії зліва і справа від місця обрива і дорівнюють відповідно, $l - x$ та x

E_X - постійна земляного тракту, що залежить від частоти сигнального струму;

$\gamma_1 = \frac{E\gamma}{\sqrt{1+2\rho}}$ - коефіцієнт розповсюдження хвилі земляного тракту рейкової лінії;

γ - коефіцієнт розповсюдження сигналу по лінії;

Z_B - хвильовий опір

ρ - коефіцієнт поверхневої провідності, що характеризує відношення між складовими опору ізоляції.

Так як на РК, при контрольному режимі роботи, впливає дискретне значення у вигляді зламу рейкової нитки з кінцевим опором Z_e , то узагальнений чотириполюсник рейкової лінії PL_0 визначимо як

$$[A]_0 = \begin{bmatrix} A_{N_{l-x}} & B_{N_{l-x}} \\ C_{N_{l-x}} & D_{N_{l-x}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & Z_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{N_x} & B_{N_x} \\ C_{N_x} & D_{N_x} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$A_0 = A_{N_{l-x}} \cdot A_{N_x} + (A_{N_{l-x}} \cdot Z_3 + B_{N_{l-x}}) \cdot C_{N_x} \quad (3.29)$$

$$B_0 = A_{N_{l-x}} \cdot B_{N_x} + (A_{N_{l-x}} \cdot Z_3 + B_{N_{l-x}}) \cdot D_{N_x} \quad (3.30)$$

$$C_0 = C_{N_{l-x}} \cdot A_{N_x} + (C_{N_{l-x}} \cdot Z_3 + D_{N_{l-x}}) \cdot C_{N_x} \quad (3.31)$$

$$D_0 = C_{N_{l-x}} \cdot B_{N_x} + (C_{N_{l-x}} \cdot Z_3 + D_{N_{l-x}}) \cdot D_{N_x} \quad (3.32)$$

де $A_{N_{l-x}}, B_{N_{l-x}}, C_{N_{l-x}}, D_{N_{l-x}}$ – коефіцієнти чотирьохполосника N_{l-x} рейкової лінії, довжиною $(l - x)$ км від її початку до місця злому рейки Z_3 ,
 $A_{N_x}, B_{N_x}, C_{N_x}, D_{N_x}$ – коефіцієнти чотирьохполосника N_x рейкової лінії, довжиною x км від місця злому рейки Z_3 до кінця рейкової лінії.

Коефіцієнти узагальненого чотирьохполосника приймуть вид

$$A_0 = \text{ch}((1-x) \cdot \gamma) \cdot \text{ch}(x \cdot \gamma) + (\text{ch}((1-x) \cdot \gamma) \cdot Z_3 + z_b \cdot \text{sh}((1-x) \cdot \gamma)) \cdot \frac{1}{z_b} \cdot \text{sh}(x \cdot \gamma) \quad (3.33)$$

$$B_0 = \text{ch}((1-x) \cdot \gamma) \cdot z_b \cdot \text{sh}(x \cdot \gamma) + (\text{ch}((1-x) \cdot \gamma) \cdot Z_3 + z_b \cdot \text{sh}((1-x) \cdot \gamma)) \cdot \text{ch}(x \cdot \gamma) \quad (3.34)$$

$$C_0 = \frac{1}{z_b} \cdot \text{sh}((1-x) \cdot \gamma) \cdot \text{ch}(x \cdot \gamma) + (\frac{1}{z_b} \cdot \text{sh}((1-x) \cdot \gamma) \cdot Z_3 + \text{ch}((1-x) \cdot \gamma)) \cdot \frac{1}{z_b} \cdot \text{sh}(x \cdot \gamma) \quad (3.35)$$

$$D_0 = \frac{1}{z_b} \cdot \text{sh}((1-x) \cdot \gamma) \cdot z_b \cdot \text{sh}(x \cdot \gamma) + (\frac{1}{z_b} \cdot \text{sh}((1-x) \cdot \gamma) \cdot Z_3 + \text{ch}((1-x) \cdot \gamma)) \cdot \text{ch}(x \cdot \gamma) \quad (3.36)$$

Матриця коефіцієнтів узагальненого чотирьохполосника A_k для контрольного режиму має вид

$$\|A_k\| = \left\| \begin{matrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{matrix} \right\| = \|N_1\| \times \|ПЛ_0\| \times \|N_2\| \quad (3.36)$$

$$A_k = (A_{N_1} \cdot A_0 + B_{N_1} \cdot C_0) \cdot A_{N_2} + (A_{N_1} \cdot B_0 + B_{N_1} \cdot D_0) \cdot C_{N_2} \quad (3.37)$$

$$B_k = (A_{N_1} \cdot A_0 + B_{N_1} \cdot C_0) \cdot B_{N_2} + (A_{N_1} \cdot B_0 + B_{N_1} \cdot D_0) \cdot D_{N_2} \quad (3.38)$$

$$C_k = (C_{N_1} \cdot A_0 + D_{N_1} \cdot C_0) \cdot A_{N_2} + (C_{N_1} \cdot B_0 + D_{N_1} \cdot D_0) \cdot C_{N_2} \quad (3.39)$$

$$D_k = (C_{N_1} \cdot A_0 + D_{N_1} \cdot C_0) \cdot B_{N_2} + (C_{N_1} \cdot B_0 + D_{N_1} \cdot D_0) \cdot D_{N_2} \quad (3.40)$$

для схеми (3.2) наведено співвідношення

$$\begin{cases} \dot{E} = \dot{U}_{2k} \cdot A_k + \dot{I}_{2k} \cdot B_k \\ \dot{I}_S = \dot{U}_{2k} \cdot C_k + \dot{I}_{2k} \cdot D_k \end{cases} \quad (3.41)$$

При подальших розрахунках система рівнянь прийме наступний вид

$$\dot{U}_{2k} = |U_{2k}|e^{-j\varphi_{U_{2k}}} = \dot{E} \cdot \frac{Z_2}{A_k \cdot Z_2 + B_k} \quad (3.42)$$

Зв'язок напруги \dot{U}_{1k} і струму \dot{I}_{1k} на вході чотириполосника A_{kk} з напругою \dot{U}_{2k} і струмом \dot{I}_{2k} на його виході описується системою рівнянь виду:

$$\begin{cases} \dot{U}_{1k} = \dot{U}_{2k} \cdot A_{kk} + \dot{I}_{2k} \cdot B_{kk} \\ \dot{I}_{1k} = \dot{U}_{2k} \cdot C_{kk} + \dot{I}_{2k} \cdot D_{kk} \end{cases} \quad (3.43)$$

де

$$\begin{cases} A_{kk} = (A_0 \cdot A_{N_2} + B_0 \cdot C_{N_2}) \cdot A_{дп} + (C_0 \cdot A_{N_2} + D_0 \cdot C_{N_2}) \cdot B_{дп} \\ B_{kk} = (A_0 \cdot B_{N_2} + B_0 \cdot D_{N_2}) \cdot A_{дп} + (C_0 \cdot B_{N_2} + D_0 \cdot D_{N_2}) \cdot B_{дп} \\ C_{kk} = (A_0 \cdot A_{N_2} + B_0 \cdot C_{N_2}) \cdot C_{дп} + (C_0 \cdot A_{N_2} + D_0 \cdot C_{N_2}) \cdot D_{дп} \\ D_{kk} = (A_0 \cdot B_{N_2} + B_0 \cdot D_{N_2}) \cdot C_{дп} + (C_0 \cdot B_{N_2} + D_0 \cdot D_{N_2}) \cdot D_{дп} \end{cases} \quad (3.44)$$

Рівняння (3.42) (3.43) являються математичними моделями інформативних при знаків контрольного режиму.

Критерієм контрольного режиму роботи є коефіцієнт чутливості до пошкодження рейки, залежність якого від опору рейок приведено на рис. 3.10. для трьох різних значень опору ізоляції баласту: 0,2; 1; 5 Ом км.

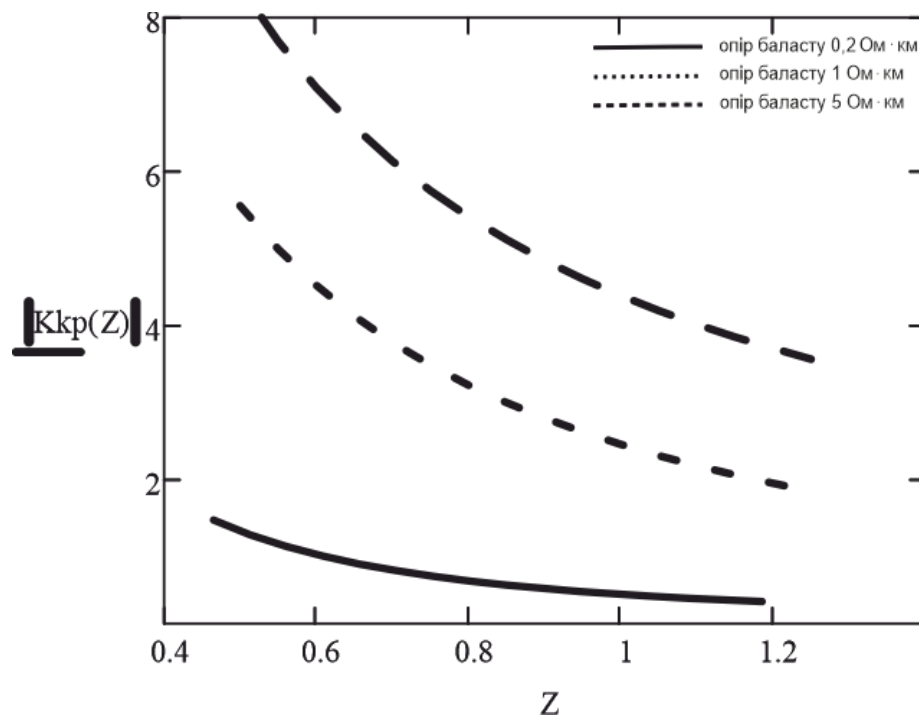


Рисунок 3.10 – залежність коефіцієнту чутливості до пошкодження рейки від опору рейок при різних опорах ізоляції баласту

3.8. Режим АЛСН

Режим АЛС відповідає вступу поїзда на вхідний кінець рейкового кола. В цьому режимі струм в рейках під прийомними котушками локомотива повинен бути не менше розрахункового, необхідного для надійної роботи приймальних пристроїв АЛС на локомотиві. Мінімальний розрахунковий струм повинен бути не менше 1,2 А при автономній тязі, 2 А - при електротязі постійного струму і частоті сигнального струму 50 Гц, 1,4 А-при електротязі змінного струму і сигнальному струмі частотою 25 або 75 Гц. Вимоги цього режиму співпадають з вимогами нормального режиму, так як в режимі АЛС необхідно забезпечити заданий струм на релейному кінці в найнесприятливіших умовах. Тому несприятливі умови режиму АЛС збігаються з несприятливими умовами нормального режиму - мінімальна напруга джерела живлення, максимальний опір рейок і мінімальний опір ізоляції.

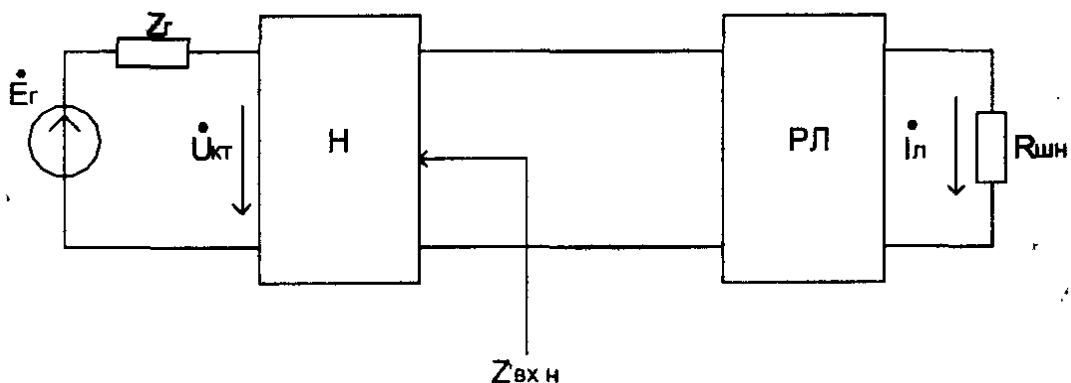


Рисунок 3.11 – Схема заміщення при режимі АЛСН

Критерієм режиму АЛС є коефіцієнт, що показує у скільки разів струм АЛС більше від мінімального нормативного. Залежність цього коефіцієнту від опору рейок приведено на рис. 3.11. для трьох різних значень опору ізоляції баласту: 0,2; 1; 5 Ом км.

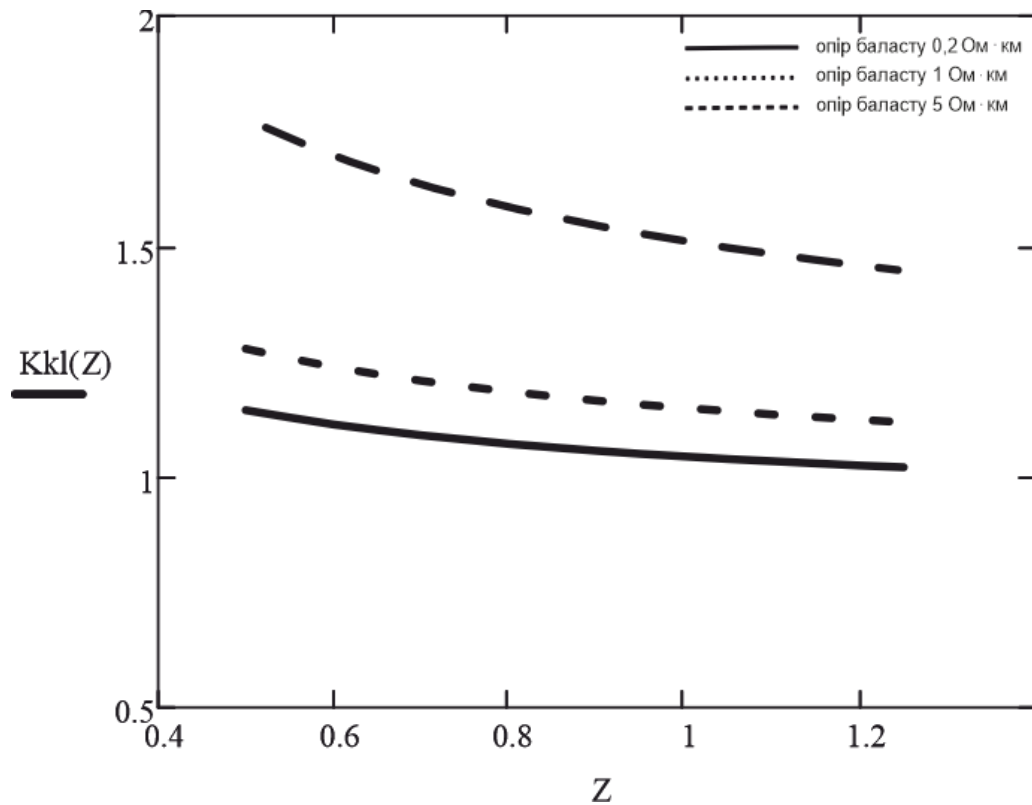


Рисунок 3.11 – залежність коефіцієнту чутливості до пошкодження рейки від опору рейок при різних опорах ізоляції баласту

3.9. Режим короткого замикання

Під режимом короткого замикання (к.з.) мається на увазі режим роботи джерела(сигнального або кодового струму) при розташуванні шунта потягу в точках підключення цього джерела до РЛ. При цьому опір шунта можна приймати рівним нулю, оскільки за найгірших умов РК повністю зайнята рухомим складом.

Режим короткого замикання відповідає моменту шунтування живильного кінця рейкового кола колісними парами рухомого складу. В цьому режимі потрібно, щоб потужність короткого замикання при найнесприятливіших умовах не перевищувала допустиму номінальну потужність джерела живлення. Несприятливі умови для даного режиму будуть при найбільшій напрузі джерела живлення. Величини опору рейок і опору ізоляції впливу на режим короткого замикання не надають.

Критеріями режиму к.з. є струм і потужність генератора, що розраховуються при його максимальній вихідній напрузі. Зазвичай струм і потужність к.з. більші, ніж в нормальному режимі. Проте в схемах РК з ємнісним обмежувачем таке співвідношення може не дотримуватися.

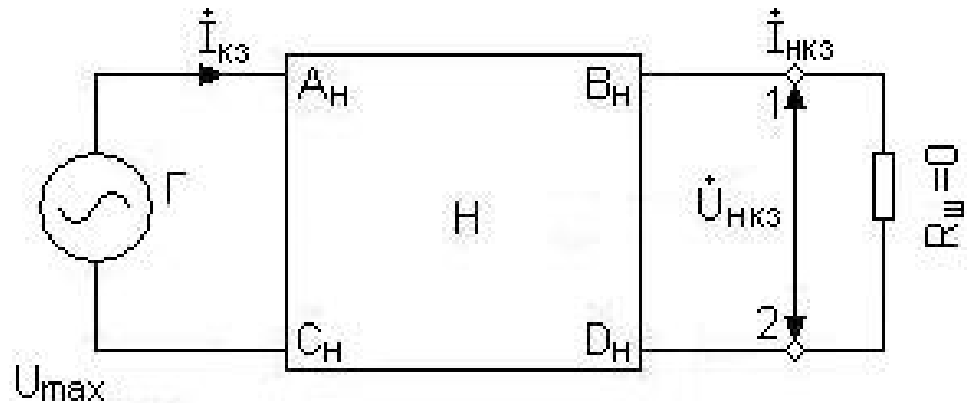


Рисунок 3.12 – Схема заміщення рейкового кола в режимі К.З.

Виходячи з того, що вхідний опір чотирьохполюсника Н в режимі К.З.

$$Z_{\text{вхКЗ}} = B_H / D_H,$$

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{КЗ}} &= \frac{U_{\text{max}}}{B_H / D_H} \\ S_{\text{КЗ}} &= \frac{U_{\text{max}}^2}{B_H / D_H} \end{aligned} \right\}$$

Отримані значення не повинні перевищувати гранично допустимих для даного джерела.

Критерієм режиму короткого замикання є потужність, яку повинно витримати джерело живлення при накладанні шунта на живлячому кінці. В результаті розрахунків отримаємо потужність короткого замикання $S_{\text{КЗ}}$, залежність якої від опору рейок приведено на рис. 3.13. для трьох різних значень опору ізоляції баласту: 0,2; 1; 5 Ом км.

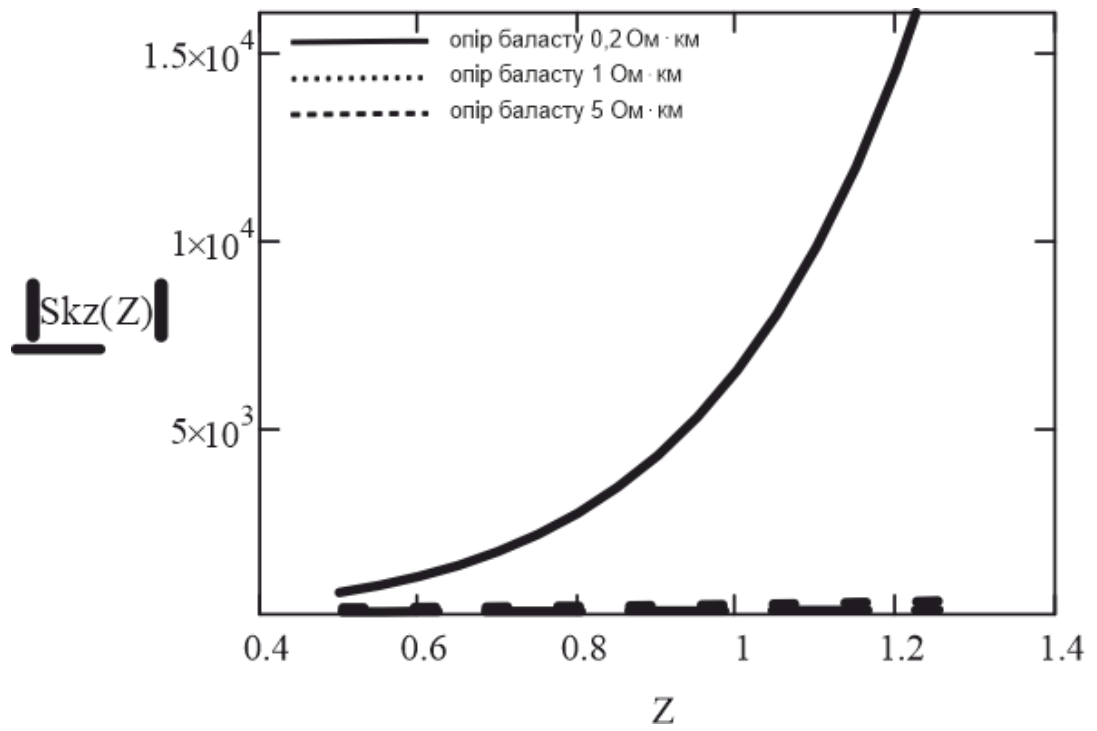


Рисунок 3.13 – залежність потужність короткого замикання від опору рейок при різних опорах ізоляції баласту

ВИСНОВКИ

Метою роботи було оцінити кондуктивний вплив зворотного тягового струму на режими роботи рейкових кіл.

Виконано аналіз електромагнітного впливу електрорухомого складу на роботу рейкових кіл. Встановлено, що кондуктивний вплив (гальванічний зв'язок), який виникає за рахунок протікання зворотного тягового струму по рейковій лінії, є найбільш не безпечнішим з точки зору нормального функціонування рейкових кіл. Рівень впливу обумовлюється кількістю локомотивів у фідерній зоні, рівнем асиметрії рейкової лінії та її ізоляцією щодо землі.

Максимальні струми завад в рейкових колах спостерігаються на частотах 25, 420, 480, 580, 780, 4545, 5000 Гц і в багатьох випадках амплітуди гармонік перевищують граничні значення. При цьому амплітуда гармонік значно збільшується при збільшенні тягового струму, тобто при прискоренні руху електровозом з асинхронним тяговим двигуном і ШІМ.

В роботі виконано розрахунки режимів роботи рейкових кіл в умовах впливу зворотного тягового струму на опір рейкової лінії. В результаті дослідження виявлено, що великі рівні тягового струму в рейках погіршують умови виконання режимів роботи рейкових кіл.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Шаманов, В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики: учебное пособие [Текст] / В. И. Шаманов – М.: Маршрут, 2013 – 244 с.
2. Кириленко, А. Г. Электрические рельсовые цепи: Учебное пособие [Текст] / А. Г. Кириленко, Н. А. Пельменева. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006. – 94 с.
3. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник [Текст] / В. С. Аркатов, А. И. Баженов, Н. Ф. Котляренко – М.: Транспорт, 1992. – 384 с.
4. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость: Учебник для вузов [Текст] / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
5. Шаманов, В. И. Помехи и помехоустойчивость автоматической локомотивной сигнализации: Учебное пособие [Текст] / В. И. Шаманов – Иркутск: Изд-во ИРГУПС, 2005. – 236с.
6. Завгородний, А. В. Методические аспекты определения уровней опарного и мешающего влияния подвижного состава на работу рельсовых цепей [Текст] / А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк, В. Г. Сыченко // Наука і прогрес транспорту. Вісник дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – Д., 2005. – Вип. 9. – С. 11-14.
7. Костроминов, А. М. Об электромагнитной совместимости рельсовых цепей с перспективным электроподвижным составом [Текст] // Автоматика, телемеханика и связь. – 1989. - № 6. – С. 33-34.
8. Eckel, H.-G. A new family of modular IGBT converters for traction applications [электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.etenik.uni-rostock.de/ee/download/publications_LEA/uni_hro_publication_lea_26.pdf

9. Кабалык, Ю. А. Системы управления электроподвижным составом [Текст] / Ю. С. Каблык. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. - 119с.
10. Маслов, Г. П. Электроснабжение железных дорог: Учебное пособие [Текст] / Г. П. Маслов, Г. С. Магарай, О. А. Сидоров. – Омск: Омский гос. университет путей сообщения, 2006. – 48 с.
11. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов [Текст] / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – Санкт-Петербург: Питер, 2007. – 350 с.
12. Марквард, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : Учебник для вузов [Текст] / К. Г. Марквард. – Москва: Транспорт, 1982. – 528 с.
13. Карв, Ш. Активные фильтры гармоник [Электронный ресурс] – Режим доступа:
[http://ssily.ru/admin/uploads/states/file/aktivnyie_filtryi_garmonik\(rus\).pdf](http://ssily.ru/admin/uploads/states/file/aktivnyie_filtryi_garmonik(rus).pdf)
14. Бабаев, М. М. Анализ влияния электромагнитных факторов на работу рельсовых цепей [Текст] / М. М. Бабаев, В. Ю. Гребенюк // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2011. – № 28. – С. 75-82.
15. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость: Учебник для вузов [Текст] / М. П. Бадер. – Москва: УМК МПС, 2002. – 638 с.
16. Безнаритний, А. М. Дослідження впливу зворотного тягового струму на роботу рейко-вих кіл в умовах різних видів тягового навантаження [Текст] / А. М. Безнаритний, В. І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2014. – Ном. 8. – Дніпропетровськ: Вид во ДНУЗТ, 2015. – С. 27–31.
17. Щека В. І. Підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації рухомого складу з асинхронним тяговим приводом. Дис.на здоб. наук. ст. к.т.н.спеціальність 05.22.20 – експлуатація і ремонт засобів транспорту. Дніпро:2015. – 161 с.
18. Щека В. І. Дослідження механізмів впливу контактної мережі на рейкові кола [Текст]// Наука та прогрес транспорту. Вісник

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2015, № 3 (57) – С. 27-35.

19. Вісін М. Г., Забарило Д. О. Підвищення електромагнітної сумісності рейкових кіл з електрорухомим складом подвійного живлення з асинхронними тяговими двигунами тяговою мережею // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2012. – С. 75-82.
21. Щека В. І. Організація захисту рейкових кіл від електромагнітних завад з боку контактної мережі [Текст] / В. І. Щека // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – Ном. 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 84-90.
22. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ): ЦШЕОТ/0012: Затв. Гол. упр. зв'язку, енергетики та обчислювальної техніки М-ва транспорту України 05.10.1998. – Київ, 1998. – 72 с.
23. Устройства СЦБ. Технология обслуживания. – М.: Транспорт, 1999. – 433с.