

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

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

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. завідувача кафедри  
\_\_\_\_\_ /Д. О. Босий/

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи  
електроспоживання**

Тема **Удосконалення способу заземлення опор контактної мережі  
електрифікованих залізниць постійного струму**

Theme **Improving the method of grounding the supports of the catenary of  
electrified DC railways**

Керівник дипломної роботи доц. \_\_\_\_\_ А. В. Антонов

Нормоконтролер доц. \_\_\_\_\_ В. М. Ляшук

Студент групи ЕС1926 \_\_\_\_\_ М. І. Тимошенко

Student Tymoshenko Maksym

Дніпро – 2020

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

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

### ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС \_\_\_\_\_ магістр  
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

студента групи ЕС1926 \_\_\_\_\_ Тимошенко М.І.  
(номер групи) (ПІБ)

1 Тема дипломної роботи: «Удосконалення способу заземлення опор контактної мережі електрифікованих залізниць постійного струму»

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

2 Термін подання студентом закінченої роботи «7» грудня 2020р.

3 Вихідні дані до дипломного проекту (роботи): типові альбоми контактної мережі, Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): заземлення опор контактної мережі, розподіл потенціалів та струмів у системі тягового електропостачання, результати моделювання

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

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Обсяг розділу, %
ВСТУП	23.09	5
АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗАЗЕМЛЕННЯ ОПОР КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ І МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЗАЗЕМЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ	15.10	25
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТЕНЦІАЛІВ ТА СТРУМІВ У СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	11.11	30
РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ «РЕЙКА-ЗЕМЛЯ»	25.11	30
ВИСНОВКИ	04.12	5
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	07.12	5

Дата видачі завдання: «17» вересня 2020 р.

Керівник дипломної роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис) к.т.н., доц. Антонов А.В.  
(ПБ)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_  
(підпис) Тимошенко М. І.  
(ПБ)

## **РЕФЕРАТ**

Пояснювальна записка має обсяг 74 сторінки, складається з 3 розділів та містить 28 ілюстрацій, 1 таблиці, 67 бібліографічних джерел, 2 додатків.

Мета роботи – Дослідження напрямків вдосконалення заземлення опор тягових мереж постійного струму з використанням протяжних заземлюючих пристроїв залізобетонних опор контактної мережі.

Надійність роботи електрифікованих залізниць безпосередньо залежить від працездатності підтримуючих конструкцій протягом їх всього терміну експлуатації. При впровадженні швидкісного руху, оновленні електрорухомого складу та інфраструктури набуває важливості питання комплексного дослідження адекватності функціонування пристроїв заземлення опор, особливо на постійному струмі. А так як спорудження контактної мережі на електрифікованих залізницях є довгостроковим фінансовим вкладенням, від якого залежить якість надання послуг з транспортування вантажів та пасажирів, обґрунтування вибору типу заземлення опор є важливою та актуальною задачею.

Ключові слова: ШВИДКІСНИЙ РУХ; ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ; ОПОРА; ЗАЗЕМЛЕННЯ; МОДЕЛЮВАННЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП..	6
1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗАЗЕМЛЕННЯ ОПОР КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ І МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЗАЗЕМЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ	10
1.1 Особливості роботи рейкових мереж електрифікованих залізниць	11
1.2 Теоретичні положення, які використовуються при розрахунку систем заземлення опор контактної мережі	13
1.3 Аналіз схем заземлення опор контактної мережі	20
1.4 Конструктивне виконання протяжних заземлюючих пристроїв	31
2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТЕНЦІАЛІВ ТА СТРУМІВ У СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	38
2.1 Електричні параметри опор контактної мережі	38
2.2 Оцінка величини перехідного опору та взаємних провідностей в системі «рейки – протяжний заземлювач»	44
2.3 Розробка математичної моделі системи «рейки-протяжний заземлювач»	50
3 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ «РЕЙКА-ЗЕМЛЯ»	58
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	65
Додаток 1	72
Додаток 2	74

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Тимошенко М.І.			Удосконалення способу заземлення опор контактної мережі електрифікованих залізниць	Літ.	Арк.
Керівник		Антонов А. В.					5
Н. Контр.		Ляшук В.М.				Аркушів	74
						ДНУЗТ, ІСЕ гр.ЕС1926	

## ВСТУП

На сьогодні однією з найважливіших стратегічних завдань розвитку залізничного електрифікованого транспорту є ріст його ефективності роботи.

У ряді технічних і економічних проблем електрифікованих залізниць одне з основних місць займає проблема забезпечення надійного функціонування усіх елементів контактної мережі, яка актуалізується з підвищенням швидкостей руху електрорухомого складу.

Залізничний транспорт є одним з основних видів транспорту, що забезпечує потреби в вантажних та пасажирських перевезеннях.

При цьому, необхідно зауважити, що стан контактної мережі, в більшості не відповідає умовам забезпечення швидкісного руху. Відбувається повальне старіння контактної мережі, інфраструктура залізниці потребує нагальної модернізації та реконструкції.

Основною частиною електрифікованих залізниць є система тягового електропостачання, яка в свою чергу складається з живильних ліній електропередачі різної напруги, тягових трансформаторних підстанцій і тягової мережі. Тягова мережа, в свою чергу, складається з контактної мережі і рейкової мережі. Контактна мережа представляє собою сукупність проводів, опорних і підтримуючих конструкцій. До опорних конструкцій відносяться роздільні і нероздільні опори, що сприймають навантаження від ваги проводів, консолей і фіксаторів, а також вітрові та ожеледні навантаження.

На сьогоднішній день найбільшого поширення на електрифікованих дорогах нашої країни отримали залізобетонні опори. Несуча здатність таких опор безпосередньо залежить від стану арматури опори, основним пошкодженням якої є корозія.

Найбільш гостро питання корозійних пошкоджень опор стоїть на ділянках постійного струму. Йдеться про електричну корозію арматури опор, яка виникає під дією блукаючих струмів. Особливість таких ушкоджень полягає в складності їх

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

діагностування, при цьому зниження несучої здатності опори може привести до її падіння, що призведе до зупинки руху на ділянці та суттєвих втрат коштів перевізників.

Електрокорозія є наслідком особливості роботи рейкової мережі – поєднання функцій зворотного проводу з робочим і захисним заземлюючим пристроєм. Використання рейкової мережі для заземлення опор контактної мережі вимагає застосування спеціальних пристроїв, що попереджають електричне з'єднання обладнання з рейками, в нормальному режимі роботи системи тягового електропостачання. Такими пристроями є іскрові проміжки, діодні та тиристорні заземлювачі. Їх основне завдання – запобігти витоків тягових струмів через обладнання, що заземлюється, в землю. Зазначені пристрої вимагають додаткових матеріальних витрат і трудових ресурсів для їх нормальної експлуатації. При цьому, необхідно відмітити часті випадки вандалізму в останні роки.

Актуальність проблеми підвищення ефективності роботи пристроїв електропостачання електрифікованих залізниць на постійному струмі, полягає в мінімізації можливих відмов і пошкоджень опор контактної мережі через вплив електричної корозії.

Проблемі захисту пристроїв електропостачання від електрокорозії присвячено безліч наукових робіт таких вчених як: О.М. Брильов, О.І. Гуков, Ю.О. Кравцов, О.В. Котельников, Б.І. Косарев, В.О. Кандаєв, В.І. Подольський, А.В. Шишляков, Ломазов Д. Б., Лапкін Б.Д., Сиченко В. Г., Дьяков В. О.

Дослідженнями в області заземлення на електрифікованому залізничному транспорті також займалися такі іноземні науковці, як: М. Alamuti, Н. Nouri, А. Gholami, W. Guangning, L. Zhou, A. Mariscotti, L. Sandrolini, L. Rouco.

Проведений огляд останніх публікацій показує, що однією з головних передумов забезпечення надійного функціонування електрифікованих залізниць постійного струму, в тому числі при впровадженні швидкісного руху на електрифікованих залізницях України є мінімізація пошкоджень опор контактної мережі та суміжних споруд від електрокорозії.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Актуальність роботи.** Надійність роботи електрифікованих залізниць безпосередньо залежить від працездатності підтримуючих конструкцій протягом їх всього терміну експлуатації. При впровадженні швидкісного руху, оновленні електрорухомого складу та інфраструктури набуває важливості питання комплексного дослідження адекватності функціонування пристроїв заземлення опор, особливо на постійному струмі. А так як спорудження контактної мережі на електрифікованих залізницях є довгостроковим фінансовим вкладенням, від якого залежить якість надання послуг з транспортування вантажів та пасажирів, обґрунтування вибору типу заземлення опор є важливою та актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Робота відповідає науковим напрямкам роботи кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

**Мета і завдання роботи.** Дослідження напрямків вдосконалення заземлення опор тягових мереж постійного струму з використанням протяжних заземлюючих пристроїв залізобетонних опор контактної мережі.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішені наступні завдання:

- провести аналіз існуючих систем заземлення та захисту опор контактної мережі від впливу корозії;
- удосконалити варіанти конструктивного виконання заземлюючих пристроїв;
- провести моделювання розподілення електричного поля всередині опор контактної мережі;
- розробити математичну модель системи «рейка – заземлювач» з врахуванням взаємного впливу елементів системи.

Об'єкт дослідження – пристрої електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму.

Предмет дослідження – заземлення опор контактної мережі.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Методи дослідження – в основу роботи покладені теоретичні та емпіричні методи дослідження.

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

Проведене моделювання розподілу електричного поля в залізобетонних опорах, яке дозволяє більш точно визначати місця небезпечного впливу струмів витоку.

Розроблена математична модель системи «рейка – заземлювач», яка відрізняється можливістю врахування взаємного впливу елементів системи.

**Практичне значення отриманих результатів:**

Отримані в роботі результати дозволяють знизити інтенсивність електричної корозії залізобетонних опор та інших підтримуючих конструкцій, збільшити тривалість їх експлуатації та знизити витрати на обслуговування пристроїв електропостачання.

**Особистий внесок здобувача.** Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження отримані здобувачем самостійно.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на Міжнародній студентській науковій конференції «Перспективні галузі наукових досліджень: динаміка та тренди», м. Суми, 16.10.2020.

**Публікації**

1. Тимошенко М.І., Заремба А.А., Шлапак М.І. Напрямки мінімізації корозійного впливу та дослідження стану елементів контактної мережі. Міжнародна студентська наукова конференція «Перспективні галузі наукових досліджень: динаміка та тренди» м. Суми, 16.10.2020. с. 85 – 87.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗАЗЕМЛЕННЯ ОПОР КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ І МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЗАЗЕМЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Для заземлення обладнання електрифікованих залізниць і опор контактної мережі в Україні застосовується рейкова мережа, яка вважається природним заземлювачем.

Сама рейкова мережа, характеризується поздовжнім та поперечним електричним опором, останній прийнято називати перехідним опором «рейка – земля».

Особливістю роботи рейкової мережі на електрифікованому транспорті є використання рейкової мережі в якості природного заземлювача для опор контактної мережі і для обладнання, що розташовується уздовж залізниці.

Іншою особливістю роботи рейкової мережі є використання її в якості каналу для сигнальних струмів СЦБ.

Так як для інтервального регулювання руху поїздів використовується автоматичне блокування, перегін розділяється на блок-ділянки, обладнані рейковими колами, які є датчиками інформації про наявність чи відсутність поїзда на ділянці. Будь-яке рейкове коло включає джерело електричної енергії і приймач. Принцип дії рейкових ланцюгів полягає в тому, що при з'єднанні рейок через колісну пару, генерується сигнал про зайнятість блок-ділянки. При цьому важливо, щоб сигнал без спотворень дійшов до приймача. Спотворення можуть виникати при малому перехідному опорі «рейка – земля», тобто частина сигнального струму буде стікати в землю. Крім цього сигнальний струм може стікати через різноманітне обладнання, яке з'єднане з рейками і з землею, в основному, через опори контактної мережі. Тому, з точки зору пристроїв СЦБ для надійної роботи рейкових кіл необхідно здійснювати приєднання до рейок якомога рідше. При цьому повинно підтримуватися високе значення перехідного опору «рейка – земля».

Таким чином, виникає протиріччя у вимогах до параметрів рейкової мережі: у рейкової мережі як природного заземлювача повинен бути мінімальний

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

перехідний опір «рейка - земля», але у рейкових колах повинен бути присутній максимальний перехідний опір.

Крім описаних особливостей, характерних для електрифікованих залізниць в цілому, існує особливість, характерна тільки для електрифікованих залізниць постійного струму. Йдеться про електричну корозію.

Електрична корозія є електрохімічним процесом руйнування поверхні металу при протіканні зовнішнього постійного струму з металу в електроліт. У випадку з електричними залізницями електролітом є ґрунт. Наявність перехідного опору між ґрунтом та підземними спорудами, а також обладнанням самої залізниці створює умови для виникнення електрокорозії.

### **1.1 Особливості роботи рейкових мереж електрифікованих залізниць**

Для заземлення обладнання електрифікованих залізниць і опор контактної мережі застосовується рейкова мережа, яка вважається природним заземлювачем.

Рейкова мережа, як довга лінія, характеризується поздовжнім і поперечним опором, останній прийнято називати перехідним опором «рейка – земля».

З'єднання опор з рейками при пробіі ізоляції контактної мережі забезпечує замикання контактної мережі на рейку, тобто на зворотній провід, по якому електрична енергія повертається до джерела живлення (формально це не можна назвати заземленням).

У разі ж з'єднання з рейками обладнання розташованого вздовж залізниці, наприклад комплектних трансформаторних підстанцій, сигнальних точок СЦБ, таке з'єднання буде заземленням, оскільки рейкова мережа вважається природним заземлювачем.

І в тому і в іншому випадку, чим нижче опір рейкової мережі, тим надійніша робота захисту і тим більша електробезпека для експлуатаційного персоналу. Тут під опором рейкової мережі розуміється опір з урахуванням перехідного опору «рейка – земля».

Таким чином, першою особливістю роботи рейкової мережі на електрифікованих залізницях є використання рейкової мережі в якості природного

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

заземлювача для опор контактної мережі і для обладнання, що розташовується уздовж залізниці.

Іншою особливістю роботи рейкової мережі є використання її в для сигнальних струмів СЦБ.

В Україні для інтервального регулювання руху поїздів використовується автоматичне блокування. При цьому перегін розділяється на блок-ділянки, обладнані рейковими колами, які є датчиками інформації про наявність чи відсутність поїзда. Будь-яке рейкове коло включає джерело електричної енергії і приймач. Принцип дії рейкових кіл полягає в тому, що при з'єднанні рейок через колісну пару, генерується сигнал про зайнятість блок-ділянки. При цьому важливо, щоб сигнал без спотворень дійшов до приймача. Спотворення можуть виникати при малому перехідному опорі «рейка – земля», тобто частина сигнального струму буде стікати в землю. Крім цього сигнальний струм може стікати через обладнання, що з'єднане з рейками і з землею, в основному, через опори контактної мережі. Як наслідок, з точки зору пристроїв СЦБ для надійної роботи рейкових кіл необхідно здійснювати приєднання до рейок якомога рідше. При цьому необхідно забезпечувати високе значення перехідного опору «рейка – земля».

Таким чином, виникає протиріччя у вимогах до параметрів рейкової мережі: у рейкової мережі, як природного заземлювача повинен бути мінімальний перехідний опір «рейка – земля», але для рейкових ланцюгів бажано мати максимально можливий перехідний опір.

Крім описаних особливостей, характерних для електрифікованих залізниць в цілому, існує особливість, характерна тільки для електрифікованих залізниць постійного струму. Йдеться про електричну корозію.

Електрична корозія є електрохімічним процесом руйнування поверхні металу при протіканні зовнішнього постійного струму з металу в електроліт. У випадку з електричними залізницями електролітом є ґрунт. Наявність перехідного опору між ґрунтом і підземними спорудами, а також обладнанням самої залізниці створює умови для виникнення електрокорозії.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки на ділянках постійного струму полярність струму і напруга не змінюється в часі, в порівнянні з ділянками змінного струму, виникають стійкі анодні і катодні зони, також прийнято виділяти знакозмінні зони [1]. Анодною зоною вважається зона, в якій спостерігається позитивний потенціал рейок щодо землі, відповідно в цій зоні струм стікає з рейкової мережі в землю. Позитивний потенціал спостерігається поблизу електрорухомого складу, який споживає електричний струм з контактної мережі. Катодною зоною вважається зона, в якій потенціал рейок щодо землі негативний, при цьому струм втікає в рейки з землі. Стійкі катодні зони спостерігаються поблизу тягових підстанцій, тобто там, де тяговий струм повертається від електрорухомого складу до джерела живлення. Знакозмінною ж вважається зона, де потенціал рейок змінює знак, тобто спостерігається як стікання струму з рейок, так і втікання.

З точки зору електрокорозії небезпечними є анодні та знакозмінні зони [2]. У цих зонах можливе не тільки стікання струму з рейок, але і стікання струму через обладнання, яке має електричний зв'язок з рейками. При цьому, буде відбуватися корозія саме обладнання, через яке струм буде стікати в землю. Таким обладнанням можуть бути опори контактної мережі і їх фундаменти, щогли сигнальних точок, обладнання СЦБ та інші конструкції по з'єднанні з рейками.

## **1.2 Теоретичні положення, які використовуються при розрахунку систем заземлення опор контактної мережі**

Виходячи з особливостей роботи електрифікованої залізниці, можна виділити два завдання, які необхідно вирішити при виборі способу заземлення опор контактної мережі. Перше – завдання захисту від електрокорозії фундаментів і арматури підземної частини опор, характерна для ділянок постійного струму.

Друге – завдання забезпечення надійної роботи захистів фідерів тягових підстанцій при замиканні контактної мережі на заземлені конструкції.

Завданню захисту від електрокорозійних ушкоджень залізобетонних фундаментів і стійок присвячено безліч наукових робіт таких вчених як А.І. Гуков, А.В. Котельников [1...4], Б.І. Косарев [5,6], А.Б. Косарев [5,7], В.А. Кандаєв

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

[2,8...13], А.А. Кудрявцев, Е. Селедцов, К.Б. Кузнецов [14, 15], Павлов А.В. [16], В.І. Подольський [17], Порцелан А.А. [18], Ломазов Д. Б. [19...25], В. О. Дьяков [25...30].

Вихідною математичною моделлю, що використовується для дослідження розподілення потенціалу рейкової мережі на електрифікованих залізницях постійного струму, можна вважати систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varphi_p}{dx} &= -r_p I_p \\ dI_p &= -\frac{\varphi_p}{r_{pz}} dx \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

де  $\varphi_p$  – потенціал рейкової мережі щодо віддаленої землі, В;

$I_p$  – струм рейкової мережі, А;

$r_p$  – погонний опір рейкової мережі, Ом/км;

$r_{pz}$  – перехідний опір рейкової мережі, Ом·км.

Рішення цієї системи рівнянь при різних початкових умовах представлені в [11,12]. При використанні цієї математичної моделі застосовується принцип суперпозиції: кожен струм (струм електрорухомого складу, струм тягової підстанції) розглядається окремо, а потім всі отримані результати складаються в загальну криву розподілу потенціалу рейкової мережі. На основі цієї кривої можна виділити зони розподілу потенціалу: анодну, катодну чи знаковмінну.

При розрахунку розподілу потенціалу рейкової мережі на змінному струмі необхідно враховувати індуктивний вплив між контурами «контактний провід – земля» і « рейка – земля», тоді система рівнянь (1.1) прийме наступний вигляд [11]:

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

$$\left. \begin{aligned} d\varphi_p &= -(z_p I_p + I_0 z_{kp}) dx, \\ dI_p &= -\frac{\varphi_p}{z_{p3}} dx. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

На електричних залізницях змінного струму проблема електрокорозії стоїть не так гостро в порівнянні з залізницями постійного струму, проте в системі змінного струму актуальною є проблема електромагнітного впливу на суміжні лінії.

У зазначених вище системах рівнянь використовується така величина як перехідний опір «рейка – земля», відповідно виникає завдання його визначення. Рішенням цього завдання займалися В.В. Бургсдорф [31], А.Л. Вайнер, Р.Н. Карякін, К.Б. Кузнєцов [14], Б.І. Косарев, А.Б. Косарев [5].

Найбільш відомою моделлю аналітичного розрахунку перехідного опору є багат шарова модель [5], в якій рейки розглядаються як прямолінійні однорідні паралельні провідники. Відтік струму з рейок відбувається з нескінченної кількості прямокутних металевих пластин. При цьому перехідний опір визначається багаточленом:

$$r_{p3} = b_0 + b_1 \rho_0 + b_p R_{ш} + b_3 \rho_{31}^0 + b_4 Z_2 + b_5 h_{н} + b_6 \rho_{н}, \quad (1.3)$$

де  $\rho_{ш}$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_{н}$  – питомий електричний опір матеріалів шпал, баласту і насипу відповідно, Ом·м;

$\rho_{e1}^0$  – еквівалентний електричний опір ґрунту, кОм;

$R_{ш}$  – електричний опір шпали, кОм;

$h_{ш}$  – висота насипу, м;

$b_0 \dots b_6$  – експериментальні коефіцієнти.

В [14] розроблена альтернативна методика розрахунку перехідного опору «рейка – земля». Ґрунтуючись на експериментальних даних, отриманих за

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

допомогою методу вертикального електричного зондування, дослідної ділянки [14] була запропонована формула, яка представляє собою неявну залежність перехідного опору від вхідних в неї виміряних і розрахованих величин.

$$r_{P3} = 0,318 \cdot \rho \cdot \frac{\Omega_{[0, \alpha Y_1]} - K \Omega_{[0, \alpha Y_2]}}{1 - K} \quad (1.4)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір ґрунту, Ом·м;

$\Omega$  – спеціальна функція Зунде;

$K$  – відношення виміряних значень напруги;

$Y_1, Y_2$  – координати в площині, перпендикулярній осі колії, м;

$\alpha$  – аргумент функції Зунде.

Надалі, розглядаючи рейкову мережу як протяжний заземлювач, що лежить на поверхні землі, і ґрунтуючись на теорії довгих ліній, була запропонована спрощена формула визначення перехідного опору «рейка – земля» [14]:

$$r_{P3} = \frac{0,203}{R_{P3}^2 \gamma_i \gamma_a z_p} \quad (1.5)$$

де  $R_{PE} = \sqrt{R_P \cdot a_{P12}}$  – еквівалентний радіус одноколійної лінії, м;

$R_P$  – еквівалентний радіус однієї рейки, м;

$a_{P12}$  – провідність сталі, См/м;

$\gamma_a$  – провідність ґрунту, См/м;

$z_p$  – повздовжній електричний опір лінії, Ом·м;

У даній роботі на основі розробленої методики розрахунку складних неоднорідних заземлюючих пристроїв методом ланцюгових схем і методом

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



відносного опору, розвиваються методи розрахунку і вдосконалюється пристрій для заземлення опор контактної мережі [15] із застосуванням протяжного заземлювача.

У загальному випадку протяжний заземлюючий пристрій являє собою систему «трос – опори» і протяжний горизонтальний заземлюючий електрод, що знаходиться в землі (рис. 1.1). З огляду на екрануючі властивості провідного простору землі, зазначена вище лінія замінюється системою з'днаних симетричних чотириполюсників.

На основі теорії ланцюгових схем можна отримати вирази, які характеризують струм і напругу будь-якого елементу ланцюгової схеми з безлічі  $n$ , для протяжного заземлювача і рейок, прокладених паралельно одна одній.

$$\left. \begin{aligned} u_{nz} &= u_{0z} \cosh(n \cdot g_z) + z_z \cdot (i_{y0} - K_1 i_p) \cdot \sinh(n g_z) \\ (i_{yn} - K_1 i_k) &= \frac{u_{0z}}{z_z} \cdot \sinh(n \cdot g_z) + (i_{y0} - K_1 i_k) \cdot \cosh(n g_z) \\ u_{np} &= u_{0p} \cdot \cosh(n g_p) + z_p (i_{y0} - K_2 i_k) \cdot \sinh(n g_p) \\ (i_{yn} - K_2 i_k) &= \frac{u_{0p}}{z_p} \cdot \sinh(n g_p) + (i_{y0} - K_2 i_k) \cdot \cosh(n g_p) \end{aligned} \right\}, \quad (1.6)$$

де  $u_{0z}$ ,  $u_{0p}$  – напруга на вході ланцюгових схем заземлювача і рейки, В;

$u_{nz}$ ,  $u_{np}$  – напруга на виході  $n$ -ого чотириполюсника, В;

$i_{y0}$ ,  $i_{yn}$  – струм на вході і виході ланцюгової схеми, А;

$i_k$  – струм у контактній мережі, А;

$z_z$ ,  $z_p$  – характеристичні опору чотириполюсників ланцюгової схеми для протяжного заземлювального пристрою і рейок, Ом;

$g_z$ ,  $g_p$  – характеристичні постійні передачі чотириполюсників для протяжного заземлювального пристрою і рейок;

$K_1, K_2$  – коефіцієнт зв'язку контактної мережі відповідно з протяжним заземлювальним пристроєм і рейками.

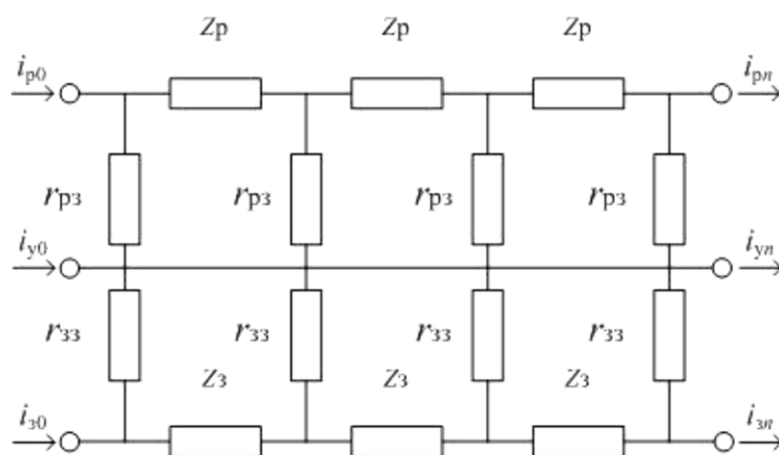


Рисунок 1.1 – Схеми заміщення системи «провід – рейка – протяжний заземлювач»

Також варто відзначити ланцюгово-польову модель заземлюючих пристроїв, яка розроблена С.Л. Шишигіним [43...45]. Зазначена модель відноситься до заземлюючих пристроїв в системі забезпечення руху поїздів і також ґрунтується на теорії ланцюгових схем. Вона являє собою багатоланкову схему, що складається з симетричних чотирьохполюсників. Відмітна особливість зазначеної моделі полягає в тому, що чотирьохполюсники володіють власними поздовжніми активно-індуктивними опорами і поперечними активно-ємнісними провідностями.

На сьогоднішній день, методика розрахунку вертикальний заземлювачів, які використовуються в різних заземлюючих пристроях розроблена досить докладно. Існує два найбільш поширених методи розрахунку заземлювачів [43]: на основі рішення рівняння Лапласа для потенціалу точкового джерела і метод дзеркальних зображень [5,43]. Також слід зазначити метод розрахунку складних заземлюючих пристроїв методом відносних опорів [14].

Перший метод полягає в тому, що заземлювач замінюється сукупністю точкових джерел струму, причому форма однієї з екіпотенційних поверхонь їх

результуючого електричного поля близька за формою до поверхні розглядуваного заземлювача.

Основним рівнянням даного методу є двовимірне рівняння Лапласа, що отримується при переході до криволінійної ортогональної циліндричної системи координат  $(r, z, \psi)$ , причому вісь  $z$  перпендикулярна до кордону напівпростору і проходить через точкове джерело.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{H_2 \cdot H_3}{H_1} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{H_3 \cdot H_1}{H_2} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = 0, \quad (1.7)$$

де  $H_1, H_2, H_3$  – коефіцієнти Ламе.

Для знаходження загального рішення рівняння (1.7) застосовується метод Фур'є. Загальне рішення рівняння являє собою суму всіх частинних рішень.

$$\Phi = \int_0^{\infty} J_0(\lambda r) \cdot (C_1 \alpha e^{\lambda z} + C_2 \beta e^{-\lambda z}) d\lambda, \quad (1.8)$$

де  $C_1, C_2$  – постійні інтегрування;

$\alpha, \beta$  – постійні, що не залежать від координат  $r, z$ .

Після визначення всіх постійних можливо два варіанти подальшого рішення: перший – чисельний, заснований на взятті невластних інтегралів і отриманні чисельних значень потенціалу в заданих точках провідного напівпростору (цей метод застосовується при багаточислової землі), і другий – аналітичний, результатом якого є вирішення у вигляді сум рядів.

Метод дзеркальних зображень також заснований на пошуку рішення, яке задовольняє рівнянню Лапласа. Відмінність полягає в тому, що еквіпотенціальні

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

поверхні замінюються металевими поверхнями з тим же потенціалом, що не спотворює поля [5].

Різновидом методу дзеркальних зображень є метод оптичної аналогії [43], при якому точкове джерело струму уподібнюється джерелу світла, яке відбивається і заломлюється в системі напівпрозорих дзеркал, розташованих на кордоні шарів. Слід зазначити методику спільного застосування методу дзеркальних зображень і методу інтегральних рівнянь розроблену С.Л. Шишигінін [44]. Зазначена методика дозволяє проводити розрахунки заземлювачів в багат шаровій землі як з горизонтальними, так і з вертикальними неоднорідностями.

Методика розрахунку складних заземлюючих пристроїв методом відносного опору, ґрунтується на тому, що в якості відносного опору розтіканню заземлювального пристрою приймається опір заземлюючого пристрою одиничного розміру в шарі ґрунту з одиничним питомим опором. У багат шаровій землі геометричні розміри шарів виражаються в частках від одиничного розміру.

Розглядаючи напівсферичний заземлюючий пристрій, розташований в двошаровому провідному просторі землі, було отримано вираз, який визначає опір заземлювального пристрою:

$$R_{zy} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\pi r_1} + \frac{\rho_1}{2\pi r_3} \quad (1.9)$$

де  $\rho_1, \rho_2$  – питомий опір відповідно першого та другого шарів землі;

$r_3$  – радіус заземлюючого пристрою напівсферичної форми;

$r_1$  – відстань від центру заземлюючого пристрою до зовнішньої границі першого шару землі.

### 1.3 Аналіз схем заземлення опор контактної мережі

Виходячи з описаних особливостей роботи електрифікованих залізниць, можна виділити два напрямки в розвитку систем заземлення опор контактної мережі. Перший напрямок ґрунтується на використанні рейкової мережі в якості

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

заземлюючого пристрою. Другий напрямок ґрунтується на використанні систем захисту при опорах, які відокремлені від рейок.

До першого напряму можна віднести системи заземлення опор, які широко використовуються на сьогоднішній день на залізничному транспорті з використанням захисних пристроїв: іскрових проміжків, діодних і діод-іскрових заземлювачів.

До подібних систем заземлення опор пред'являється такі вимоги:

- забезпечувати ізоляцію опор від рейкової мережі в нормальному режимі;
- надійно з'єднувати опори з рейками в аварійному режимі.

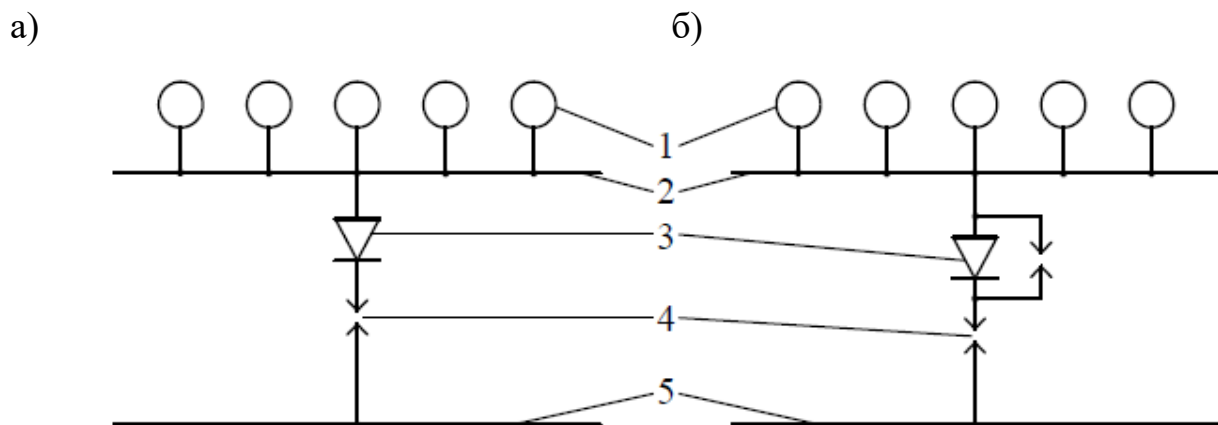
З самого початку електрифікації широкого розповсюдження отримало застосування іскрових проміжків типу ІМП-62М. Однак досвід експлуатації показав, що вони не здатні працювати багаторазово, тобто виходять з ладу при першому короткому замиканні, а також, що вони виходять з ладу при перекритті рогових розрядників [18]. У 1968 р УЕМПТ запропонував ЦЕ МПС застосовувати в якості захисного пристрою діодний заземлювач, який складається з трьох паралельно з'єднаних напівпровідникових вентилів В-200 10-ого класу, на основі якого був розроблений діодний заземлювач ЗД-1. Цей пристрій використовувався для групового заземлення опор з використанням тросового з'єднання. При цьому діодний заземлювач при необхідності може пропускати імпульс зворотно прикладеної напруги, переходячи в лавинний режим. Однак досвід експлуатації показав, що діодні заземлювачі схильні до електричних пробів, особливо при установці поблизу рогових розрядників і місць рушання та розгону поїздів. Крім того при впливі зворотної напруги в лавинний режим переходить тільки один вентиль з трьох з меншою напругою лавиноутворення [14], в силу різниці параметрів напівпровідникових приладів.

Також розроблялися пристрої, що комбінують іскрові проміжки і напівпровідникові вентиля та трос групового заземлення. Прикладом може бути пристрій описаний в [4] (рисунок 1.2, а). Суть пристрою полягає в послідовному включенні напівпровідникового вентиля і іскрового проміжку, причому вентиль

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

анодом приєднується до тросу групового заземлення, а катодом – до електроду іскрового проміжку.

Безпосередньо до рейок приєднувався іскровий проміжок. Крім цього загальна точка напівпровідникового вентиля і іскрового проміжку з'єднувалася з контрольним виводом. Перевагою пристрою була захищеність напівпровідникового діода від перенапруги з боку рейок при короткому замиканні контактної мережі на рейку, крім того збільшувалася багатократність спрацювання іскрового проміжку.



1 – опора контактної мережі; 2 – заземлюючий трос; 3 – напівпровідниковий вентиль; 4 – іскровий проміжок; 5 – рейкова мережа

Рисунок 1.2 – Пристрої для заземлення опор контактної мережі з застосуванням іскрових проміжків (а) та напівпровідникових вентилів (б)

Розвитком ідеї спільного застосування вентилів і іскрового проміжку є пристрій, що описаний в [85] (рисунок 1.2, б). Він відрізняється від попереднього пристрою тим, що паралельно вентилю включений ще один іскровий проміжок. Таке рішення дозволило підвищити надійність напівпровідникового вентиля.

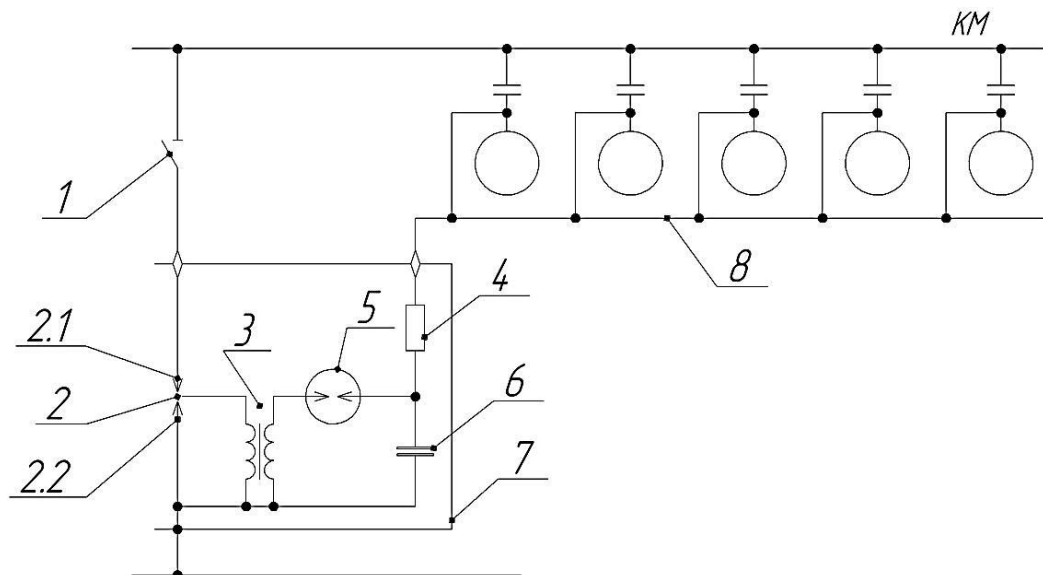
Загальним недоліком для всіх описаних пристроїв є необхідність використання великої кількості напівпровідникових вентилів і іскрових проміжків.

Крім того, велике число приєднань до рейкової мережі збільшує вплив на рейкові кола автоблокування.

Другий напрямок ґрунтується на відмові від з'єднання опор з рейковою мережею. До цього напрямку можна віднести такі системи як потенціальний захист Донецької залізниці (ПЗК), миттєвий потенційний захист (МПЗ), а також тросові системи захистів з ізольованим тросом і датчиком пробую.

Захист ПЗК [15], запропонована в 1970-і рр., Містить додатковий провід, протягнутий по опорах контактної мережі, від'єднаний від рейок.

В цьому випадку опори повністю від'єднують від рейки і об'єднують на частини перегону тросом, який вводиться до шафи захисту. Короткозамикач спрацьовує від напруги «трос-рейка», значення якої вище уставки захисту (рис. 1.3).



1 – роз'єднувач; 2 – трьохелектродний розрядник з піджигачим електродом типу ЗСС; 3 – трансформатор піджигача; 4 – струмообмежуючий резистор; 5 – розрядник; 6 – конденсатор; 7 – металева шафа; 8 – додатковий трос

Рисунок 1.3 – Схема потенційного захисту Донецької дороги

Захисний додатковий трос підвішується на опорах контактної мережі з польової сторони (до нього під'єднують усі конструкції, встановлені на опорі і які потребують захисного заземлення).

Шафа всередині обшита діелектричним матеріалом і під'єднана або до середньої точки дроселя, або заземлена наглухо на тягову рейку. Вводи від контактної мережі і троса виконані через прохідні ізолятори.

Захист працює таким чином. При перекритті ізоляції на опорі на тросі з'являється напруга, яка через резистор 4 заряджає конденсатор 6. При досяганні на конденсаторі напруги 350...400 В спрацьовує розрядник 5 і конденсатор розряджається на первинну обмотку трансформатора піджигу 3.

Збільшений імпульс напруги з вторинної обмотки трансформатора потрапляє на підпалюючий електрод короткозамикача 2.1, внаслідок чого з'являється іскровий розряд між цим електродом і заземленим на рейку основним електродом розрядника 2.1. Іонізація повітряного проміжку приводить до виникнення дуги між основними електродами 2.1 і 2.2 (короткозамикач 2 спрацював).

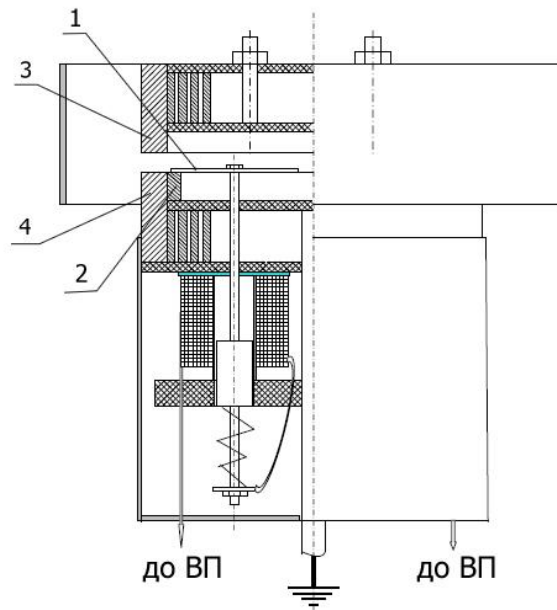
Підпалюючий електрод виконаний у вигляді мідної голки, яка виходить на 2-3 мм за лінію найменшої відстані між основними електродами (12...13 мм). Між голкою і заземленим електродом – 5...6 мм. Короткозамикач не має пристрою гасіння дуги, тобто, він розрахований на швидке відключення к.з. вимикачами підстанції і поста секціонування. Шафу ПЗК підключають до контактної мережі через роз'єднувач, що дозволяє відключити її для виконання ремонтно-профілактичних робіт.

Перевагою захисту є його автономність (можливість встановлення на перегоні і саме на тих опорах, які потребують захисту від електрокорозії (в анодних зонах). Недоліком захисту є виникнення повторного к.з., яке виникає ближче до підстанції і складніше вимикається вимикачами.

На теперішній час виконана модернізація захисту ПЗК. Замість трьохелектродного розрядника ЗСС розроблений дуговий короткозамикач БКЗ-3.3 (рис. 1.4).

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24





1, 2 – контакти запальних пристроїв; 3 – верхній електрод; 4 – нижній електрод

Рисунок 1.4 – Конструкція дугового короткозамикача

У нижньому електроді розміщений запальний пристрій, який складається з двох пар контактів, які дублюють одна одну для підвищення надійності роботи.

При подачі напруги від вхідного пристрою на котушки електромагнітів сердечник приходить у рух, при цьому розмикаються контакти 1 і 2 запальних пристроїв, включених послідовно у ланцюг живлення котушок. На контактах виникає електрична дуга, яка, розтягуючись, викликає іонізацію повітряного проміжку, утвореного верхнім і нижнім електродами, що приводить до його пробою. Виникає коротке замикання контактної мережі на тягову рейку.

Потужна електрична дуга зі струмом в декілька кілоампер під впливом радіального магнітного поля, що створюється витками магнітного дуття, обертається з великою швидкістю по колу торцевих поверхонь електродів, не спричиняючи їх оплавлення. При пробіі між електродами і виникненні струму короткого замикання вхідний пристрій шунтується, котушки електромагнітів знеструмлюються, і запальний пристрій повертається в початкове положення.

Мінімальний струм спрацювання запального пристрою 3,5...5 А. Вхідний пристрій (рис. 4.35) включає в себе струмообмежуючі резистори R1 та R2, діоди

VD-1, VD-2 (не менше 11 класу), тиристор VT-1, тиристор VT-2, стабілітрони VD-3...VD-8, конденсатор С і розрядники Р1 та Р2. Резистори R1 та R2 призначені для обмеження струму, що протікає через котушки електромагнітів запального пристрою.

Діодно-тиристорний ланцюг перешкоджає протіканню тягових і сигнальних струмів із рейок у додатковий провід. Розрядник Р1 захищає діодно-тиристорний ланцюг від пробної зворотної полярності при комутаційних і грозових перенапругах.

По кінцях зони, що захищається, на повітряних проміжках кожної колії, поруч із тяговою підстанцією і ПСК, а також всередині зони, що захищається, встановлюються дугові короткозамикачі типу БКЗ-3,3, силові контакти яких підключаються з боку верхніх електродів до контактної мережі, а з боку нижніх електродів до середньої точки дросель-трансформатора або до тягової рейки. До додаткового проводу короткозамикачі підключаються через вхідні пристрої (ВП).

При пробі ізоляції на якій-небудь опорі додатковий трос вмикається під повну напругу контактної мережі. Напруга по додатковому тросу через вхідні пристрої подається на запальні пристрої (ЗП) БКЗ-3,3, спричиняючи спрацювання короткозамикачів і замикання контактної мережі на рейку. Струм короткого замикання відключається швидкодіючими вимикачами тягових підстанцій, постів секціонування і пунктів паралельного з'єднання. Напруга спрацювання короткозамикача регулюється підбором стабілітронів VD3 – VD8 у межах 400...450 В.

На сьогоднішній день основною тенденцією розвитку електрифікованого залізничного транспорту в світі є високошвидкісний залізничний транспорт.

Основним документом, який регламентує роботу залізниць країн Євросоюзу, є директива 2008/57 / ЄС [88] про функціональну сумісність залізниць всередині Євросоюзу. На підставі цього документа складаються так звані технічні вимоги до експлуатаційної сумісності (в оригіналі TSI), які можна зіставити з

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

вітчизняними інструкціями ЦЕ. Найбільш цікавим є TSI 50122, що регламентує електробезпеку, заземлення і зворотні контури. Він складається з трьох частин:

- TSI 50122-1 - захисне спорядження від ураження електричним струмом [89].

- TSI 50122-2 - Обладнання, спрямоване проти впливу блукаючих струмів, створюваних залізницями постійного струму [90].

- TSI 50122-3 - Взаємний вплив залізниць постійного і змінного струму [91].

Згідно з цими документами на залізницях країн Євросоюзу з метою зниження величини блукаючих струмів, створюваних залізницями постійного струму, жодна конструкція, установка або споруда, не ізолювані від землі, не повинні бути пов'язані зі зворотним контуром. Тут слід відзначити, що за цими ж документами до зворотного контуру відноситься не тільки рейкова мережа, а й додаткові зворотні провідники. Ці провідники прокладають паралельно рейок і з'єднуються з ними через певний інтервал.

Для нашої країни найбільш актуальними будуть системи, що застосовуються на залізницях постійного струму. До таких систем відносяться наступні:

- система «глухого» заземлення;
- ізолювана система;
- система діодного і тиристорного заземлення;
- система дренажних шарів.

Система «глухого» заземлення. Схема цієї системи представлена на рис. 1.5. Негативний полюс кожної підстанції заземлюється на окрему заземлювальну сітку, минаючи будь-які опори в контурі заземлення. Зворотний контур, створюваний ходовими рейками, стає паралельним з землею, при цьому значна частина зворотного струму може протікати через землю, підвищуючи загрозу корозії підземних конструкцій поряд з рейками [92, 93].

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

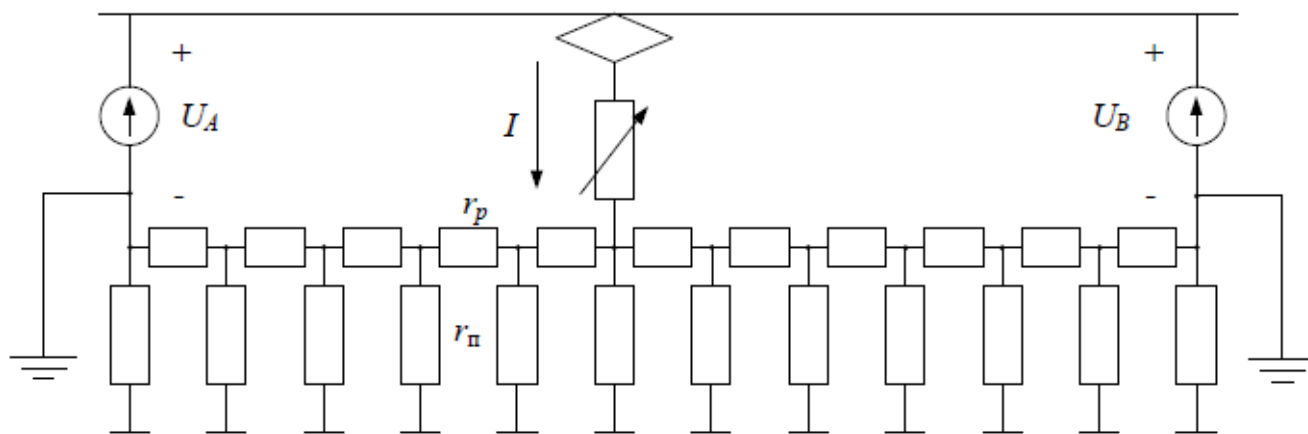


Рисунок 1.5 – Схема системи глухого заземлення

Ізольована система. Ця система відрізняється від попередньої тільки тим, що негативний полюс підстанції окремо не заземлюють. Ця система характеризується меншою величиною блукаючих струмів, однак при цьому спостерігається підвищений потенціал рейок по відношенню до землі, що може бути небезпечно для обслуговуючого персоналу. Дана система також вважається застарілою.

Система діодного і тиристорного заземлення. В системі діодного заземлення з'єднання між землею і негативною шиною на тяговій підстанції здійснюється через діодний блок. Діоди обмежують напругу рейок короткозамкненим контуром для зворотного струму на тяговій підстанції при перевищенні зворотної напруги діода. Діод також забезпечує низькоомний зворотний контур при короткому замиканні між струмоведучими частинами і заземленою шиною на підстанції.

Останні практичні і теоретичні дослідження показали, що використання системи діодного заземлення може призвести до великої напруги дотику і підвищенню струмів витоку в деяких випадках [92,93].

Система тиристорного заземлення використовує автоматичний заземлюючий перемикач, який складається з контролюючих постійний струм і потенціал контурів і двох тиристорів, з'єднаних для забезпечення двонаправленого контролю струму, що протікає між мінусовою шиною і землею. Тиристиори

розташовані в заземлюючій системі тягової підстанції. Коли потенціал рейки перевищує задану напругу, відповідний тиристор (в залежності від полярності) буде відкриватися і з'єднувати мінусову шину з землею. Відкритий тиристор буде продовжувати проводити струм, поки він не знизиться до нуля або поки полярність напруги, що прикладається до тиристора, не зміниться на зворотну. При закритті тиристора, система стає ізольованою, що обмежує струми витoku. Вибір відповідного рівня напруги відкриття тиристора значно залежить від характеристик самої схеми. Для компромісу між безпекою персоналу і захистом від електрокорозії, слід вибирати середнє значення. Використання низького значення напруги робить характеристики схеми тиристорного заземлення близькими до системи глухого заземлення. З іншого боку, вибір завищеного значення напруги робить її ближчою до ізольованої схемою.

Система дренажних шарів. Відповідна схема представлена на рис.1.6.

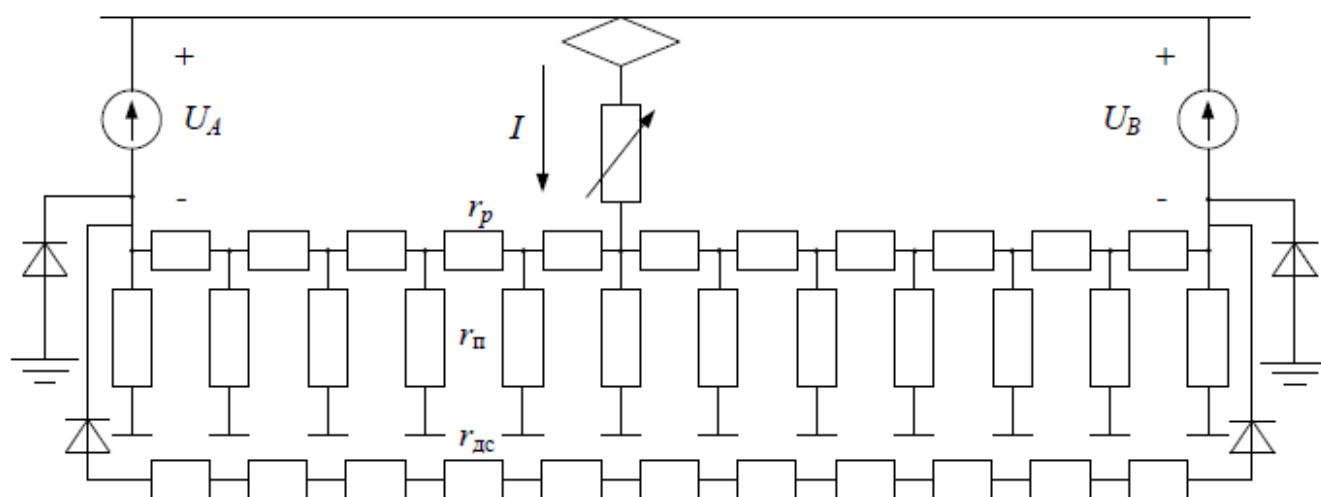


Рисунок 1.6 – Система дренажних шарів

Ця система заснована на використанні уздовж залізничної лінії спеціальних дренажних шарів, розташованих під землею вздовж осі колії. Дренажним шаром є звичайна заземлювальна сітка. Кожен дренажний шар з'єднується з сусіднім, а шари, розташовані біля підстанцій, додатково підключаються через діодний блок до негативного полюса кожної підстанції. Крім того, негативний полюс підстанцій

також з'єднується з землею через діодний блок. Варто відзначити, що в якості дренажних шарів можна використовувати залізобетонні конструкції колії.

Ця система дозволяє не тільки захищати підземні металеві споруди, а й захищати самі дренуючі шари.

З огляду на зазначені вимоги європейських стандартів, цікавою є система заземлення, реалізована на високошвидкісної лінії SUI - YU в Китаї електрифікованої по системі 25 кВ. Система носить аббревіатуру IGL (Integrated grounding line), що можна перевести як вбудована заземлювальна лінія [93, 94]. IGL представляє собою голий мідний провід марки TD – 70 мм<sup>2</sup>, прокладений уздовж колії. При цьому він розділяється на секції і підключається до нейтральних точок дросель-трансформаторів через кожні 1000 м. Всі заземлені конструкції, розташовані уздовж залізниці, з'єднуються з IGL.

Схема системи з застосуванням IGL представлена на рис. 1.7. При цьому, рейки також застосовуються як зворотний провід.

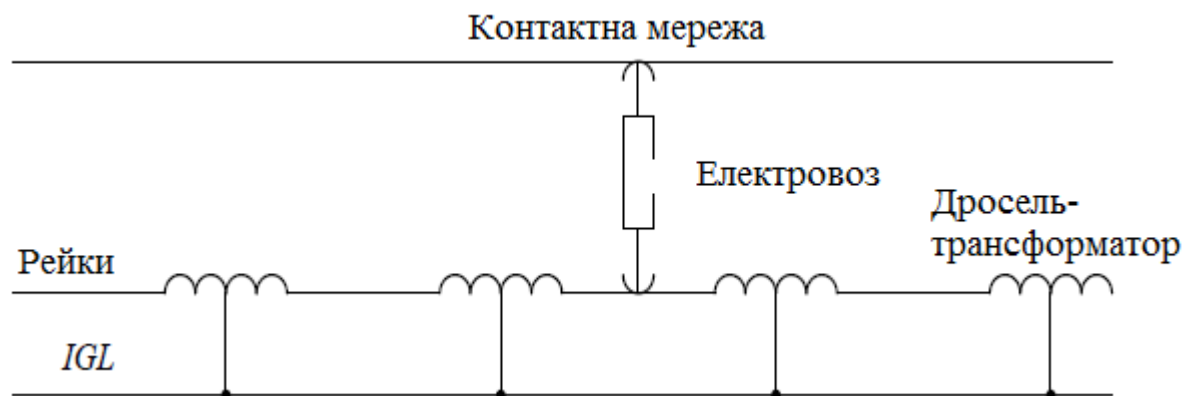


Рисунок 1.7 – Система з'єднання IGL з рейковою мережею

В роботі [94] представлені результати експериментів щодо застосування IGL на лінії SUI – YU, які показали, що застосування цієї системи сприяє зниженню потенціалу рейок майже на третину. Але більш цікавий висновок про те, що зі збільшенням протяжності IGL знижується її активний поздовжній опір, але при цьому спостерігається зростання реактивного опору.

Цікавим також є система заземлення, що застосовується на залізничній лінії між Туріном і Новарою в Італії [96]. Ця ділянка електрифікована по системі 2х25 кВ змінного струму 50 Гц і включає в себе не тільки протяжний підземний заземлювач, але і заземлення, яке з інтервалом 1500 м приєднуються до нульової точки дроссель-трансформаторів рейкової мережі. Заземлення та підземний заземлювач з'єднуються між собою через кожні 750 м. Крім того кожна опора приєднується до повітряного заземлювального проводу і до протяжному підземному заземлювачу..  
Схема поперечного перерізу, описуваної системи заземлення.

#### 1.4 Конструктивне виконання протяжних заземлюючих пристроїв

Поєднання функцій заземлювального пристрою і провідника зворотного струму в рейкової мережі має негативні наслідки. Аналіз існуючих систем захисту опор контактної мережі на залізничному транспорті показує, що одним з перспективних напрямків в області вдосконалення заземлюючих пристроїв є використання протяжних заземлювачів різної конструкції.

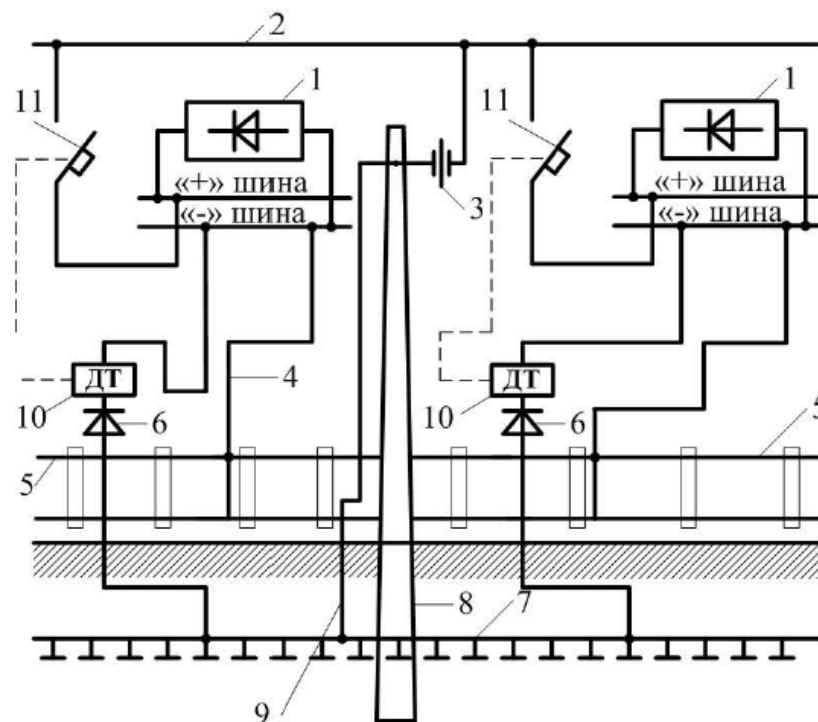
Основною ідеєю протяжного заземлювального пристрою є відмова від заземлення залізобетонних конструкцій на ділянках постійного струму на рейкову мережу. Основною перевагою в цьому випадку буде зниження електричної корозії арматури залізобетонних конструкцій, викликаній протіканням струму з рейок через саму конструкцію в землю. Такий процес спостерігається в так званих «анодних» зонах – зонах, де потенціал рейок позитивний. Відключення конструкцій від рейок ліквідує вказаний шлях протікання струму, однак при цьому утворюється інший – струм може протікати від заземлювача через конструкції в землю. У цьому випадку необхідно, щоб потенціал заземлювача залишався негативним, що забезпечить катодну поляризацію конструкцій, з'єднаних з ним. При катодній поляризації, тобто навмисному зниженні потенціалу споруди нижче рівня нуля, процеси електричної корозії зупиняються і знову не виникають. Чим нижче буде рівень потенціалу споруди, тим буде стійкішою поляризація і тим ефективніше буде здійснюватися захист конструкцій.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Виходячи з описаних вище моментів, було вирішено дослідити декілька варіантів конструктивного виконання протяжних заземлюючих пристроїв, які відрізняються видом протяжного заземлювача:

- варіант із застосуванням горизонтального заземлюючого електрода;
- варіант із застосуванням комбінованого заземлювача;
- варіант із застосуванням заземлюючого проводу.

Варіант із застосуванням горизонтального заземлюючого електрода є основним вихідним варіантом і є вдосконаленням протяжного заземлювального пристрою, розробленого в УрГУПС [15]. Основною конструктивною зміною є спосіб підключення заземлення до негативного полюсу джерела електропостачання. Принципова схема пристрою представлена на рис.1.8 [98...102].



1 – тягова підстанція постійного струму; 2 – контактна мережа; 3 – ізоляція контактної мережі;  
4 – фідер зворотного струму тягової підстанції; 5 – рейкова мережа; 6 – полярізуючі діодні  
блоки; 7 – горизонтальний заземлюючий електрод; 8 – опорні конструкції; 9 – заземлюючий  
провідник; 10 – датчик струму протяжного заземлювача; 11 – швидкодіючий вимикач  
контактної мережі

Рисунок 1.8 – Схема протяжного заземлювального пристрою опор контактної мережі із застосуванням горизонтального заземлюючого електрода



Конструкція такого заземлювального пристрою передбачає приєднання залізобетонних конструкцій безпосередньо до протяжного заземлювача. Приєднання здійснюється на рівні п'яти консолю, або через діагностичний вивід арматури опори.

Підключення заземлювального пристрою здійснюється до «-» шини тягової підстанції, через датчик струму і поляризовуючий діодний блок. Основна функція датчика струму – вимір струму в заземлювачі в місці підключення до тягової підстанції. Інформація про величину струму заземлювача надходить в блок управління швидкодіючим вимикачем, який відбудовується на відключення вимикача при певному значенні струму заземлювача. Поляризовуючий діодний блок призначений для запобігання протікання струму з «-» шини тягової підстанції до заземлювача при проходженні поїздів поблизу місця підключення до «-» шини.

До основних переваг представленого варіанту конструктивного виконання можна віднести:

- 1) здійснення захисту фундаментів, опор контактної мережі та інших підземних споруд, приєднаних до протяжного заземлювача, від електричної корозії;
- 2) зменшення трудомісткості робіт по ремонту залізничних колій за рахунок усунення приєднань до рейок;
- 3) підвищення надійності роботи рейкових кіл автоблокування;
- 4) здійснення захисту заземлювального пристрою опор контактної мережі від проявів «вандалізму».

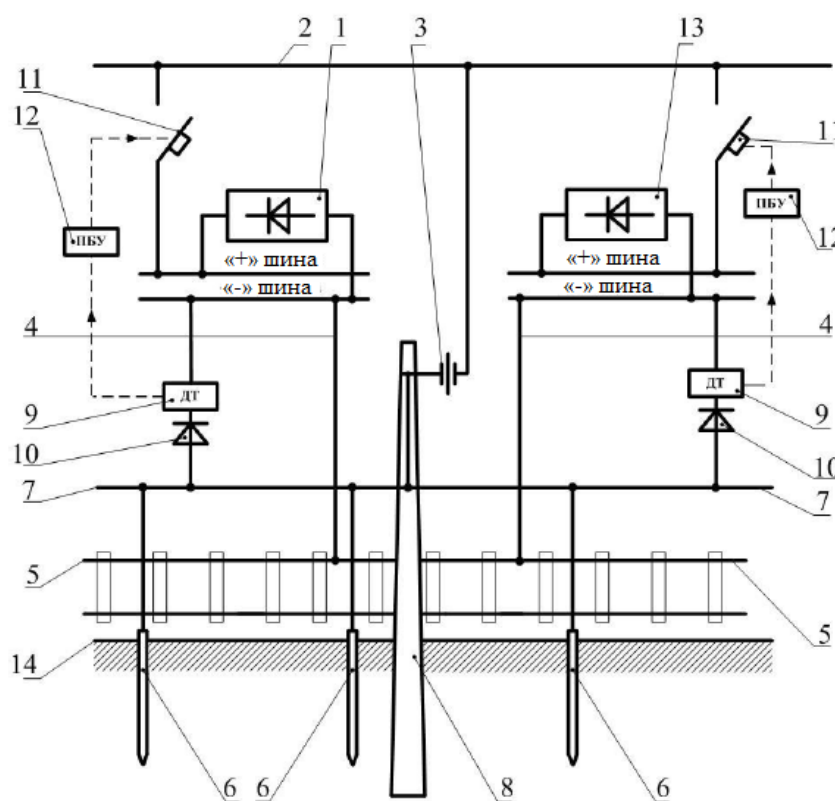
Головними недоліками даного варіанту виконання є нестійка катодна поляризація, а також необхідність значних матеріальних витрат на монтаж пристрою.

Комбінований заземлювач включає в себе вертикальні заземлюючі електроди, що розташовуються на певній відстані один від одного. У свою чергу, вони об'єднуються металевим заземлюючим провідником, який встановлюється на опорах контактної мережі з польової сторони. В якості заземлюючого проводу

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовується провід марки ПБСМ-70. Вертикальні заземлюючі електроди розташовуються на відстані 500 м один від одного і виконуються з сталеві арматури діаметром 12 мм.

При використанні комбінованого заземлювача в цілому по довжині електрифікованої ділянки, перехідний опір «заземлювач – земля» дорівнюватиме нескінченності, так як заземлюючий провідник відділений від землі та ізольований повітрям, що представляє собою діелектрик. В цьому випадку для струму можливі два шляхи витоку: через опір вертикальних електродів, або через опір опор, які, згідно рис. 1.9, безпосередньо зв'язані з заземлюючим провідником «+» шини.



- 1 – тягова підстанція постійного струму; 2 – контактна мережа; 3 – ізоляція контактної мережі;  
 4 – рейковий фідер тягової підстанції; 5 – рейкова мережа; 6 – вертикальний електрод;  
 7 – металевий заземлювач; 8 – опори контактної мережі; 9 – датчик струму; 10 – поляризуючі діодні блоки; 11 – швидкодіючий вимикач; 12 – програмований блок управління; 13 – суміжна підстанція; 14 – рівень поверхні землі

Рисунок 1.9 – Схема протяжного заземлювального пристрою опор контактної мережі із застосуванням комбінованого заземлювача

Основними перевагами варіанту конструкції заземлюючого пристрою із застосуванням комбінованого заземлювача є зменшення робіт на його улаштування. Монтаж вертикального електрода в декількох місцях ділянки коштує набагато дешевше і займає менше часу, ніж монтаж горизонтального електрода по всій довжині ділянки. При цьому немає необхідності закривати на ділянці. Всі основні переваги, зазначені для варіанту з горизонтальним електродом, справедливі і для варіанту з комбінованим заземлювачем. Виняток становить тільки захищеність від проявів «вандалізму»: заземлювальний провідник розташовується на опорах з польової сторони і може бути пошкоджений в корисливих цілях.

Відсутність розподіленої зв'язки між заземлювальним проводом і рейковою мережею призведе до зменшення їх взаємного впливу один на одного, прямим наслідком чого буде зниження потенціалу заземлюючого проводу. Іншими словами, буде підвищена стійкість катодного поляризації споруд, що захищаються. У цій ситуації, стійкість поляризації буде прямо залежати від опору розтікання вертикальних електродів і опору приєднань до заземлювального проводу опор. Чим вище будуть ці опору, тим нижче буде потенціал проводу і тим стійкіше буде поляризація і навпаки. Крім того, відстань між вертикальними електродами також буде впливати на стійкість поляризації: чим ближче один до одного будуть розташовані електроди, тим більше їх число буде міститися на всій довжині ділянки, і тим більше струму буде протікати через них в цілому.

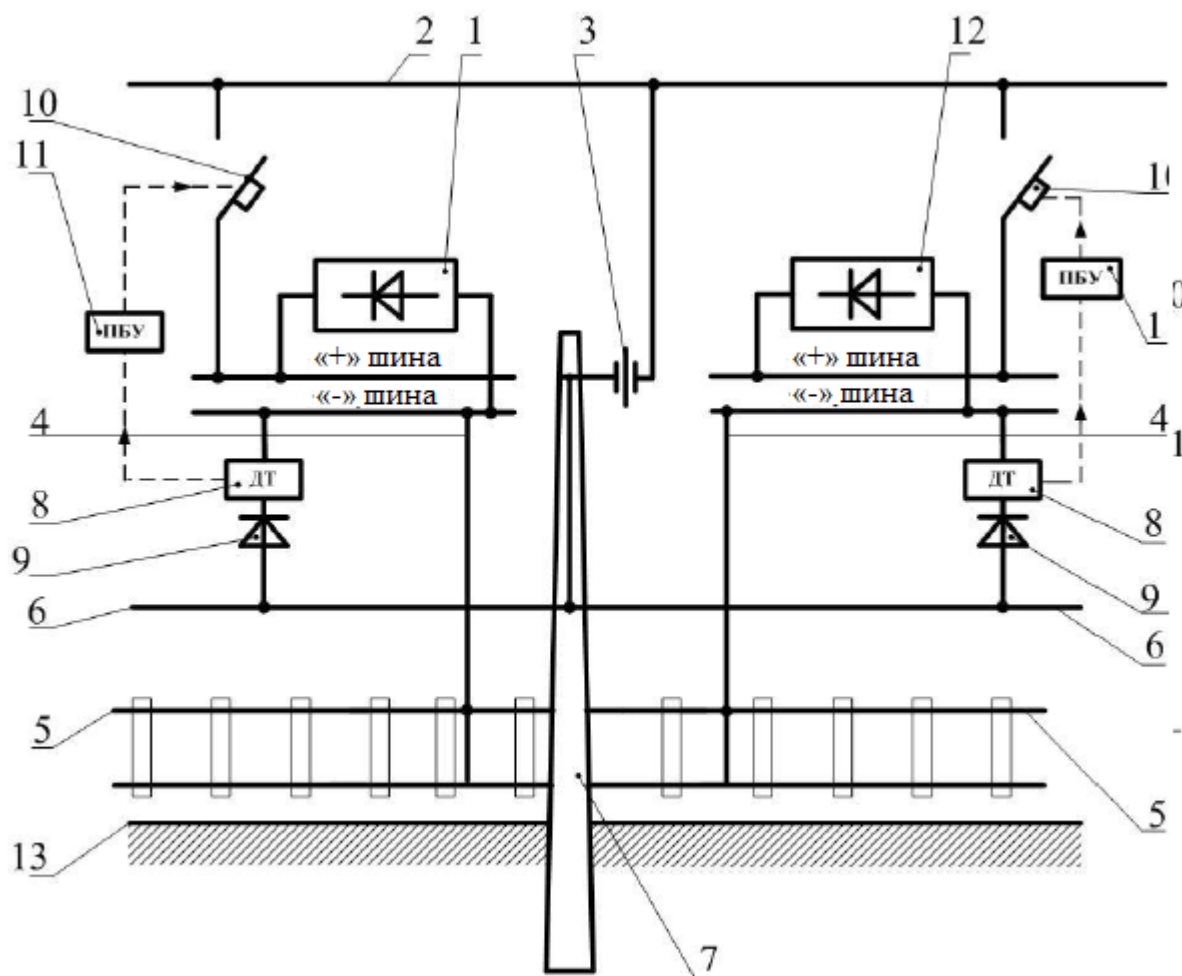
Виходячи із зазначених вище особливостей конструкції, варіант із застосуванням комбінованого заземлювача, був запропонований варіант із застосуванням тільки заземлюючого проводу.

В якості заземлюючого проводу також пропонується застосовувати провід ПБСМ-70.

Як видно з рис. 1.10 при використанні заземлюючого проводу в конструкції заземлювального пристрою відсутні будь-які елементи, пов'язані з землею. Таке рішення дозволило підвищити стійкість катодної поляризації заземлюючого

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проводу. Однак, як і в попередньому випадку, залишається шлях витоку струму з заземлюючого проводу через опір опор контактної мережі. Від опору опор буде залежати величина стікаючого струму і відповідно стійкість поляризації.



- 1 – тягова підстанція постійного струму; 2 – контактна мережа; 3 – ізоляція контактної мережі;  
 4 – рейковий фідер тягової підстанції; 5 – рейкова мережа; 6 – металевий заземлюючий провід;  
 7 – опори контактної мережі; 8 – датчик струму; 9 – поляризуючі діодні блоки;  
 10 – швидкодіючий вимикач; 11 – програмований блок управління; 12 – суміжна підстанція;  
 13 – рівень поверхні землі

Рисунок 1.10 – Схема протяжного заземлювального пристрою опор контактної мережі із застосуванням заземлюючого проводу

1) Використання рейок і землі в якості живлячої полюса при електропостачанні локомотивів електричної тяги постійного струму викликає довготривале протікання високих рівнів постійних струмів в землі, що призводить

до інтенсивної електричної корозії фундаментів і підземних частин опор контактної мережі.

2) На сьогоднішні розроблено безліч систем захисту опор контактної мережі від електричної корозії: потенційний захист Донецької зілинці, миттєвий потенційна захист, захист опор, ізольованих від рейок. Зазначені системи мають суттєві недоліки.

3) Аналіз іноземних джерел показав, що в країнах Європи велику увагу приділяють проблемі електрокорозії на ділянках постійного струму. Найбільш перспективною серед зарубіжних систем можна вважати систему, основу на спільному використанні протяжного підземного заземлювача і заземлюючого провідника.

4) На основі результатів аналізу вітчизняних і закордонних систем заземлення та захисту опор було виявлено перспективний напрямок їх розвитку, що полягає у відмові від використання рейкової мережі в якості заземлюючого пристрою. Ґрунтуючись на ідеї використання сторонніх протяжних заземлювачів, були розроблені варіанти конструктивного виконання протяжних заземлюючих пристроїв, що мають функціональні особливості.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТЕНЦІАЛІВ ТА СТРУМІВ У СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

### 2.1 Електричні параметри опор контактної мережі

Протяжні заземлюючі пристрої передбачається використовувати на діючих ділянках з метою підвищення терміну служби залізобетонних опор, які схильні до електричної корозії на ділянках постійного струму.

Конструкція заземлювального пристрою передбачає приєднання опор безпосередньо до протяжного заземлювача, тим самим створюється умова для протікання струму через тіло опори. Для того щоб враховувати цей процес при математичному моделюванні системи «рейки-протяжний заземлювач» необхідно знайти опір опор з урахуванням їх опору розтікання.

Підключення опор до протяжного заземлювача може проводитися за допомогою випуску заземлювача опор при його наявності, або ж з використанням підключення до хомута консолі опори.

В цьому випадку, опір опори необхідно розглядати від рівня п'яти консолі до її підземної частини, або до підземної частини фундаменту. Схема підключення опори до заземлювача представлена на рис. 2.1

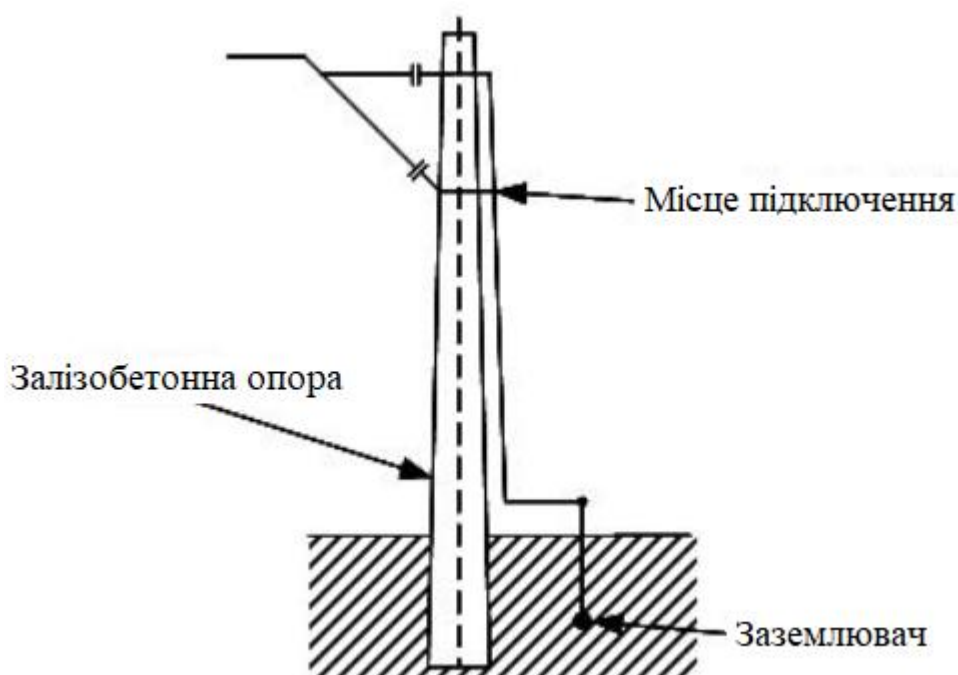


Рисунок 2.1 – Схема підключення опори до заземлювача

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Залізобетонна опора включає в себе дві основні частини: бетон і металевий арматурний каркас. Бетон слабо проводить електричний струм, при цьому його питомий опір сильно залежить від його зволоженості, арматура ж виконується зі сталі і в порівнянні з бетоном є дуже гарним провідником електричного струму.

В цьому виражається особливість залізобетонної опори як провідника електричного струму, виходячи з якої, на величину її опору впливає конфігурація арматурної сітки [105, 106]. Це також відноситься і до залізобетонних фундаментів. Ґрунтуючись на ідеї використання сторонніх протяжних заземлювачів, були розроблені варіанти конструктивного виконання протяжних заземлюючих пристроїв, що мають функціональні особливості.

Зі співвідношення питомих опорів бетону і арматури впливає ще одна особливість залізобетонних конструкцій як електричних провідників: при протіканні струму потенціал арматури практично не буде змінюватися по її довжині, тобто поверхня арматури буде еквіпотенціальною [107]. При цьому величина струму, що втікає в арматурну сітку дорівнює величині струму, що з неї витікає.

Крім залізобетонних опор на ділянках електрифікованих залізних постійного струму активно використовуються металеві опори, що встановлюються на залізобетонні фундаменти. Якщо оцінити опір металевої опори, то очевидно, що воно буде набагато меншою, ніж опір залізобетонного фундаменту. Таким чином, при оцінці опору металевої опори з урахуванням її опору розтікання досить розглянути тільки залізобетонний фундамент розташований в землі.

Процес протікання постійного струму по залізобетонній конструкції описується системою рівнянь, яка може бути застосована до тривимірної моделі

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div}(\vec{J}) &= 0 \\ \vec{J} &= \sigma \cdot \vec{E} \\ \vec{E} &= -\operatorname{grad}(\varphi) \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

де  $\vec{J}$  – вектор густини електричного струму, А/м<sup>2</sup>;

$\vec{E}$  – вектор напруженості електричного поля, В/м;

$\sigma$  – питома електропровідність, См/м;

$\varphi$  – електричний потенціал, В.

Перше рівняння показує, що в даній області немає джерел струму, друге – описує залежність між вектором густини струму і вектором напруженості електричного поля, а третє – виражає потенціал, через вектор напруженості.

При моделюванні необхідно завдання граничних умов: необхідно задати зону зовнішнього потенціалу та зону нульового потенціалу. Оскільки розглядається тривимірна модель, то граничні умови задаються на поверхнях.

$$\int_{S_{\text{арм}}} J_{\text{арм}}^n dS_{\text{арм}} = 0, \quad (2.2)$$

де  $S_{\text{арм}}$  – це зовнішня поверхня арматури, яка контактує з бетоном, м<sup>2</sup>;

$J_{\text{арм}}^n$  - густина струму по нормалі до арматури, А/м<sup>2</sup>.

Вираз (2.2) означає, що при потенціалі арматури  $\varphi$  весь струм, втікає в неї з бетону по всій поверхні дотику і дорівнює зворотному струму витоку.

Застосовуючи описані граничні умови до будь-якої залізобетонної конструкції, можна отримати розподіл потенціалів в тілі конструкції і в навколишньому ґрунті, на основі якого в подальшому буде визначатися власне опір конструкції з урахуванням її опору розтікання струму.

Бетон являє собою складну багатокомпонентну структуру [2], питомий опір якої залежить від багатьох факторів, найбільш важливим з яких є наявність вологи. Зволоження призводить зниження опору практично будь-яких матеріалів.

В відношенні бетону наявність вологи знижує його опір в десятки разів: опір сухого бетону досягає значень 1000 Ом · м, при цьому питомий опір сильно зволоженого бетону може знижуватися до 40 Ом · м.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Питомий опір ґрунту також сильно залежить від наявності вологи. Крім цього його величина змінюється протягом року: взимку питомий опір ґрунту в середньому вище, ніж влітку. Очевидна сильна неоднорідність ґрунту не тільки у вертикальній, але і в горизонтальній площинах. Виходячи з цього, в якості вихідних даних для задання питомої опору ґрунту використовуються результати вертикального електричного зондування, наведені в [115].

Необхідно визначити значення опорів залізобетонних конструкцій при різних величинах питомих опорів ґрунту і бетону. Питомий опір бетону буде варіюватися від 200 до 1000 Ом · м, опір ґрунту – від 150 до 350 Ом · м.

Епюра розподілу потенціалів в тілі залізобетонної опори і в землі показано на рис. 2.2.

За отриманими розподілами можна визначити величину опору розглянутих конструкцій як відношення потенціалу поверхні до інтеграла нормальної складової щільності струму по цій поверхні.

$$r_k = \frac{\varphi}{\iint_S J_S^n}, \quad (2.3)$$

де  $S$  – поверхня, на якій задається потенціал, відмінний від 0;

$\varphi$  – потенціал поверхні, В;

$J_S^n$  – складова густини струму, направлена по нормалі до поверхні  $S$ , А/м<sup>2</sup>.

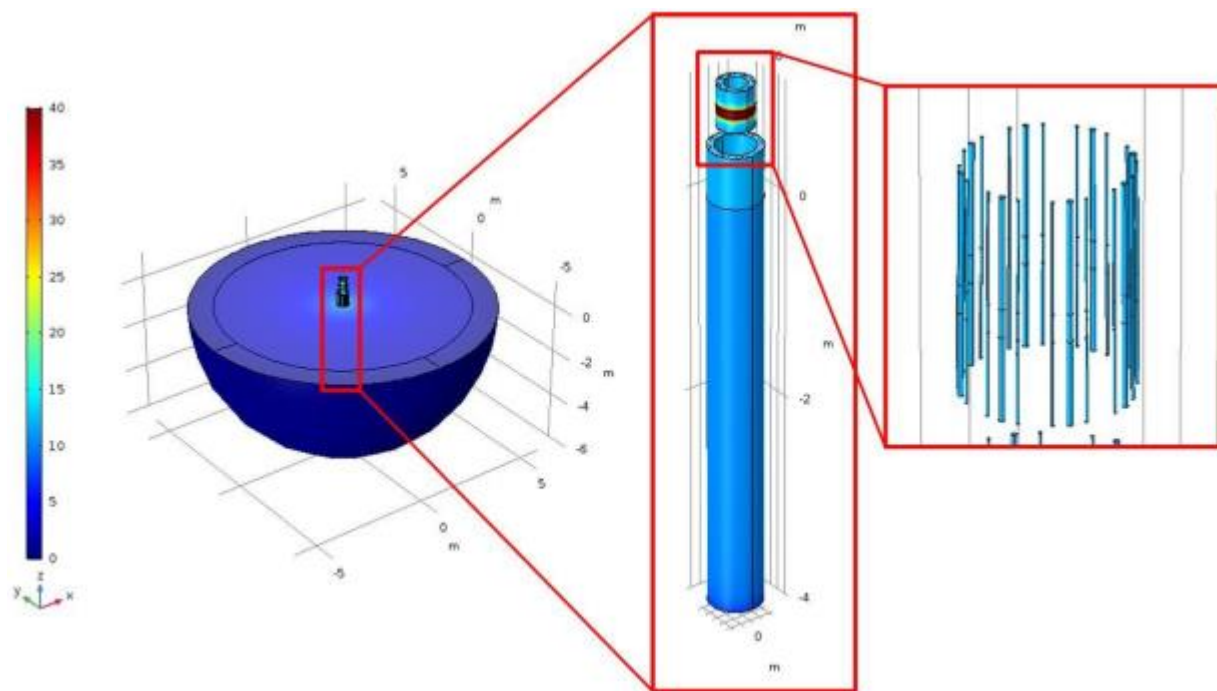


Рисунок 2.2 – Розподіл потенціалу в землі і на поверхні нероздільної опори СС-136.6 при питомому опорі бетону  $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  і питомому опорі ґрунту  $350 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (кольорова шкала в вольтах)

На рис. 2.3 наведені графіки залежності опору розглянутої опори СС-136.6 при різних значеннях питомих опорів ґрунту і бетону.

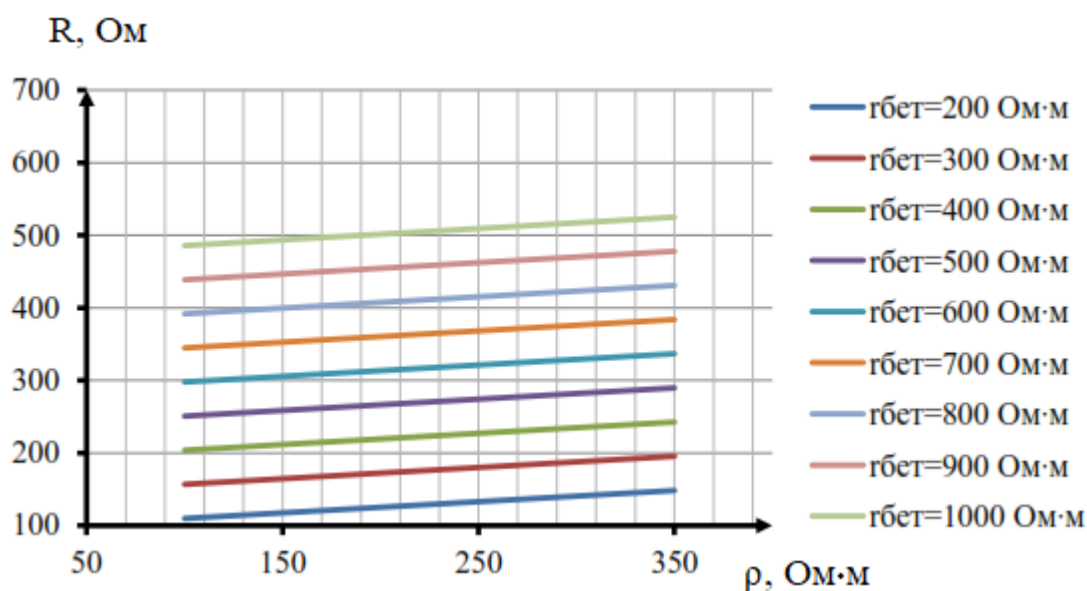


Рисунок 2.3 – Залежність опору стійки опори СС-136.6 від питомого електричного опору ґрунту, для різного значення опору бетону

На величину опору залізобетонних конструкцій впливає наявність гідроізоляційного шару. В якості гідроізоляції, як правило, використовується склади типу бітуму, що володіють великим питомим опором. У опор контактної мережі бітумний склад наноситься на основу опори. При ідеальному стані гідроізоляції: відсутності тріщин і пошкоджень, опір опори буде вимірюватися сотнями кОм, однак в реальності захисний шар може бути пошкоджений, мати тріщини або взагалі бути відсутнім. Виходячи з вищесказаного, необхідно визначити залежність опору залізобетонних конструкцій від наявності пошкоджень гідроізоляційного шару.

У разі залізобетонних опор товщина шару може бути прийнята рівною 0,5 мм, питомий опір бітуму дорівнює  $10 \dots 13 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , діелектрична проникність бітуму дорівнює 2,5. Шаром бітуму опора покривається на висоту 4 м від основи.

Тріщини в гідроізоляційному шарі моделювалися овалами різного перетину, які розміщувалися нижче рівня землі. Моделювання проводилося для овалів перетином: 25, 100, 225, 1257, 3142 і 6283 мм. Овал розташовувався на 0,9 м нижче рівня поверхні землі. Очевидно, що розташування тріщини в захисному шарі впливає на величину опору, але в даному випадку мета - оцінити вплив саме площі пошкодження на опір опори.

В результаті чисельного моделювання були отримані криві залежності опору стійки опори СС-136.6 від площі модельованої тріщини при питомому опорі ґрунту  $350 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (рис .2.4).

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

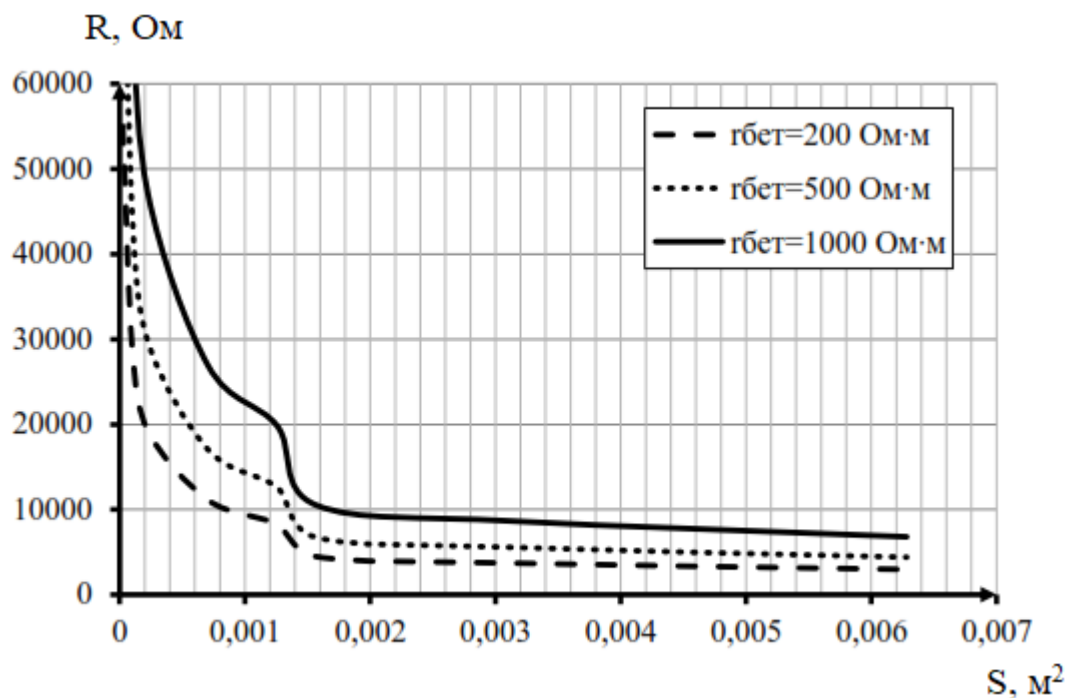


Рисунок 2.4 – Залежність опору стійки опори СС-136.6 та питомого електричного опору ґрунту в залежності від площі пошкодження шару гідроізоляції

## 2.2 Оцінка величини перехідного опору та взаємних провідностей в системі «рейки – протяжний заземлювач»

Перехідний опір є одним з первинних параметрів рейкової мережі, виходячи з чого визначення його величини є одним із завдань, без вирішення якої неможливо оцінити розподіл потенціалів в системі «рейки-протяжний заземлювач» [2, 5, 14].

Очевидно, що визначення величини перехідного опору – завдання складне, оскільки на нього впливає безліч факторів. Найбільш загальними можна вважати структуру і питомий опір ґрунту, оскільки рейки лежать на поверхні землі. Крім цього, необхідно враховувати тип рейок, геометрію верхньої будови колії, матеріал баластної призми, матеріал шпал, наявність ізолюючих прокладок між рейками і шпалою.

Існують аналітичні вирази, що дозволяють розраховувати перехідні опори рейкової мережі, в яких частково або повністю враховується геометрія верхньої будови колії за допомогою різних коефіцієнтів. Перехідний опір протяжного заземлювача щодо віддаленої землі може бути визначено за допомогою виразу:

$$r_{33} = \frac{1}{2\pi l \gamma_a} \lg \frac{8l^2}{\pi d t}, \quad (2.4)$$

де  $l$  – довжина заземлювача, м;

$\gamma_a$  – провідність землі, См/м;

$d$  – радіус заземлювача, м;

$t$  – глибина залягання заземлювача.

Недолік формули (2.4) полягає в тому, що вона не враховує неоднорідність ґрунту, яка виражається в різній величині його провідності на різній глибині.

Поняття «взаємна провідність» являє собою величину, що дозволяє враховувати взаємний вплив рейкової мережі і протяжного заземлювача, знаходяться в безпосередній близькості один від одного. Вплив виражається в протіканні струмів з рейкової мережі в заземлювач і навпаки. В цьому випадку важливо враховувати просторове розташування рейкової мережі і заземлення відносно один одного. Виходячи з вищесказаного, взаємна провідність системи «рейки-протяжний заземлювач» повинна враховувати межі розділу «заземлювач - ґрунт» і «рейки-шпала», а також провідність ґрунту, який їх розділяє.

У загальному випадку взаємна провідність по суті своїй є зворотним значенням перехідного опору, з тією лише різницею, що в разі взаємних провідностей необхідно розглядати провідності двох елементів відносно один одного, а не провідності одного елемента щодо віддаленої землі.

Розрахунки перехідних опорів і взаємних провідностей засновані на системі рівнянь Максвелла, що описують будь-які електромагнітні поля в будь-яких середовищах. Складність розрахунку полягала в правильному завданні граничних умов і отриманні конкретного рішення. Для цієї мети застосовувалися допущення, які спрощували математичну модель, дозволяючи отримати аналітичні рішення.

Однак подібний підхід не завжди давав точні результати і міг приводити до значних погрешностей.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Розвиток цифрових технологій відкрив можливості для застосування чисельних методів розрахунку, основна ідея яких полягає в переході від виконання граничних умов на всій розрахунковій області до виконання граничних умов на наборі заданих точок. Чисельні методи дозволили з достатнім ступенем точності вирішити деякі завдання, які не можна було вирішити аналітично. При чисельному рішенні можна враховувати конкретну геометрію розглянутого об'єкта, при цьому іноді не потрібно вводити припущень для її спрощення. Однак, для чисельних рішень необхідні значні обчислювальні потужності, спеціалізовані програмні продукти, а також навик роботи з ними.

При визначенні перехідного опору рейкової мережі можна використовувати чисельний метод розрахунку, а саме метод кінцевих елементів. В цьому випадку слід розглядати поперечний переріз колії, всередині якої і буде визначатися розподіл електричного поля. На основі цього розподілу можна, можливо визначити перехідний опір рейкової мережі на відповідних межах [116].

Розподіл електричного поля в провідному просторі описується системою рівнянь (2.1), яка може бути застосована для випадку двовимірного завдання.

Вирішення буде виконуватися для поперечного перерізу колії, обладнаної протяжним заземлювачем. Геометрія розрахункової моделі представлена на рис. 2.5.

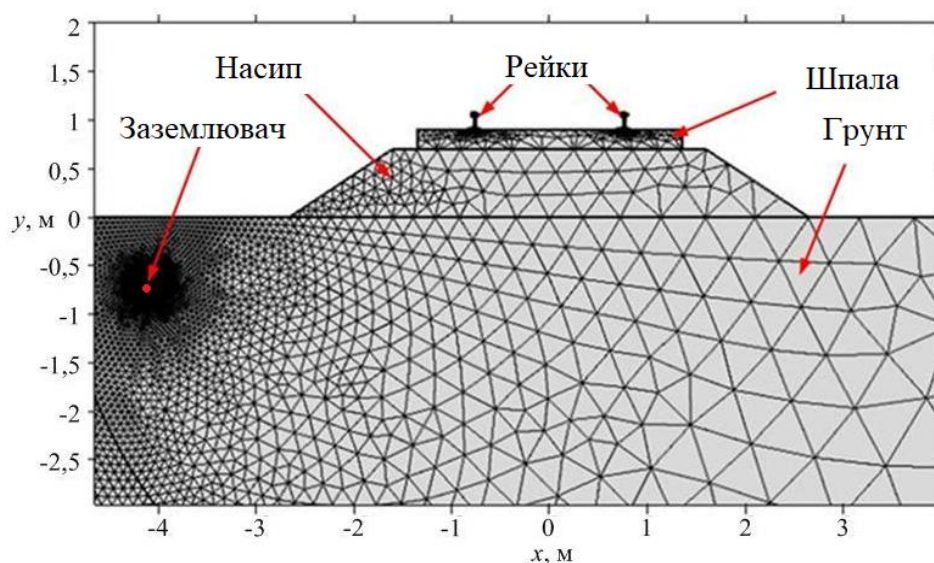


Рисунок 2.5 – Геометрія розрахункової моделі поперечного перетину колії

При визначенні перехідного опору рейкової мережі нульовий потенціал буде здаватися на зовнішньому кордоні розрахункової області, що представляє собою віддалене заземлення. Відповідно, потенціал, відмінний від нуля, буде задаватися на лініях дотику рейок зі шпалою.

При визначенні взаємної провідності двох елементів системи «рейки-протяжний заземлювач» на одно- або двоколіній ділянці, граничні умови задаються виходячи з того, що потрібно визначити провідність тільки між двома конкретними елементами. В цьому випадку нульовий потенціал задається на кордоні першого елемента, а потенціал, відмінний від нуля, задається на другому елементі. Очевидно, що якщо поміняти елементи місцями шукана величина не зміниться. При цьому на зовнішньому кордоні розрахункової області задається умова ізоляції.

Крім граничних умов, що забезпечують вирішення розглянутої моделі, важливу роль відіграють матеріали об'єктів, що беруть участь в моделі. В нашому випадку це матеріали шпал, баласту і ґрунту. Для визначення розподілу електричного поля необхідно задати питомі опору зазначених об'єктів. Як матеріал шпал буде розглядатися бетон, а в якості матеріалу баласту - щебінь.

Необхідно визначити значення перехідних опорів і взаємних провідностей при різних величинах питомих опорів ґрунту, бетону шпал, щебеню баласту. Питомий опір бетону шпал приймається рівним 200, 500 і 1000 Ом · м; питомий опір щебеню приймається рівним 3000 і 5000 Ом · м, опір ґрунту приймається рівним 150, 250 і 350 Ом · м.

Крім параметрів матеріалів елементів, шукані величини будуть залежати від розташування елементів. Так взаємні провідності будуть залежати від глибини залягання заземлювача, відповідно цей параметр також матиме кілька значень.

Далі необхідно пояснити, яким чином будуть визначатися шукані опору і провідності. В результаті чисельного моделювання буде отримано розподіл потенціалів всередині даної області, на основі якого можна буде визначити величину напруженості електричного поля і щільності струму. Очевидно, що

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



шукані величини будуть залежати від щільності струму, спрямованої по нормалі до розглянутої кордоні. У випадку з заземлювачем: по нормалі до кордону заземлювача, у випадку з рейками - по нормалі до кордоні дотику рейок і шпали. Перехідний опір буде визначатися виразом:

$$r = \frac{\varphi}{\int_L J_n}, \quad (2.5)$$

де  $L$  – границя, на якій визначається перехідний опір;

$\varphi$  – потенціал на границі, В;

$J_n$  – складова вектору щільності струму, яка направлена по нормалі до границі, яка розглядається, А/м.

Задання граничних умов для визначення конкретного перехідного опору або взаємної провідності буде здійснюватися за тим же принципом, що і для випадку одноколіїної ділянки. Розподіл електричного поля в даній області для одно- і двоколіїної ділянок наведені на рис. 2.6 і 2.7 відповідно.

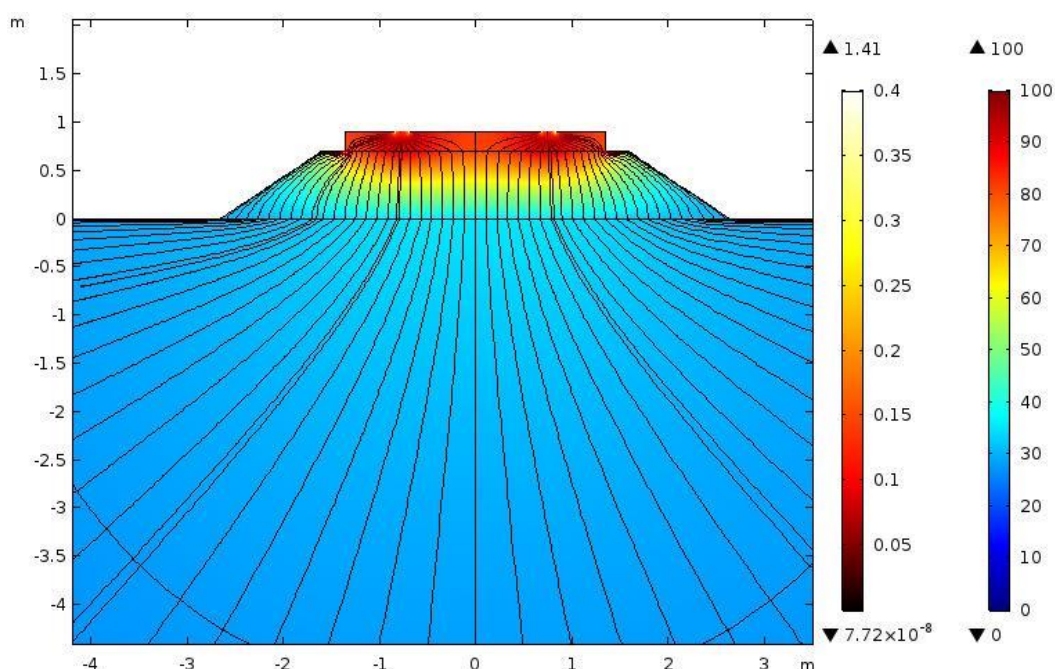


Рисунок 2.6 – Розподіл електричного в поперечному перетині одноколіїної ділянки (ліва шкала в А/м<sup>2</sup>, права шкала шкала в вольтах)



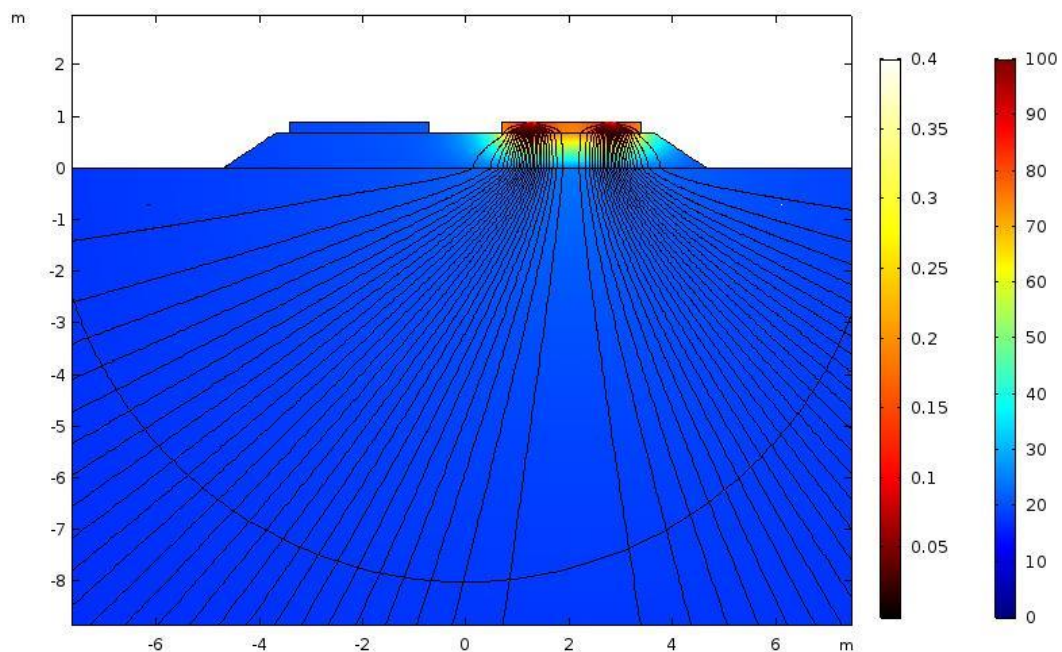


Рисунок 2.7 – Розподіл електричного в поперечному перетині двоколіїної ділянки (ліва шкала в  $A/m^2$ , права шкала шкала в вольтах)

На рис. 2.6, 2.7 у вигляді колірної розподілу показано розподіл потенціалу поблизу верхньої будови колії. В обох випадках граничні умови задавалися на кордоні між рейками і шпалою і на зовнішньому кордоні розрахункової області (на рис. 2.6, 2.7 не показана). З малюнків видно, що поблизу лінії задання потенціалу спостерігається найбільше його значення, яке знижується в міру віддалення. Також на рисунках показані лінії щільності струму, які мають колірну градацію. Очевидно, що найбільша щільність струму спостерігається поблизу Межі, на якій заданий потенціал. Це говорить про адекватність отриманих результатів чисельного рішення моделі поперечного перетину колії.

Кінцевою метою чисельного моделювання є отримання залежності перехідних опорів і взаємних провідностей всіх елементів системи «рейки-протяжний заземлювач» при різних значеннях питомого опору ґрунту, баласту, шпал і глибини залягання заземлювача. Результати розрахунку взаємної провідності рейок першої колії і заземлювача першої колії представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Взаємна провідність «рейки першої колії – заземлювач першої колії», См/м

Питомий електричний опір шпал	Питомий електричний опір баласту	$R_{\text{землі}}=150$ Ом·м	$R_{\text{землі}}=250$ Ом·м	$R_{\text{землі}}=350$ Ом·м
$R_{\text{шпал}}=200$ Ом·м	$R_{\text{баласт}}=3000$ Ом·м	0,002046	0,001745	0,001522
	$R_{\text{баласт}}=5000$ Ом·м	0,001426	0,001272	0,001149
$R_{\text{шпал}}=500$ Ом·м	$R_{\text{баласт}}=3000$ Ом·м	0,001816	0,001575	0,001391
	$R_{\text{баласт}}=5000$ Ом·м	0,001307	0,001177	0,001070
$R_{\text{шпал}}=1000$ Ом·м	$R_{\text{баласт}}=3000$ Ом·м	0,001547	0,001368	0,001227
	$R_{\text{баласт}}=5000$ Ом·м	0,001155	0,001052	0,000966

Інші результати розрахунків приведено в Додатку А.

### 2.3 Розробка математичної моделі системи «рейки-протяжний заземлювач»

Недоліком загальноприйнятої математичної моделі системи «рейка - протяжний заземлювач» є те, що в цій моделі елементи системи розглядаються тільки щодо віддаленої землі. Конкретно це виражається в тому, що струми, що стікають з рейок і заземлювача, протікають тільки в напрямку віддаленої землі.

Протікання струму між елементами системи визначається співвідношенням їх потенціалів, а також опором ґрунту, який їх розділяє, відповідно, чим більша різниця потенціалів, тим більша величина струму буде протікати від рейок до протяжного заземлювача. При цьому величина стікаючого струму з кожного з елементів залежить від його потенціалу. Таким чином, потенціал кожного елемента системи буде залежати від потенціалу суміжного елемента. Схема заміщення в цьому випадку набуде вигляду рис. 2.8.

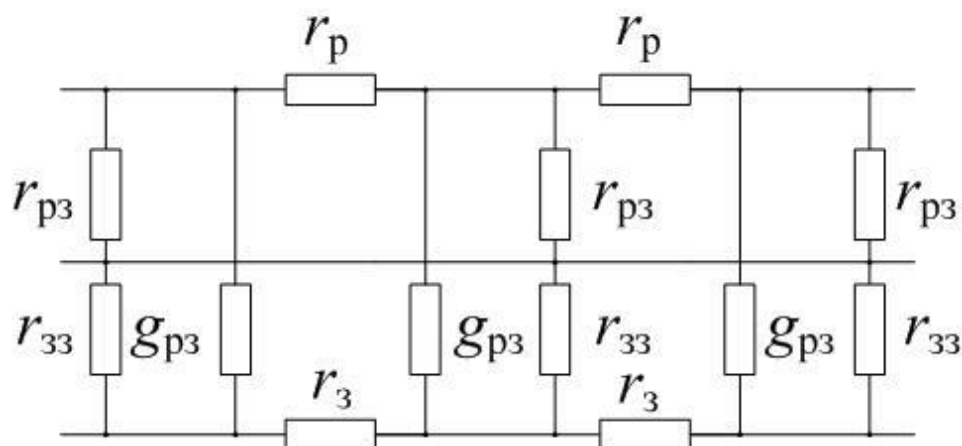


Рисунок 2.8 – Схема заміщення системи «рейка – протяжний заземлювач»

З огляду на вищесказане, можна записати уточнену систему диференціальних рівнянь, що враховує взаємний вплив рейкової мережі і протяжного заземлювача один на одного.

$$\left. \begin{aligned} I_3 r_3 &= -\frac{d\varphi_3}{dx} \\ I_p r_p &= -\frac{d\varphi_p}{dx} \\ -\left( \frac{\varphi_3}{r_{33}} + (\varphi_3 - \varphi_p) \cdot g_{p3} \right) &= \frac{dI_3}{dx} \\ -\left( \frac{\varphi_p}{r_{p3}} + (\varphi_p - \varphi_3) \cdot g_{p3} \right) &= \frac{dI_p}{dx} \end{aligned} \right\}, \quad (2.7)$$

де  $g_{p3}$  – взаємна провідність між рейковою мережею та протяжним заземлювачем, См/м.

Загальне вирішення системи рівнянь (2.7) має вигляд:

$$\Phi_P = -\frac{1}{2 \cdot r_3 \cdot r_{P3} \cdot r_{33}} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left( C_4 \cdot e^{\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x} + C_3 \cdot e^{-\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x} \right) \cdot \begin{pmatrix} -r_3 \cdot r_{P3} \cdot r_{33} + r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P \\ +r_{33} \cdot r_P \cdot r_{P3} - r_3 \cdot r_{P3} \cdot \frac{1}{g_{P3}} + \alpha' \end{pmatrix} \\ & + \left( C_2 \cdot e^{\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x} + C_1 \cdot e^{-\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x} \right) \cdot \begin{pmatrix} -r_3 \cdot r_{P3} \cdot r_{33} + r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P \\ +r_{33} \cdot r_P \cdot r_{P3} - r_3 \cdot r_{P3} \cdot \frac{1}{g_{P3}} - \alpha' \end{pmatrix} \end{aligned} \right\}; \quad (2.8)$$

$$\varphi_3 = C_1 \cdot e^{-\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x} + C_2 \cdot e^{\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x} + C_3 \cdot e^{-\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x} + C_4 \cdot e^{\frac{\sqrt{2}}{2} \gamma' \cdot x}$$

$$\gamma' = \frac{\sqrt{-r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_{P3} \cdot \left( -r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P - r_{33} \cdot r_P \cdot r_{P3} - r_3 \cdot r_{P3} \cdot r_{33} - r_3 \cdot r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} + \alpha' \right)}}{r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_{P3}}; \quad (2.9)$$

$$\gamma'' = \frac{\sqrt{r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_{P3} \cdot \left( r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P + r_{33} \cdot r_P \cdot r_{P3} + r_3 \cdot r_{P3} \cdot r_{33} + r_3 \cdot r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} + \alpha' \right)}}{r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_{P3}}; \quad (2.10)$$

$$\alpha' = \sqrt{\begin{aligned} & r_{33}^2 \cdot \frac{1}{g_{P3}^2} \cdot r_P^2 + 2 \cdot r_{33}^2 \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P^2 \cdot r_{P3} - 2 \cdot r_{P3}^2 \cdot \frac{1}{g_{P3}} \cdot r_P \cdot r_3 \cdot r_{P3} - \\ & - 2 \cdot r_{P3} \cdot \frac{1}{g_{P3}^2} \cdot r_P \cdot r_3 \cdot r_{P3} + r_{33}^2 \cdot r_P^2 \cdot r_{P3}^2 + 2 \cdot r_{33}^2 \cdot r_P \cdot r_{P3}^2 \cdot r_3 - \\ & - 2 \cdot r_{P3} \cdot r_P \cdot r_{P3}^2 \cdot r_3 \cdot \frac{1}{g_{P3}} + r_3^2 \cdot r_{P3}^2 \cdot r_{33}^2 + 2 \cdot r_3^2 \cdot r_{P3}^2 \cdot r_{33} \cdot \frac{1}{g_{P3}} + \\ & + r_3^2 \cdot r_{P3}^2 \cdot \frac{1}{g_{P3}^2} \end{aligned}}, \quad (2.11)$$

де  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – постійні інтегрування.

Видно, що в порівнянні з (2.7) загальне рішення значно ускладнилося в силу наявності чотирьох постійних інтегрування в кожній з шуканих функцій.

Формули (2.8)...(2.11) вже малопридатні для аналітичних розрахунків, тому рішення системи (2.7) доцільно виконувати чисельними методами і зокрема методом кінцевих елементів.

Особливістю використання протяжного заземлювального пристрою на двоколісній ділянці є наявність кожної з колій свого заземлювача.

Очевидно, що в цьому випадку рейкова мережа і заземлювачі кожної з колій будуть впливати одна на одну.

Для того щоб в математичній моделі впрохувався взаємний вплив елементів системи «рейки-протяжний заземлювач» необхідно ввести в систему величини взаємних провідностей кожного з елементів відносно одна одної. Наявність суміжної колії значно збільшить кількість зв'язків в порівнянні з одноколісною ділянкою. Наочно це пояснює рис. 2.9.

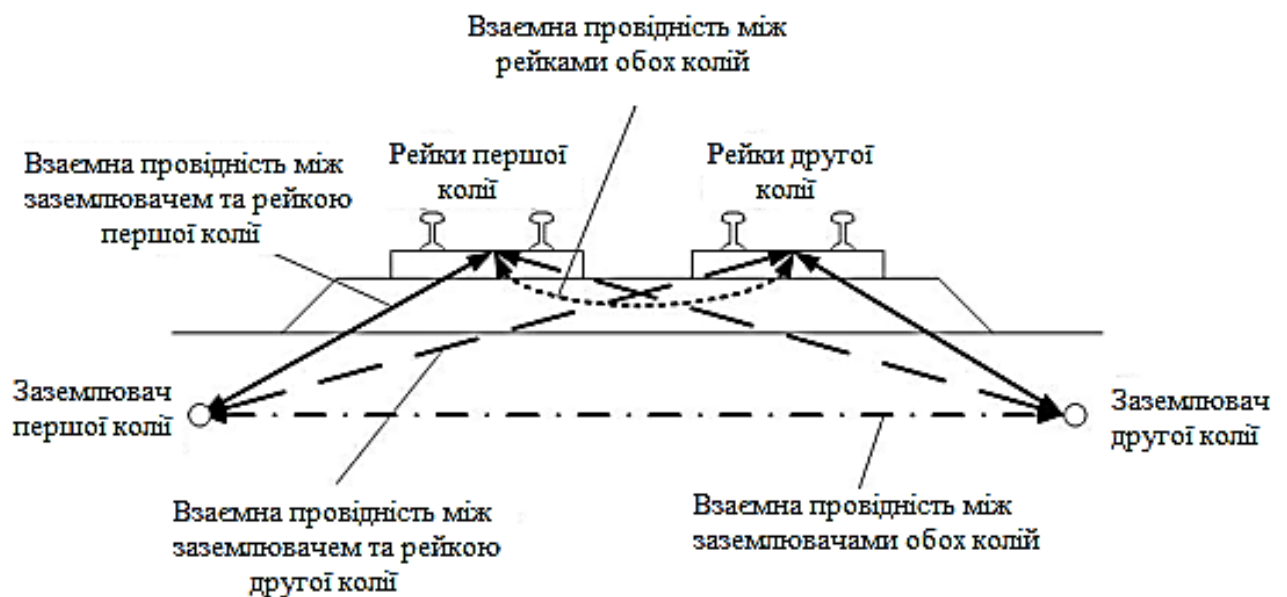


Рисунок 2.9 – Схема впливу елементів системи «рейки-протяжний заземлювач» двоколісної ділянки одна на одну

Враховуючи вищевказане, можна сформулювати системи диференціальних рівнянь, які представляють собою математичну модель описаної системи.

$$\left. \begin{aligned} -I_{31}r_{31} &= \frac{d\varphi_{31}}{dx}, & -I_{P1}r_{P1} &= \frac{d\varphi_{P1}}{dx}, & -I_{32}r_{32} &= \frac{d\varphi_{32}}{dx}, & -I_{P2}r_{P2} &= \frac{d\varphi_{P2}}{dx} \\ \frac{\varphi_{31}}{r_{331}} + (\varphi_{31} - \varphi_{P1}) \cdot g_{P131} + (\varphi_{31} - \varphi_{32}) \cdot g_{3132} + (\varphi_{31} - \varphi_{P2}) \cdot g_{P231} &= -\frac{dI_{31}}{dx} \\ \frac{\varphi_{P1}}{r_{P31}} + (\varphi_{P1} - \varphi_{31}) \cdot g_{P131} + (\varphi_{P1} - \varphi_{P2}) \cdot g_{P1P2} + (\varphi_{P1} - \varphi_{32}) \cdot g_{P132} &= -\frac{dI_{P1}}{dx} \\ \frac{\varphi_{32}}{r_{332}} + (\varphi_{32} - \varphi_{P2}) \cdot g_{P232} + (\varphi_{32} - \varphi_{31}) \cdot g_{3132} + (\varphi_{32} - \varphi_{P1}) \cdot g_{P132} &= -\frac{dI_{32}}{dx} \\ \frac{\varphi_{P2}}{r_{P32}} + (\varphi_{P2} - \varphi_{32}) \cdot g_{P232} + (\varphi_{P2} - \varphi_{P1}) \cdot g_{P1P2} + (\varphi_{P2} - \varphi_{31}) \cdot g_{P132} &= -\frac{dI_{P2}}{dx} \end{aligned} \right\}, \quad (2.12)$$

де  $\varphi_{31}, \varphi_{32}$  – потенціали рейок першої і другої колії, відповідно, В;

$\varphi_{P1}, \varphi_{P2}$  – потенціали рейкових мереж першої і другої колії, відповідно, В;

$I_{31}, I_{32}$  – струми заземлювачів першої і другої колії відповідно, А;

$I_{P1}, I_{P2}$  – струми рейкових мереж першої і другої колії відповідно, А;

$r_{31}, r_{32}$  – повздовжні опори заземлювачів першої і другої колії відповідно, А;

$r_{P1}, r_{P2}$  – повздовжні опори рейкової мережі першої і другої колії відповідно, А;

$r_{331}, r_{332}$  – перехідні опори заземлювачів першої і другої колії відповідно, А;

$r_{P31}, r_{P32}$  – перехідні опори рейкової мережі першої і другої колії відповідно, А;

$g_{331}, g_{332}$  – перехідні опори заземлювачів першої і другої колії відповідно, А;

$g_{P131}, g_{P132}$  – взаємні провідності між рейковою мережею першої колії та заземлювачем першої колії, а також взаємна провідність між рейковою мережею першої колії та заземлювачем другої колії відповідно, А;

$g_{P231}, g_{P232}$  – взаємні провідності між рейковою мережею другої колії та заземлювачем першої колії, а також взаємна провідність між рейковою мережею другої колії та заземлювачем другої колії відповідно, А;

$g_{312}, g_{p1p2}$  – взаємні провідності між заземлювачем першої колії та заземлювачем другої колії, а також взаємна провідність між рейковою мережею першої колії та рейковою мережею другої колії відповідно, А;

З огляду на громіздкість спільного рішення для попереднього випадку, далі спільне рішення для (2.12) не наводиться. В цілому систему (2.12) доцільно вирішувати чисельними методами, оскільки коректне завдання всіх граничних умов для визначення постійних інтегрування шуканих функцій аналітичним шляхом є дуже трудомісткою завданням.

Далі необхідно розглянути граничні умови. За аналогією з одноколійних ділянкою основні граничними умови будуть задаватися в місцях розташування тягових підстанцій і електровозів.

У місці розташування тягової підстанції передбачається підключення рейкових мереж і заземлювачів обох колій до «-» шини тягової підстанції. Виходячи з цього, схема заміщення прийме вид:

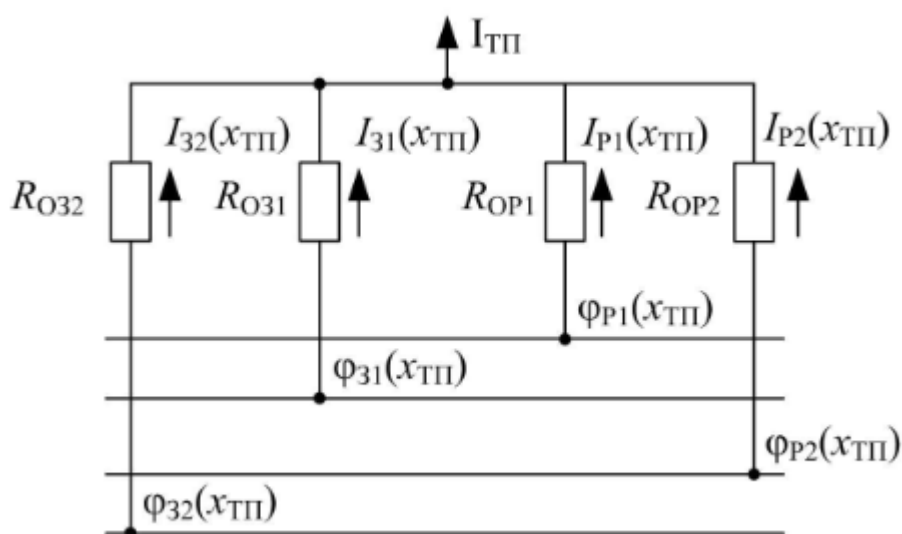


Рисунок 2.10 – Схема заміщення підключення рейкових мереж і протяжних заземлювачів до тягової підстанції на двоколійній ділянці

Для схеми заміщення по рис. 2.13 можна записати систему рівнянь за законами Кірхгофа:



$$\left. \begin{aligned} \varphi_{P1}(x_{ТП}) &= R_{OP1} \cdot I_{P1}(x_{ТП}) - R_{O31} \cdot I_{31}(x_{ТП}) + \varphi_{31}(x_{ТП}) \\ \varphi_{P2}(x_{ТП}) &= R_{OP2} \cdot I_{P2}(x_{ТП}) - R_{O32} \cdot I_{32}(x_{ТП}) + \varphi_{32}(x_{ТП}) \\ \varphi_{P2}(x_{ТП}) &= R_{OP2} \cdot I_{P2}(x_{ТП}) - R_{OP1} \cdot I_{P1}(x_{ТП}) + \varphi_{P1}(x_{ТП}) \\ I_{P1}(x_{ТП}) + I_{P2}(x_{ТП}) + I_{31}(x_{ТП}) + I_{32}(x_{ТП}) &= I_{ТП} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Вирішуючи систему рівнянь (2.13) можна визначити величину струмів рейок і протяжних заземлювачів для конкретного розташування підстанції.

На багатоколійних ділянках залізниць застосовується такий пристрій як міжколійних рейковий з'єднувач покликаний знизити опір зворотного тягової мережі. Цей елемент також необхідно враховувати при завданні граничних умов. Важливим фактором є відстань між сусідніми міжколійними з'єднаннями. Чим частіше вони встановлюються, тим менше опір зворотного тягової мережі і тим ближче за величиною потенціали рейок обох колій. При цьому безпосередньо впливу на потенціал заземлювача з'єднувачі впливати не будуть. Сформулювати граничну умову в місці розташування міжколійних з'єднувача можна за допомогою такої схеми заміщення

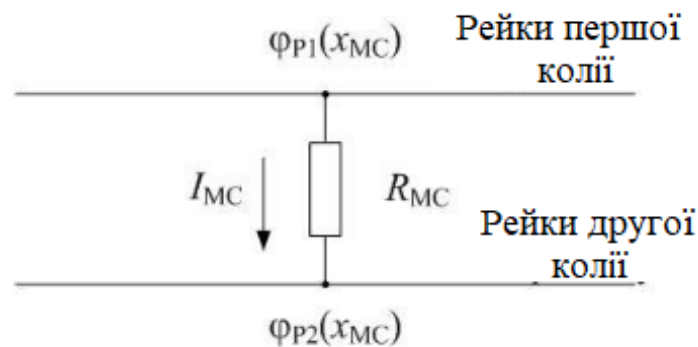


Рисунок 2.11 – Схема заміщення міжколійного з'єднувача

Застосувавши до схеми по рис. 2.11 другий закон Кірхгофа для ділянки кола можна виразити величину струму з'єднувача  $I_{МС}$ .

$$\varphi_{P1}(x_{МС}) = -I_{МС} \cdot R_{МС} + \varphi_{P2}(x_{МС}), \quad (2.14)$$

де  $R_{МС}$  – опір міжколійних з'єднувача, Ом;

$x_{МС}$  – координата розташування міжколійних з'єднувачів, км.



Відповідно струм з'єднувача буде витікати з рейок одної колії і втікати в інший залежно від співвідношення потенціалів рейок першого і другої колії в цій точці.

При використанні чисельних методів розрахунку з'являється можливість враховувати стікання струму з опор, що приєднуються до протяжного заземлювача.

При цьому граничні умови в місці розташування опори будуть визначатися величиною стікаючого струму, величину якого можна знайти за аналогією зі струмом міжколійних з'єднувачів. Різниця буде полягати в тому, що струм буде прямо пропорційний не різниці потенціалів елементів, а потенціалу протяжного заземлювача.

За аналогією з одноколійних ділянкою, місця розташування тягових підстанцій, електровозів і міжколійних з'єднувачів будемо називати характерними точками. Описані вище умови, що застосовуються на двоколійних ділянках, необхідно ставити в усіх характерних точках. Наявність міжколійних з'єднувачів значно ускладнює процес завдання граничних умов в силу того, що на ділянці може бути кілька з'єднувачів. Все вище сказане підтверджує доцільність застосування чисельних методів для дослідження системи «рейки-протяжний заземлювач» як на одноколійних, так і на двоколійних ділянках постійного струму.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ «РЕЙКА-ЗЕМЛЯ»

В роботі здійснюється моделювання для одноколійної ділянки з двома тяговими підстанціями і одним електровозом на міжпідстанційній зоні. При цьому реалізується двостороннє живлення розглянутого ділянки. Крім цього важливою умовою є протяжність рейок за межі даної зони, тобто лівіше лівої і правіше правої підстанцій. На реальних ділянках протяжність рейок дуже велика і при розрахунках може бути прийнята рівній нескінченності, проте при дослідженні на фізичній аналоговій моделі немає можливості змодельовати такий випадок. Тому для достовірності результатів експерименту необхідно, щоб ця протяжність була не меншою, ніж довжина даної міжпідстанційної зони. Виходячи з вищесказаного, схема для моделювання ділянки набуде наступного вигляду:

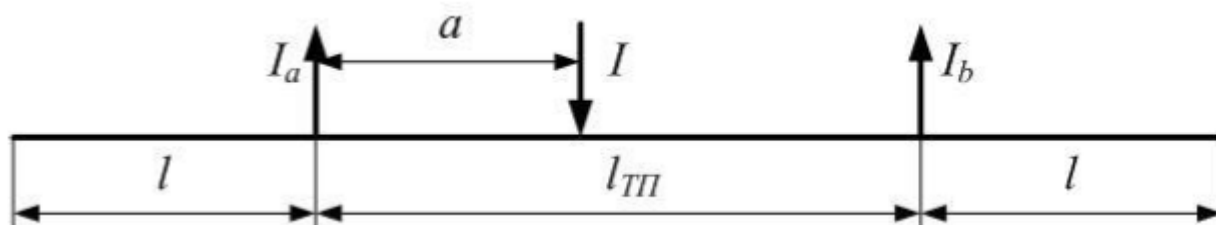


Рисунок 3.1 – Схема модельованої ділянки залізничної ділянки постійного струму

На рис. 3.1 використовуються такі символи:  $l$  – довжина рейок лівіше лівої і правіше правої підстанцій, км;  $l_{ТП}$  – довжина даної міжпідстанційної зони, км;  $a$  – відстань від лівої підстанції до електровозу, км;  $I$  – струм електровозу, А;  $I_A, I_B$  – струми тягових підстанцій.

При моделюванні використовувалися наступні параметри ділянки:

$$l = 26 \text{ км}, l_{ТП} = 20 \text{ км}.$$

При моделюванні приймається умова, що рейкова мережа і контактна підвіска однакові по всій довжині модельованої ділянки.

Для більшої достовірності були розглянуті кілька варіантів розташування електровозу на розглянутій ділянці, а також кілька варіантів параметрів рейкової мережі. Відповідно до варіантів розташування електровозу три:  $a = 5$  км,  $a = 10$  км,  $a = 15$  км. Варіантів параметрів рейкової мережі два. Варіант 1:  $r_p = 18$  мОм/км,

$r_{p3} = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ ,  $r_3 = 108 \text{ мОм}\cdot\text{км}$ ,  $r_{33} = 1,4 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ , варіант 2:  $r_p = 12 \text{ мОм/км}$ ,  $r_{p3} = 1 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ ,  $r_3 = 49 \text{ мОм}\cdot\text{км}$ ,  $r_{33} = 3,1 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ .

Сильна відмінність поздовжніх опорів рейкової мережі і заземлення пояснюється значною різницею їх перетинів, оскільки в якості заземлювача застосовується арматурні стрижні малого перетину.

Власне результатом експерименту буде розподіл потенціалів рейок та заземлювачів уздовж розглянуті ділянки [123]. Результати експерименту представлені на рис. 3.2...3.7.

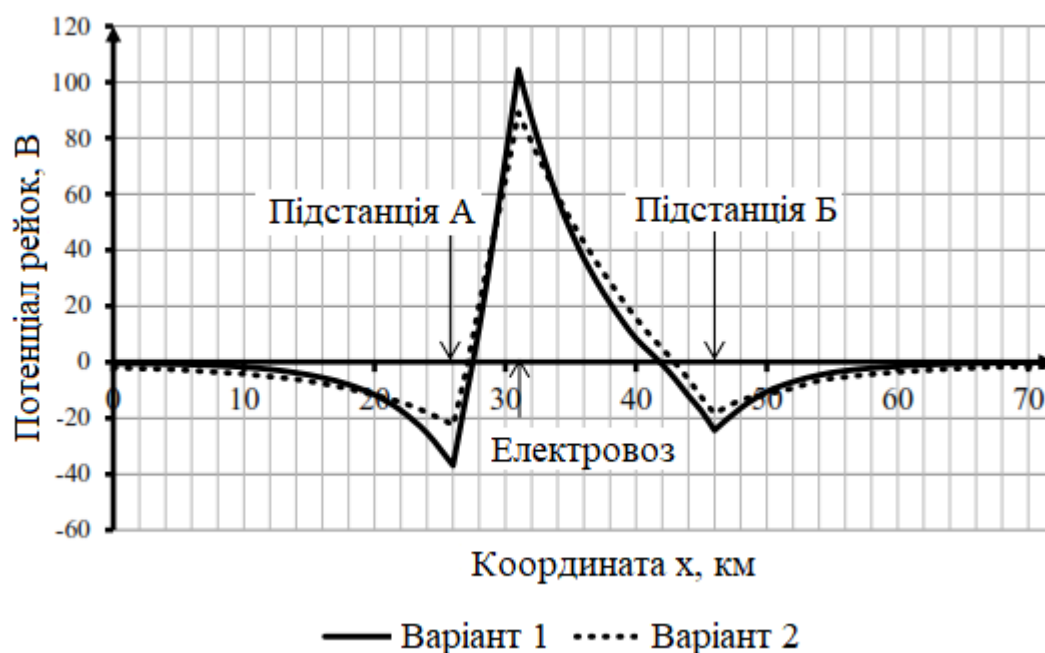


Рисунок 3.2 –Результати вимірювань потенціалу рейок при розташуванні електровоза на відстані  $a = 5 \text{ км}$  від лівої підстанції при двох варіантах параметрів рейкової мережі

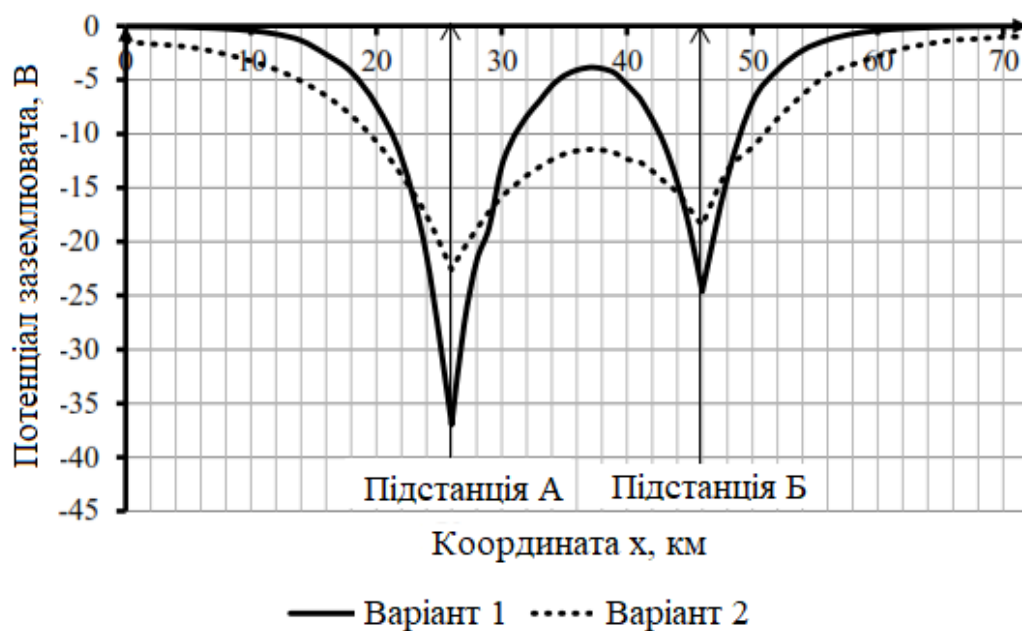


Рисунок 3.3 –Результати вимірювань потенціалу заземлювача при розташуванні електровоза на відстані  $a = 5$  км від лівої підстанції при двох варіантах параметрів рейкової мережі

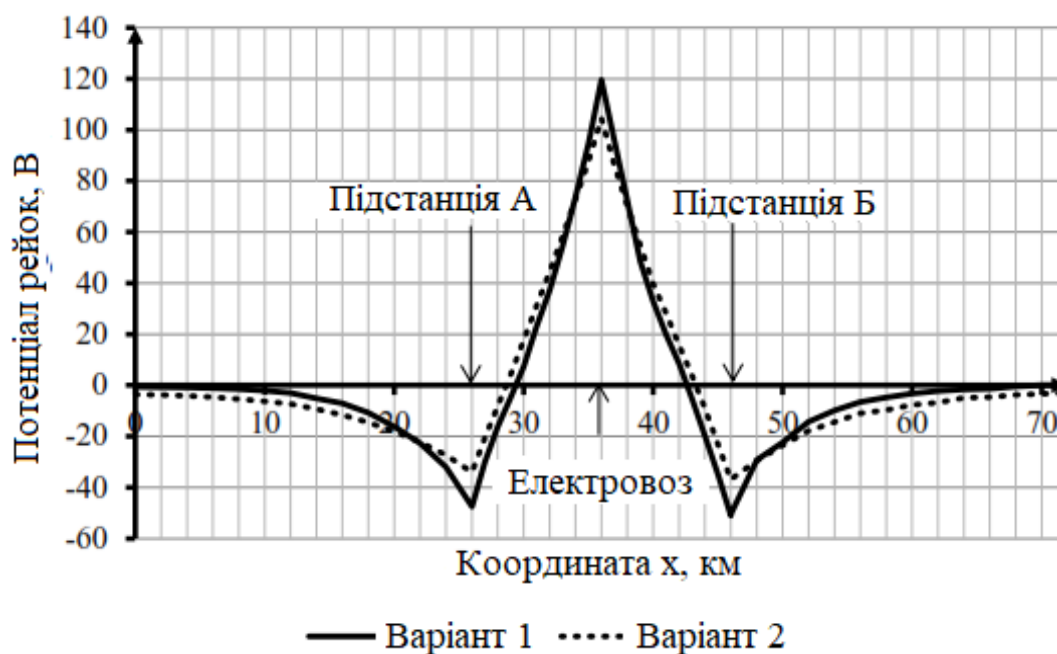


Рисунок 3.4 –Результати вимірювань потенціалу рейок при розташуванні електровоза на відстані  $a = 10$  км від лівої підстанції при двох варіантах параметрів рейкової мережі

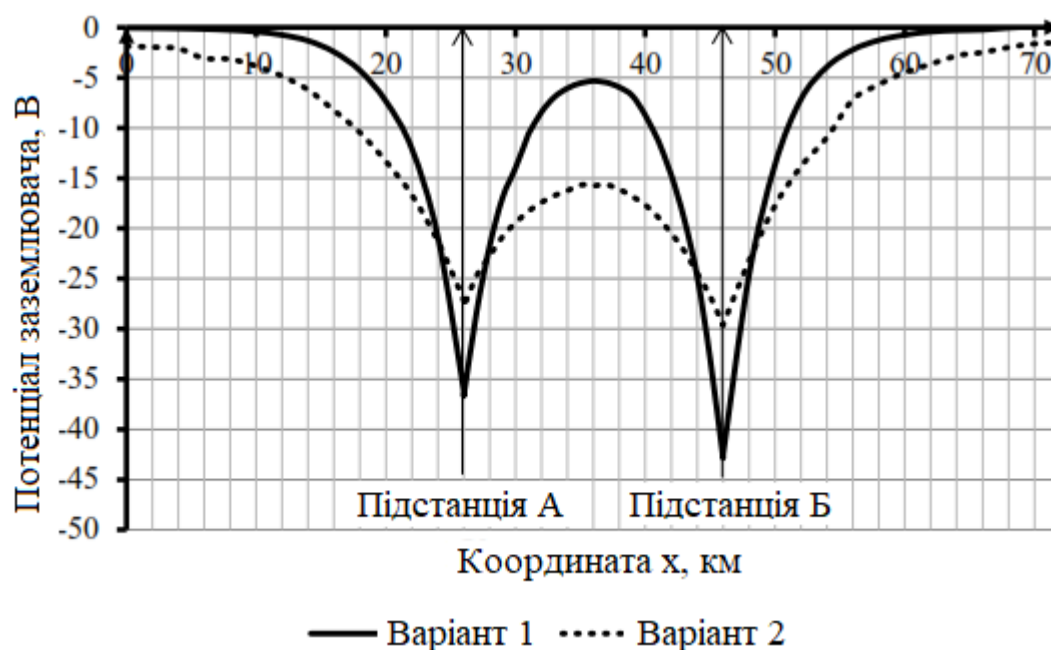


Рисунок 3.5 –Результати вимірювань потенціалу заземлювача при розташуванні електровоза на відстані  $a = 10$  км від лівої підстанції при двох варіантах параметрів рейкової мережі

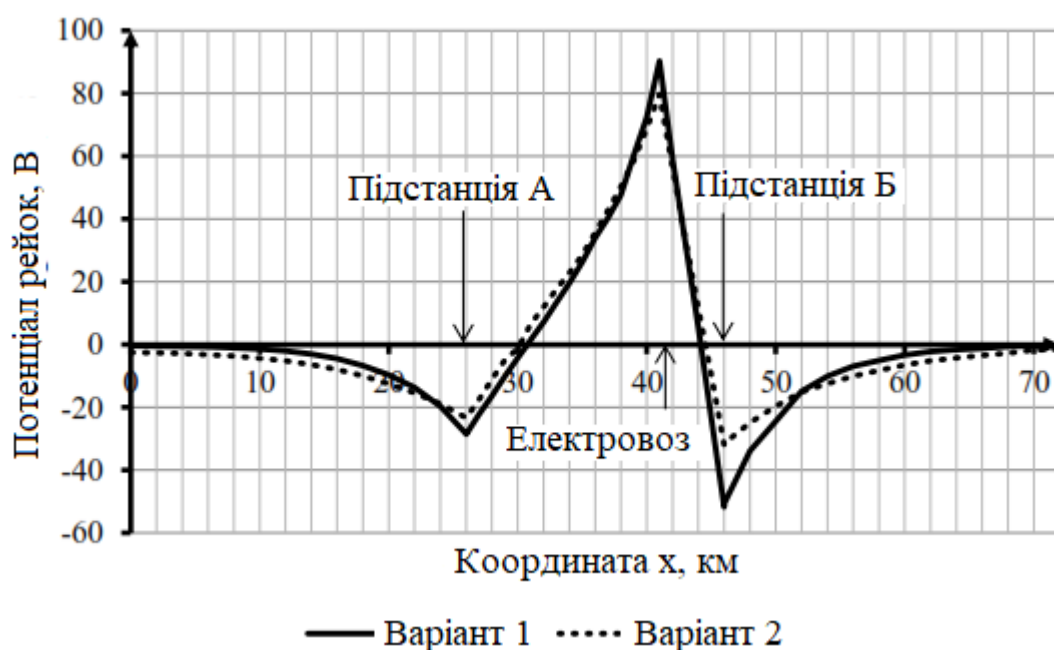


Рисунок 3.6 –Результати вимірювань потенціалу рейок при розташуванні електровоза на відстані  $a = 15$  км від лівої підстанції при двох варіантах параметрів рейкової мережі

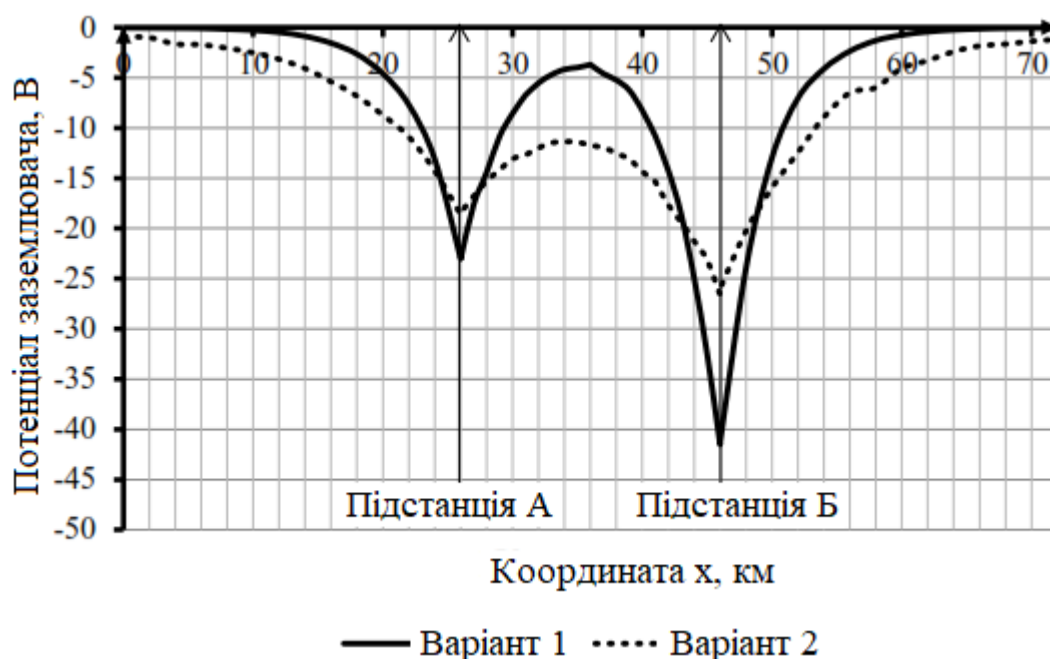


Рисунок 3.7 –Результати вимірювань потенціалу заземлювача при розташуванні електровоза на відстані  $a = 15$  км від лівої підстанції при двох варіантах параметрів рейкової мережі

При проведенні експерименту величина струму задавалася 2800 А. За формою графіків можна переконається, що модель вірно відображає фізичні процеси протікання струму по рейкової мережі: в місці розташування електровоза спостерігається пік потенціалу рейкової мережі - створюється анодна зона, в якій відбувається стікання струму з рейок. У місцях розташування підстанцій спостерігається мінімум потенціалу рейкової мережі, що створює катодну зону, в якій спостерігається втікання струму в рейкову мережу. При зміні розташування електровоза на даній ділянці відбувається переміщення піку потенціалу рейок.

Потенціал же заземлювача залишається негативним на всій розглядуваній ділянці, що говорить про його катодну поляризацію, при цьому його максимум розташовується приблизно в середині міжпідстанційної зони. Також можна побачити, що збільшення перехідного опору «заземлювач-земля» привело як до зниження максимуму, так і до збільшення мінімуму потенціалу заземлювача.

Таким чином, модель з великим ступенем вірогідності відображає фізичні процеси.

Виходячи з отриманих результатів, можна говорити про можливість застосування і ефективності чисельного методу дослідження розподілу потенціалів в системі «рейки-протяжний заземлювач».

З огляду на приведені результати досліджень можна сформулювати твердження про можливість застосування протяжних заземлювачів, як альтернативу заземлення конструктивних елементів контактної мережі на рейки.

Але треба зауважити, що основним чинником при виборі конструктиву протяжного заземлювача є економічна складова його застосування, яка повинна враховувати як капітальні витрати на монтаж конкретної системи, витрати на обслуговування так і економічний ефект від зменшення впливу корозії на елементи, які їй піддаються.

За попередніми оцінками, найбільш доцільнішим конструктивним виконанням протяжного заземлювача є застосування тросів заземлення, які приєднуються до «-» шини на підстанції разом з рейками.

Також, має місце застосування протяжних заземлювачів виконаних з тросів з вбиванням додаткових стрижнів заземлення.

Використання вказаних варіантів виконання протяжних заземлювачів повинно забезпечити мінімізацію впливу на рейкові мережі, можливість застосування існуючої системи захисту на тяговій підстанції (з модернізацією, шляхом підключення до неї датчику струму від тросу протяжного заземлювача) та мінімальні капітальні, а також експлуатаційні витрати.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Проведені експериментальні дослідження взаємодії ланцюгової контактної підвіски змінного струму зі струмоприймачем дали змогу визначити нерівномірність натиску струмоприймача по довжині прогону і, відповідно, нерівномірність відтискання та еластичності.

2. Моделювання зміни струморозподілу в прогоні контактної підвіски показало незначний вплив наявності струмопровідних струн на перерозподіл струмів між проводами, що визначило відсутність необхідності використання для швидкісних ланцюгових контактних підвісок змінного струму мірні електропровідні струни.

3. Отримані результати моделювання взаємодії швидкісних ланцюгових контактних підвісок зі струмоприймачем ТЛ-13У на розроблених математичних моделях дало змогу визначити основні напрямки удосконалення конструкції контактної підвіски, для відповідності впровадження швидкісного електрорухомого складу.

4. Вперше встановлено залежності механічних характеристик швидкісних контактних підвісок від сили натиску струмоприймача, які дозволяють більш точно визначати показники якості струмознімання.

5. Отримав подальший розвиток метод розрахунку взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем в усталеному режимі, який направлений на визначення відтискання та еластичності контактного проводу з урахуванням конструктивних особливостей контактних підвісок та їх електричних параметрів.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Котельников, А.В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А.В. Котельников, А.В. Наумов, Л.П. Слободянюк – М.: Транспорт, 1990. – 215 с.
2. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта : монография / А. В. Котельников, В. А. Кандаев. – М. : Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. трансп., 2013. - 552 с.
3. Котельников, А.В. Оптимизация параметров цепей обратного тока тягового электроснабжения в условиях интенсификации движения и повышения весовых норм поездов / А.В. Котельников, А.В. Наумов, А.А. Наумов, Е.Э. Закиев // Вестник ВНИИЖТ – 2006 - №1 – С.3-12.
4. А.с. 583007 СССР, МПК В60М 5/00. Устройство для заземления опор контактной сети [Текс] / Котельников А.В., Иванова В.И., Наумов А.В., Порцелан А.А., Баранов Е.А.; заявитель ВНИИЖТ – Оpubл. 05.12.1977, Бюл. № 45. – 2 с. : ил.
5. Косарев, А.Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев – М. : Ин-текст, 2008. – 480 с.
6. Косарев, Б.И. Совершенствование защиты тяговых сетей постоянного тока при отсоединенных от рельсов опорах контактной сети / Б.И. Косарев, А.В. Симаков // Транспорт: наука, техника, управление. – 2007. - № 11 – С.14-18.
7. Косарев, А.Б. Повышение надежности работы устройств автоблокировки за счет отказа от использования рельсовых путей для заземления опор контактной сети переменного тока / А.Б. Косарев, С.В. Логинов // Вестник ВНИИЖТ – 2009 – № 2 – С.9-14.
8. Кандаев В.А. Совершенствование эксплуатационного контроля коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта: авторефер. дисс. ... д-ра. техн. наук: 05.22.07 / Кандаев Василий Андреевич. – Омск, 2004. – 31 с.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Кандаев, В.А. Методика расчета заземляющего устройства с учетом сопротивления границы раздела «металл – грунт» / В.А. Кандаев, К.В. Авдеева, А.О. Сырецкая // Известия Транссиба. – 2012. – № 2 – С. 69-73.

10. Кандаев, В.А. Совершенствование средств диагностирования заземляющих устройств / В.А. Кандаев, К.В. Авдеева, А.А. Медведева // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: мат. всеросс. науч.-техн. конф. – Омск : ОмГУПС, 2013. – С. 324-329.

11. Кандаев, В.А. Экспериментальные исследования коррозионного состояния железобетонных образцов при их искусственном старении / В.А. Кандаев, А.В. Пономарев, А.В. Колесник // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: мат. науч. конф. – Омск : ОмГУПС, 2015. – С. 221-227.

12. Кандаев В.А. Метод определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети / В.А. Кандаев, А.В. Пономарев, К.В. Авдеева, А.В. Колесник // Известия Транссиба. – 2016 – № 1(25) – С. 37-43.

13. Кандаев В.А. Распределение токов и потенциалов в системе подземных сооружений в поле блуждающих токов / В.А. Кандаев, К.В. Авдеева, А.В. Уткина, А.А. Медведева // Известия Транссиба. – 2016 – № 2(26) – С. 78-91.

14. Кузнецов, К. Б. Основы электробезопасности в электроустановках: учебное пособие / К. Б. Кузнецов. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. – 495 с.

15. А.с. 1141026 СССР, МПК В60М 5/02. Устройство для заземления опор контактной сети /Кузнецов К.Б., Кузнецова Г.С., Галузо А.А., Мезенцев А.П.; заявитель УЭМИИТ, Южно-Уральская ж.д. – Оpubл. 23.02.1985, Бюл. № 7. – 3 с. : ил.

16 Вайнштейн, А.Л. Коррозионные повреждения опор контактной сети / А.Л. Вайнштейн, А.В. Павлов. – М. : Транспорт, 1988. – 112 с.

17. Подольский, В.И. Повышение долговечности центрифугированных железобетонных опор контактной сети / В.И. Подольский// Теоретические и конструктивно-технологические разработки и рекомендации по повышению долго-

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

вечности железнодорожных зданий и сооружений : межвуз. сб. науч. тр. – М. : МИИТ, 1988. – С. 78-86.

18. Шилкин, П.М. Защита контактной сети постоянного тока при различных способах заземления опор / П.М. Шилкин, А.А. Порцелан, А.В. Котельников. – М. : Транспорт, 1977. – 104 с.

19. Ломазов, Д. Б. Определение максимальной разности потенциалов в рельсовых цепях электрического транспорта / Д. Б. Ломазов // Электричество. – 1950. – № 9.

20. Ломазов, Д. Б. Нужны ли стыковые соединители при нормальном содержании рельсовых стыков? / Д. Б. Ломазов // Железнодорожный транспорт. – 1952. – № 7.

21. А. С. 90518 СССР. Измерение максимальной разности потенциалов в рельсовых цепях / Д. Б. Ломазов (СССР). – опубл. 1950.

22. Лапкин, Б. Д. Влияние развития станционных путей на величину блуждающих токов / Б. Д. Лапкин, Д. Б. Ломазов // Известия высших учебных заведений. – 1958. – № 9.

23. Ломазов, Д. Б. О методах защиты подземных металлических сооружений от коррозии / Б. Д. Ломазов // Исследования работы устройств электрической тяги. – М.: Трансжелдориздат, 1959.

24. 227. Францевич, И. Н. Про захист від корозії газопроводів в умовах міста / И.Н. Францевич, Д. Б. Ломазов, Ф. А. Рогоза // Вісник Академії наук УРСР. – 1959. – № 7.

25. Ломазов, Д. Б. Новые правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии/ Д. Б. Ломазов //Электричество.– 1959. – № 11.

26. Ломазов, Д. Б. Расчет рельсовых цепей с учётом станционных путей /Д. Б. Ломазов // Электричество. – 1960. – № 3.

27. Ломазов, Д. Б. К пересмотру Правил защиты металлических сооружений от коррозии / Д. Б. Ломазов //Электричество. – 1962. – № 1.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. Ломазов, Д. Б. О методике расчёта трамвайных отсасывающих сетей / Д. Б. Ломазов // Электричество. – 1962. – № 2.

29. А. С. 437432 СССР, МПК С 23f 13/00. Устройство для катодной защиты от коррозии подземных сооружений / А. С. Винский, А. А. Горобец, М. Д. Гречкин, В. В. Дрок, В. А. Дьяков, Ю. А. Качан, В. И. Компаниец, Д. Б. Ломазов, В. К. Майоров, В. И. Ростовский, В. М. Шевченко (СССР). – 1823432/22 – 1; заявл. 17. 08. 1972; опубл. 25. 07. 1974, Бюл. № 27. – 3 с.

30. Ломазов, Д. Б. Унифицированная антикоррозионная защита / Д. Б. Ломазов, В. А. Дьяков, В. И. Ростовский // Электричество. – 1975. - № 9. – с. 66-31. Дьяков, В. А. Блуждающие токи в подземном сооружении, наведенные анодным заземлителем / В. А. Дьяков// РНТС ВНИИОЭНГ. Сер. «Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности». – 1976. - № 4. – с. 11 – 13.

32. Дьяков, В. А. Анализ методов антикоррозионной защиты подземных сооружений: автореф. дис. канд. техн. наук: 05. 22. 09 / В. А. Дьяков; ДИИТ. – Днепропетровск, 1974. – 16 с.

33. Дьяков В.О. Противокоррозионная защита подземных сооружений /В.А. Дьяков// Електрифікація транспорту.-2012.-№ 4.-с.30-37.

34. Бургсдорф, В.В. Заземляющие устройства электроустановок / В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 400с.

35. Шишигин, С.Л. Векторная форма записи потенциала стержневого заземлителя в однородной и двухслойной земле / С.Л. Шишигин // Электричество. – 2007. – № 7 – С. 22-27.

36. Шишигин, С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств / С.Л. Шишигин // Электричество. – 2010. – №1 – С. 16-23.

37. Шишигин, С.Л. Сопротивление заземлителя в многослойной земле с границами произвольной формы / С.Л. Шишигин // Электричество. – 2013. - № 4 – С.18-24.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

38. А.с. 1209480 СССР, МПК В60М 5/00. Устройство для заземления опор контактной сети электрических железных дорог [Текст] / Харигов В.Ф., Савченко В.А. – Оpubл. 07.02.1986, Бюл. № 5. – 2 с. : ил.

39. Directive 2008/57/EC of the European parliament and of the council of 17 June 2008 on the interoperability of the rail system within the Community. – Official Journal of the European Union, 2008. – 45 p.

40. European standard EN 50122-1. Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 1: Protective provisions against electric shock. – European Committee for Electrotechnical Standardization, 2011. – 88 p.

41. European standard EN 50122-2. Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems. – European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010. – 29 p.

42. European standard EN 50122-3. Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 3: Mutual Interaction of a.c. and d.c. traction systems. – European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010. – 29 p.

43. Niasati, M. Overview of stray current control in DC railway systems / A. Gholami, M. Niasati // Railway Engineering. Challenges for Railway Transportation in Information Age. – Hong Kong, 2008.

44. Научные исследования: от теории к практике : мат. междунар. науч.–практ. конф. – Чебоксары : ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – С. 55-59.

45. Guangning, W. Study on the Performance of Integrated Grounding Line in High-Speed Railway. / W. Guangning, G. Guoqiang, D. Anping, Z. Lijun, C. Xiaobin, W. Wangang, W. Bo, T. Yuanfang, C. Jigang // IEEE transactions on power delivery – 2011. – vol. 26, no. 3 – pp. 1803-1809.

46. Tortia, A. M. L. Turin–Milan high speed railway line, 2 x 25 kv 50 Hz Ac electrified. EMC problems in earthing of exposed conductive parts / A. M. L. Tortia //

					02.15.EC1926.ПД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. – SPEEDAM, 2006. – pp. 1127–1132.

47. Подольский, В.И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкции, эксплуатация, диагностика / Труды ВНИИЖТ. [Текст] / В.И. Подольский – М.: Интекст, 2007. – 152 с.

48. Бернацкий, А.Ф. Электрические свойства бетона [Текст] / А.Ф. Бернацкий, Ю.В. Целебровский, В.А. Чунчин. Под ред. Ю.Н. Вершинина. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.

49. Бургсдорф, В.В. Заземляющие устройства электроустановок [Текст] / В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с., ил.

50. Целебровский, Ю.В. Заземляющие устройства электроустановок высокого и низкого напряжений [Текст] / Ю.В. Целебровский, Е.Л. Кац, Б.Г. Меньшов – М.: ВИНТИ, 1989. – 160 с.

51. Карякин, Р.Н. Использование железобетонных фундаментов производственных зданий в качестве заземлителей [Текст] / Р.Н. Карякин, В.И. Солнцев – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 128 с.

52. Катигроб, Н.П. О проводимости железобетонных свайных фундаментов опор ЛЭП 154 – 500 кВ [Текст] / Н.П. Катигроб – «Электричество», 1961. – №5.

53. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1. / Под. ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.

54. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.2. / Под. ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1981. – 392 с

55. Оллендорф, Ф. Токи в земле. Теория заземлений [Текст] / Ф. Оллендорф. Пер. с нем. инж. М. М. Савостюка, под ред. инж. Е.В. Нитусова. – М.: ГНТИ, 1932. – 216 с.

56. Марголин, Н.Ф. Токи в земле [Текст] / Н.Ф. Марголин – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1947. – 195 с.

57. Каганас, М.С. Повреждение железобетона переменным током [Текст] / М.С. Каганас // Бетон и железобетон. – 1969. – №11. – С. 31 – 33.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

58. ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы [Текст] – М.: Стандартинформ, 2011. 83 с.

59. Катигроб, Н.П. Исследования проводимости железобетонных фундаментов опор ЛЭП токами промышленной частоты [Текст] / Н.П. Катигроб // Труды АЧИМСХ. – 1957.– выпуск 11 – часть 1.

60. Катигроб, Н.П. О заземлении опор линий электропередач [Текст] / Н.П. Катигроб // Труды АЧИМСХ. – 1958.– выпуск 8 – часть 1.

61. Катигроб, Н.П. К вопросу о возможности использования железобетонных фундаментов опор ЛЭП в качестве грозозащитных заземлителей [Текст] / Н.П. Катигроб // Труды АЧИМСХ. – 1959.– выпуск 2 – часть 2.

62. Кужекин, И.П. Молния и молниезащита [Текст] / И.П. Кужекин, В.П. Ларионов, Е.Н. Прохоров – М.: Знак, 2003. – 330 с.

63. Инструкция по устройству молниезащиты зданий. Сооружений и промышленных коммуникаций. М.: Издательство МЭИ, 2004. 57 с.

64. Карякин, Р.Н. Тяговые сети переменного тока [Текст] / Р.Н. Карякин – М.: Транспорт, 1964. – 186 с.

65. Селедцов, Э.П. Эксплуатация опор контактной сети [Текст] / Э.П. Селедцов, Е.А. Баранов – М.: Транспорт, 1977. – 104 с.

66. Рябкова, Е.А. Заземления в установках высоких напряжений [Текст] / Е.А. Рябкова – М.: Энергия, 1978. – 224 с.

67. ЦЕ-0023 Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць, затверджені наказом Укрзалізниці від 20.11.2007 р. № 546-Ц.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71