

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 **Напрямки удосконалення методів діагностування ізоляторів
контактної мережі електрифікованих залізниць**

Theme **Directions for improving the methods of diagnosing insulators of the
catenary network of electrified railways**

Керівник дипломної роботи доц. _____ А. В. Антонов

Нормоконтролер доц. _____ В. М. Ляшук

Студент групи ЕС1926 _____ А. А. Заремба

Student Zaremba Andrii

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 Заремба А.А.
(номер групи) (ПІБ)

1 Тема дипломної роботи: «Напрямки удосконалення методів діагностування ізоляторів контактної мережі електрифікованих залізниць»

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): аналіз стану ізоляторів контактної мережі, розробка методики дистанційного контролю ізоляторів контактної мережі

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Обсяг розділу, %
ВСТУП	23.09	5
АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ІЗОЛЯТОРІВ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ	15.10	25
МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯТОРІВ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ	11.11	30
РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ	25.11	30
ВИСНОВКИ	04.12	5
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	07.12	5

Дата видачі завдання: «17» вересня 2020 р.

Керівник дипломної роботи

_____ к.т.н., доц. Антонов А.В.
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

_____ Заремба А.А.
(підпис) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 52 сторінки, складається з 3 розділів та містить 27 ілюстрацій, 1 таблиця, 1 додаток, 69 бібліографічних джерел.

Мета роботи – Удосконалення методів діагностування ізоляторів контактної мережі..

Безпека системи електропостачання безпосередньо залежить від надійної роботи електричної мережі, одним із прикладів якої є контактна мережа електрифікованих залізниць. При наявності запасу по електричній міцності повне пошкодження одного з ізоляторів в гірлянді може не викликати відразу порушення нормальної роботи електричної мережі. Однак поступове накопичення дефектних ізоляторів веде до перекриття, особливо в грозовий період і виникненню аварійних ситуацій. Так як існуючі пристрої діагностування стану ізоляції контактної мережі не відповідає умовам дистанційного діагностування ізоляції, у зв'язку з цим, вдосконалення методів діагностування ізоляції електричної мережі є актуальною проблемою на сьогоднішній день.

Ключові слова: КОНТАКТНА МЕРЕЖА, ІЗОЛЯЦІЯ, ДІАГНОСТУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП..	6
1 1. АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ІЗОЛЯТОРІВ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ	9
1.1 Класифікація основних методів діагностування ізоляторів контактної мережі.	9
1.2 Аналіз причин відмов пристроїв контактної мережі на електрифікованих залізницях	20
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ.....	26
3 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ВПЛИВІВ НА ІЗОЛЯТОРИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ	32
3.1 Імпульсні методи визначення пошкодження лінії.....	32
3.2 Метод визначення місця пошкодження на основі зовнішніх попередньо заряджених конденсаторів.....	34
3.3 Визначення первинних параметрів лінії	35
3.4 Моделювання процесу діагностування в програмному комплексі Multisim ..	37
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	42
Додаток А	50

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Напрямки удосконалення методів діагностування ізоляторів контактної мережі електрифікованих залізниць	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив		Заремба А.А.						
Керівник		Антонов А. В.					5	52
Н. Контр.		Ляшук В.М.				ДНУЗТ, ІСЕ гр.ЕС1926		

ВСТУП

Електроенергетична система являє собою складний енергетичний комплекс, завданням якого є забезпечення економічного та надійного виробництва електроенергії, її транспортування і постачання споживачам електроенергії в необхідному для споживачів кількості і необхідної якості. Підвищення рівня безпеки функціонування енергетичних систем є важливим пріоритетом розвитку і модернізації, наукових досліджень і поточної експлуатаційної роботи.

Аналіз роботи господарства електропостачання показав, що велика частка відмов припадає на пошкодження ізоляції. Ізолятор - це один з найбільш відповідальних елементів контактної мережі.

Значні динамічні удари і вібрації в момент проходження електрорухомого складу сприяють швидкому старінню ізоляторів.

Використовувані в даний час методи діагностування ізоляції не досконалі, так як вони не враховують, в достатній мірі, сукупність прояви фізичних процесів, що призводять до втрати ізолюючих властивостей. Жоден з існуючих способів діагностування не можна назвати повною мірою дистанційним. Всі пристрої застосовуються в безпосередній близькості від гірлянд ізоляторів. Це призводить до значних трудових витрат обслуговуючого персоналу і зниження ступеня достовірності отриманих результатів.

Роботи багатьох фахівців в різний час були присвячені вирішенню, як загальним завданням, так і безпосередньо пов'язаним з дослідженнями режимів роботи контактної мережі і електропостачання в цілому. Дані питання розглядаються в працях В. П. Міхеєва, К. Г. Марквардта, Г. П. Маслова, В. Н. Зажирко, Д. В. Разевіг, А. В. Єфімова, Г. С. Кучинського, В. П. Закарюкіна, А. Г. Галкіна, О. А. Сидорова та інших.

Актуальність роботи. Безпека системи електропостачання безпосередньо залежить від надійної роботи електричної мережі, одним із прикладів якої є контактна мережа електрифікованих залізниць. При наявності запасу по

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

електричної міцності повне пошкодження одного з ізоляторів в гірлянді може не викликати відразу порушення нормальної роботи електричної мережі. Однак поступове накопичення дефектних ізоляторів веде до перекриття, особливо в грозовий період і виникненню аварійних ситуацій. Так як існуючі пристрої діагностування стану ізоляції контактної мережі не відповідає умовам дистанційного діагностування ізоляції, у зв'язку з цим, вдосконалення методів діагностування ізоляції електричної мережі є актуальною проблемою на сьогоднішній день.

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

Мета і завдання роботи. Удосконалення методів діагностування ізоляторів контактної мережі.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішені наступні завдання:

- дослідження існуючих методів діагностування ізоляторів контактної мережі;
- аналіз причин відмов ізоляторів;
- дослідження процесів, які впливають на роботу ізоляторів;
- розробка математичної моделі діагностування ізоляторів контактної мережі.

Об'єкт дослідження – пристрої електропостачання електрифікованих залізниць.

Предмет дослідження – ізолятори контактної мережі.

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

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист.

Розроблена математична модель пристрою діагностування ізоляторів контактної мережі, який відрізняється від існуючих тим, що в якості тестових

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

впливів обрані прямокутні імпульси, мають безперервний спектр вищих гармонік, а оскільки об'єкт діагностування представлений комплексним опором, кожна з складових гармонік вхідної напруги буде по-різному впливати на форму вихідного сигналу.

Практичне значення отриманих результатів:

Отримані в роботі результати дозволяють знизити кількість випадків виходу з стані ізоляції контактної мережі, попередити можливі несправності та зменшити трудові затрати на діагностування ізоляції контактної мережі.

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.

1..

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

1. АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ІЗОЛЯТОРІВ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ

Аналіз роботи господарства електропостачання показує, що велика частка відмов припадає на пошкодження ізоляції контактної мережі. Ізолятор – це один з найбільш відповідальних і самих ненадійних елементів контактної мережі.

Значні динамічні удари і вібрації в момент проходу електрорухомого складу сприяють швидкому старінню ізоляторів. При наявності запасу по електричній міцності повне пошкодження одного з ізоляторів в гірлянді може не викликати відразу порушення нормальної роботи електричної мережі. Однак поступове накопичення дефектних ізоляторів веде до перекриттів, особливо в грозовий період, і виникненню аварійних ситуацій.

1.1 Класифікація основних методів діагностування ізоляторів контактної мережі

Ізолятори контактної мережі піддаються контролю перед установкою і в процесі експлуатації. Перед введенням в експлуатацію, після транспортування і тривалого зберігання, ізолятори повинні проходити тестове діагностування.

Не допускаються до монтажу і замінюються в процесі експлуатації ізолятори, що мають такі дефекти:

- тріщини шапок ізолятора, хитання, сповзання або повертання їх в закладенні, видиме викривлення деталей у всіх типів ізоляторів;
- сколи порцеляни ребер загальною площею понад 3 см або видимі тріщини;
- в склі – тріщини, сколи, посічки, зморшки, складки, напливи, свищі, видимі внутрішні газові міхури і сторонні включення;
- у полімерних ізоляторів – механічні пошкодження (надрізи, проколи, кратери, садна), розгерметизація захисного чохла або покриття, сліди струмопровідних доріжок (треків) на довжині більше однієї третини шляху витоків;
- корозія стрижня тарілчастого ізолятора до діаметра 12 мм.

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

Коефіцієнт запасу механічної міцності ізоляторів по відношенню до їх нормованої руйнуючої сили повинен бути не менше 5,0 при середньому експлуатаційному навантаженні і 2,7 – при найбільшій робочій навантаженні.

Дефектні ізолятори замінюють негайно або не пізніше п'яти днів з моменту виявлення. Поверхня порцеляни очищається від пилу і бруду серветкою, змоченою в гасі. Після випаровування гасу вдруге протирають поверхню фарфору сухою чистою серветкою, не залишаючи волокон. У місцях підвищеного забруднення ізоляторів поверхню порцеляни рекомендується покрити пастою або вазеліном шаром товщиною 1 мм.

Основним видом контролю ізоляції контактної мережі в процесі експлуатації є огляди при обходах і об'їздах вагоном лабораторією.

Діагностування фарфорових ізоляторів проводиться приладами дистанційного контролю їх стану (тепловізорами, електронно-оптичними дефектоскопами та ін.). Або вимірювальними штангами. Схематично класифікація методів представлена на рис. 1.1.

Тестове діагностування застосовується перед введенням ізоляторів в експлуатацію, після транспортування або тривалого зберігання. Даний вид діагностування включає в себе зовнішній огляд, випробування підвищеною напругою, визначення тангенса кута втрат і активного опору ізолятора.

Випробування ізоляції підвищеною напругою дозволяють виявити локальні дефекти, які не виявляються іншими методами; крім того, такий метод випробувань є прямим методом контролю здатності ізоляторів витримувати вплив перенапруг і дає певну впевненість в якості ізоляції. До ізоляторів прикладається випробувальна напруга 50 кВ промислової частоти. Час прикладання такої напруги – 1 хвилина. Ізолятор вважається таким, який витримав випробування, якщо за цей час не спостерігалось пробою або часткових пошкоджень конструкції ізоляції.

При профілактичних або післяремонтних випробуваннях перевіряється здатність ізоляторів пропрацювати без відмови до наступних чергових випробувань. Контроль ізоляторів підвищеною напругою дає тільки непряму

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

оцінку електричної міцності ізоляції і основне його завдання – перевірка відсутності грубих зосереджених дефектів. Найбільш поширеним приладом для випробування ізоляторів підвищеною напругою є АИД-70/50 або його аналоги. Такі пристрої призначені для випробування ізоляції силових кабелів і твердих діелектриків синусоїдальною електричною напругою 50 кВ (максимальна робоча напруга 70 кВ) частотою 50 Гц. АИД-70/50 включає в себе трансформатор високовольтний, вимикач високовольтний, резистори високовольтні і випрямні стовпи, поміщені в бак, заповнений трансформаторним маслом. Рівень трансформаторного масла знаходиться на відстані (15 ± 1) мм від зовнішньої поверхні гетинаксовій панелі джерела випробувальної напруги. Герметизація бака джерела напруги здійснюється за допомогою гумової прокладки. Випробувальна напруга з бака виводиться через прохідний високовольтний ізолятор, до якого приєднується випробовуваний об'єкт. Під кожухом бака знаходиться електромагніт заземлювача, конденсатори і розрядники.

Зовнішній вигляд апарата і схема підключення підвісних тарілчастих фарфорових ізоляторів до джерела напруги приведені на рис. 1.2 та 1.3.

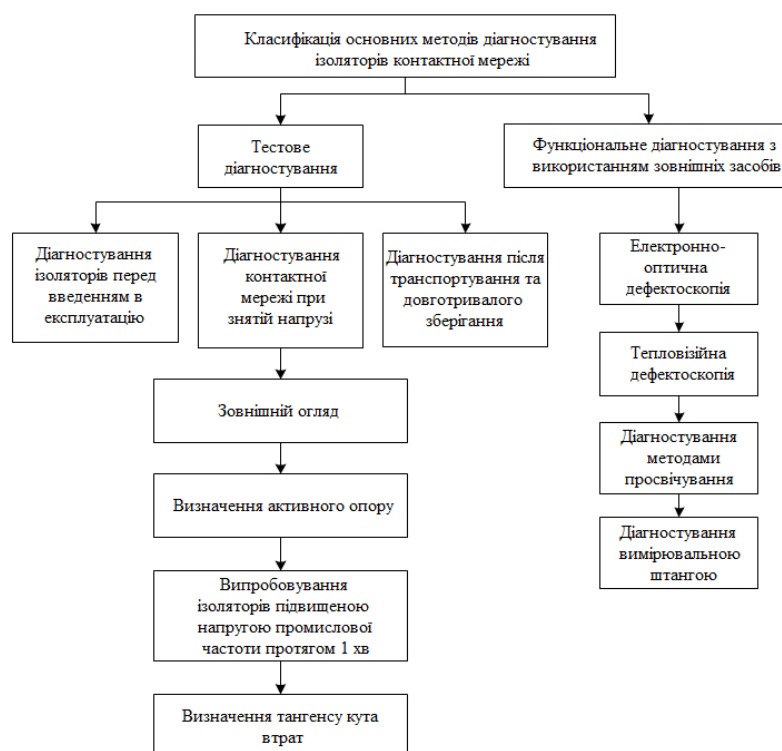


Рисунок 1.1 – Класифікація методів діагностування

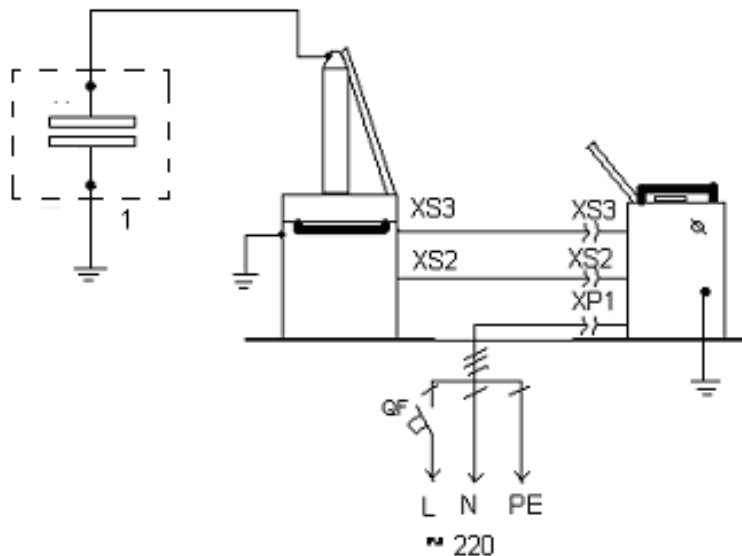


Рисунок 1.2 – Схема підключення ізолятора до АИД-70/50



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд АИД-70/50

Вимірювання активного опору ізоляторів є одним з найпростіших, але дуже ефективних методів контролю стану ізоляції, дозволяють фіксувати один з найпоширеніших прихованих дефектів – потрапляння вологи в армування

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

ізолятора. Поверхнєве забруднення ізоляторів також знижує їх діелектричні здібності. Обидва дефекти призводять до перекриття ізолятора. Опором ізоляції називають відношення напруги, прикладеного до ізоляції, до току через перетин ізоляції, при прикладенні постійної напруги і через 1 хвилину після подачі напруги, тобто це – опір при постійній напрузі через 1 хвилину після його подачі.

Активний опір ізолятора вимірюється мегомметром при напрузі 2,5 кВ і повинен бути не менше 300 МОм [1, 7, 9].

Зовнішній вигляд мегомметра наведено на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд мегомметра

Визначення кута діелектричних втрат $\text{tg } \delta$ вважається одним з основних методів контролю ізоляції електрообладнання високої напруги, оскільки розподілені дефекти (зволоження, іонізація газових включень) в першу чергу викликають збільшення діелектричних втрат [9]. При вимірах контролюють абсолютну величину $\text{tg } \delta$, які зміни $\text{tg } \delta$ в порівнянні з попередніми вимірами. Виміряне значення $\text{tg } \delta$ в зіставленні з нормативом дає уявлення про поточний стан ізоляції, характер зміни $\text{tg } \delta$ при періодичних вимірах дозволяє судити про

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

погіршення властивостей ізоляції в процесі експлуатації, а зростання $\operatorname{tg} \delta$ при підвищенні напруги свідчить про частковий розрядив ізоляції [9, 10]. Величина $\operatorname{tg} \delta$ адекватно відображає ресурс ізолятора, що дуже важливо в експлуатації підвісних тарілчастих фарфорових ізоляторів. Складність оцінки за цим критерієм полягає в тому, що його величина залежить не тільки від щільності порцеляни, але і розмірів зразка, тим більше від конструкції тарілчастого ізолятора, що складається з декількох елементів.

Вимірювання $\operatorname{tg} \delta$ на високій напрузі проводять вимірювальними мостами змінного струму, побудованими за схемою Шерінга [9, 11, 12]. Найбільш поширеним приладом такого типу є міст Р5026, дозволяє вимірювати ємності ізоляції від 10 пФ до 500 мкФ і тангенс кута втрат від 0.0001 до 1.0 з похибками порядку одиниць відсотків при напрузі 10 кВ.

Нерідко зустрічаються старі модифікації цього моста МД-16 і Р-595. Найбільш сучасними мостами є прилади СА7100, СА-7100-2 і СА-7100-3, які мають вбудовані блоки пам'яті і функції управління за допомогою персонального комп'ютера, підключеного через СОМ-порт (RS232) до блоку управління. Принципово пристрій чотирьох плечового високовольтного врівноважуючого вимірювального моста змінного струму, виконаного по схемою Шерінга, показано на рис. 1.5. Відмінними рисами моста за схемою Шерінга є висока напруга живлення моста і досить хороша збіжність моста при його зрівноважуванні. Остання обставина для моста змінного струму, що працює на синусоїдальній напрузі і вимагає для збіжності вирівнювання модулів і фаз потенціалів на вимірювальній діагоналі моста, має найважливіше значення [9, 11].

Також одним із найбільш доступних і перспективних в використанні є пристрій ИПИ-10 – це дводіапазонний вимірювач параметрів ізоляції і призначений для вимірювання тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ і ємності високовольтної ізоляції С.

Використовується при технічному обслуговуванні, ремонті, наладці, випробуваннях різних енергетичних об'єктів як на місці їх установки, так і в умовах

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

лабораторій, а також для вимірювання тангенса кута діелектричних втрат і ємності різних електроізоляційних матеріалів. Додатково даний пристрій дозволяє вимірювати ще й напругу в мережі до 10 кВ та з'єднуватись з радіоприймачем персонального комп'ютера і передавати інформацію.

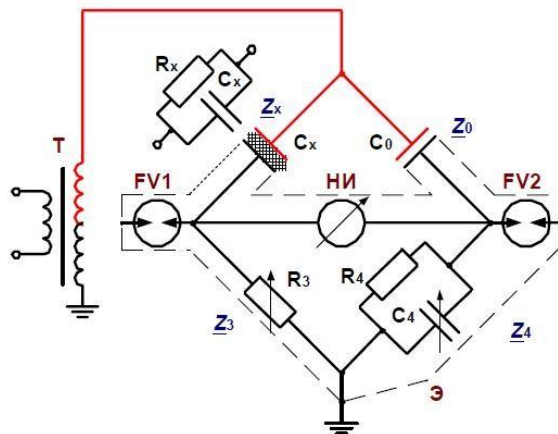


Рисунок 1.5 – Схема моста Шерінга для вимірювання $\tan \delta$



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд ИПИ-10

Універсальним методом діагностування ізоляторів в процесі експлуатації є їх дефектування вимірювальною штангою [7].

Застосовується даний вид діагностування як на ділянках змінного, так і постійного струму. Також широкого поширення набули методи визначення

часткових розрядів і методи просвічування на ділянках залізниць змінного струму. При підвищенні напруги на одному з ізоляторів виникає поверхневий частковий розряд. Це можливо при пробі одного з ізоляторів в гірлянді змінного струму.

Фарфорові тарілчасті ізолятори на ділянках постійного струму діагностують за допомогою вимірювальної штанги типу ШИ-10 з ізолюючої робочого майданчика знімною вишки або автомотриси [7].

Перед вимірюванням необхідно перевірити справність вимірювальної штанги, для чого щупами штанги торкнутися одночасно струмоведучих і заземлених частин. У справної вимірювальної штанги стрілка приладу повинна перейти за граничну червону позначку і одночасно загориться неонові лампочка-індикатор. Для діагностування гірлянди з трьома ізоляторами штанга обладнується приставкою з двома щупами.

Вимірювання здійснюється дотиком щупами штанги одночасно по обидва боки ізолятора гірлянди по черзі: першим - з боку контактної мережі (напруги), другим - з боку заземлюючих конструкцій, а потім - середніх ізоляторів. Ізолятори, що мають опір 300 МОм і менше і струм витоку 10 мкА і більше, вважаються дефектними. У цих випадках стрілка вимірювального приладу буде йти вправо за червону граничну позначку, і загоряться неонові лампочка-індикатор.

На ділянках змінного струму дефектування проводиться аналогічним чином. Дефектними вважаються ізолятори, падіння напруги на яких дорівнює або менше значень, представлених в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Недопустимі падіння напруги на ізоляторах

Число ізоляторів в гірлянді	Падіння напруги, кВ на ізоляторі, рахуючи від заземленої конструкції					
	1-м	2-м	3-м	4-м	5-м	6-м
3	4,0	4,0	5,0	-	-	-
4	3,0	3,0	3,0	5,0	-	-
5	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	-
6	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	3,0

Схема діагностування ізоляторів за допомогою вимірювальної штанги приведена на рис. 1.9. Обидва зазначених методи малопродуктивні і працездатні лише при наявності напруги в контактній мережі.

Таким же способом проводиться дефектування фарфорових штирьових ізоляторів 6 (10) кВ [7]. Утримуючи вимірювальну штангу в руках, торкнутися її щупом штиря перевіряється ізолятора і за показаннями стрілки приладу на голівці штанги визначити величину напруги на штирі перевіряється ізолятора. Аналогічним порядком, визначити по чергово величину напруги на штирях ізоляторів інших фаз.

Ізолятори вважаються дефектними, якщо виміряна величина напруги менше 2,5 кВ для ПЛ-6 кВ і 4,0 кВ - для ПЛ 10 кВ.



Рисунок 1.9 – Схема діагностування ізоляторів в гірлянді

Поява поверхневого часткового розряду супроводжується акустичними та електромагнітними коливаннями, оптичними випромінюваннями [5, 9, 11, 12]. Найбільша чутливість забезпечується в оптичному діапазоні. Діагностування ізоляторів по ультрафіолетовому (УФ) випромінюванні засновано на виявленні поверхневих часткових розрядів (ПЧР) та корони, що виникають на ізоляторах в місці появи дефекту. Для цього використовується залежність сили світла ПЧ-

розрядів в УФ-діапазоні спектра від прикладеної напруги. При напрузі вище порогового значення, відповідного виникненню розрядів, сила світла пропорційна п'ятого ступеня від величини напруги. Тому невеликі перерозподіли напруги вздовж гірлянди, пов'язані з наявністю нульових ізоляторів, призводять до різкого збільшення сили світла ПЧР або до їх виникнення. Для контролю ПЧР застосовують переносний електронно – оптичний дефектоскоп «Філін» в різних його модифікаціях [9, 10, 11]. Функціональна схема ЕОД «Філін-6» представлена на рис. 1.10.

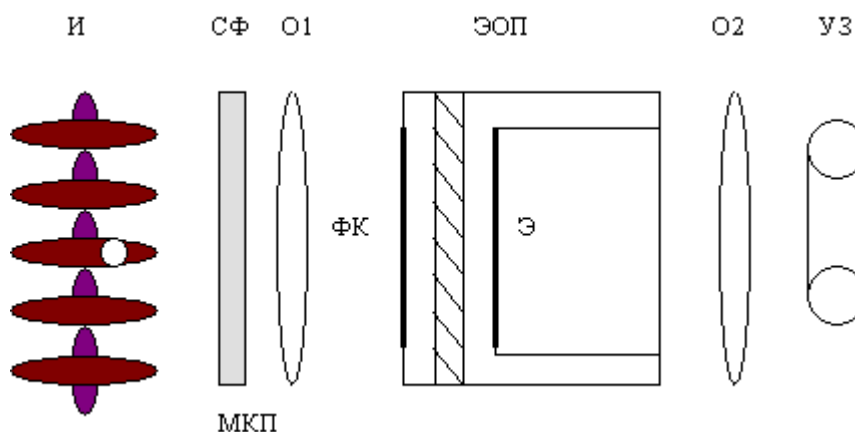


Рисунок 1.10 – Блок-схема електронно-оптичного дефектоскопа «Філін-6»

Застосування тепловізійного діагностування засноване на тому, що наявність деяких видів дефектів високовольтного обладнання викликає зміну температури дефектних елементів і, як наслідок, зміна інтенсивності інфрачервоного (ІЧ) випромінювання, яке може бути зареєстровано телевізійними приладами [16-20]. Важливо, щоб вимірювалося власне випромінювання обстежуваного об'єкта, пов'язане з наявністю і ступенем розвитку дефекту. При проведенні діагностики необхідно враховувати коефіцієнт випромінювання поверхні обстежуваного об'єкта, а також кут між віссю тепловізійного приймача і нормаллю до поверхні, що випромінює. При проведенні вимірювань однотипних об'єктів необхідно розташовувати тепловізійний приймач на однаковій відстані і під однаковим кутом до поверхні об'єкта [16].

При виявленні більш нагрітих зон необхідно, перш за все, оцінити, чи не є вони наслідком різниці в коефіцієнтах випромінювання, чи не пов'язано це з наявністю отворів або розташованих під кутом площин [17-20].

Присутність дефекту виявляється порівнянням температури аналогічних ділянок поверхні апаратів, що працюють в однакових умовах нагрівання та охолодження. Характер і ступінь розвитку більшості дефектів може бути встановлений тільки після додаткових вимірювань і в результаті аналізів, що дозволяють оцінити стан кожної з тепловиділяючих конструкційних частин апарату окремо [21, 22]. Контроль підвісної порцелянової ізоляції за допомогою вимірювання температури поверхні ізоляторів теоретично і практично можливий при достатній роздільній здатності тепловізора [22].

Майже всі оптичні методи засновані на вимірі інтенсивності теплового випромінювання (інколи - поглинання) тіл. Інтенсивність теплового випромінювання сильно залежить від температури тіл і дуже різко убиває з її зменшенням. Дані методи не вимагають контакту датчика вимірювального приладу з тілом, температура якого вимірюється, і тому можуть застосовуватися для вимірювання дуже високих температур. Основна умова застосовності методів - випромінювання тіла має бути чисто тепловим, тобто воно повинно підкорятися закону випромінювання Кірхгофа [11, 16, 21]. Зовнішній вигляд тепловізійної камери приведений на рис. 1.11.

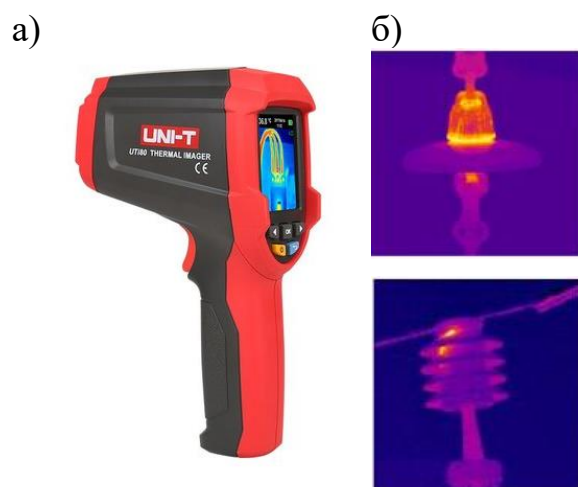


Рисунок 1.11 – Тепловізор (а) та тепловізограми (б)

У першому розділі наведено класифікацію основних методів діагностування ізоляції контактної мережі. Вивчено принцип дії основних приладів діагностування та способи їх застосування. Таке різноманіття методів і засобів діагностування доводить, що проблема є актуальною для дистанцій електропостачання залізниць.

Пробій ізоляції викликає коротке замикання, яке призводить до економічних втрат, викликаних несподіваними відмовами електрообладнання, простою ділянки контактної мережі, руйнування елементів системи електропостачання. При наближенні до місця короткого замикання виникає можливість потрапляння людей під напругу.

Жоден з представлених приладів діагностування не можна в повною мірою назвати «дистанційним». Зовнішній огляд також передбачає об'їзд всієї ділянки, що призводить до великих затрат часу і коштів.

Для підвищення достовірності оцінки стану ізоляторів, контроль необхідно проводити декількома методами або удосконалювати дистанційні системи діагностування.

1.2 Аналіз причин відмов пристроїв контактної мережі на електрифікованих залізницях

Залізничний транспорт являє собою складну технічну систему. Його різні галузі утворюють підсистеми, одна з яких – електропостачання. Ефективність функціонування технічної системи залежить від показників якості, одним з яких є надійність. Вона тісно пов'язана з економічними показниками. Вибір оптимальної надійності, як і багато інженерних рішень, являє собою задачу з альтернативними умовами. Так, чим вище надійність, тим менше шкоди від відмов технічних пристроїв. З іншого боку, для її збільшення необхідні додаткові витрати.

Необхідно відзначити, що мета функціонування технічної системи реалізується в комерційній діяльності. Наприклад, для господарства електропостачання вона полягає в перетворенні електричної енергії, одержуваної від зовнішніх енергетичних систем, до вигляду, зручного для використання тяговими (контактна мережа) і нетяговими залізничними споживачами [35-37].

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

У свою чергу збиток залежить від числа і тривалості відмов (часу відновлення). Тому для вирішення поставленого завдання необхідно знати закономірності і причини зміни показників надійності, працездатності окремих елементів системи електропостачання. Повний збиток від відмов пристроїв контактної мережі залізничного транспорту залежить від ступеня використання пропускної здатності конкретної ділянки. Чим більший час відновлення працездатного стану пристрою, що викликало порушення графіка руху, тим більше число затриманих поїздів. Крім порушення технологічного процесу, відмови можуть призвести до катастроф поїздів, загибелі людей і екологічних катастроф [37]. Крім того, інтенсивна експлуатація пристроїв залізничного транспорту є причиною їх прискореного зносу, старіння і зростання числа відмов. Тому чим вище ступінь використання пропускної здатності, тим ефективнішими будуть заходи, підвищують надійність [36].

В останні роки відбувається спад обсягу перевезень. Для збереження продуктивності праці і зниження експлуатаційних витрат скорочують чисельність обслуговуючого персоналу. У галузях залізничного транспорту, що займаються в основному технічною експлуатацією, потрібна чисельність експлуатаційного персоналу залежить від розмірів руху. До таких галузей відноситься господарство електропостачання, в якій в даний час ресурс контактної мережі закінчується. Це пояснюється великими масштабами електрифікації залізниць країни. Ця обставина вимагає науково-обґрунтованого підходу до скорочення чисельності кадрів, враховувати вдосконалення технічного обслуговування, зміцнення ремонтної бази і підвищення кваліфікації інженерно-технічного персоналу.

Виникає складне завдання - підтримка об'єктів системи електропостачання в процесі їх експлуатації в працездатному стані в умовах обмежених ресурсів може бути вирішена тільки з використанням теорії надійності і її основної частини – теорії технічне обслуговування. Значний ефект здатний дати перехід від обслуговування за нормами до технічного обслуговування за станом. Цей метод

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

можна застосувати при використанні теорії технічної діагностики [38] і широке впровадження засобів дистанційного діагностування [39].

На етапі експлуатації надійність об'єкта підтримується своєчасним проведенням регулюючих заходів, замінами окремих елементів. На даній стадії надійність об'єкта формується за рахунок якісного технічного обслуговування. Експлуатація контактної мережі здійснюється своєчасним проведенням робіт з технічного обслуговування (ТО), капітального ремонту (КР), оновленню і реконструкції (ОР).

Найбільша кількість подій, пов'язаних з порушенням безпеки руху поїздів в господарстві електрифікації та електропостачання відбувається через відмови в роботі пристроїв контактної мережі. Які у відсотковому співвідношенні можна представити наступним чином, рис. 1.12.

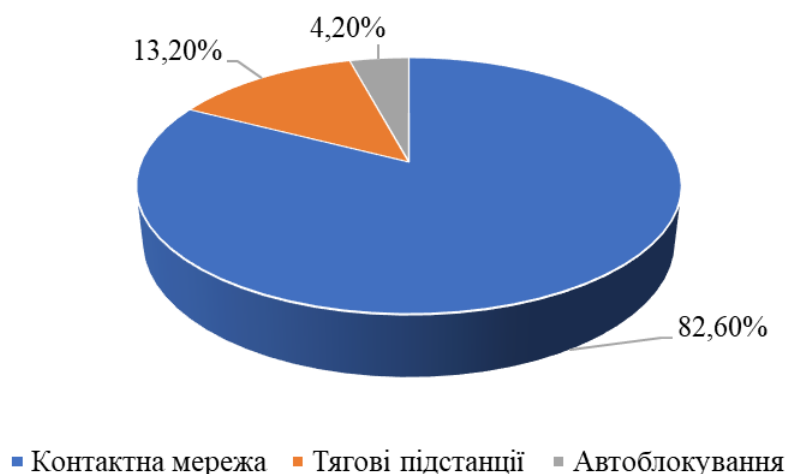


Рисунок 1.12 – Діаграма розподілу транспортних подій за 2018 рік

З аналізу звітів господарства електропостачання за останні роки, можна прослідкувати, яким саме чином розподіляються пошкодження елементів контактної мережі по рокам (дані представлені за виключенням пошкоджень контактних проводів та тросів), рис. 1.13.

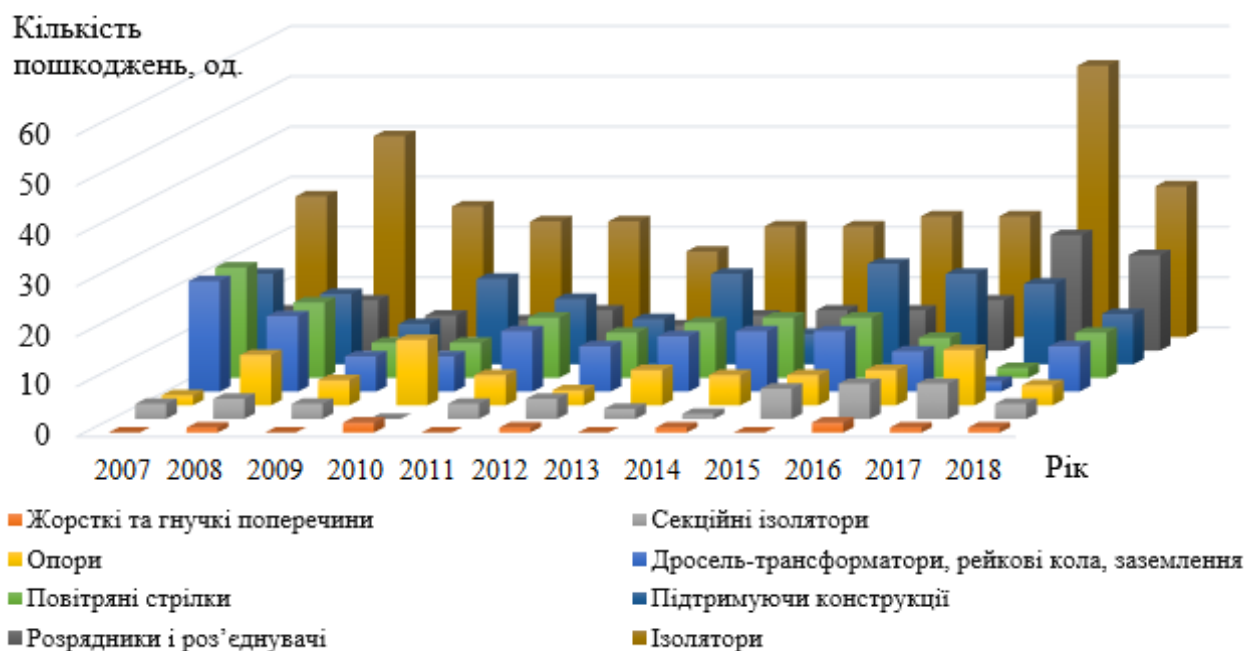


Рисунок 1.13 – Діаграма розподілу пошкоджень елементів контактної мережі за роками

Як можна побачити, найчисельніші пошкодження елементів контактної мережі припадають саме на ізолятори.

Основними причинами нестабільної роботи пристроїв контактної мережі в є: незадовільна якість обслуговування і ремонту пристроїв електропостачання 18%; заводський брак 15%; порушення технології робіт 14%; незадовільна якість оглядів пристроїв електропостачання 14%; старіння пристроїв 11%; дефекти монтажу 8%; порушення термінів обслуговування і ремонту пристроїв електропостачання 8%; вплив метеоумов 6%; вплив сторонніх предметів 4%; помилки експлуатаційного персоналу 2%; інше (зупинка поїзда по нез'ясованих причинах) 2%.

Основними причинами пошкодження ізоляторів є: низька якість виготовлення тарілчастих фарфорових ізоляторів, застосовуваних на КМ; установка ізоляторів в пристроях електропостачання без попередніх електричних випробувань; несвоєчасне дефектування і заміна дефектних ізоляторів. Також причинами пошкодження ізоляторів можуть бути і грозові перенапруги, несоосність елементів ізолятора, високе механічна навантаження ізоляторів з руйнівним навантаженням

70 кН в вузлах анкерування контактної підвіски. На зростання пошкодження ізоляторів впливають такі чинники: постійна вібрація; запиленість довкілля від рухомого складу і прилеглих до залізниці промислових підприємств; недотримання вимог при транспортуванні, вивантаженні і їх зберіганні; невідповідність числа ізоляторів в гірлянді ступеню забрудненості атмосфери або нормативної довжині шляху струму витоку; корозія на ділянках постійного струму; старіння ізоляторів [1, 3, 7, 52, 53, 54].

Характерними видами пошкоджень в ізоляторах є: перекриття по поверхні; механічне руйнування ізолятора; утворення мікротріщин під шапкою ізолятора від впливу сонячних променів: пробій ізолятора; перекриття ізолятора птахами [9-12].

Аналіз розподілу відмов у вузлах ізоляції за часом доби показує, що практично більшість їх (84 - 86%) відбувається в світле (сонячне) час, тобто коли здійснюється спочатку нагрів (з 6 до 15 годин), а потім охолодження (з 16 до 22 годин) матеріалів ізолятора, мають різні коефіцієнти лінійного розширення (11...10 – для сірого чавуну, 3...10 – для порцеляни) [10, 11, 52, 53]. Досвід експлуатації показав, що термін надійної роботи стрижневого і підвісного фарфорового ізолятора не перевищує 15...20 років, після чого його необхідно замінити, інакше зниження механічної міцності порцеляни призводить до зламів ізолятора.

Пробої ізоляторів відбуваються через порушення правил їх зберігання, транспортування, завантаження і вивантаження. Нерідкі випадки, коли ізолятори перевозять навалом, скидають у опір з висоти і навіть на ходу автомотриси.

У багатьох випадках ізолятори монтуються без протирання ізоляційної поверхні.

Через недбале збирання ізолюючої деталі і металевої арматури (шапки і стержня), механічних ударів по ізоляторах з'являються відколи порцеляни, а також мікротріщини під шапкою ізолятора. Волога проникає в мікротріщини, і в результаті збільшується струм витоку. Бруд і волога знижує електричну міцність порцеляни і відбувається пробій або перекриття одного, або гірлянди ізоляторів [9-12, 52-57].

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

Одна з основних причин руйнування скляних ізоляторів – це поверхневі часткові розряди (ПЧР), що виникають при забрудненні і зволоженні поверхні ізолятора. Руйнування ізолятора відбувається під дією розтягуючого механічного навантаження, що утворюються в наслідок нагрівання скла струмом ПЧР до пластичного стану і подальшого охолодження нагрітої області. Зазвичай ПЧР виникають на кордоні розділу сухого і зволоженого шарів забруднення, тобто в зонах з максимальної напруженістю електричного поля [9-12].

Основні причини пошкодження секційних ізоляторів: порушення ізоляційних властивостей вставки; злам ізоляторів в місці закладення його в накінечники; перекриття ізолятора в несучій тросі через відсутність нейтральної вставки; порушення регулювання ковзунів для проходу полоза струмоприймача ЕРС.

Основні причини руйнування стержневих ізоляторів: низька механічна міцність при ударних навантаженнях; швидке старіння в експлуатації та, особливо, при низьких температурах: недоліки конструкцій, які фіксують вузлів; порушення норм утримання; випадки, які не пов'язані з експлуатацією. Недостатня механічна міцність стержневих ізоляторів при їх затисканні і впливі ударних навантажень призводить до руйнування порцеляни. Зниження механічної міцності деяких ізоляторів при тривалій експлуатації зазвичай відбувається через виникнення значних напружень в місці сполучення порцеляни, цементного закладення і металевої арматури в зв'язку з різними коефіцієнтами температурного розширення цих матеріалів. У таких місцях в порцеляні виникають мікро- і макротріщини, з часом, що розвиваються і знижують механічну міцність всього ізолятора.

Максимальна втрата міцності відбувається при низьких температурах.

Міцність ізолятора зменшується також через постійні ударні навантаження, що передаються на них при експлуатації. У таких випадках в порцеляні також виникають приховані тріщини, які потім розвиваються [9].

Найбільш небезпечним пошкодженням ізолятора є його повне перекриття та втрата ізоляційних властивостей, що в підсумку призводить до короткого замикання і виведення ділянки контактної мережі з експлуатації.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ

Розглянемо, які фізичні ефекти виникають в результаті прикладення до ізолятора високої напруги. З теорії відомо, що якщо до двох електродів, розділених ізолятором, прикласти електричне поле достатньої напруженості, то на поверхні або в тілі ізолятора утворюється електропровідний шар, в якому виникає і розвивається електричний розряд – стример [9-12]. Виникнення і розвиток розряду супроводжується генерацією коливань в широкому діапазоні частот (в інфрачервоному, звуковому, ультразвуковому діапазонах частот, у видимому спектрі і в широкому діапазоні радіочастот). Таким чином, приймальня частина пристрою діагностики повинна виявляти ту чи іншу з перерахованих наслідків появи і розвитку стримера.

Відомо, що іонізація повітря і утворення поверхневих часткових розрядів (ПЧР) можуть статися, наприклад, при фотоіонізації. Щоб вплив випромінювання призвів до іонізації повітря, має виконуватися умова:

$$\lambda \leq \frac{c \cdot h}{W_u}, \quad (2.1)$$

де c – швидкість світла;

λ – довжина хвилі випромінювання;

h – постійна Планка;

W – енергія іонізації.

Хвилі з такими довжинами лежать на кордоні ультрафіолетового та рентгенівського випромінювань (так званий вакуумний ультрафіолет), видиме ж світло не може привести до іонізації повітря.

Поява шару високої провідності на поверхні ізолятора може статися також в результаті теплового впливу – термічної іонізації. Імовірність термічної іонізації повітря при температурі $T = 20$ °C мізерно мала. Ступінь іонізації повітря, тобто відношення числа іонізованих частинок до загальної їх кількості в одиниці об'єму

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

при температурі $T = 10\,000\text{ К}$, становить 0,02 [9, 11]. Тому при такому низькому ступені іонізації виникнення термічної іонізації неможливо.

Для того щоб навколо ізолятора утворився електропровідний шар в результаті електростатичної емісії, необхідно зовнішнє електричне поле напруженістю 1000 кВА/см, що на практиці не спостерігається [9, 11]. Тому цього виду емісії в ізоляційних конструкціях контактної мережі немає.

Відомий ще такий вид іонізації, здатний привести до утворення каналу високої провідності, як ударна іонізація. Енергія частинки, що рухається в електричному полі:

$$W = q \cdot E \cdot x, \quad (2.2)$$

де q – заряд частинки;

E – напруженість електричного поля;

x – шлях, пройдений частинкою перед зіткненням [9].

Виникнення ПЧР ймовірніше на поверхні справних ізоляторів, оскільки напруга на дефектних ізоляторах виявляється значно нижче. Тобто якщо ізолятор або гірлянда ізоляторів мають дефекти, достатні для освіти в результаті впливу прикладеної напруги електропровідного шару, то на поверхні або в тілі ізоляторів будуть виникати часткові поверхневі розряди [58, 59].

Однак може виникнути і виникає на практиці така ситуація, коли, наприклад, в гірлянді з чотирьох підвісних ізоляторів може виявитися один або навіть два «нульових» ізолятора, а решта за своїми якостям будуть «тримати» прикладену напругу. Поверхневий розряд при цьому розвиватися не буде. На ділянках постійного струму методи за визначенням ПЧР не набули широкого поширення внаслідок труднощів виявлення ефектів розряду. Тому завдання створення ефективних методів дистанційного діагностування на ділянках постійного струму залишається актуальним [60, 61].

У загальному випадку для n -провідної лінії, розташованої у повітрі над поверхнею землі, для кожного з проводів необхідно враховувати ЕРС

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

взаємоіндукції від струмів, що протікають в сусідніх проводах, а також струм зміщення між проводом, який розглядається і всіма сусідніми проводами. При цьому отримуємо систему з $2n$ рівнянь (так званих телеграфних рівнянь) [62]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u_k}{\partial x} = r_k i_k + L_k \frac{\partial i_k}{\partial t} + \sum_{m=1}^{m=n} M_{km} \frac{\partial i_m}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_k}{\partial x} = g_k u_k + \sum_{m=1}^{m=n} g_{km} (u_k - u_m) + C_k \frac{\partial u_k}{\partial t} + \sum_{m=1}^{m=n} C_{km} \frac{\partial (u_k - u_m)}{\partial t}, \end{cases} \quad (2.3)$$

де $k = 1, 2, \dots$;

n – номер проводу;

r_k, L_k, g_k, C - власні параметри k -го проводу на одиницю довжини з урахуванням впливу землі;

M_{km} і C_{km} – взаємна індуктивність і ємність між k -м і m -м проводами на одиницю довжини лінії з урахуванням впливу землі.

Нехай на вхід лінії подані прямокутні імпульси, що містять безперервний спектр гармонійних складових. Користуючись комплексним методом, напишемо рівняння лінії для комплексних діючих значень напруги і струму:

$$-\frac{\partial \dot{U}}{\partial x} = r\dot{I} + j\omega L\dot{I}; \quad -\frac{\partial \dot{I}}{\partial x} = g\dot{U} + j\omega C\dot{U} \quad (2.4)$$

Диференціюючи перше рівняння по x і, використовуючи друге, знаходимо:

$$-\frac{\partial^2 \dot{U}}{\partial x^2} = (r + j\omega L)(g + j\omega C)\dot{U} = \gamma^2 \dot{U}, \quad (2.5)$$

де

$$\gamma = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (2.6)$$

Розв'язання рівняння для \dot{U} має вид:

$$\dot{U} = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x} \quad (2.7)$$

З першого рівняння лінії знаходимо комплексний струм:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= -\frac{1}{r + j\omega L} \frac{\partial \dot{U}}{\partial x} = \frac{\gamma}{r + j\omega L} (A_1 e^{-\gamma x} - A_2 e^{\gamma x}) = \\ &= \sqrt{\frac{g + j\omega C}{r + j\omega L}} (A_1 e^{-\gamma x} - A_2 e^{\gamma x}) = \frac{1}{Z} (A_1 e^{-\gamma x} - A_2 e^{\gamma x}), \end{aligned} \quad (2.8)$$

де

$$Z = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}} \quad (2.9)$$

Комплексні величини $\gamma = \alpha + j\beta$ і Z є основними характеристиками однорідної лінії і докладніше будуть розглянуті в наступному розділі.

Для визначення довільних постійних A_1 і A_2 досить знати дві з цих чотирьох величин. Виразимо ці постійні через напругу і струм на початку лінії. Вважаючи, що $x = 0$, маємо:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= A_1 + A_2 \quad \text{и} \quad \dot{I}_1 = \frac{1}{Z} (A_1 - A_2) \\ A_1 &= \frac{1}{2} (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z) \quad \text{и} \quad A_2 = \frac{1}{2} (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z) \end{aligned}$$

Відповідно,

$$\dot{U} = \frac{1}{2} (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2} (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z) e^{\gamma x}; \quad (2.10)$$

$$\dot{I} = \frac{1}{Z} \left[\frac{1}{2} (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z) e^{-\gamma x} - \frac{1}{2} (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z) e^{\gamma x} \right]. \quad (2.11)$$

Розглянемо випадок зміни струмів і напруг при наявності на кордоні сполучення двох ліній з розподіленими параметрами ємності C_0 .

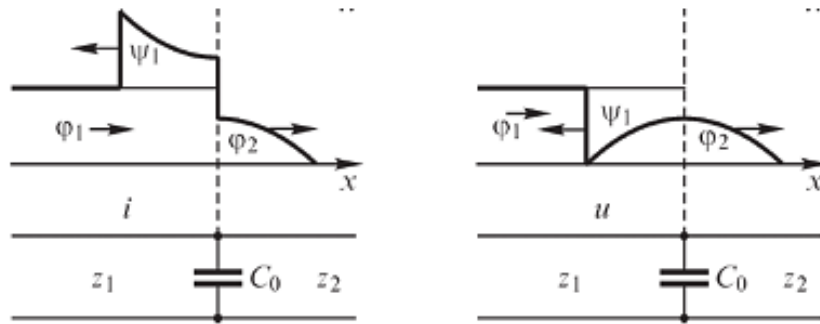


Рисунок 2.1 – Розповсюдження хвиль в лінії з ємнісним навантаженням

При застосуванні ємнісного відгалуження для згладжування фронту заломлених хвиль відбита хвиля напруги в перший момент часу дорівнює за значенням і протилежна за знаком падаючої хвилі і напруга в першій лінії в момент приходу хвилі до місця сполучення ліній падає до нуля, а потім поступово зростає. На рис. 2.1 показані падаючі, заломлені і відбиті хвилі для приватного випадку $z_1 = z_2$

$$\begin{aligned} u_{\varphi 2} &= \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) u_{\varphi 1}; & i_{\varphi 2} &= \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) i_{\varphi 1}; \\ u_{\psi 1} &= e^{-\frac{t}{\tau}} u_{\varphi 1}; & i_{\psi 1} &= e^{-\frac{t}{\tau}} i_{\varphi 1}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\text{де } \tau = \frac{L_0}{2z_1} = \frac{L_0}{2z_2}.$$

Нехай в місці сполучення ліній включено відгалуження, що містить конденсатор, ємність якого дорівнює C_0 . Тоді в місці сполучення ліній:

$$u_1 = u_2; \quad i_1 = C_0 \frac{du_2}{dt} + i_2.$$

і в разі переходу хвиль напруги і струму з першої лінії в другу можемо написати:

$$u_{\varphi 1} + u_{\psi 1} = u_{\varphi 2}; \quad \frac{u_{\varphi 1} - u_{\psi 1}}{z_1} = C_0 \frac{du_{\varphi 2}}{dt} + \frac{u_{\varphi 2}}{z_2}$$

Відповідно,

$$2u_{\varphi 1} = z_1 C_0 \frac{du_{\varphi 2}}{dt} + \frac{z_2 + z_1}{z_2} u_{\varphi 2}$$

При прямокутній формі падаючої хвилі та $u_{\varphi 1} = \text{const}$ отримаємо:

$$u_{\varphi 2} = \frac{2z_2}{z_2 + z_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) u_{\varphi 1}; \quad i_{\varphi 2} = \frac{2z_2}{z_2 + z_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) i_{\varphi 1}$$

Тоді, знайдемо:

$$u_{\psi 1} = \left(\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} - \frac{2z_2}{z_2 + z_1} e^{-\frac{t}{\tau}} \right) u_{\varphi 1} \quad (2.13)$$

$$i_{\psi 1} = \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} + \frac{2z_2}{z_1 + z_2} e^{-\frac{t}{\tau}} \right) i_{\varphi 1} \quad (2.14)$$

Вирази, отримані для $u_{\varphi 2}$ і $i_{\varphi 1}$ аналогічні виразам, отриманим в попередньому випадку, і відповідно до цього, заломлені хвилі наростають поступово від нуля до тих значень, які виходять при відсутності відгалуження. При цьому швидкість їх наростання, обумовлена постійною часу тим менше, чим більша ємність конденсатора C_0 .

Таким чином, в результаті наявності ємнісного відгалуження фронт заломлених хвиль набуває пологий характер навіть при стрімкому фронті падаючих хвиль. Згладжування фронту заломлених хвиль в даному випадку пояснюється тим, що енергія падаючої хвилі частково переходить в енергію поля конденсатора.

3 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ВПЛИВІВ НА ІЗОЛЯТОРИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ

3.1 Імпульсні методи визначення пошкодження лінії

Імпульсні, або локаційні методи визначення місця пошкодження (МП) засновані на вимірі часу між моментом подачі в лінію зонduючого електричного імпульсу і моментом повернення відбитого від МП імпульсу до початку лінії [63, 64]. Принцип вимірювання відстані до місця пошкодження даним методом наведено на рис. 3.1.

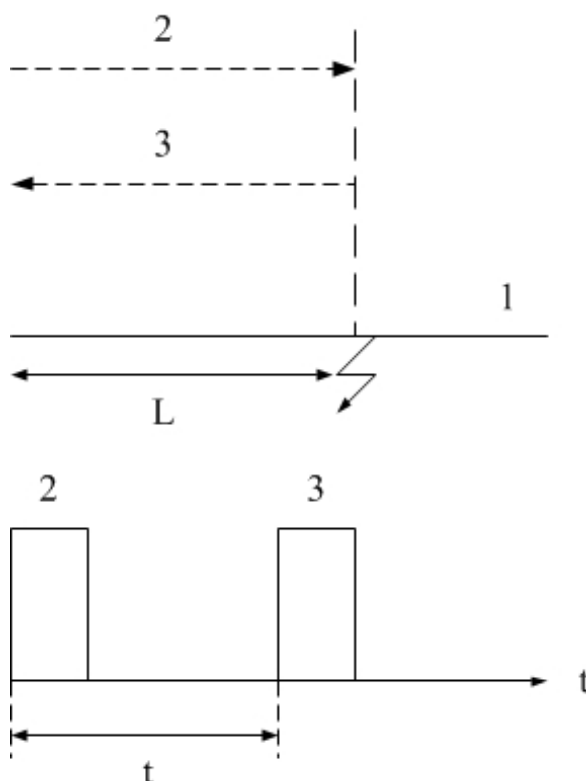


Рисунок 3.1 – Імпульсний метод визначення місця пошкодження лінії

В лінію 1 подається зонduючий імпульс 2 і вимірюється час подвійного пробігу зонduючого імпульсу 3 до місця пошкодження і назад. Шукана відстань до місця пошкодження знаходиться за формулою:

$$L = \frac{t}{2} \cdot V, \quad (3.1)$$

де t – час пробігу імпульсу,

V – швидкість поширення імпульсу в лінії.

Імпульсні методи діляться на автоматичні і неавтоматичні. Автоматичні локаційні шукачі використовуються для ліній, що перебувають під робочою напругою. Призначені вони для високовольтних ЛЕП напругою 330 - 1150 кВ.

Автоматичні локатори спрацьовують від пускових органів релейного захисту і фіксують відстань до місця пошкодження в період горіння дуги [66].

Неавтоматичні локаційні шукачі використовуються на лініях з відключеним напругою, при відсутності електричної дуги. Після погашення дуги на пошкодженій повітряній лінії отримати необхідний відбитий імпульс в більшості випадків не вдається [63, 64, 66]. У той же час, в кабельних лініях, після попередньої операції пропалювання і зниження перехідного опору до декількох десятків Ом, коефіцієнт відображення в місці пошкодження, як правило, забезпечує достатній відбитий імпульс. Тому в кабельних лініях застосовується неавтоматична локація, а на повітряних лініях - автоматична.

Основні проблеми локаційних шукачів пов'язані з отриманням відбитого імпульсу оптимальної форми, тривалості і амплітуди. Ці проблеми вирішуються підбором форми і тривалості зондуючих імпульсів і обробкою сигналів, що приходять з лінії. Підбір зондуючих імпульсів здійснюється таким чином, щоб основна частина амплітудного спектра відбитого імпульсу була розташована в тій самій шпальті частот, що і спектр зондуючого імпульсу [63, 64, 67].

Значне підвищення роздільної здатності дає застосування здвоєного імпульсу, що складається з двох прямокутних імпульсів різної полярності. Другий імпульс має регульовану амплітуду. Ставлення амплітуди другого імпульсу до амплітуди першого називають коефіцієнтом корекції [67].

Автоматичні і неавтоматичні локаційні шукачі використовують далеко не на всіх ЛЕП. Це пов'язано зі складністю даної апаратури і її високою ціною. На ділянках контактної мережі постійного струму функції таких локаційних шукачів виконує релейний захист [68-71].

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

Одним з недоліків релейного захисту є недостатня точність визначення місця пошкодження. Також, релейний захист не діагностує стан ізоляторів, він лише відключає необхідний ділянку в разі аварії або короткого замикання на рейок.

3.2 Метод визначення місця пошкодження на основі зовнішніх попередньо заряджених конденсаторів

Даний метод заснований на визначенні власної частоти коливального контуру, утвореного пошкодженою фазою, перехідним опором і зовнішнім конденсатором, підключеним між пошкодженою фазою попередньо відключеною лінії і землею [63, 72].

Спрощена схема такого контуру наведена на рис. 3.2. пошкоджена фаза в даному випадку представлена у вигляді зосередженого активного опору R_k і індуктивності L_k .

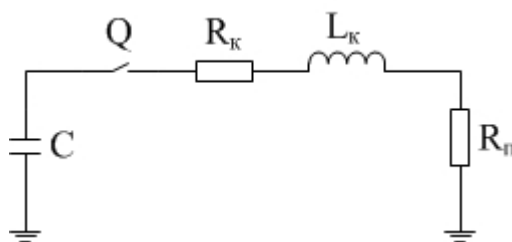


Рисунок 3.2 – Схема заміщення пошкодженої фази

Величина ємності C зовнішнього конденсатора вибирається на порядок більше ємності фази лінії щодо землі $C \gg C_0 l$, C – питома ємність одиниці лінії; l – довжина лінії. При виконанні такої умови можна знехтувати впливом власної ємності лінії і враховувати тільки поперечні активні і індуктивні опору.

Для визначення відстані до місця пошкодження ємність C попередньо заряджається, а потім за допомогою вимикача Q підключається до пошкодженої фази, відключеною від живлення лінії.

Відомо, що якщо активний опір контуру $R_k + R_n$ менше критичного значення

$$R_k + R_n \leq 2 \cdot \sqrt{\frac{L_k}{C}} \quad (3.2)$$

Кутова частота власних коливань контуру:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_K \cdot C} - \frac{R_K + R_{II}}{4 \cdot L_K^2}} \quad (3.3)$$

Індуктивність контуру пропорційна відстані до місця ушкодження:

$$L_K = l_K \cdot L_0 \quad (3.4)$$

Відстань до місця пошкодження:

$$l_K = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L_0 \cdot C} \quad (3.5)$$

Недоліком такого методу є похибка від перехідних опорів, які не враховуються в місці пошкодження, яка при великих значеннях таких опорів може бути істотною [63, 72].

Інший недолік – при близьких замиканнях індуктивність контуру L може бути дуже малою. При цьому власна частота коливань може бути дуже великою. Для обмеження власної частоти рекомендується послідовно з додатковою ємністю встановлювати додаткову (баластну) індуктивність [72].

Вивчивши дані методики, можна зробити висновок, що жодна з них не підходить в повній мірі для роботи на ділянках контактної мережі постійного струму.

3.3 Визначення первинних параметрів лінії

Створення теорії дистанційного діагностування на ділянці контактної мережі постійного струму потребують обов'язкового дотримання і обліку всіх особливостей конструкції такого ділянки. Напруги і струми в кожному перетині лінії визначаються не тільки моментом часу, але і його координатою. Лінії з розподіленими параметрами характеризуються в розрахунку на одиницю довжини активним опором проводів r_0 , їх індуктивністю L_0 , ємністю проводів C_0 і активною провідністю ізоляції g_0 [73-75].

Схема заміщення ділянки лінії нескінченно малої довжини d_0 приведена на рис. 3.3.

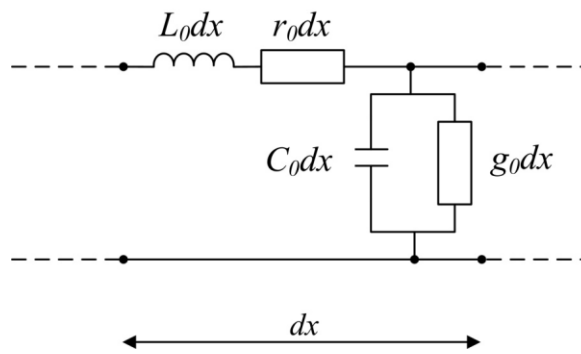


Рисунок 3.3 – Схема заміщення ділянки лінії

Параметри електромагнітної хвилі в лінії пов'язані її хвильовими параметрами - хвильовим опором Z і коефіцієнтом поширення хвилі γ . Хвильовий опір показує відношення напруги) біжучої хвилі в будь-якому перетині лінії з координатою x і визначається первинними параметрами [73]:

$$\underline{Z}_B = \frac{\dot{U}_B(x)}{\dot{I}_B(x)} = \sqrt{\frac{R_0 + j \cdot \omega \cdot L_0}{g_0 + j \cdot \omega \cdot C_0}} \quad (3.6)$$

Коефіцієнт поширення хвилі показує в логарифмічних одиницях зміну величини напруги біжучої хвилі, а так само його фазовий зсув на одиницю довжини лінії:

$$\gamma = \alpha + j \cdot \beta = \ln \frac{\dot{U}_B(x)}{\dot{U}_B(x+1)} = \sqrt{(R_0 + j \cdot \omega \cdot L_0) \cdot (g_0 + j \cdot \omega \cdot C_0)} \quad (3.7)$$

Хвильові параметри визначаються експериментально за результатами вимірювання вхідного опору лінії при холостому ході і короткому замиканні на її виході [73, 74]:

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\underline{Z}_K \cdot \underline{Z}_X} \quad (3.8)$$

$$th(\gamma l) = \sqrt{\frac{\underline{Z}_K}{\underline{Z}_X}} \quad (3.9)$$

Знаючи наближено фазову швидкість v_ϕ хвилі в лінії на частоті f , визначають наближено число півхвиль на довжині лінії, яке округлюють до найближчого цілого числа n .

Первинні параметри визначаються зі спільного вирішення виразів (3.6) і (3.7):

$$R_0 + j \cdot \omega \cdot L_0 = \gamma \cdot \underline{Z}_B \quad (3.10)$$

$$g_0 + j \cdot \omega \cdot C_0 = \frac{\gamma}{\underline{Z}_B} \quad (3.11)$$

Таким чином, можна визначити невідомі параметри ділянки контактної мережі розрахунковим методом. Але даний розрахунок справедливий для ділянки з однорідною розподіленним навантаженням по всій довжині лінії. В реальних же умовах, всі ділянки контактної мережі неоднорідні і мають відмінні одна від одної. На основі розглянутих методів була створена імітаційна модель пристрою діагностування, що працює в імпульсному режимі [76].

3.4 Моделювання процесу діагностування в програмному комплексі Multisim

Для вирішення завдання контролю ізолюючих елементів і оперативного визначення місця їх пошкодження необхідно використовувати сучасне програмне забезпечення [77]. Для створення віртуальної моделі пристрою була обрана програма Multisim 12.0. Схема пристрою діагностування ізоляції, створена в програмі Multisim [80-82] наведена на рис. 3.4.

Від джерела подається змінна напруга 100 В на схему помножувача напруги. З генератора прямокутних імпульсів подається сигнал на реле частотою 1 Гц. Вихід ІО1 підключається до контактної мережі. вихід ІО2 з'єднаний з рейкою.

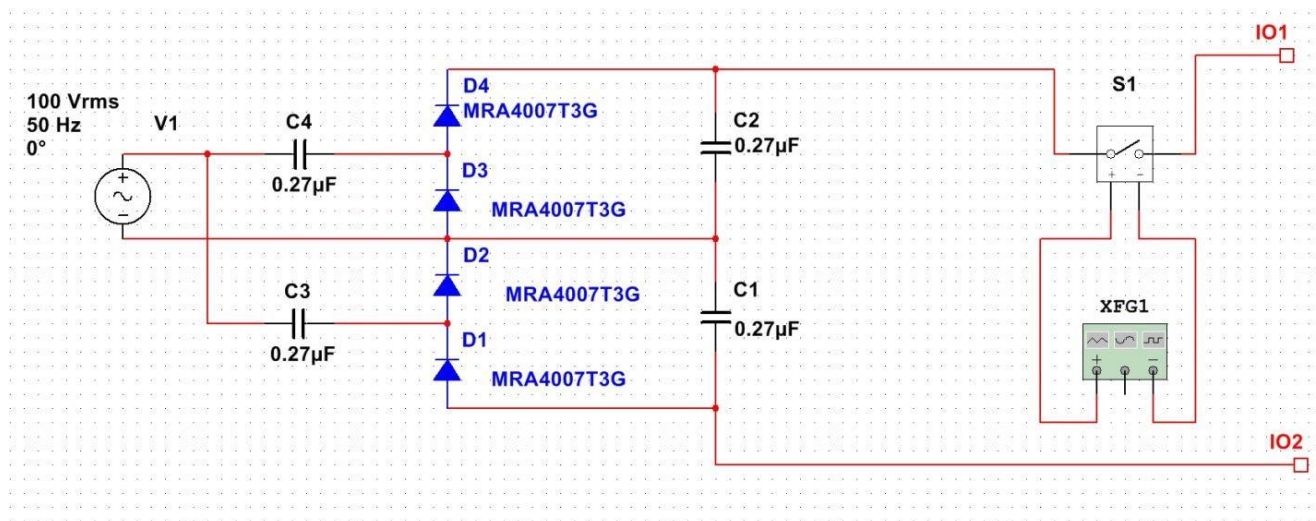


Рисунок 3.4 – Схема пристрою діагностування ізоляторів в програмному комплексі Multisim

В якості тестових впливів обрані прямокутні імпульси, мають безперервний спектр вищих гармонік. Оскільки об'єкт діагностування представлений комплексним опором, кожна з складових гармонік вхідної напруги буде по-різному впливати на форму вихідного сигналу.

Схема вимірювального експериментального пристрою реалізованого в програмі Multisim представлена на рис. 3.5.

Сигнал з виходу приладу IO1 подається в лінію. Опору R1...R2 виконують функцію дільника напруги. Сигнал фіксується осцилографом XSC1.

Гірлянда складається з двох ізоляторів, кожен з яких представлений у вигляді паралельно сполученого активного і ємнісного опору.

Розглянуто найбільш складнодіагностований випадок, коли перший (найближчий до консолі) ізолятор несправний, а другий тільки починає втрачати свої діелектричні властивості (гірлянда №3 на рис. 3.5). Опір першого ізолятора складає 500 кОм, ємність 5 пФ; опору другого ізолятора – 200 МОм і ємність 30 пФ. Кожен проліт мав довжину 50 м і комплексний опір 0,03 Ом [11, 12].

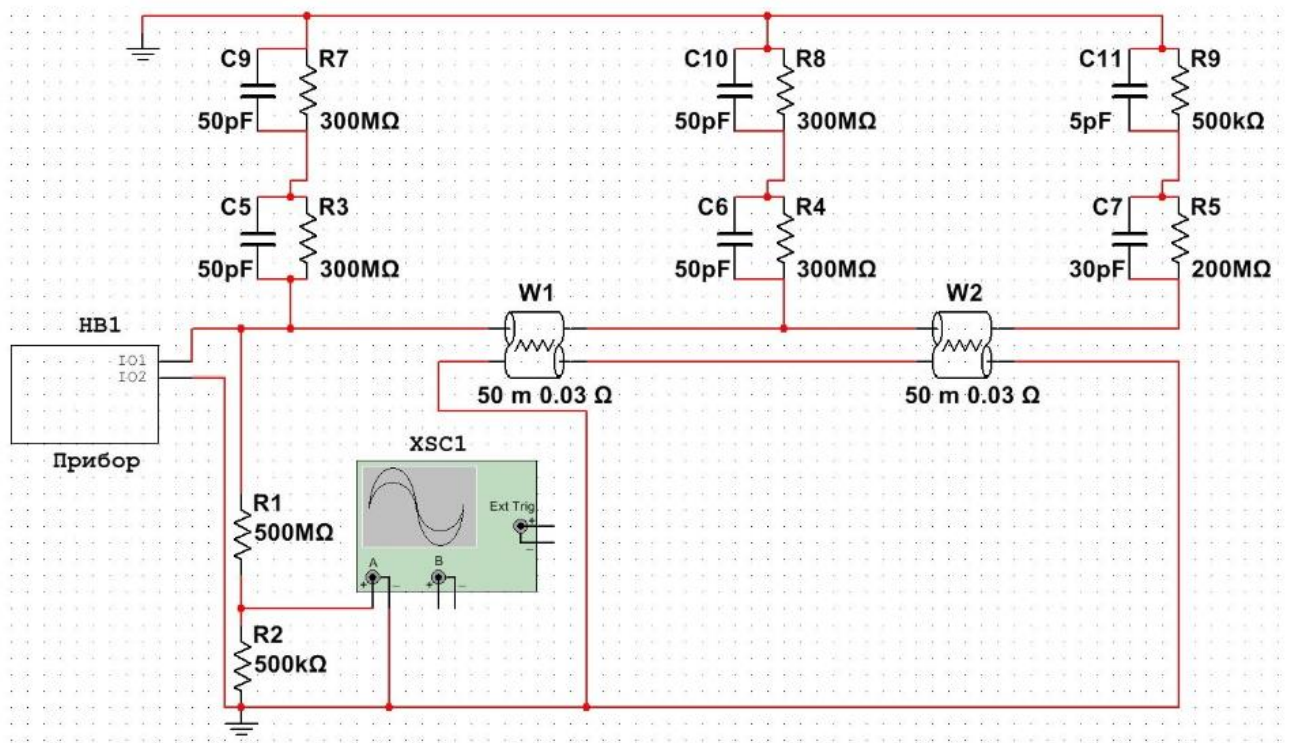


Рисунок 3.5 – Моделювання процесу діагностування в програмі Multisim
Послідовність прямокутних імпульсів, характеризується тривалістю, амплітудою і періодом проходження одиничного імпульсу.

На рис. 3.6 приведена осцилограма справної лінії. Всі ізолятори мають активний опір 300 МОм і ємність 50 пФ [11, 12]. При проходженні імпульсу через лінію, відбувається заряд з подальшим розрядом ємності ізоляторів.

На рис. 3.7 представлені результати моделювання з пошкодженою гірляндою в різних точках лінії: 1 – несправна гірлянда знаходиться на початку лінії, 2 - гірлянда знаходиться в середині лінії, 3 - гірлянда розташована в кінці лінії. Як видно з осцилограм, чим далі знаходиться несправна гірлянда, тим сильніший спад заднього фронту імпульсу. Це можна пояснити сумарним розрядом ємностей всіх ізоляторів лінії. Сигнал, що надходить в лінію, шунтується несправним ізолятором, опір і ємність якого значно менше, ніж у справних ізоляторів. Тому, коли несправна гірлянда знаходиться на початку лінії, розряд ємності гірлянди відбувається значно швидше.

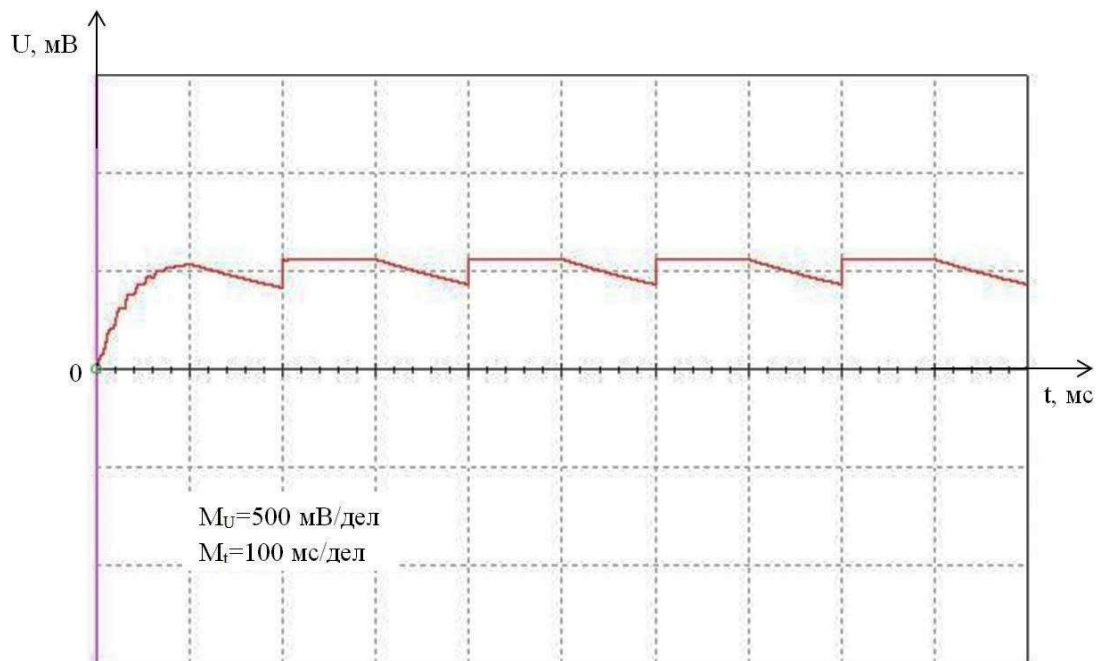


Рисунок 3.6 – Осцилограма вихідного сигналу справної ділянки

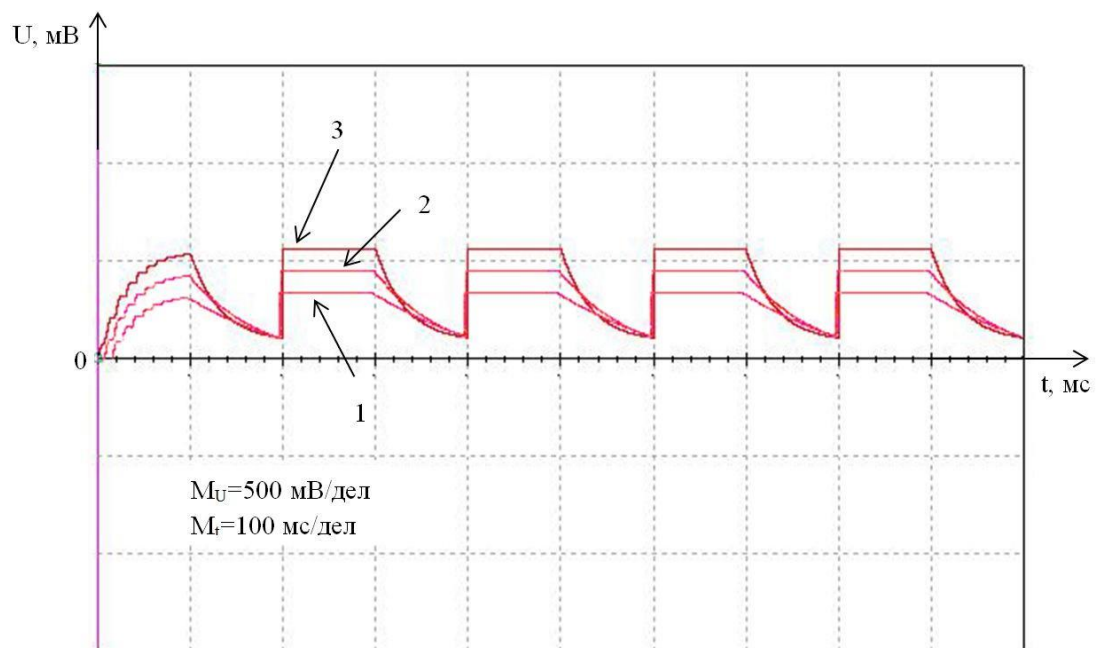


Рисунок 3.7 – Осцилограма вихідного сигналу справної ділянки

Дана модель показала, що наявність на ділянці несправних ізоляторів супроводжується зміною форми діагностуючих імпульсів, а відстань до несправного ізолятора визначається зміною амплітуди сигналу.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Розглянуті основні існуючі пристрої діагностування стані ізоляції контактної мережі, визначено складність їх застосування для постійного моніторингу стану ізоляції.

2. Розглянуті основні методи дистанційного визначення місць пошкодження на повітряних лініях електропередачі і в кабельних лініях. Метод попередньо заряджених конденсаторів працює на великій частоті і не враховує перехідний опір в місці пошкодження. Це призводить до погіршень при отриманні діагностичних сигналів. Імпульсний метод найбільш підходящий для адаптації під умови ділянок контактної мережі постійного струму.

2. Визначено параметри ділянки лінії нескінченно малої довжини. Лінії з розподіленими параметрами характеризуються в розрахунку на одиницю довжини активним опором проводів їх індуктивністю і ємністю проводів, а також активною провідністю ізоляції.

3. На основі імпульсного методу, з урахуванням параметрів ділянки контактної мережі постійного струму, було розроблено модель пристрою дистанційного діагностування ізоляторів. У програмі Multisim 12.0 була реалізована модель даного пристрою і експеримент на ділянці з трьома гірляндами ізоляторів.

4. Для діагностування були обрані імпульси прямокутної форми частотою 1 Гц. Отримано осцилограми справної лінії і пошкодженої в трьох різних режимах роботи. Наявність на ділянці несправних ізоляторів супроводжується зміною форми діагностуючих імпульсів, а відстань до несправного ізолятора визначається зміною амплітуди сигналу.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.
2. Contact Lines for Electrical Railways / Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., Schneider, E. – Germany: Publicis MCD Verlag, 2009. – 994 p.
3. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети 3-е изд., перераб. И доп / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – М: Транспорт, 1991. – 335 с.
Колесов, С. М. Материалы и взаимодействие контактной подвески
4. Марквардт, К. Г. Контактная сеть. 4-е изд. перераб. и доп. Учеб. Для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1994 г. – 335 с.
5. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи: Учебник для вузов ж.-д. транспорта. / В. П. М и х е е в . М.: Маршрут, 2003 г. – 416 с.
6. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Учеб. для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1982 г. – 528 с.
7. Марквардт, К.Г. Контактная сеть: Учебник для вузов ж.-д. транс. / К.Г. Марквардт, И.И. Власов. – М.: Транспорт, 1977. – 271 с.
8. Аппарат Испытательный диодный АИД-70/50. Руководство по эксплуатации. АИД-70/50.00.00.00 РЭ. – 19 с.
9. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов. И. М. Богатенков, Г. М. Иманов, В. Е. Кизеветтер и др.; Под ред. Г. С. Кучинского. – СПб: изд. ПЭИПК, 1998 г. – 700 с.
10. Радченко, В. Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги. М.: Транспорт, 1975 г. – 360 с.
11. Егоров, В. В. Техника высоких напряжений. Перенапряжения в устройствах электрической тяги. Профилактические испытания изоляции: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2004 г. – 188 с.
12. Разевиг, Д. В. Техника высоких напряжений. М.: Энергия, 1976 г. – 488 с.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

13. Методические указания по дистанционному оптическому контролю изоляции воздушных линий электропередачи и распределительных устройств переменного тока напряжением 35 – 1150 кв. СТО 56947007-29.240.003-2008. – 31 с.

14. Fumi, A. Контактная сеть железных дорог Италии [Текст] / A. Fumi // Железные дороги мира. 2003. – №5. – С. 12 – 17.

15. Хананов, В. В. Мобильная система диагностики изоляторов контактной сети по ультрафиолетовому излучению / В. В. Хананов, А. В. Мизинцев, Ю. И. Плотников // Железные дороги мира. – 2006. – № 9. – С. 54– 62.

16. Объем и нормы испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – 6-е изд., с изм. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004 г. – 256 с.

17. Петров, Л. С. Тепловизионная диагностика высоковольтного оборудования энергосистем и энергопредприятий. [Электронный ресурс]: Л. С. Петров, В. Ю. Поляков // Новости электротехники. – 2001. – № 5 (11).

18. Власов, А. Б. Диагностическая модель тепловизионного контроля высоковольтных вводов с конденсаторным типом изоляции / А. Б. Власов // Электротехника. – 2004. – № 3. – С. 14–18.

19. Вихров, М. А. Средства контроля и диагностики высоковольтного оборудования электростанций и сетей / М. А. Вихров // Энергетик. – 2004. – № 5. – С. 44–48.

20. Бабилов, М. А. Техника высоких напряжений: учеб. пособие / М. А. Бабилов, Н. С. Комаров, А.С. Сергеев.– изд. 3. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963 г. – 670 с.

21. Базелян, Э. М. Физика молнии и молниезащита: учеб. пособие / Э. М. Базелян, Ю. П. Райзер. – М.: Физматлит, 2001 г. – 320 с.

22. Баркан, Я. Д. Эксплуатация электрических систем: учеб. Пособие для электроэнергетических специальных вузов.– М.: Выс. шк, 1990. – 304 с.

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

23. Бахрах, А. Г. Структурная и функциональная схема работы мобильного контрольно-вычислительного комплекса для диагностики контактной сети / А. Г. Бахрах, М. А. Гаранин, Д. А. Фомочкина / В сборнике: Наука и образование транспорту 2012. – С. 146–149.

24. Термографы компьютерные портативные «ИРТИС-200». Описание типа средств измерений. Гос. Рег. № 19998-00. 2 с.

25. Бей, Ю. М. Тяговые подстанции: учеб. для вузов ж.-д. транспорта. / Ю. М. Бей, Р. Р. Мамошин, В. Н. Пупынин – М.: Транспорт, 1986. – 319 с.

26. Вавилов, В. П. Неразрушающий контроль. Справочник, т. 5: в 2 кн. Кн. 1 Тепловой контроль. М.: «Машиностроение», 2004 г. – 679 с.

27. Вавилов, В. П. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. / В. П. Вавилов, А. Н. Александров – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003 г. – 76 с.

28. Пашков, Б. А. Инфракрасное термографирование / Б. А. Пашков // Наука и технологии в промышленности. – 2004. – № 2. – С. 53–55.

29. Пирометры – приборы для измерения температуры по инфракрасному излучению бесконтактным методом. Каталог продукции фирмы «Диагност». Режим доступа: http://www.diagnost.ru/part_6.html.

30. Кочуров, Е. Л. О технических характеристиках тепловизоров и о проблемах интерпретации результатов тепловизионной съемки оборудования / Е. Л. Кочуров, И. В. Милютин, А. В. Рубиновский // Ижевск. ООО «Лаборатория энергоснабжения». Отдел диагностики ООО «Удмуртские коммунальные системы», 2010. Режим доступа: <http://www.enlab.ru/pub/pub16/pub16.html>.

31. Прибор контроля высоковольтного энергетического оборудования под напряжением «Ультраскан 2004». Каталог продукции ООО «Промприбор». Режим доступа: <http://www.prompribors.ru/inside/13218>.

32. Прибор акустического контроля высоковольтных изоляторов "Метакон-Экспресс". Каталог продукции ООО «НПП Метакон». Режим доступа: <http://metacon.ru/m-e.html>.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

33. Сви, П. М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. – М.: Энэрогаоатомиздат, 1988 г. – 126 с.

34. Тареев, Б. М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоиздат, 1982 г. – 320 с.

35. Электротехнический справочник. В 3-х т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др.– 6-е изд., испр. и доп. – М.: Энергия, 1980 г. – 520 с .

36. Ефимов, А. В. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – М.: УМК МПС России, 2000. – 512 с.

37. Инструкция по безопасности при эксплуатации электроустановок тяговых подстанций и районов электроснабжения железных дорог ОАО «РЖД». – М.: ТЕХИНФОРМ 2008 г. – 192 с.

38. Кузьменко, А. Ю. Энергоэффективные технологии контроля изоляции контактной сети железных дорог постоянного тока / А. А. Кузнецов, А. Д. Родченко, А. Ю. Кузьменко // Энергосбережение в теплоэнергетике и теплоэлектротехнологиях: матер. Междунар. Науч.практич. Конф. – Омск:Изд-во ОмГТУ, 2010. – С. 160–162.

39. Кузьменко, А. Ю. Аппаратный комплекс обнаружения повреждений изоляции контактной сети на участках железных дорог постоянного тока. Молодёжь и наука: сборник материалов VII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию первого полета человека в космос [Электронный ресурс] /отв. ред. О. А. Краев - Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2011 г. Режим доступа: <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/587352>. Павлов, П. В. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 2000 г. – 494 с.

40. Бородулин, В. Н. Диэлектрики. – Изд-во МЭИ. М.: 1993 г. – 60 с.

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

41. Пасынков, В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1986 г. – 367 с.

42. Кучинский, Г. С. Изоляция установок высокого напряжения: Учеб. для вузов / Под общ. ред. Г. С. Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987 г. – 368 с.

43. Комолов, А. А. О возможности применения информации о токе утечки через поверхность загрязненной и увлажненной изоляции для целей диагностики ее электрической прочности / А. А. Комолов, В. М. Руцкий // Вестник транспорта Поволжья. – 2011.– № 2. – С. 60–65.

44. Комолов, А. А. Проблемы эксплуатации высоковольтной изоляции в условиях загрязненной атмосферы / А. А. Комолов, С. В. Коркина, В. М. Руцкий // Известия Самарского науч. центра Рос. академии наук. – Темат. выпуск. – 2010.– № 1. – С. 482–484.

45. Бунзя, А. А. Разработка элементов системы диагностики высоковольтной изоляции устройств электроснабжения тяговых подстанций: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Бунзя Александр Андреевич. Екатеринбург, 2011. – 157 с.

46. Куценко, С. М. Разработка дистанционной диагностики линейной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта: дис. канд. техн. наук: 05.14.12 / Куценко Сергей Михайлович. Томск, 2006. – 143 с.

47. Кузьменко, А. Ю. Диагностирование изоляции участка контактной сети железных дорог постоянного тока / А. А. Кузнецов, А. Д. Родченко, А. Ю. Кузьменко // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научно-практической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. – С. 286–290.

48. Кузьменко, А. Ю. Разработка технических средств и методики контроля состояния изоляторов контактной сети постоянного тока / А. А. Кузнецов, Е. А. Кротенко, А. Ю. Кузьменко // Известия Транссиба. – 2012. – № 4 (12). С. 110–116.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

49. Демирчан, К. С. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Учебник для вузов. Том 3. – 4-е изд. / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 377 с.

50. Владимиров, Л. В. Дистанционное определение места однофазного замыкания на землю воздушных линий, питающих объекты нефтедобычи: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Владимиров Леонид Вячеславович. Омск, 2012. – 161 с.

51. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г. М. Шалыт // М.: Энергоиздат, 1982 г. – 312 с.

52. Gopalakrishar A., Kezunovich M., McCenna S. M., Hamai D. M. Fault location using distributed parameter transmission line model // IEEE Transaction on Power Delivery. 2000. Vol. 15, № 4. P. 1169–1174.

53. Айзенфельд, А. И. Методы определения мест короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи при помощи фиксирующих приборов. – М.: Энергия, 1974 г. – 98 с.

54. Кузнецов, А. П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи. – М.: Энергоатомиздат, 1989 г. – 94 с.

55. Беркович, М. А. Основы техники релейной защиты / М. А. Беркович, В. В. Молчанов, В. А. Семенов // 6-е изд., пераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984 г. – 376 с.

56. Гельфанд, Я. С. Релейная защита распределительных сетей. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987 г. – 638 с.

57. Фигурнов, Е. П. Релейная защита: учебник для вузов / Е. П. Фигурнов. – М.: Желдориздат, 2002. – 719 с.

58. Фигурнов, Е. П. Релейная защита: учебник для вузов ж.-д. транспорта: в 2 ч. / Е. П. Фигурнов; Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: УМЦ ЖДТ, 2009.

59. Клеменц, А. Б. анализ основных параметров устройства определения мест замыкания в проводных сетях / А. Б. Клеменц, Л. Н. Солуянов, О. А.

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

Коноплянцев // Электрификация сельского хозяйства. – Саратов: Изд-во ССХИ, 1974. – Вып. 40. – С. 48–54.

60. Демирчан, К. С. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Учебник для вузов. Том 2. – 4-е изд. / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2006. – 576 с.

61. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Электронный ресурс]: учебник для бакалавров, для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки дипломированных специалистов "Электротехника, электромеханика и электротехнологии", "Электроэнергетика", "Приборостроение": допущено Министерством образования РФ / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2014. Режим доступа: <http://www.biblio-online.ru>.

62. Зажирко, В. Н. Периодические режимы однофазных и трехфазных электрических цепей: учебное пособие / В. Н. Зажирко [и др.]; Омский государственный университет путей сообщения. – 2-е изд. – Омск: ОмГУПС, 2006. – 125 с.

63. Кузьменко, А. Ю. Моделирование и экспериментальное исследование тестовых воздействий для контроля изоляторов контактной сети постоянного тока / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, Е. А. Артюкова // Электроснабжение железных дорог: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2013. – С. 23-27.

64. Компьютерное моделирование в дисциплинах "Теоретические основы электротехники" и "Электротехника": учебное пособие / Омский государственный университет путей сообщения; ред. В. Н. Зажирко. – Омск: ОмГУПС, 2006. – 88 с.

141

65. Кузьменко, А. Ю. Моделирование процесса дистанционного диагностирования изоляторов контактной сети / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко // Известия Транссиба. – 2014. – № 4 (20). – С. 92–97.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

66. Кузьменко, А. Ю. Исследование аппаратного комплекса и методики контроля состояния изоляторов контактной сети постоянного тока / Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании'2012». – Выпуск 4. Том 2. – Одесса: Купrienko, 2012 – ЦИТ: 412-0537 – С. 39-42.

67. Серебряков, А. С. Электротехника и электроника. Лабораторный практикум на Electronics Workbench и Multisim: учебное пособие для студентов вузов / А. С. Серебряков. – М.: Высшая школа, 2009. – 335 с.

68. Марченко, А. Л. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim [Электронный ресурс]: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по неэлектротехническим направлениям подготовки бакалавров 550000 – технические науки и по неэлектротехническим направлениям подготовки дипломированных специалистов, 650000 – техника и технологии / А. Л. Марченко, С. В. Освальд. – М.: ДМК Пресс, 2010. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com>.

69. Хернитер, М. Е. Multisim 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств [Электронный ресурс]: пер. с англ. / М. Е. Хернитер. – М.: ДМК Пресс, 2009. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com>.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

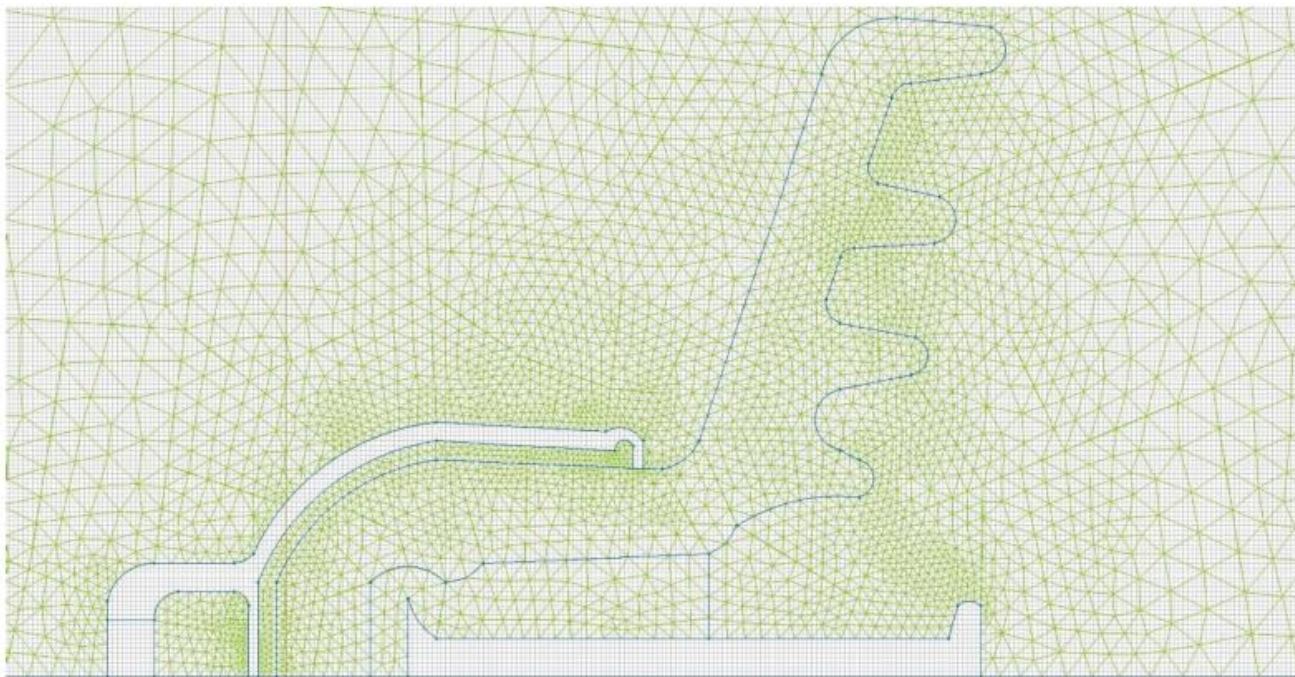


Рисунок А.1 – Креслення справного ізолятора в програмному комплексі Elcut

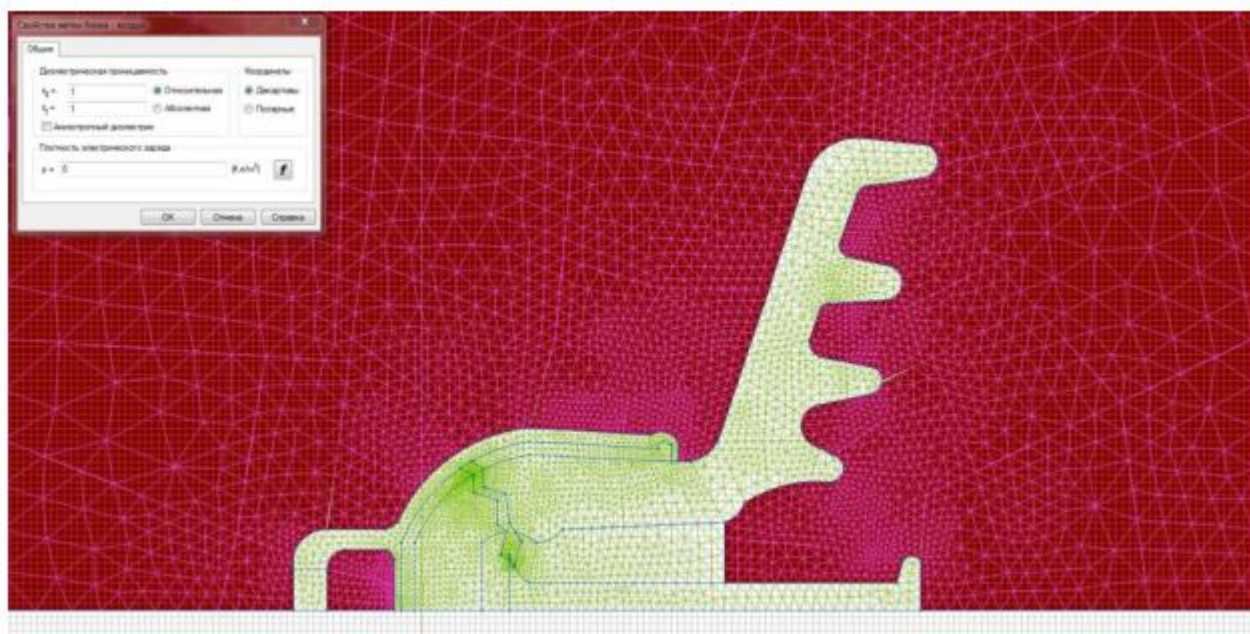


Рисунок А.2 – Вибір параметрів середовища «повітря» програмному комплексі Elcut

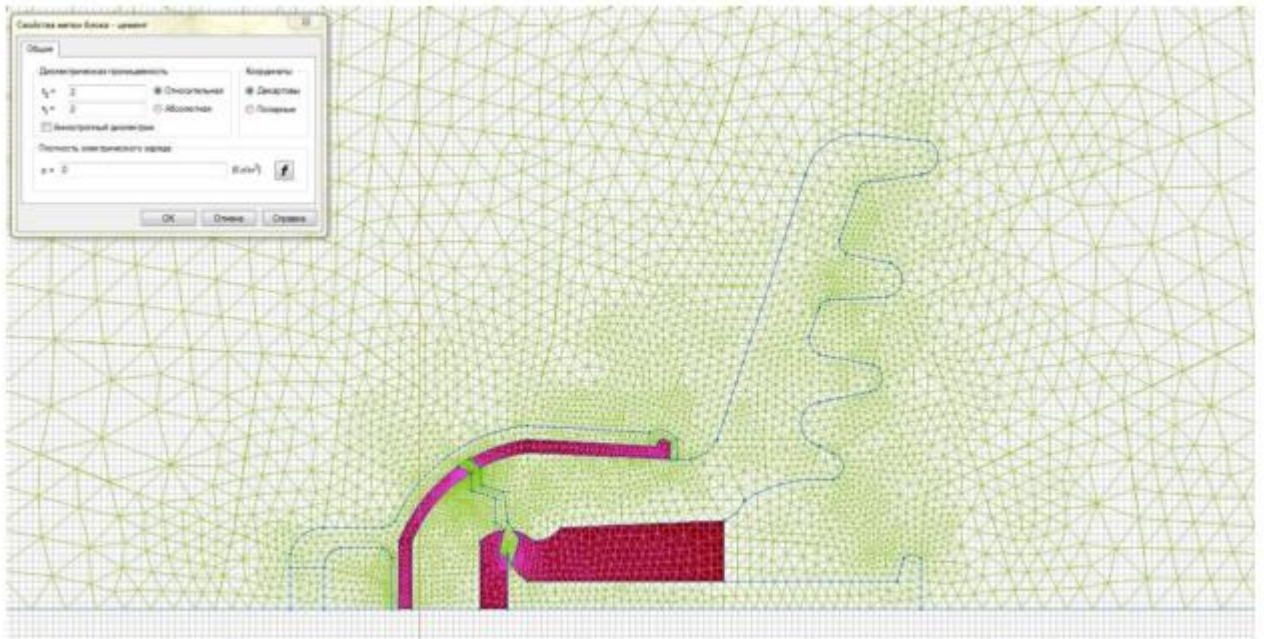


Рисунок А.3 – Вибір параметрів середовища «цемент» програмному комплексу Elcut

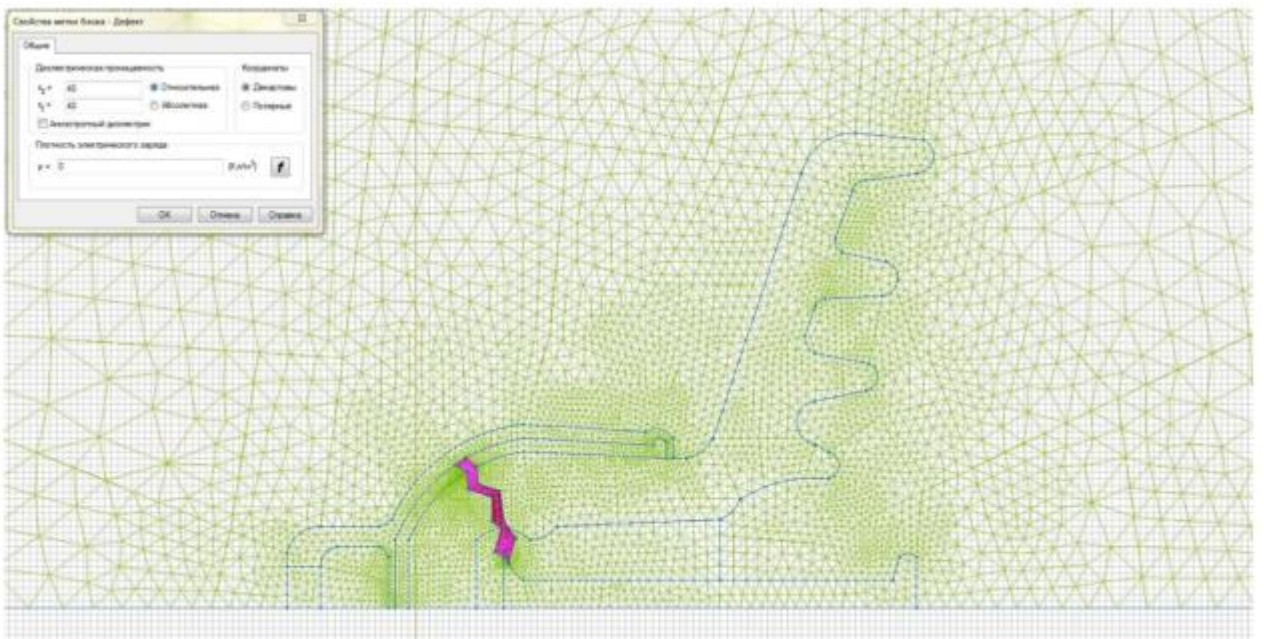


Рисунок А.4 – Вибір параметрів середовища «дефект» програмному комплексу Elcut

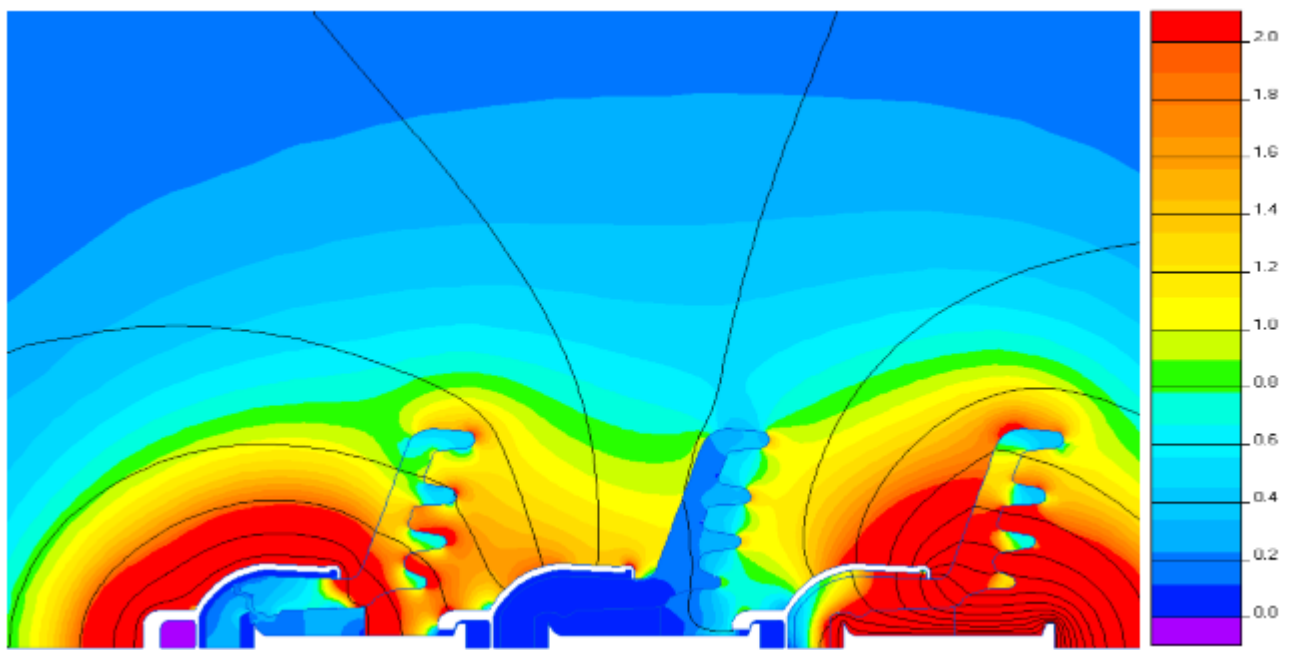


Рисунок А.5 – Розподіл напруженості поля при верхньому несправному ізоляторі в гірлянді

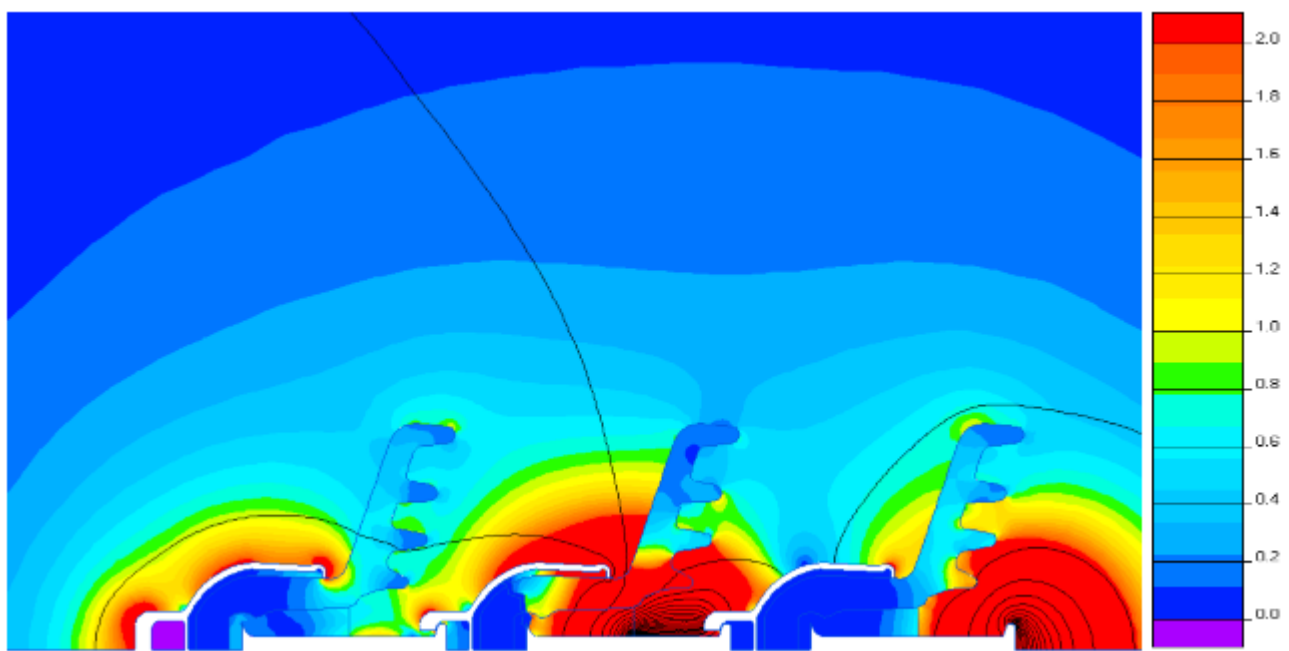


Рисунок А.6 – Розподіл напруженості поля при середньому несправному ізоляторі в гірлянді