

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Конончук Олександр Павлович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Дослідження імпульсних впливів перенапруг на ізолятори контактної мережі
шляхом моделювання хвильових процесів в середовищі MULTISIM
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Конончук О. П.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Цивенкова Наталія Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Конончук О. П. Дослідження імпульсних впливів перенапруг на ізолятори контактної мережі шляхом моделювання хвильових процесів в середовищі MULTISIM. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Метою даної роботи є удосконалення методів діагностування ізоляторів електричних мереж постійного струму за рахунок застосування нових алгоритмів та апаратних комплексів.

Предметом дослідження являється стан підвісних тарілчастих ізолятори електричної мережі постійного струму.

Ключові слова: імпульсні перенапруги , хвильовий процес, ізолятор.

ABSTRACT

Kononchuk O. P. Research of impulse effects of overvoltages on insulators of the contact network by modeling wave processes in the MULTISIM environment. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The purpose of this work is to improve the methods of diagnosing insulators of direct current electrical networks by applying new algorithms and hardware complexes.

The subject of the study is the condition of suspended plate insulators of direct current electrical networks.

Keywords: impulse overvoltages, wave process, insulator.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ	7
1.1 Завдання підвищення надійності контактної мережі	7
1.2. Статистичний аналіз причин відмови пристроїв контактної мережі на дистанціях залізниці	8
Висновки по розділу 1	11
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИРОДИ ВИНИКНЕННЯ УШКОДЖЕНЬ В ІЗОЛЯТОРАХ	13
2.1 Дослідження природи виникнення ушкоджень в ізоляторах залізниці	13
2.2 Хвильові процеси в лінії з розподіленими параметрами	21
Висновки по розділу 2	28
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ВПЛИВ НА ІЗОЛЯТОРИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ	29
3.1 Імпульсні методи визначення місця ушкодження в лініях	29
3.2 Метод ВМП на основі зовнішніх попередньо заряджених конденсаторів	31
3.4 Моделювання процесу діагностування в програмі Multisim	33
Висновки по розділу 3	36
ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	39

ВСТУП

Актуальність роботи

Енергосистема це складний електроенергетичний комплекс, який призначений для забезпечення надійного та економічного виробництва, транспортування та постачання електроенергії споживачам у необхідній кількості та якості. Одним із основних державним пріоритетом розвитку та модернізації промисловості є зростання рівня безпеки електроенергетичної системи, наукових досліджень в даній галузі та роботи при поточній експлуатації. Безпечна робота системи електропостачання насамперед залежить від надійної роботи електромережі, і типовим прикладом якої являється лінії постійного струму електрифікованих залізниць.

Аналіз функціонування господарства електропостачання залізниці виявив значну проблему, яка потребує пильної уваги: найбільша частка відмов у роботі припадає на пошкодження ізоляторів. Цей факт вказує на необхідність глибокого вивчення причин виникнення цих пошкоджень та розробки ефективних заходів щодо їх запобігання.

Пошкодження ізоляторів призводять до перебоїв в електропостачанні, що, своєю чергою, негативно позначається на графіку руху поїздів і може призвести до серйозних економічних втрат. Отже, оптимізація роботи господарства електропостачання вимагає детального аналізу факторів, що впливають на стан ізоляторів.

Необхідно дослідити вплив кліматичних умов, таких як різкі перепади температур, забруднення навколишнього середовища та вплив ультрафіолетового випромінювання. Також слід провести ретельну перевірку якості використовуваних ізоляторів, дотримання технологій їх монтажу та обслуговування, а також своєчасності проведення профілактичних заходів.

Розробка та впровадження комплексного підходу, що включатиме в себе покращення якості матеріалів, оптимізацію технічного обслуговування та вдосконалення методів діагностики стану ізоляторів, дозволить значно підвищити надійність роботи господарства електропостачання залізниці та

мінімізувати ризики, пов'язані з пошкодженням ізоляторів. Лише систематичний і науково обґрунтований підхід до вирішення цієї проблеми дозволить забезпечити стабільне та безпечне функціонування залізничного транспорту.

Сучасні методи діагностики ізоляції, незважаючи на значний прогрес у галузі електротехніки, не позбавлені суттєвих недоліків. Ключовим обмеженням є недостатній облік сукупності фізичних процесів, що призводять до деградації ізоляційних властивостей. Існуючі методи часто фокусуються на окремих параметрах, таких як опір ізоляції або тангенс кута діелектричних втрат, упускаючи з уваги складні взаємодії, що лежать в основі процесів старіння та руйнування ізоляції. У зв'язку з цим, удосконалення методів діагностування ізоляції електричної мережі постійного струму є актуальною проблемою на сьогоднішній день.

Мета кваліфікаційної роботи – визначення удосконалених методів діагностики ізоляторів електричних мереж постійного струму за рахунок застосування нових алгоритмів та апаратних комплексів.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені наступні завдання:

- 1) створити математичну модель дистанційного методу діагностування ізоляторів на основі аналізу параметрів ліній з розподіленими параметрами;
- 2) визначити параметри діагностуючих імпульсів та критерії вимірюваних параметрів для визначення місця несправного ізолятора.

Об'єкт дослідження являються вузли ізоляції електричної мережі постійного струму.

Предмет дослідження – стан підвісних тарілчастих ізоляторів електричної мережі постійного струму.

Методи дослідження визначалися поставленими завданнями кваліфікаційної роботи та були засновані на математичному апараті ліній з розподіленими параметрами та перехідних процесів в електричних ланцюгах. Імітаційне моделювання процесу дистанційного діагностування ізоляторів

електричної мережі постійного струму здійснювалося у програмному середовищі Multisim з урахуванням основних положень теорії ланцюгів із розподіленими параметрами. розподілу напруженості електростатичного поля навколо ізолятора здійснювалося у програмному середовищі і експериментальних досліджень Multisim здійснювався за допомогою програми Microsoft Excel.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Конончук О. П., Целуйко А. А., ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИРОДИ
ВИНИКНЕННЯ УШКОДЖЕНЬ В ІЗОЛЯТОРАХ ЗАЛІЗНИЦІ

Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. – С 145-147.

Конончук О. П. ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЇ З РОЗПОДІЛЕНИМИ
ПАРАМЕТРАМИ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 155-157.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ

1.1 Завдання підвищення надійності контактної мережі

Сучасна залізниця як складна технічна система значною мірою залежить від надійної роботи контактної електричної мережі (КЕС). Відсутність надійності КЕС призводить до збоїв у графіку руху поїздів, фінансових втрат та зниження безпеки перевезень. Таким чином, завдання підвищення надійності КЕС є критично важливим для забезпечення ефективного та безпечного функціонування залізничного транспорту.

Вирішення цього завдання потребує комплексного підходу, що включає кілька ключових напрямів [14]. По-перше, необхідне вдосконалення системи діагностики стану КЕС. Впровадження сучасних методів неруйнівного контролю, таких як тепловізійна зйомка, ультразвукова дефектоскопія та дистанційний моніторинг дозволить своєчасно виявляти потенційні несправності та запобігати аварійним ситуаціям.

По-друге, важлива модернізація обладнання КЕС. Заміна застарілих елементів, використання сучасних матеріалів та конструкцій, стійких до впливу зовнішніх факторів, таких як зледеніння та корозія, значно підвищить довговічність та надійність мережі.

По-третє, необхідне вдосконалення системи технічного обслуговування та ремонту КЕС. Оптимізація графіків обслуговування, впровадження сучасних технологій ремонту та використання високоякісних запасних частин зменшить ризик раптових відмов обладнання.

По-четверте, важливим є підвищення кваліфікації персоналу, який обслуговує КЕС. Навчання сучасним технологіям діагностики, ремонту та експлуатації дозволить оперативно реагувати на проблеми, що виникають, і запобігати їх розвитку.

На закінчення, підвищення надійності КЕС – це складне, але необхідне завдання, що потребує комплексного підходу та постійної уваги. Вирішення

цього завдання дозволить забезпечити стабільну та безпечну роботу залізничного транспорту, підвищити його ефективність та конкурентоспроможність.

В останні роки в Україні на залізничному транспорті спостерігається спад обсягу перевезень, а також виробництва. Для зменшення витрат на експлуатацію постійно скорочують чисельність обслуговуючого персоналу. Відомо, що на залізничному транспорті, чисельність експлуатаційного персоналу, який займаються напряду технічною експлуатацією, суттєво залежить від кількості перевезень. Значні скорочення наблюдаються і в галузі господарства електропостачання, яке в основному й займається обслуговуванням контактної мережі. Ці фактори значно впливають на масштабами електрифікації залізниць країни. Дані обставини потребують сучасного науково-обґрунтованого підходу до скорочення чисельності кадрів, вдосконалювати методи технічного обслуговування, зміцнювати ремонтну базу та підвищувати кваліфікацію інженерно-технічного персоналу.

Тому надійна і безперебійна робота пристроїв контактної мережі вимагає комплексного підходу, що включає модернізацію обладнання, вдосконалення систем моніторингу та діагностики, підвищення кваліфікації персоналу, а також посилення контролю за дотриманням правил експлуатації. Тільки так можна мінімізувати негативний вплив кліматичних та технологічних факторів та забезпечити стабільне функціонування залізничного транспорту. Це можна реалізувати тільки при використанні теорії технічної діагностики [14] і широкому впровадженні засобів дистанційного діагностування [3].

1.2. Статистичний аналіз причин відмови пристроїв контактної мережі на дистанціях залізниці

Величезне число порушень безпеки руху поїздів пов'язані із подіями у господарстві електрифікації та електропостачання які відбувається завдяки відмовам у роботі пристроїв контактної елетромережі. Статистичний аналіз відмов пристроїв контактної мережі у 2014 році представлений на рисунку 1.1.

Основними причинами відмов пристроїв контактної мережі у 2014 році, що впливають на безпеку руху в господарстві електрифікації та електропостачання, є перекриття та руйнування ізоляторів контактної мережі (18 %), обриви та перепалювання проводів (17 %), руйнування затискачів (13 %), порушення регулювання контактної мережі (13 %), вплив метеоумов (8 %), обриви струн (6 %). Дані щодо розподілу основних причин відмов пристроїв контактної мережі за період 2005 – 2014 рр. [14] зведені в таблицю 1.1.

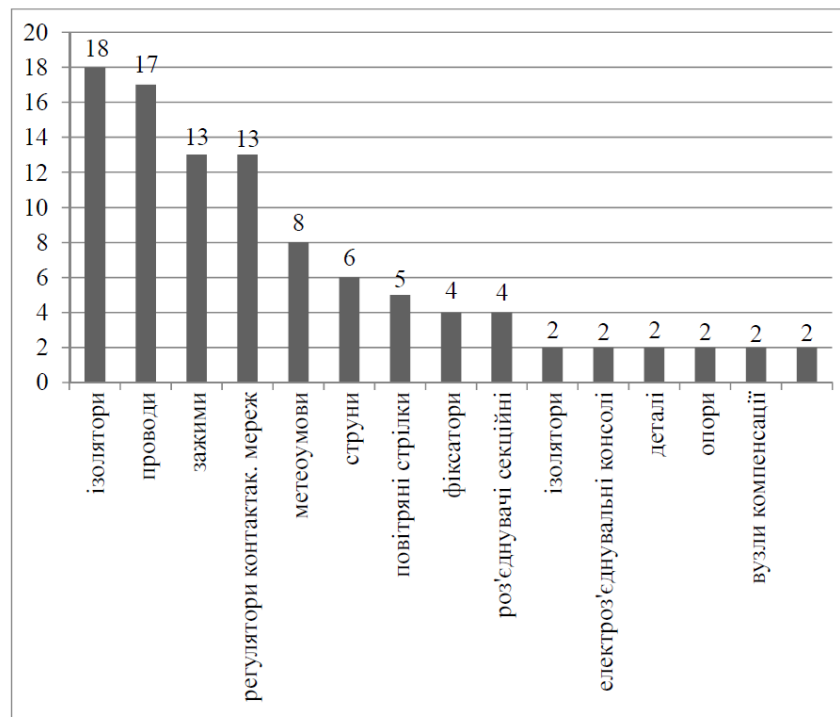


Рисунок 1.1 – Статистичний аналіз відмов пристроїв контактної мережі у 2014 році

Таблиця 1.1- Розподіл відмов приладів контактної мережі за період 2005 – 2014 роки.

Рік	Прилади контактної мережі					
	Ізолятори, %	Проводи і троси, %	Зажими к.с., %	Регулювання к.с., %	Обриви струн, %	Повітряни стрілки, %
2005	17,7	27,3	14,4	-	9,7	9,9
2006	16	29,5	14,7	-	7,2	9,3
2007	11,8	30,5	16,2	-	8,4	10,5
2008	14,0	31,2	14,0	-	10,0	8,3
2009	15,7	13,3	13,5	21,4	5,7	11,3
2010	15	7	10	20	7	11
2011	21	11	10	13	7	9
2012	17	17	8	15	8	8
2013	21	19	11	10	7	4
2014	18	17	13	13	6	5

Як видно з даної таблиці, частка пошкоджень ізоляторів, відносно інших відмов, завжди залишалася високою і за останні шість років вийшла на перше місце за цим показником.

Ключові причини, що викликають відмови та зниження ефективності функціонування системи контактних мереж залізниці, можна умовно поділити на кілька категорій.

По-перше, знос обладнання та старіння інфраструктури є суттєвим фактором. Тривала експлуатація, схильність до атмосферних впливів і циклічних навантажень призводять до поступової деградації матеріалів, послаблення механічних з'єднань і, як наслідок, до збільшення ймовірності аварійних ситуацій (близько 20% відмов).

По-друге, недостатнє технічне обслуговування та ремонт погіршують проблему зношування (14% відмов). Несвоєчасне виявлення та усунення дефектів, а також застосування застарілих технологій при ремонті (14% відмов) призводять до прискореного зносу елементів мережі та зниження надійності усієї системи.

По-третє, зовнішні чинники значно впливають на стабільність роботи контактної мережі. До них відносяться екстремальні погодні умови

(зледеніння, сильні вітри, перепади температур) (9% відмов), а також механічні пошкодження, спричинені зовнішніми впливами, наприклад, падінням дерев або актами вандалізму(6% відмов).

По-четверте, недосконалість конструктивних рішень та технологій може бути причиною вразливості окремих елементів контактної мережі (7% відмов). Помилки в проектуванні та виборі матеріалів, що не враховують специфічні умови експлуатації (11% відмов), призводять до зниження експлуатаційної надійності та збільшення витрат на обслуговування[14].

Таблиця 1.2 – Основні причини порушення роботи контактної мережі за період 2005 – 2014 рр.

Рік	Причини порушень				
	Недоліки експлуатації, %	«Старіння» пристроїв, %	По вині сторонніх предметів, %	Вплив метеумов, %	Інші, %
2005	51,3	23,1	11,0	4,3	10,2
2006	47,9	22,1	5,9	13,2	10,9
2007	55,0	27,1	6,2	7,9	3,8
2008	53,1	34,1	4,2	6,0	2,6
2009	47,3	22,3	12,3	15,0	3,1
2010	47,0	21,6	15,1	13,0	3,3
2011	49,6	20,4	11,9	10,4	3,5
2012	54,3	20,0	15,5	10,2	-
2013	52,1	16,5	19,3	12,1	-
2014	77	11	4	6	2

З даних таблиці 1.2 видно, що основним порушенням нормальної роботи контактної мережі є некоректна експлуатація пристроїв контактної мережі, неякісний монтаж і ремонт пристроїв електропостачання, «старіння» пристроїв і, як наслідок, вихід цих пристроїв з ладу. Значно знизити дані показники допоможе ефективно і своєчасне діагностування пристроїв

контактної мережі, в тому числі фарфорових підвісних та штирьових ізоляторів [14].

Таким чином, забезпечення стабільної роботи контактної мережі залізниці потребує комплексного підходу, що включає своєчасну модернізацію обладнання, систематичне технічне обслуговування, застосування сучасних технологій моніторингу та діагностики, а також врахування зовнішніх факторів під час проектування та експлуатації. Тільки за дотримання цих умов можливо гарантувати надійну та ефективну роботу залізничного транспорту.

Висновки по першому розділу

Статистичний аналіз відмов пристроїв контактної мережі показав, що протягом останніх десяти років відмова ізолюючих елементів залишається однією з головних проблем надійної роботи контактної мережі. Через великий обсяг електрифікованих залізниць виникає проблема невчасного технічного обслуговування та ремонту пристроїв електропостачання. Нестача ресурсів та кадрів призводить до старіння та поломки пристроїв контактної мережі. Значний ефект здатний дати перехід від обслуговування за нормами до технічного обслуговування станом.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИРОДИ ВИНИКНЕННЯ УШКОДЖЕНЬ В ІЗОЛЯТОРАХ

2.1 Дослідження природи виникнення ушкоджень в ізоляторах залізниці

Ізолятори відіграють критичну роль у забезпеченні надійної роботи електроенергетичних систем на залізничному транспорті, запобігаючи витoku струму між струмопровідними частинами та заземленими елементами. У процесі експлуатації вони зазнають різних впливів, що призводять до пошкоджень, які, своєю чергою, можуть знизити ефективність та безпеку роботи системи.

Ізолятори, критично важливі компоненти в електроенергетичних системах, схильні до різних видів пошкоджень, що впливають на їхню функціональність і надійність. Основними причинами цих пошкоджень можна вважати сукупність факторів, що включають як зовнішні впливи, так і внутрішні дефекти.

По-перше, забруднення поверхні ізолятора є однією з найпоширеніших причин. Промислові викиди, морська сіль, сільськогосподарські добрива та пил утворюють провідний шар на поверхні ізолятора, знижуючи його діелектричну міцність і призводячи до перекриттів та витоків струму.

По-друге, атмосферні впливи, такі як екстремальні температури, ультрафіолетове випромінювання та опади, сприяють деградації матеріалу ізолятора. Постійний вплив тепла та холоду може спричинити розтріскування та руйнування структури, в той час, як ультрафіолет сприяє старінню полімерних ізоляторів.

По-третє, механічні пошкодження, викликані ударами блискавки, падінням предметів, вандалізмом або неправильною установкою, можуть призвести до миттєвої поломки ізолятора. Порушення цілісності матеріалу створює умови для електричного пробоя.

По-четверте, електричні перевантаження та внутрішні дефекти також відіграють важливу роль. Неправильна експлуатація, старіння ізоляції всередині ізолятора або наявність мікротріщин, що утворилися в процесі виробництва, можуть стати причиною електричного пробоя.

Нарешті, діяльність птахів і тварин може сприяти забрудненню ізоляторів і, в деяких випадках, призводити до механічних пошкоджень.

На закінчення, пошкодження ізоляторів є результатом комплексного поєднання зовнішніх та внутрішніх факторів. Для забезпечення надійної роботи електроенергетичних систем необхідні регулярний огляд, очищення та заміна пошкоджених ізоляторів, а також застосування матеріалів, стійких до впливу навколишнього середовища.

Визначальними причинами відмов контактної мережі, що впливають на безпеку руху в господарстві електрифікації та електропостачання, є перекриття та руйнування ізоляторів контактної мережі (21 %), обриви та перепалювання проводів (19 %), руйнування затискачів (11 %), порушення регулювання контактної мережі (10 %), обриви струн (7 %) [1].

На ділянках контактної мережі постійного струму переважно використовуються підвісні порцелянові ізолятори тарілчастого типу. Пошкодження порцелянових підвісних ізоляторів призводять до збою руху поїздів, а в деяких випадках і до великих перерв, необхідних для відновлення пошкоджених конструкцій. Серед загальної кількості відмов підвісних ізоляторів контактної мережі переважають механічні пошкодження. Подібні руйнування ізоляторів часто відбуваються за несприятливих метеорологічних умов (у період сильних вітрів та автоколивань проводів, при низькій температурі навколишнього середовища).

Основні причини руйнування підвісних ізоляторів: обмежена механічна міцність при ударних навантаженнях; швидке старіння в експлуатації; недоліки конструкцій фіксуючих вузлів; порушення норм утримання; випадки, не пов'язані з експлуатацією [6].

Недостатня механічна міцність підвісних ізоляторів при їх заземленні та впливі ударних навантажень призводить до руйнування фарфору. Зниження механічної міцності деяких ізоляторів при тривалій експлуатації зазвичай відбувається через виникнення значних напружень в місці сполучення фарфору, цементної заробки та металевої арматури у зв'язку з різними коефіцієнтами температурного розширення цих матеріалів. У таких місцях у фарфорі виникають мікро- та макротріщини, які з часом розвиваються і знижують механічну міцність всього ізолятора. Максимальна втрата міцності відбувається при низькій температурі навколишнього середовища [9].

Міцність ізолятора зменшується також через постійні ударні навантаження, що передаються на ізолятор під час експлуатації. У таких випадках у фарфорі також виникають приховані тріщини, які потім розвиваються. Прихованість дефектів, які не можна виявити ні візуально, ні електричними випробуваннями, є найбільш небезпечною в експлуатації.

У даний час у контактній мережі електрифікованих залізниць використовується велика кількість різновидів ізоляторів. У значній кількості продовжують використовуватися фарфорові ізолятори, що потребують періодичного контролю під час експлуатації.

Розподіл напруженості електростатичного поля навколо гірлянди ізоляторів залежить від типу ізоляторів та їх кількості у гірлянді. Як відомо, напруга на гірлянді з декількох ізоляторів, що відповідає появі корони на одному з них, може бути значно меншою за сумарну напругу всіх ізоляторів у гірлянді і за деяких умов може виявитися нижчою за робочу напругу. Пояснюється це тим, що напруга, прикладена до гірлянди, розподіляється по ізоляторах нерівномірно. Те ж саме відбувається і з розподілом напруженості електростатичного поля.

Для з'ясування причин нерівномірного розподілу напруги необхідно звернутися до схеми заміщення гірлянди з трьох ізоляторів, представленої на рисунку 2.1.

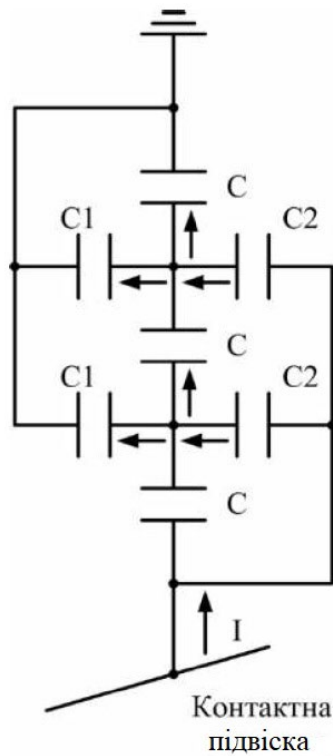


Рисунок 2.1– Схема заміщення гірлянди ізоляторів

На цій схемі C – власна ємність ізолятора, що складає для тарілчастих ізоляторів 50 – 70 пФ; $C1$ – ємність ізолятора по відношенню до землі; $C2$ – ємність ізолятора по відношенню до проводу. Значення ємностей $C1$ і $C2$ залежать від положення ізолятора в гірлянді; в середньому $C1 = 4 - 5$ пФ, $C2 = 0,5 - 1$ пФ [1].

Наявність ємностей $C1$ і $C2$ якраз і зумовлює нерівномірний розподіл напруги та напруженості електростатичного поля по елементах гірлянди. Розглянемо спочатку вплив тільки ємностей $C1$. Відбувається відгалуження струму I в ці ємності, і, як наслідок, струми, що проходять через власні ємності ізоляторів, і падіння напруги на ізоляторах будуть тим меншими, чим далі від контактної підвіски знаходиться ізолятор. Якщо розглянути вплив тільки ємностей по відношенню до проводу, то картина зміниться: струми через ємності C і падіння напруги будуть меншими на тих ізоляторах, які знаходяться далі від заземленого кінця гірлянди.

В реальних умовах, тобто коли $C1 > C2 \neq 0$, найбільша напруга прикладається до ізолятора, розташованого ближче до контактного проводу,

найменші напруги – до ізоляторів, що знаходяться в середині гірлянди, і дещо підвищені – до ізоляторів ближче до консолі.

Розв'язання задачі розподілу електростатичного поля гірлянди ізоляторів, що працюють на постійній напрузі контактної мережі залізниць, знаходиться шляхом розрахунків поля на межах розділу системи «метал – діелектрик 1 – діелектрик 2 – ... діелектрик n – метал – повітря». Для опису зміни поля в гірлянді ізоляторів при наявності дефектів на одному з ізоляторів дефект представляється у вигляді струмопровідного середовища з перехідними параметрами діелектричної проникності.

Основною задачею розрахунку електростатичного поля є визначення напруженості поля в обмеженому об'ємі, що розглядається, за заданими потенціалами крайніх точок металевих частин гірлянди ізоляторів.

Для чисельного розв'язання задач електростатичного поля використовують метод скінченних елементів, заснований на апроксимації шуканої неперервної функції – електричного потенціалу, дискретною моделлю, яка будується на множині кусково-неперервних функцій, визначених на скінченній кількості підобластей, які називаються скінченними елементами.

Застосування методу скінченних елементів починається з розбиття області моделювання S на скінченні елементи, причому їх число, розміри та розташування довільні. Скінченні елементи можуть представляти собою трикутники. Сторони трикутників повинні збігатися з межами розділу середовищ з різними властивостями.

Якщо скористатися прикладом плоско паралельної задачі розрахунку електричного поля діелектрика, поміщеного всередину електричного поля, методом скінченних елементів, то елементарний вектор в кожній точці координатної сітки визначиться шляхом розв'язання диференціальних рівнянь виду [5, 7]:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\varepsilon};$$

$$\begin{cases} E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}; \\ E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}; \\ E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}; \end{cases}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon};$$

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \int_V \frac{\rho dV}{r}.$$

Розглянутий метод передбачає наближене розв'язання диференціального рівняння, що описує поле, розподілене в області S. При цьому повинна виконуватися наступна умова: різниця між наближеним і точним розв'язками має бути ортогональна функціям форми, які використовуються при апроксимації [3].

Метод скінченних елементів використовувався для моделювання напруженості електричного поля [4] фарфорових ізоляторів у програмі Elcut. Також були проведені експериментальні дослідження в лабораторії техніки високих напруг для підтвердження адекватності моделювання та можливості поширення його результатів на точки, в яких важко або неможливо провести вимірювання.

Для вирішення поставленої задачі як правило вибирається осесиметричний клас моделі. Це означає, що для визначення розподілу напруженості поля буде достатньо виконати креслення половини ізолятора (гірлянди). Розподіл напруженості поля у тривимірному просторі отримується в результаті обертання створеної моделі навколо осі симетрії. Побудова здійснювалася в системі декартових координат. Число вузлів сітки прийнято рівним 5000. Креслення несправного ізолятора із заданням властивостей області «Фарфор» наведено на рисунку 2.2.

У програмі для кожної області (середовища) визначається значення діелектричної проникності. Значення діелектричної проникності для середовищ, що використовуються в моделі, представлені в таблиці 2.1

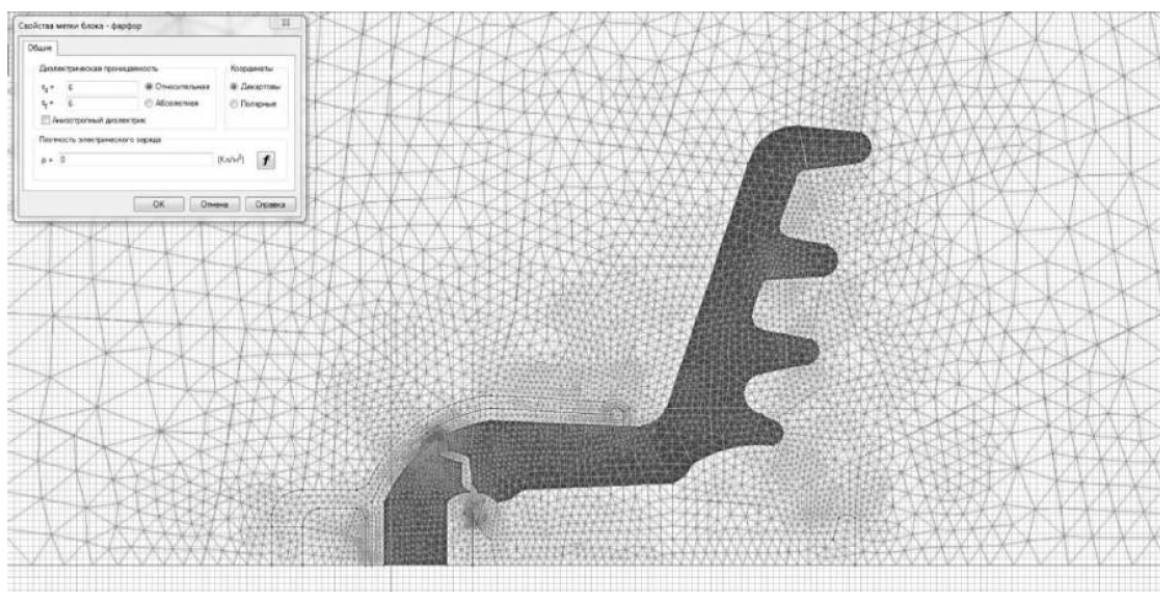


Рисунок 2.2 – Модель несправного ізолятора в програмі Elcut

Таблиця 2.1 - Параметри відносної діелектричної проникності середовищ

Середовище	ϵ
повітря	1
парцеляна	6
цемент	2
дефект	20
вода	40

Для отримання картини поля поверхню стрижня ізолятора задають міткою «Напруга» (3 кВ), а поверхню шапки – міткою «Заземлення» ($U = 0$). Розподіл напруженості електростатичного поля на справному та несправному ізоляторах представлено на рисунках 2.3 і 2.4 відповідно.

Як видно з рисунків 2.3, 3.4, наявність дефекту в ізоляторі призводить до збільшення напруженості електростатичного поля, що відповідає підвищеному значенню ϵ в цій області.

Проаналізувавши отримані дані, можна зробити висновок про те, що наявність несправного ізолятора в гірлянді призводить до збільшення напруженості електростатичного поля навколо гірлянди. Під час вимірювань на справній гірлянді максимальне значення напруженості електростатичного поля спостерігається біля ізолятора, що знаходиться найближче до джерела напруги, а мінімальне значення напруженості – біля ізолятора, найближчого до заземлених частин.

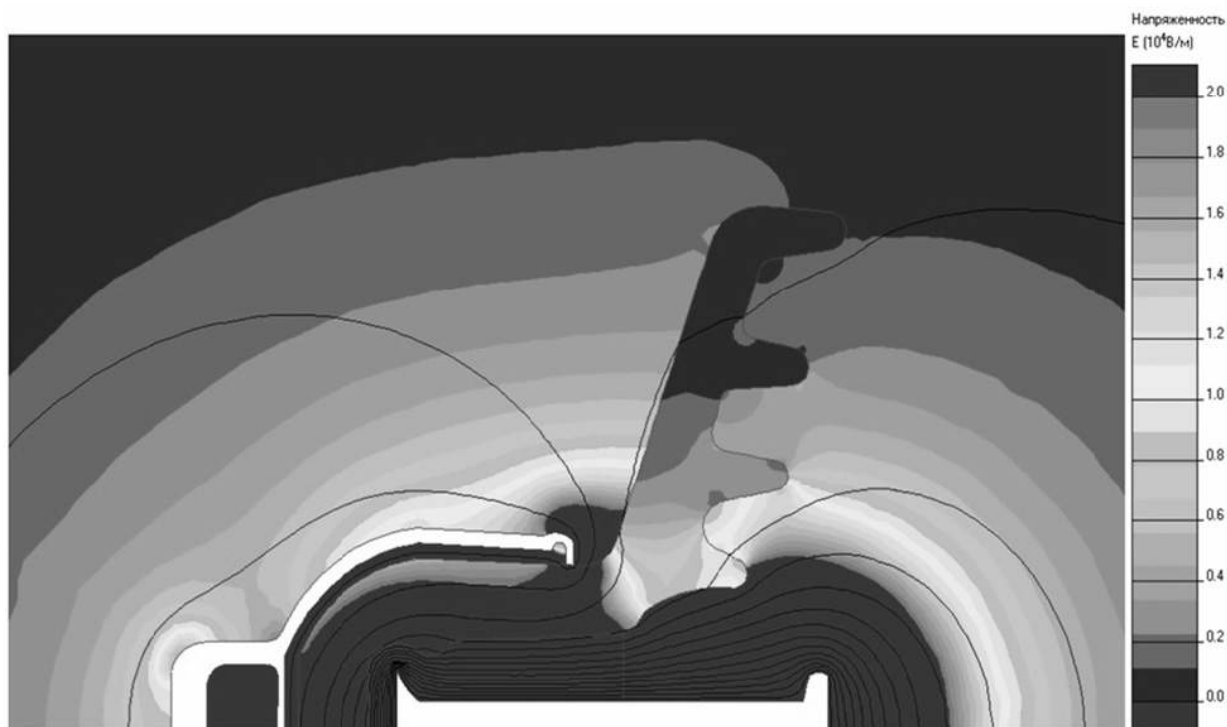


Рисунок 2.3 – Розподіл напруженості поля на справному ізоляторі

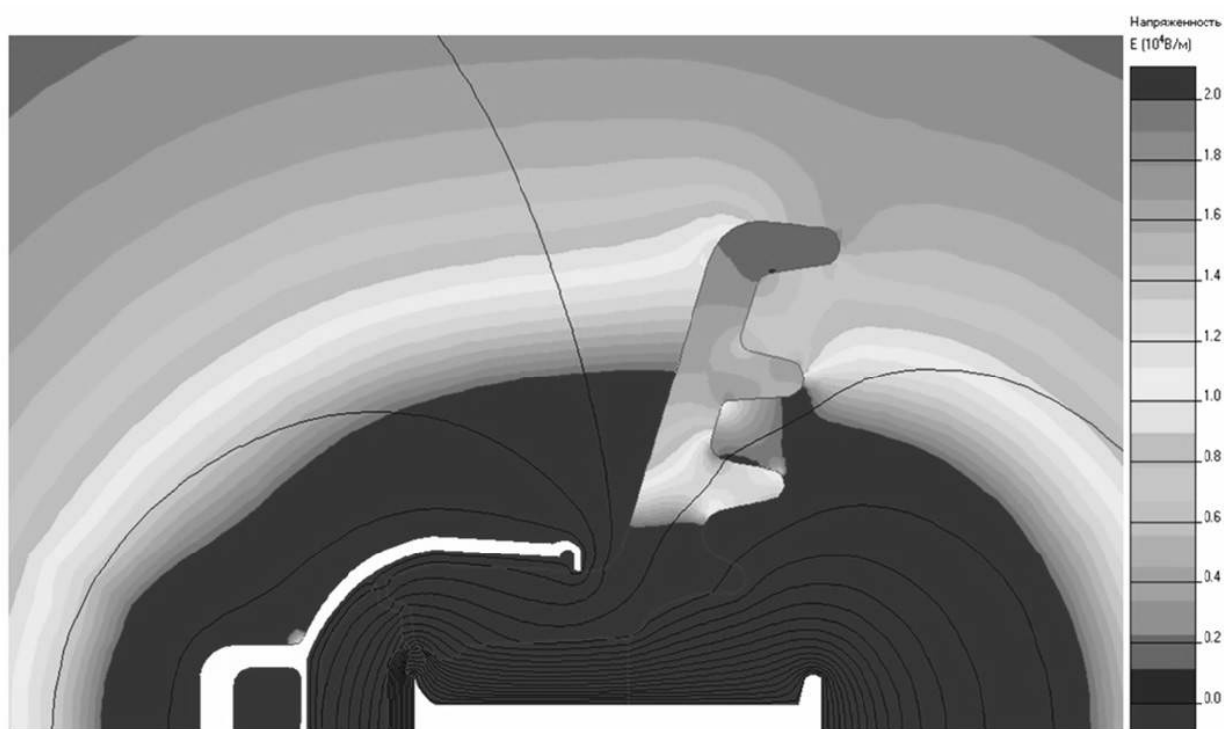


Рисунок 2.4 – Розподіл напруженості поля на несправному ізоляторі

Це доводить раніше висунуту теорію про розподіл електростатичного поля навколо гірлянди ізоляторів. Величина напруженості електростатичного поля залежить також від відстані, на якій проводяться вимірювання.

У роботі [5] наведено дані щодо експериментальних досліджень і вимірювань електростатичного поля на дефектному ізоляторі та гірляндах із трьох ізоляторів з різним положенням дефектного. Вимірювання проводилися вимірювачем електростатичного поля типу СТ-01. Дефектний ізолятор було отримано шляхом штучного створення внутрішнього дефекту з підвищеним значенням діелектричної проникності ϵ . Даний дефект являє собою мікротріщину у фарфоровій частині ізолятора, в яку був залитий сольовий розчин для ще більшого зниження діелектричних властивостей ізолятора.

Проаналізувавши отримані карти розподілу напруженості поля в результаті моделювання та зіставивши їх з результатами експериментальних досліджень, можна зробити висновок про те, що наявність несправного ізолятора в гірлянді призводить до збільшення напруженості електростатичного поля як навколо ізолятора, так і навколо гірлянди в цілому. Під час вимірювань на справній гірлянді максимальне значення напруженості електростатичного поля спостерігається біля ізолятора, що знаходиться найближче до джерела напруги, а мінімальне значення – біля ізолятора, найближчого до заземлених частин [3, 10].

2.2 Хвильові процеси в лінії з розподіленими параметрами

Електричні кола з розподіленими параметрами представляють собою клас кіл, особливості функціонування яких залежать від розподілу опорів, провідностей, індуктивностей та ємностей за просторовими координатами. До таких кіл належать різноманітні повітряні та кабельні лінії з області енергетики, дротового зв'язку, радіотехніки, передачі інформації. Використання електричних ліній різних конструкцій і призначення характерно і для залізничного транспорту. Це контактна мережа електрифікованих ділянок залізниць, високовольтні лінії електропередачі, що живлять ці ділянки, рейкові кола, лінії автоблокування, повітряні лінії та кабелі зв'язку [7].

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \end{cases}$$

де r_0, L_0, G_0, C_0 – первинні параметри лінії.

Схема заміщення елементарної ділянки довгої лінії представлена на рисунку 2.5.

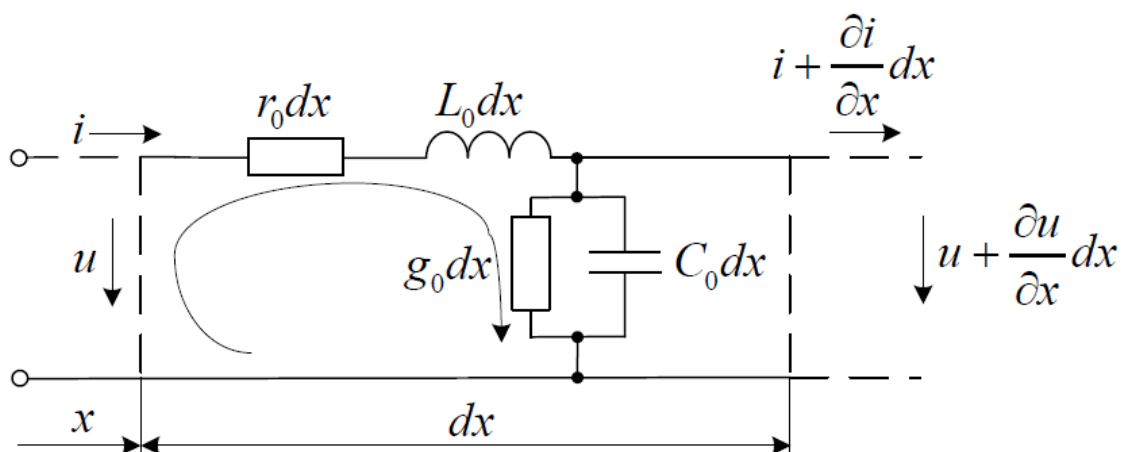


Рисунок 2.5 – Схема заміщення елементарного участка довгої лінії

Одним з об'єктів, що суттєво впливають на електромагнітну сумісність обладнання залізничного транспорту, є система тягового електропостачання.

Хвильові процеси в контактній мережі негативно впливають на електричні лінії передачі енергії, прокладені поблизу залізниці: лінії телефонного і телеграфного зв'язку, рейкові кола автоблокування, силові та освітлювальні мережі; ці хвильові процеси негативно позначаються і на втратах енергії в системі тягового електропостачання.

Однак, визначення допустимих рівнів впливу, що чиниться хвильовими процесами, не є простою та однозначною задачею. Знань про струми різних джерел недостатньо для того, щоб встановити межі, в яких забезпечувалась би електромагнітна сумісність обладнання [7]. До тих пір, поки не буде досягнуто достатнього розуміння характеру електромагнітних явищ у складних системах, енергопостачання залишатиметься під загрозою підвищеної

небезпеки, і енергопостачальні організації та споживачі будуть часто змушені вживати заходів вже після аварій.

Для оцінки впливу хвиль на ізоляцію електрообладнання необхідні дані не тільки про амплітудні значення напруг і струмів [13], а й про форму кривих. Для цього розрахунок потрібно проводити за миттєвими значеннями напруг і струмів. Такий опис також необхідний для визначення завад у мережах, що впливають на якість електроенергії.

Для вирішення цієї проблеми необхідно змоделювати систему електропостачання, що дозволить провести глибокий аналіз складних електромагнітних процесів у мережах.

Система електропостачання може розглядатися як з'єднання зосереджених та розподілених ланок, кожна з яких представлена відповідним активним або пасивним чотириполюсником (рисунок 2.6). У розрахунковому відношенні позитивна властивість схеми полягає в тому, що результуюча математична модель формується за математичними моделями її ланок-чотириполюсників [5].

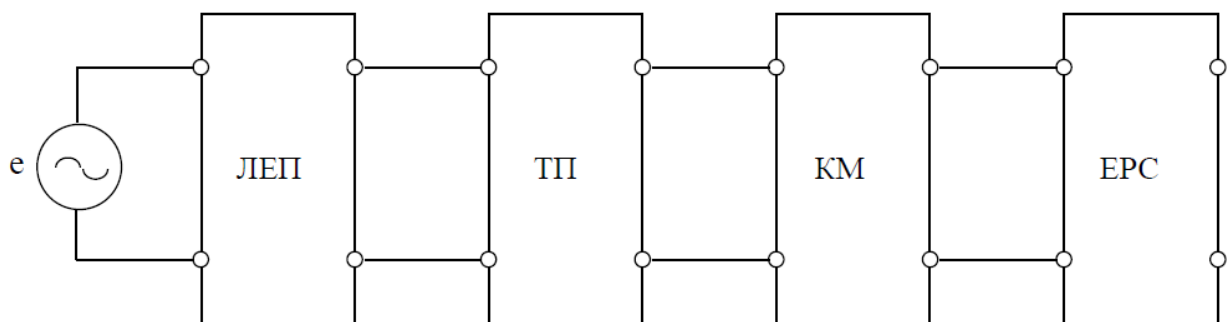


Рисунок 2.6 – Структурна схема ділянки електропостачання при консольному живленні: ЛЕП – лінії електропередачі; ТП – тягова підстанція; КС – контактна мережа; ЕПС – електрорухомий склад.

Ділянки контактної мережі представляються у вигляді однорідної двопровідної лінії, а лінії електропередачі (ЛЕП) є трипровідною системою [5]. Для приведення рівнянь ЛЕП до вигляду рівнянь двопровідної лінії було використано наступний алгоритм.

Розрахунок процесів у трифазних колах проводився у змінних, що мають ту властивість, що система рівнянь у цих нових змінних розпадається на рівняння, кожне з яких містить неповну кількість змінних.

Такими змінними можуть бути α -, β -, 0-складові струму та напруги, тобто трійка фазових векторів i_a, i_b, i_c замінюється трьома струмами i_a, i_β, i_0 , що представляють

лінійні комбінації фазових струмів. Аналогічний зміст має і перетворення фазових напруг у напруги u_α, u_β, u_0 .

Рівняння лінії передачі (2.5), (2.6) можуть бути отримані зі схеми заміщення ділянки трифазної лінії, представленої на рисунку 2.7:

$$\left\{ \begin{aligned} i_a(x,t) - i_a(x+\Delta x,t) &= C_a \Delta x \frac{\partial u_a(x+\Delta x,t)}{\partial t} + C_{ab} \Delta x \frac{\partial (u_a(x+\Delta x,t) - u_b(x+\Delta x,t))}{\partial t} + \\ &+ C_{ac} \Delta x \frac{\partial (u_a(x+\Delta x,t) - u_c(x+\Delta x,t))}{\partial t}; \\ i_b(x,t) - i_b(x+\Delta x,t) &= C_b \Delta x \frac{\partial u_b(x+\Delta x,t)}{\partial t} + C_{ba} \Delta x \frac{\partial (u_b(x+\Delta x,t) - u_a(x+\Delta x,t))}{\partial t} + \\ &+ C_{bc} \Delta x \frac{\partial (u_b(x+\Delta x,t) - u_c(x+\Delta x,t))}{\partial t}; \\ i_c(x,t) - i_c(x+\Delta x,t) &= C_c \Delta x \frac{\partial u_c(x+\Delta x,t)}{\partial t} + C_{ca} \Delta x \frac{\partial (u_c(x+\Delta x,t) - u_a(x+\Delta x,t))}{\partial t} + \\ &+ C_{cb} \Delta x \frac{\partial (u_c(x+\Delta x,t) - u_b(x+\Delta x,t))}{\partial t}; \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} u_a(x,t) - u_a(x+\Delta x,t) &= L_a \Delta x \frac{\partial i_a(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{ab} \Delta x \frac{\partial i_b(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{ac} \Delta x \frac{\partial i_c(x+\Delta x,t)}{\partial t} + \\ &+ R_a \Delta x \cdot i_a(x+\Delta x,t) + R_3 \Delta x (i_a(x+\Delta x,t) + i_b(x+\Delta x,t) + i_c(x+\Delta x,t)); \\ u_b(x,t) - u_b(x+\Delta x,t) &= L_b \Delta x \frac{\partial i_b(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{ba} \Delta x \frac{\partial i_a(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{bc} \Delta x \frac{\partial i_c(x+\Delta x,t)}{\partial t} + \\ &+ R_b \Delta x \cdot i_b(x+\Delta x,t) + R_3 \Delta x (i_a(x+\Delta x,t) + i_b(x+\Delta x,t) + i_c(x+\Delta x,t)); \\ u_c(x,t) - u_c(x+\Delta x,t) &= L_c \Delta x \frac{\partial i_c(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{ca} \Delta x \frac{\partial i_a(x+\Delta x,t)}{\partial t} + L_{cb} \Delta x \frac{\partial i_b(x+\Delta x,t)}{\partial t} + \\ &+ R_c \Delta x \cdot i_c(x+\Delta x,t) + R_3 \Delta x (i_a(x+\Delta x,t) + i_b(x+\Delta x,t) + i_c(x+\Delta x,t)). \end{aligned} \right.$$

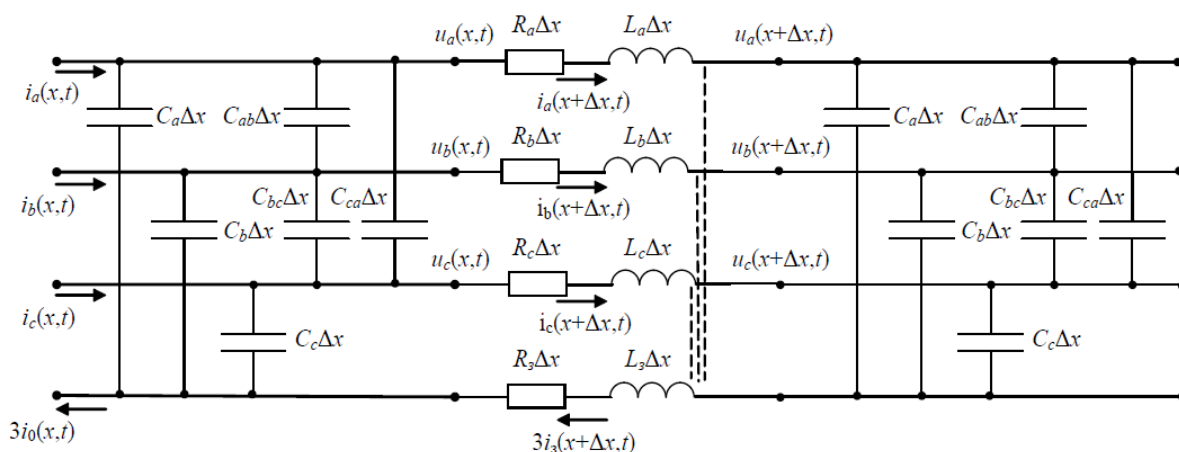


Рисунок 2.7 – Схема заміщення елемента трифазної лінії передачі

Прийmemo, що ділянка ланцюга, що розглядається, характеризується повною симетрією параметрів, тобто що мають місце рівності:

$$\begin{cases} L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = L_0; \\ C_{ab} = C_{ba} = C_{ac} = C_{ca} = C_{bc} = C_{cb} = C; \\ L_a = L_b = L_c = L; \\ R_a = R_b = R_c = R. \end{cases}$$

Після деяких математичних перетворень отримаємо рівняння:

$$\begin{cases} -\frac{\partial(u_a + u_b + u_c)}{\partial t} = (R + R_s)(i_a + i_b + i_c) + (L + 2L_0)\frac{\partial(i_a + i_b + i_c)}{\partial t}; \\ -\frac{\partial(i_a + i_b + i_c)}{\partial t} = C\frac{\partial(u_a + u_b + u_c)}{\partial t}. \end{cases}$$

У результаті співвідношення для лінії електропередачі матимуть такий вигляд:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u_0}{\partial t} = (R + 3R_s)i_0 + (L + 2L_0)\frac{\partial i_0}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i_0}{\partial t} = C\frac{\partial u_0}{\partial t}. \end{cases}$$

Значення активної провідності G_0 для ліній напругою менше 330 кВ приймається рівним нулю.

Таким чином, отримали систему рівнянь, аналогічну системі однорідної двопровідної лінії.

Подальший розрахунок напруги та струму в ЛЕП проводиться як для моделі однорідної двопровідної лінії [6].

Рівняння (2.8) у комплексній формі можна записати:

$$\begin{cases} -\frac{d\dot{U}}{dx} = (R + 3R_s + j\omega(L + 2L_0))\dot{I}; \\ -\frac{d\dot{I}}{dx} = j\omega C_0\dot{U}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{с\acute{e}}})e^{-\gamma_{\text{с\acute{e}}}x} + \frac{1}{2}(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{с\acute{e}}})e^{\gamma_{\text{с\acute{e}}}x}; \\ \dot{I}(x) = \frac{1}{2\underline{Z}_{\text{с\acute{e}}}}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{с\acute{e}}})e^{-\gamma_{\text{с\acute{e}}}x} - \frac{1}{2\underline{Z}_{\text{с\acute{e}}}}(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{с\acute{e}}})e^{\gamma_{\text{с\acute{e}}}x}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = \dot{U}_1 \operatorname{ch} \gamma_{\text{с\acute{e}}}x - \dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{с\acute{e}}} \operatorname{sh} \gamma_{\text{с\acute{e}}}x; \\ \dot{I}(x) = \dot{I}_1 \operatorname{ch} \gamma_{\text{с\acute{e}}}x - \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_{\text{с\acute{e}}}} \operatorname{sh} \gamma_{\text{с\acute{e}}}x, \end{cases}$$

Для дослідження ліній при різних первинних параметрах, довжині та режимах роботи створено математичну модель у програмному середовищі MathCAD.

Для дослідження адекватності математичної моделі проведено віртуальний експеримент при синусоїдальній напрузі живлення для лінії з параметрами, аналогічними фізичної моделі, для режимів холостого ходу і короткого замикання. Отримана крива залежності діючих значень напруги від координати x , що відраховується від початку лінії, для режиму холостого ходу наведено рисунку 2.8.

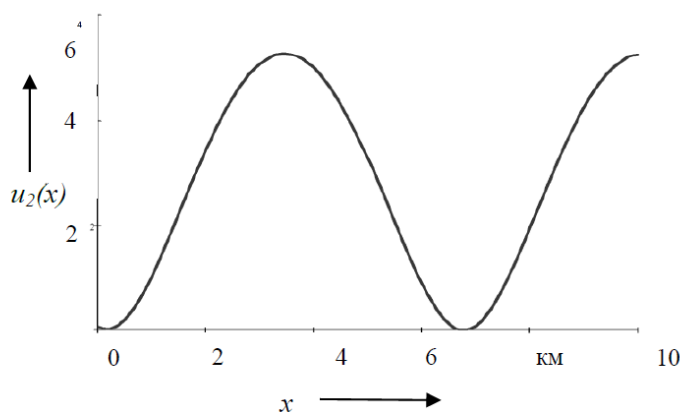


Рисунок 2.8 – Залежність діючої напруги в лінії від координати x для режиму холостого ходу

Форма напруги в лінії, як правило, несинусоїдальна і може бути представлена у вигляді нескінченного гармонічного ряду Фур'є. В основу математичної моделі кола з розподіленими параметрами при несинусоїдальній напрузі живлення покладено метод накладання, який полягає в розрахунку значень струму та напруги в будь-якій точці лінії для кожної гармоніки окремо. Послідовним розрахунком визначаються значення струму та напруги відповідних гармонік в будь-якій точці лінії, і в кінцевому підсумку для струму та напруги формуються результуючі ряди [8].

За допомогою створеної математичної моделі розраховано різні режими роботи ліній при несинусоїдальній напрузі живлення.

В теорії кіл з розподіленими параметрами існує поняття неспотворюючої лінії. Така лінія працює в режимі узгодженого навантаження (навантажена на хвильовий опір), а її параметри задовольняють умові:

$$\frac{r_0}{g_0} = \frac{L_0}{C_0}.$$

Очікуваний результат розрахунку: форма кривих напруги та струму на вході та на виході лінії без спотворень має бути однаковою, але зрушеною за фазою. Для ділянки лінії без спотворень протяжністю 120 км було проведено розрахунок передачі електричних сигналів несинусоїдальної форми. Крива вхідної напруги, що має для прикладу форму прямокутних імпульсів з періодом 1500 мкс і тривалістю імпульсу 1000 мкс, представлена у вигляді суми ста гармонік із постійною складовою. Параметри лінії:

$$r_0 = 1,415 \text{ Ом/км}; g_0 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}; C_0 = 8,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}; L_0 = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}.$$

Розрахункові криві напруги на вході і виході лінії представлені на рисунку 2.10.

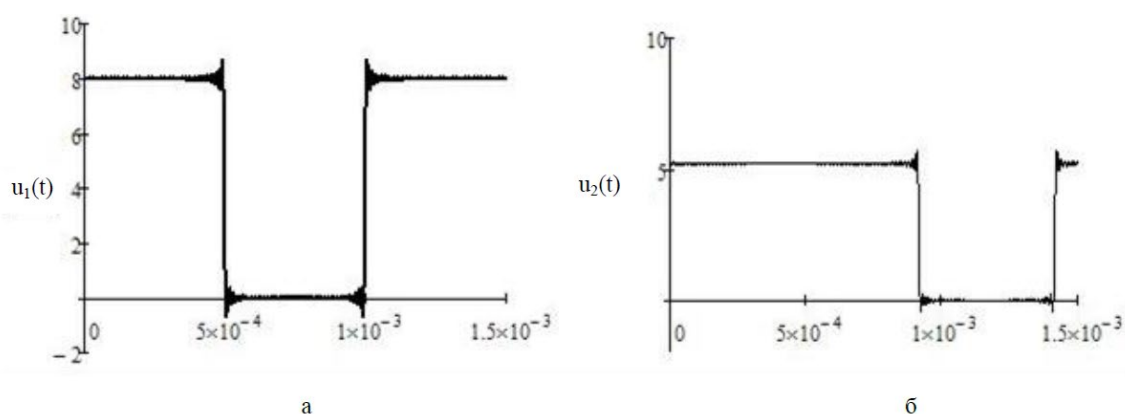


Рисунок 2.10 – Розрахункові криві напруги на вході (а) та на виході (б) лінії без спотворень

Таким чином, запропонований спосіб математичного моделювання проходження сигналів лінією з розподіленими параметрами адекватно відображає явища, що відбуваються в лінії, що підтверджено результатами експерименту на фізичній моделі, і може застосовуватися для аналізу електромагнітних процесів у контактній мережі та лініях електропередачі.

Висновки по другому розділу

Розглянуто основні види пошкоджень ізолюючих елементів. Фізичні та механічні впливи призводять до зламів ізолятора і зниження його діелектричних властивостей. Несприятливі кліматичні умови сприяють виникненню на поверхні ізолятора часткових розрядів, що призводить до поверхневого пробою ізоляторів. Але найбільш небезпечним пошкодженням є внутрішні злами ізоляторів, коли пробій відбувається всередині ізолятора.

Розглянуто хвильові процеси в лінії, що містить ємнісне навантаження. Отримано вирази для визначення струмів та напруг падаючої та заломленої хвиль. Отримано залежність форми діагностичного імпульсу від значення ємнісного опору лінії.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ВПЛИВ НА ІЗОЛЯТОРИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ

3.1 Імпульсні методи визначення місця ушкодження в лініях

Локаційні, або імпульсні методи визначення місця ушкодження (ВМУ) базуються на вимірюванні часу між моментами передачі в лінію зондувального імпульсу та моментом приходу відбитого від МУ імпульсу на початок лінії [11, 12]. Основи вимірювання відстані до місця ушкодження таким методом представлені на рисунку 3.1.

Зондуючий імпульс 2 подається у лінію 1 і час вимірюється як подвійний пробіг імпульсу зондування 3 до місця ушкодження та назад. Відстань до місця ушкодження визначається за формулою:

$$L = \frac{t}{2} \cdot V,$$

де t - час рух імпульсу,

V – швидкість руху імпульсу по лінії.

Імпульсні методи поділяються на автоматичні та неавтоматичні.

При автоматичних локаційних методах використовуються пристрої для ліній, які знаходяться під робочою напругою. Вони призначені для високовольтних ЛЕП напругою 330 - 750 кВ.

При автоматичних методах використовуються локатори, які спрацьовують від органів релейного захисту. Вони фіксують відстань до місця ушкодження в період горіння дуги [66]. Неавтоматичні методи реалізуються локаційні шукачі використовуються на лініях з вимкненою напругою, коли електрична дуги відсутня. Після згасання дуги при ушкодженій повітряній лінії в більшості випадків отримати відбитий імпульс не можливо [11, 12]. В кабельних лініях, після його пропалювання та зниження перехідного опору до декількох десятків Ом, коефіцієнт відбиття в місці пошкодження, як правило, забезпечує достатній відбитий імпульс. Відповідно в кабельних лініях застосовується неавтоматична локація, а на повітряних лініях – автоматична.

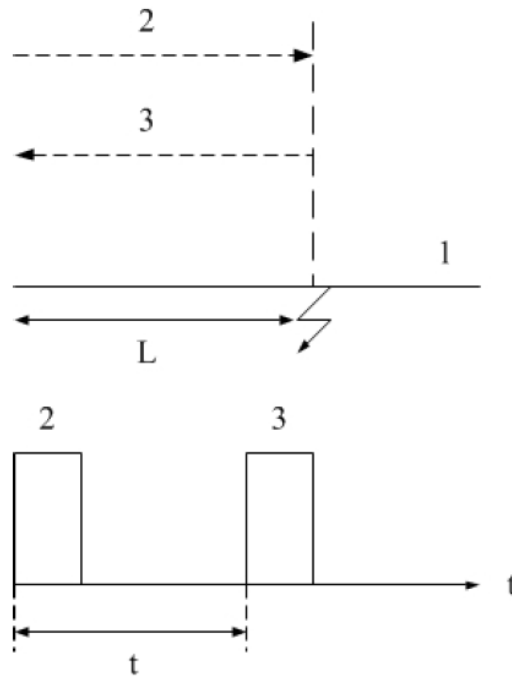


Рисунок 3.1 –Визначення місця ушкодження лінії (ВМУ) імпульсним методом

Основна проблема при локаційних методах пов'язана з отриманням відбитого зондувального імпульсу оптимальної форми, амплітуди та тривалості. Дані проблеми вирішуються шляхом підбору форми та тривалості зондувальних імпульсів та оптимальною обробкою сигналів, що надходять з лінії. Вибір зондувальних імпульсів здійснюється таким чином, щоб основна частина спектра відбитого імпульсу була розташована в тій самій смузі частот, що і спектр зондувального імпульсу [3,11,12].

Для підвищення роздільної здатності застосовуються здвоєні імпульсу, які складається з двох прямокутних імпульсів різної полярності. Причому другий імпульс має регульовану амплітуду. Відношення амплітуди другого імпульсу до амплітуди першого називають коефіцієнтом корекції [3].

В виду того, що локаційна апаратура надто складна та висока її ціна, тому автоматичні та неавтоматичні локаційні шукачі використовують далеко не на всіх ЛЕП. На ділянках контактної мережі постійного струму залізниці функції таких локаційних шукачів виконує релейний захист [5,7]. Одним із недоліків релейного захисту є недостатня точність визначення місця пошкодження.

Також, релейний захист не діагностує стан ізоляторів, він лише відключає необхідну ділянку у разі аварії або короткого замикання на рейку.

3.2 Метод ВМУ на основі зовнішніх попередньо заряджених конденсаторів

Цей метод реалізується на визначенні власної частоти коливального контуру, який утворюється пошкодженою фазою, перехідним опором та зовнішнім конденсатором, що підключений між пошкодженою фазою попередньо відключеної лінії та землею [11, 12].

Умовна схема даного контуру наведена на рисунку 3.2. Пошкоджену фазу в цьому випадку представляють у вигляді зосередженого активного опору R_K та індуктивності L_K .

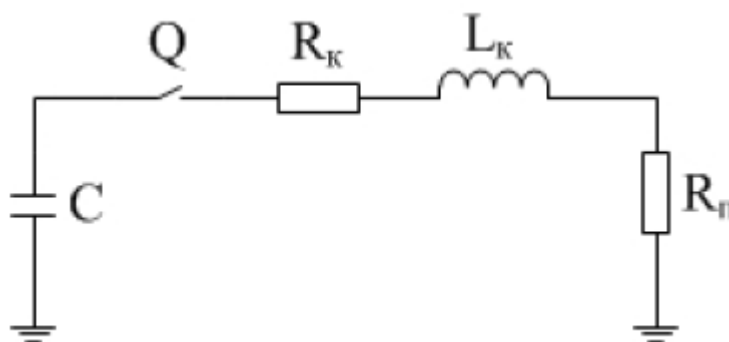


Рисунок 3.2 – Схема заміщення пошкодженої фази

Розмір ємності C зовнішнього конденсатора вибирається на порядок більше ємності фази лінії відносно землі $C \gg C_0 l$, де C_0 – питома ємність одиниці лінії; l – довжина лінії. При виконанні даної умови можна не враховувати вплив власної ємності лінії а враховувати тільки позовжні активні та індуктивні опори.

Відстань до місця ушкодження визначення після того як попередньо зарядиться ємність C , а потім підключиться до пошкодженої фази за допомогою вимикача Q .

Відомо, що якщо активний опір контуру $R_K + R_n$ менший критичного значення

$$R_K + R_{II} \leq 2 \cdot \sqrt{\frac{L_K}{C}},$$

то розряд буде коливальним.

Кутова частота особистих коливань контуру визначається виразом:

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

Індуктивність контуру пропорційна відстані до місця ушкодження:

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

де L_0 – питома індуктивність лінії.

У загальному випадку вираз (3.3) містить дві невідомі величини: відстань до місця пошкодження та перехідний опір.

При невеликих перехідних опорах, коли $\frac{R_K + R_{II}}{4 \cdot L_K^2} \ll \frac{1}{L_K \cdot C}$, в виразі (3.3) можна знехтувати другим доданком. Тоді відстань до місця ушкодження буде визначатися як:

$$l_K = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L_0 \cdot C},$$

Вираз (3.5) при відомій резонансній частоті може бути використано визначення відстані до місця ушкодження.

Недоліком такого методу ВМЗ є похибка від не врахованих перехідних опорів у місці пошкодження, що при великих значеннях таких опорів може бути суттєвою [2,11].

Інший недолік - при близьких замиканнях індуктивність контуру L_K може бути дуже малою. При цьому власна частота коливань може бути дуже великою. Рекомендується для обмеження власної частоти послідовно з додатковою ємністю встановлювати додаткову (баластову) індуктивність [2].

Вивчивши дані методики, можна дійти невтішного висновку, що жодна їх не підходить повною мірою для роботи на ділянках контактної мережі постійного струму.

3.3 Моделювання процесу діагностування в програмі Multisim

Сьогодні при вирішенні задач контролю ізолюючих елементів та швидкого визначення місця їх ушкодження широко використовується сучасне програмне забезпечення [3,4].

В якості такого програмного забезпечення при створенні віртуальної моделі пристрою [7] було обрано програму Multisim 12.0. Схема такого пристрою діагностування ізоляції, створеного в програмі Multisim [80-82], наведена на рисунку 3.4. Від джерела живлення V1 змінна напруга 100 В подається на схему помножувача напруги. Сигнал прямокутних імпульсів подається з генератора на реле з частотою 1 Гц. Вихід IO1 підключається до контактної мережі. Вихід IO2 з'єднаний з рейкою.

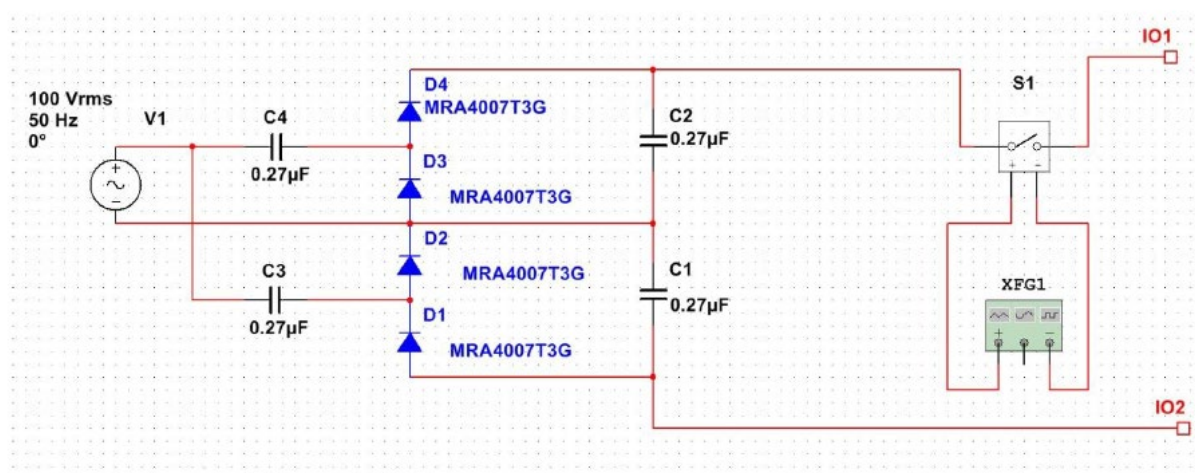


Рисунок 3.4 – Модель пристрою діагностування ізоляторів у програмі Multisim

В якості тестових впливів обрано прямокутні імпульси, що мають неперервний спектр вищих гармонік. Оскільки об'єкт діагностування представлено комплексним опором, де кожна зі складових гармонік вхідної напруги по-різному впливатиме на форму вихідного сигналу. Схема вимірювального експерименту, реалізованого в програмі Multisim, представлена на рисунку 3.5. З виходу приладу IO1 сигнал подається в лінію.

Опори R1-R2 виконують функцію дільника напруги. Осцилограф XSC1 призначений для фіксації сигналу.

Гірлянда має в своєму складі два ізоляторів, кожен з яких представлений у вигляді паралельно з'єднаного активного та ємнісного опору.

Розглянуто найбільш важкодіагностований випадок, коли перший (найближчий до консолі) ізолятор несправний, а другий тільки починає втрачати свої діелектричні властивості (гірлянда №3 на рисунку 3.5). Опір першого ізолятора становить 500 кОм, ємність 5 пФ; опори другого ізолятора – 200 МОм та ємність 30 пФ. Кожен проліт мав довжину 50 м і комплексний опір 0,03 Ома [9, 12].

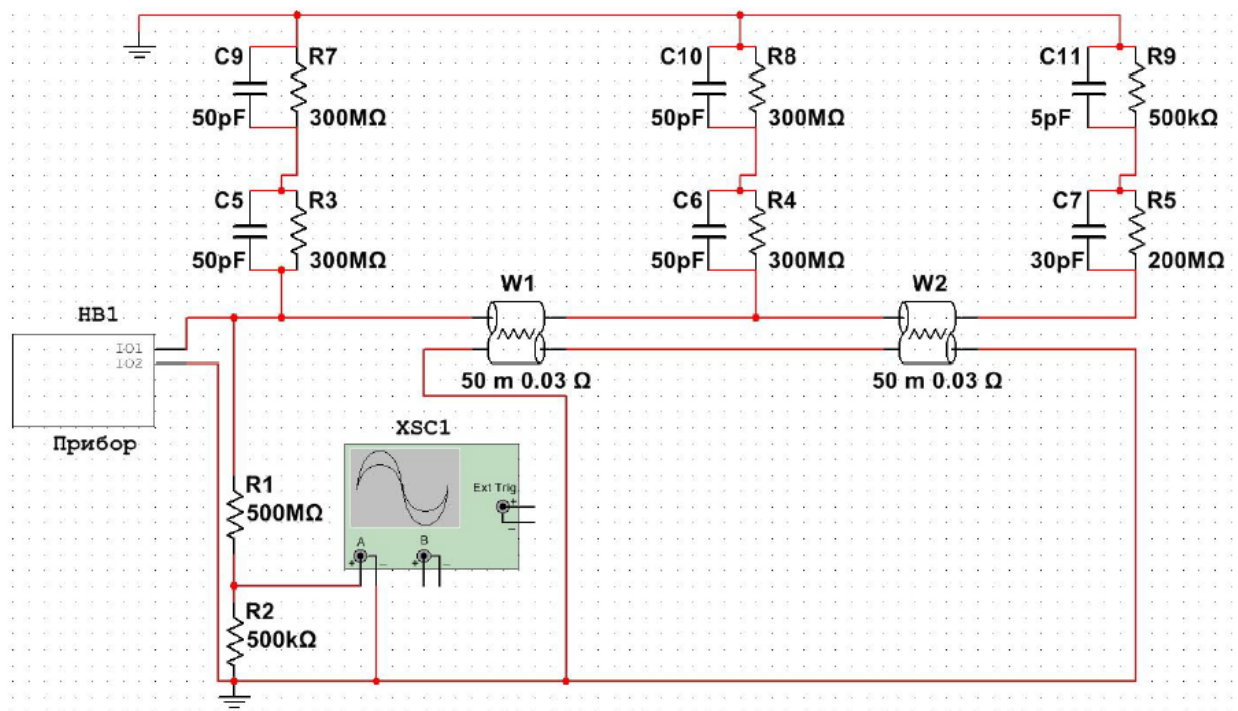


Рисунок 3.5 – Моделювання процесу діагностування у програмі Multisim

Послідовність прямокутних імпульсів, що характеризується тривалістю, амплітудою та періодом проходження одиничного імпульсу. На рисунку 3.6 наведено осцилограму справної лінії. Усі ізолятори мають активний опір 300 Мом та ємність 50 пФ [11, 12]. При проходження імпульсу через лінію, відбувається заряд з наступним розрядом ємності ізоляторів.

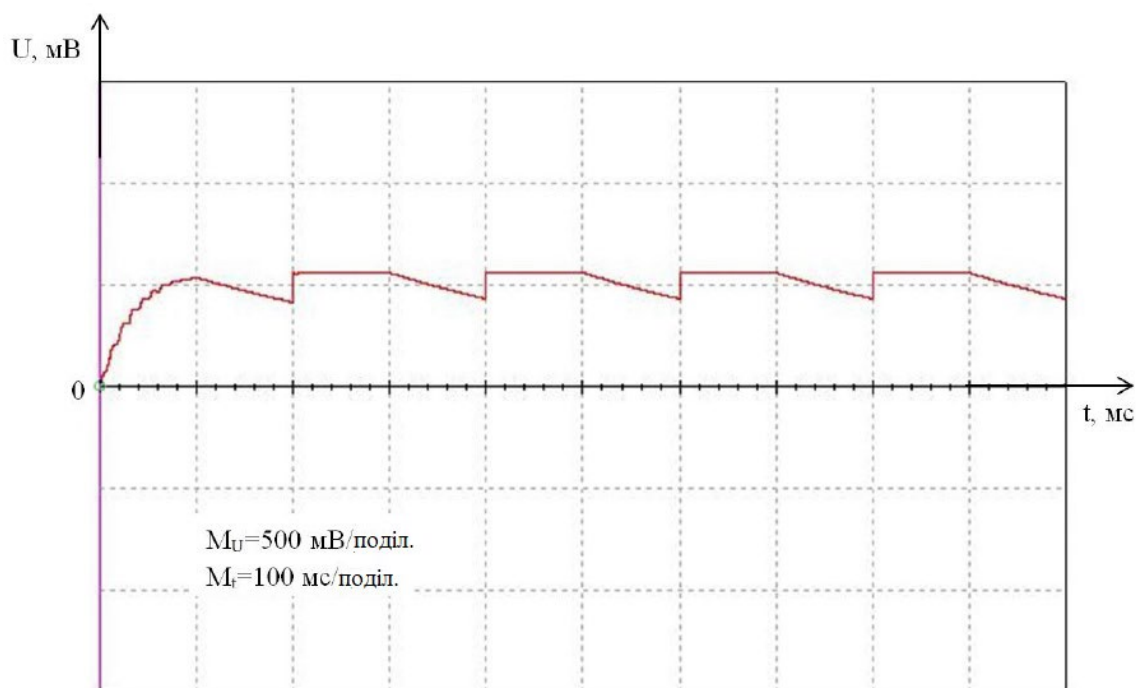


Рисунок 3.6 – Осцилограма вихідного сигналу справної ділянки

Результати моделювання з пошкодженою гірляндою у різних точках лінії показані на рисунку 3.7 : 1 – несправна гірлянда знаходиться на початку лінії, 2 – гірлянда знаходиться в середині лінії, 3 – гірлянда розташована наприкінці лінії.

З осцилограм видно, чим більш несправна гірлянда, тим сильніший спад заднього фронту імпульсу. Це пояснюється величиною сумарного розряду ємностей усіх ізоляторів лінії. Сигнал, що надходить до лінії, шунтується несправним ізолятором, опір та ємність якого значно менше, ніж у справних ізоляторів. Тому, коли несправна гірлянда знаходиться на початку лінії, розряд ємності гірлянди відбувається значно швидше.

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

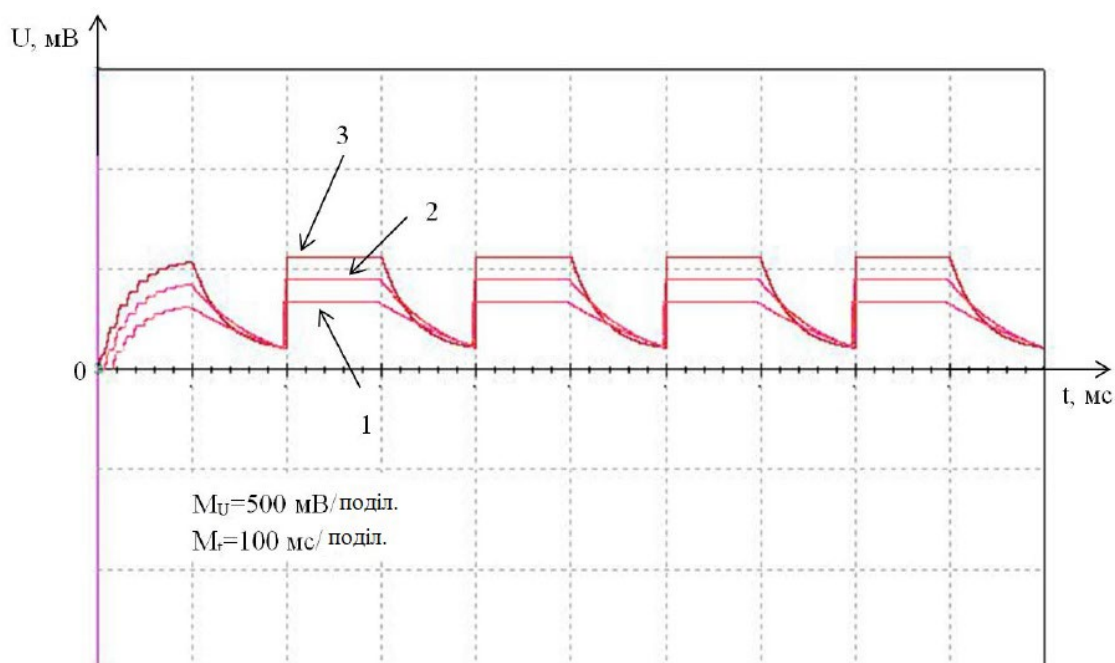


Рисунок 3.7 – Осцилограми вихідного сигналу ділянки у трьох режимах

Висновки по третьому розділу

Розглянуто основні методи дистанційного визначення місць пошкодження на повітряних лініях електропередач та кабельних лініях. Метод попередньо заряджених конденсаторів працює на великій частоті та не враховує перехідний опір у місці пошкодження. Це призводить до похибок при отриманні діагностичних сигналів. Імпульсний метод, що найбільше підходить для адаптації під умови ділянок контактної мережі постійного струму

Визначено параметри ділянки лінії нескінченно малої довжини. Лінії з розподіленими параметрами характеризуються для розрахунку одиницю довжини активним опором проводів r_0 , їх індуктивністю L_0 , ємністю проводів C_0 та активною провідністю ізоляції g_0 .

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційній роботі проведений статистичний аналіз відмов пристроїв контактної мережі показав, що протягом останніх десяти років відмова ізолюючих елементів залишається однією з головних проблем надійної роботи контактної мережі. В виду того великого обсягу електрифікованих залізниць виникає проблема невчасного технічного обслуговування та ремонту пристроїв електропостачання. Нестача ресурсів та кадрів призводить до старіння та поломки пристроїв контактної мережі.

Розглянуто основні види пошкоджень ізолюючих елементів. Фізичні та механічні впливи призводять до зламів ізолятора та зниження його діелектричних властивостей. Несприятливі кліматичні умови сприяють виникненню на поверхні ізолятора часткових розрядів, що призводить до поверхневого пробою ізоляторів небезпечним пошкодженням є внутрішні злами ізоляторів, коли пробою відбувається всередині ізолятора.

Розглянуто хвильові процеси в лінії, що містить ємнісне навантаження. Отримані вирази для визначення струмів та напруг падаючої та заломленої хвиль діагностичного імпульсу від значення ємнісного опору лінії.

Розглянуто основні методи дистанційного визначення місць пошкодження на повітряних лініях електропередач та кабельних лініях. Метод попередньо заряджених конденсаторів працює на великій частоті та не враховує перехідний опір у місці пошкодження. Це призводить до похибок при отриманні діагностичних сигналів. Імпульсний метод, що найбільше підходить для адаптації під умови ділянок контактної мережі постійного струму.

Визначено параметри ділянки лінії нескінченно малої довжини. Лінії з розподіленими параметрами характеризуються для розрахунку одиницю довжини активним опором проводів r_0 , їх індуктивністю L_0 , ємністю проводів C_0 та активною провідністю ізоляції g_0 .

Була реалізовано модель у програмі Multisim 12.0 пристрою діагностування на ділянці з трьома гірляндами ізолятори.

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. СОУ-Н ЕЕ 40.12-00100227-46:2011 Контроль технічного стану опорно-стрижневих ізоляторів за допомогою ультразвукового (акустичного) методу та засобами інфрачервоної техніки. Норми їх дефектації// Наказ від 12.05.2011 № 120
2. Р.М. Галаган, В.С. Єременко. ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ ПРИ КОНТРОЛІ ПОРЦЕЛЯНОВИХ ІЗОЛЯТОРІВ/ ISSN 1993-9981 Методи та прилади контролю якості, № 23, 2009
3. Лабзун, М. П. Методи та засоби діагностування опорно-стрижневих ізоляторів: монографія / М. П. Лабзун, О. Є. Рубаненко, В. М. Кутін – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 323 с. Л 12 ISBN 978-966-641-361-4
4. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Техніка та електрофізика високої напруги». Частина 1. «Ізоляція установок високої напруги» (для студентів 4-5 курсів денної та заочної форм навчання напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; В. Ф. Рой, Ю. П. Кравченко, Д. В. Рум'янцев. – Х.: ХНАМГ, 2009. – 51 с.
5. Костюков, І. (2021). Абсорбційні методи контролю технічного стану електричної ізоляції. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (6), 45–50. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2021.2.09>
6. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. - 192 с.
7. ДІАГНОСТИКА СТАНУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ОПОРНИХ ІЗОЛЯТОРІВ ЗА СТРУМАМИ ВИТОКУ /А. І. Котиш, К. Г. Петрова, І. В. Савеленко, С. В. Серебренніков, // Центральноукраїнський національний технічний університет- "Енергетика і автоматика", №2 2023 р.
8. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. –Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.

9. Акімов О.І., Сушко Д.Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.

10. Техніка високих напруг: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів факультету електроенерготехніки та автоматики / Уклад. : В. О. Бржезицький, В. Б. Абрамов, В. М. Козюра, О. Р. Проценко, В. І. Хомініч, В. О. Шостак, І. М. Маслюченко. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 85 с.

11. Гончаренко Ю. П. Ковбасюк С. В. Полещук І. І. Прядко В. А. Обґрунтування структури пристрою діагностування технічного стану розподільних електричних мереж //Вісник Хмельницького національного університету, №1, 2022 (305)

12. Гончаренко Ю. П., Прядко В. А., Полещук І. І., Синьківський В. А., Остра Н. В. Пропозиції щодо визначення виду зонduючого сигналу засобів локаційного діагностування технічного стану розподільних електричних мереж.// Вісник Хмельницького національного університету /серія: Технічні науки №1, 2022 С.305-312

13. Г. О. Шеїна Аналіз математичних моделей ліній електропередачі //Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» ISSN 2074-2630 Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №2(23) 2020

14. В. В. Лагута, Т. М. Сердюк, А. А. Пархоменко, АНАЛІЗ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ// Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, 2017, № 13