

Форма № Н-9.02

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Розроблення та дослідження систем заземлення для повітряних ліній електропередач

Виконав: студент 2 курсу, групи 2 ММЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Мешко О.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Галай В.М.


(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і
робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
автоматики, електроніки та
телекомунікацій

 О.В. Шефер
“02” 09 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Мешко Ользі Анатоліївні

1. Тема проекту (роботи) «Розроблення та дослідження систем заземлення для повітряних ліній електропередач»

керівник проекту (роботи) Єрмілова Наталія Василівна, к.т.н., доцент
затверджена наказом вищого навчального закладу від “09” серпня 2024 року
№ 818 – ф.а

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 19.12.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на повітряні лінії електропередач. Глибини прокладання різних типів заземлювачів. Параметри залізобетонних опор повітряних ліній: імпульсні опори обмазки та підножника, радіуси зони іскроутворення.

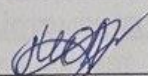
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Кабельні та повітряні лінії електропередач, переваги та недоліки. Сучасні методи розрахунків пристроїв заземлення. Аналіз перехідних режимів. Розроблення математичної моделі пристроїв заземлення та визначення її параметрів. Дослідження залежності питомого опору ґрунта від вологості та температури. Дослідження імпульсних опорів заземлювачів повітряних ліній електропередач для вертикальних та горизонтальних заземлювачів. Розрахунок імпульсних опорів залізобетонних фундаментів основ повітряних ліній. Висновки по роботі.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів)
- 1) багатоланкова електромагнітна модель стріжневого заземлювача;
 - 2) схема заміщення внутрішнього опору сталевого стріжня та графік зміни його потенціалу;
 - 3) схема заміщення заземлювача з мідних стріжнів в однорідній землі;
 - 4) графіки функцій приналежності для нечітких інтервалів вологості;
 - 5) графіки взаємозалежностей параметрів для супесі та піску при різних температурах;
 - 6) графіки залежності імпульсного опору від напруги
 - 7) розподіл зони навколо напівпарового заземлювача з бетону
 - 8) висновки по роботі.
6. Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітки (плакати)
		Дата	Категорія	Відсоток	
1	Кабельні та повітряні лінії електропередач, переваги та недоліки	07.10.24		15%	Пл. 1
2	Сучасні методи розрахунків пристроїв заземлення. Аналіз перехідних режимів	16.10.24	I	25%	Пл. 2
3	Розроблення математичної моделі пристроїв заземлення та визначення її параметрів	23.10.24		40%	Пл. 3
4	Дослідження залежності питомого опору ґрунта від вологості та температури	12.11.24		50 %	Пл. 5
5	Дослідження імпульсних опорів заземлювачів повітряних ліній електропередач для вертикальних та горизонтальних заземлювачів	19.11.24	II	60%	Пл. 6
6	Розрахунок імпульсних опорів залізобетонних фундаментів основ повітряних ліній	26.11.24		80%	Пл. 7
7	Формулювання висновків по роботі	11.12.24		90%	Пл. 8
8	Оформлення пояснювальної записки	19.12.24	III	100%	

Магістрант


(підпис)

Мешко О.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. Аналітична частина	11
1.1 Особливості ліній електропередач	11
1.1.1 Класифікація ЛЕП за типом.....	11
1.1.2 Класифікація за рівнем напруги	14
1.1.3 Технологічні особливості.....	15
1.1.4 Вплив на довкілля та соціальні фактори	17
1.1.5 Експлуатаційні характеристики.....	17
1.1.6 Економічні аспекти	17
1.1.7 Використання нових технологій.....	17
1.2 Заземлювачі: призначення, типи та особливості	18
1.2.1 Призначення заземлювачів	18
1.2.2 Типи заземлювачів.....	19
1.2.3 Вибір заземлювачів.....	21
1.2.4 Вимоги до заземлювачів та стандарти	21
Висновки до розділу	22
2. Сучасні методи розрахунку заземлюючих пристроїв	23
2.1 Методи розрахунку заземлюючих пристроїв у різних режимах	23
2.2 Багатоланкова електромагнітно зв'язана модель ЗП	26
2.3 Перехідні процеси в ЗП.....	34
2.3.1 Метод дискретних схем.....	34
2.3.2 Операторний метод	35
2.3.3 Облік частотно-залежних параметрів у МДС та ОМ.....	36
2.3.4 Приклад розрахунку.....	39
2.3.5 Результати моделювання	40
Висновки до розділу	42

3. Дослідження залежності питомої електричного опору ґрунту від вологості і температури	43
3.1 Загальний стан проблеми	43
3.2 Опис моделі для визначення залежності електричного питомої опору від вологості.....	45
3.3 Опис лабораторної установки	48
3.4 Отримані результати моделювання	49
3.5 Опис і Аналіз одержуваної залежності ρ від t	51
3.6 Побудова моделі.....	53
Висновки до розділу	53
4. Дослідження імпульсних опорів заземлювачів повітряних ліній електропередач.....	54
4.1 Вертикальні заземлювачі	54
4.2 Горизонтальні заземлювачі	57
4.3 Фіктивний радіус зони іскроутворення.....	57
4.4 Пробивна напруженість ґрунту в однорідному електричному полі	58
4.5 Дослідження іскроутворення на моделі	59
4.6 Результати розрахунків імпульсних коефіцієнтів.....	62
4.7 Вплив нелінійності вольт-амперної характеристики ґрунту.....	64
4.8 Порівняння результатів розрахунків з результатами натурних імпульсних випробувань	64
4.9 Розрахунок в неоднорідному ґрунті	65
Висновки до розділу	66
5 Розрахунок імпульсного опору залізобетонних фундаментів опор ПЛ ..	67
5.1 Основні теоретичні положення	67
5.2 Процеси до іскроутворення	69
5.3 Кількісні електричні характеристики бетону	70
5.4 Струм початку іскроутворення	72
5.5 Розрахунок імпульсного опору	73

5.6 Мінімальна відстань між заземлювачами в землі	75
5.7 Перевірка формул за даними польових випробувань.....	76
5.8 Залізобетонні заземлювачі у вигляді стійок	77
Висновки до розділу	79
Висновки	80
Список використаних джерел	81

ВСТУП

В Україні питанням безпеки надається виключно важливе значення. Цим і пояснюється той інтерес, який виявляється в нашій країні до заземлення як до основної захисної міри електробезпеки.

Заземлювачі є невід'ємною частиною електричних установок. Крім забезпечення електробезпеки заземлюючі пристрої виконують і ряд інших функцій; захист електроустановок від атмосферних і внутрішніх перенапружень; забезпечення необхідних умов для спрацювання релейного захисту при однофазних замиканнях на землю; введення струму в землю в систему що використовують її як один з проводів і т.д. Для ефективного виконання цих функцій заземлюючі пристрої повинні володіти певним значенням електричних параметрів: опору розтіканню і максимальних напруг кроку і дотику. Разом з тим, повинна обов'язково виконуватися вимога економічності, тобто конструкція заземлюючих пристроїв повинна забезпечувати необхідні електричні параметри при мінімальних розрахункових витратах.

У процесі проектування заземлюючих пристроїв електроустановок різного призначення необхідно забезпечити нормовані параметри заземлюючих пристроїв: опір заземлення, напруга дотику, напруга кроку. Таке забезпечення можливе лише за наявності надійних методів розрахунку зазначених параметрів.

Параметри заземлюючих пристроїв опор ліній електропередачі повинні забезпечуватися за будь-яких режимах і в різних грозових умовах крім того, необхідно враховувати особливості поведінки заземлюючих пристроїв при стиканні малих струмів, струмів короткого замикання, імпульсних струмів блискавок.

Ця кваліфікаційна робота присвячена дослідженню електричних параметрів ґрунтів і вдосконалення методів розрахунку електричних

параметрів заземлюючих пристроїв ліній електропередачі різного призначення.

Метою роботи є вдосконалення сучасних методів розрахунку заземлюючих пристроїв для повітряних ліній електропередач (ЛЕП). Особлива увага приділяється дослідженню впливу таких факторів, як вологість і температура ґрунту, на питомий електричний опір. Також мета полягає у розрахунку імпульсних опорів заземлювачів і залізобетонних фундаментів опор ЛЕП з метою підвищення надійності роботи електричних мереж.

Основні завдання:

1. Провести огляд існуючих конструкцій і технологій заземлення для повітряних ЛЕП, враховуючи вимоги стандартів та нормативів.
2. Дослідити залежність питомого електричного опору ґрунту від вологості, температури та інших фізико-хімічних характеристик.
3. Вивчити процеси розтікання струмів у ґрунті та їхній вплив на ефективність заземлювачів.
4. Розробити математичну модель для розрахунку імпульсних опорів заземлювачів різних типів.
5. Виконати експериментальні дослідження роботи заземлюючих пристроїв за реальних умов експлуатації.
6. Розробити рекомендації щодо вибору матеріалів і конструкцій для заземлювачів із урахуванням природних та експлуатаційних умов.

Об'єктом дослідження – фізичні процеси, що відбуваються в заземлюючих пристроях повітряних ЛЕП, зокрема розтікання струмів у ґрунті, і залежність цих процесів від характеристик ґрунту, типів заземлювачів та їх конструкцій.

Предметом дослідження – системи заземлення повітряних ліній електропередач, які включають заземлюючі пристрої, методики їхнього розрахунку та особливості експлуатації у різних природних умовах.

Методи дослідження:

1. Теоретичний аналіз:
 - Вивчення існуючих наукових праць, стандартів і нормативних документів у галузі електротехніки та електробезпеки.
 - Розробка багатоланкової моделі заземлюючих пристроїв у вигляді схеми заміщення.
 - Операторний метод для визначення параметрів електромагнітних характеристик.
2. Експериментальний метод:
 - Використання спеціальної лабораторної установки для визначення питомого електричного опору ґрунту при різних значеннях вологості та температури.
 - Вимірювання опору при трьох рівнях напруги (60 В, 80 В, 100 В) із подальшим усередненням результатів для підвищення точності.
 - Контроль температури ґрунту в лабораторних умовах з використанням термометрів у різних точках.
3. Моделювання:
 - Побудова математичних моделей для визначення залежності питомого опору ґрунту від його вологості та температури.
 - Розрахунок імпульсних опорів заземлювачів на основі експериментальних даних із використанням функцій апроксимації.
 - Використання методів дискретних схем для розрахунків перехідних процесів у заземлювачах.
4. Аналіз параметрів заземлювачів:
 - Вивчення пробивної напруженості ґрунту та закономірностей іскроутворення в землі.
 - Дослідження впливу фізико-хімічних властивостей ґрунту на ефективність роботи заземлюючих пристроїв.
5. Методи апроксимації:

- Встановлення залежності питомого опору ґрунту від вологості та температури за допомогою регресійних моделей.

- Використання експоненційних і лінійних функцій для опису процесів у ґрунті.

Актуальність теми: Системи заземлення є невід’ємною частиною електроустановок, забезпечуючи захист від перенапруг, ураження струмом і стабільну роботу енергосистем. Сучасні зміни клімату, урбанізація та зростаючі потреби в енергоефективності вимагають нових підходів до проектування заземлюючих пристроїв.

В Україні велика кількість існуючих систем заземлення морально застаріла, що створює ризики для безпеки людей і надійності мереж. Крім того, важливим є врахування регіональних особливостей ґрунтів і кліматичних умов, щоб адаптувати конструкції заземлювачів до реальних потреб.

Наукова новизна роботи:

1. Удосконалено методику розрахунку імпульсних опорів заземлюючих пристроїв з урахуванням змінних фізичних властивостей ґрунту.

2. Розроблено математичну модель багатоланкових систем заземлення, що дозволяє враховувати вплив температури, вологості та типу ґрунту на ефективність роботи.

3. Уперше проведено комплексне дослідження імпульсного опору залізобетонних фундаментів опор ЛЕП у реальних умовах.

4. Запропоновано конструктивні рекомендації для створення економічно вигідних і довговічних заземлюючих пристроїв, адаптованих до природних умов України.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Особливості ліній електропередач

Електрика застосовується у багатьох сферах людської діяльності і для того аби її доставити до безпосередніх споживачів використовуються численні системи кабелів та проводів, протягнутих у повітрі, в землі або по спеціальним кабельним спорудам. Ці проводи та кабелі формують лінії електропередачі.

Лінії електропередач (ЛЕП) – це комплекс інженерних споруд і систем, призначених для передачі електроенергії від електростанцій до споживачів. Розуміння їхніх особливостей є важливим для забезпечення ефективності, надійності та безпеки енергосистем. Оскільки ЛЕП відіграють критичну роль у функціонуванні електроенергетичних мереж, дослідження їхньої конструкції, типів і експлуатаційних характеристик є актуальними.

Їх особливості визначаються різними аспектами, такими як типи ліній (повітряні або кабельні), рівень напруги, конструкція, а також умови експлуатації. Розглянемо основні особливості ЛЕП з різними підходами до класифікації:

1.1.1 Класифікація ЛЕП за типом

1) Повітряна лінія електропередачі (ПЛ) – це відкриті лінії, проводи яких підвішуються на опорах і ізолюються за допомогою ізоляторів. Цей тип ЛЕП є найпоширенішим через свою економічність, особливо на великих відстанях.

Повітряні лінії електропередачі вважаються найменш витратним способом передачі електроенергії великої потужності. Порівняно з кабельними, вони дешевші у будівництві, мають кращу ремонтпридатність, не потребують проведення земляних робіт для прокладання або заміни проводів, забезпечують гарний візуальний огляд стану лінії і високу пропускну здатність.

Основні елементи повітряних ЛЕП:

- Опори. Встановлюються на різній відстані одна від одної (залежно від напруги), найчастіше виготовляються з металу, залізобетону або дерева. Металеві опори мають високу міцність і стійкість до навантажень, але потребують антикорозійного захисту.

- Проводи. Для передачі електроенергії використовуються переважно алюмінієві проводи (іноді з додатковою сталевною жилою для підвищення механічної міцності).

- Ізолятори. Скляні або керамічні ізолятори використовуються для відокремлення проводів від опор і запобігання коротким замиканням.

Переваги повітряних ЛЕП:

- Низька вартість будівництва і матеріалів у порівнянні з кабельними лініями.

- Простота в ремонті та обслуговуванні. Пошкодження можуть бути виявлені та усунуті відносно швидко.

Недоліки:

- Уразливість до природних факторів, таких як сильні вітри, сніг, обледеніння, а також блискавки.

- Вплив на навколишнє середовище та естетичні проблеми: високі опори та довгі проводи змінюють ландшафт.

Сфери застосування:

- Використовуються в основному на великих відстанях та у відкритій місцевості для передачі енергії на високих і середніх напругах.

2) Кабельні лінії електропередачі – прокладаються під землею або водою, що робить їх більш захищеними від погодних умов і фізичних пошкоджень. Вони використовуються в міських умовах і на територіях з обмеженим простором або складним рельєфом. Водночас прокладання кабельної лінії вартує значно більше, а тому такі лінії облаштовують переважно там, де прокладання повітряних ускладнене або неможливе з

огляду на технічні або естетичні параметри. Повітряні лінії електропередачі є однією з основних ланок енергетичної системи і за родом струму поділяються на ПЛ змінного струму і ПЛ постійного струму. Лінії постійного струму використовуються вкрай рідко, переважно для зв'язку енергосистем та живлення контактної мережі. В Україні єдина лінія постійної напруги була виведена з експлуатації у 2014 році. А переважна більшість ліній слугують для передачі змінної напруги.

Основні елементи кабельних ЛЕП:

Кабель. Містить кілька шарів ізоляції та екранування, що забезпечує безпеку та стійкість до зовнішніх впливів.

Ізоляція. Зазвичай виготовляється з поліетилену або ПВХ, що забезпечує тривалий термін служби кабелів і їхню стійкість до вологи та температурних коливань.

Переваги кабельних ЛЕП:

- Висока стійкість до впливу природних умов, таких як вітер, дощ, сніг.
- Менший вплив на ландшафт і довкілля, оскільки кабелі прокладаються під землею.
- Менші втрати електроенергії через зниження електромагнітного випромінювання.

Недоліки:

- Висока вартість прокладання та матеріалів.
- Складність у проведенні ремонту: виявлення пошкоджень та їхнє усунення потребує використання спеціального обладнання.

Сфери застосування кабельних ЛЕП:

- Використовуються переважно в міських районах, де важливо зберегти естетику та захистити лінії від зовнішніх факторів.
- Також поширені в складних умовах, таких як підводні прокладки або в місцях з обмеженою доступністю.

1.1.2 Класифікація за рівнем напруги

ЛЕП класифікуються за рівнями напруги, які визначають їхню конструкцію та сферу застосування:

1) Низьковольтні лінії (до 1 кВ) використовуються для кінцевого споживача (наприклад, для постачання електроенергії до житлових будинків).

ПЛ низької напруги передають напругу до 1 кВ і використовуються для передачі й розподілу електроенергії на невеликі відстані всередині міст, сіл та селищ до введів у будинки або невеликі підприємства. Протяжність таких ліній зазвичай становить 1-2 км. У містах при виконанні таких ліній перевагу віддають кабельним лініям електропередачі.

2) Середньовольтні лінії (1-35 кВ) застосовуються для передачі електроенергії в межах міських і сільських районів.

ПЛ середньої напруги передають напругу від 1 до 35 кВ та використовуються для передачі електроенергії від районних підстанцій до населених пунктів, крупних промислових об'єктів і аграрних комплексів, розміщених на відстані 10-20 км.

3) Високовольтні лінії (110-750 кВ) необхідні для передачі великих обсягів енергії на великі відстані.

ПЛ високої напруги – це лінії напругою переважно 110-330 кВ. Призначені для передачі великих потужностей між електричними станціями, окремими енергосистемами і великими районними підстанціями, для сполучення електростанцій з розподільними пунктами та електропостачання великих міст або економічних районів на відстані від 30 до 600 км.

4) Надвисоковольтні лінії (понад 750 кВ) забезпечують передачу електроенергії на наддалекі відстані з мінімальними втратами.

ПЛ надвисокої напруги – це лінії з напругою від 400 до 750 кВ, що служать для з'єднання окремих регіональних енергетичних систем, розміщених на відстані до 2000 км.

В Україні при передачі та розподілі електричної енергії переважно використовуються такі класи змінної напруги:

– низька напруга – 220 В і 380 В або, відповідно до міжнародних норм, 230/400 В;

– середня напруга – 6 кВ, 10 кВ і 35 кВ;

– висока напруга – 110 кВ, 150 кВ, 220 кВ і 330 кВ;

– надвисока напруга – 400 кВ, 500 кВ і 750 кВ.

Залежно від протяжності розрізняють короткі лінії електропередачі довжиною до 50 км, середні – протяжністю від 50 до 150 км та довгі – довжиною понад 150 км.

1.1.3. Технологічні особливості

1) Ізоляція: Ізолятори використовуються для відокремлення проводів від опор і запобігання коротким замиканням. Повітряні лінії використовують керамічні або скляні ізолятори, а кабельні лінії мають багатошарову полімерну ізоляцію.

Розрізняють штирьові ізолятори, що підтримують провідник над конструкцією і застосовуються на лініях напругою до 35 кВ та підвісні, що використовуються на лініях напругою понад 35 кВ і часто утворюють гірлянди ізоляторів, де провідник висить під конструкцією. Підвісні ізолятори мають вищі механічні характеристики, ніж штирьові. Виготовляються ізолятори переважно з порцеляни, загартованого скла та полімерних матеріалів, а їх кількість залежить від напруги лінії, необхідної стійкості до блискавки, висоти над рівнем моря та факторів навколишнього середовища, таких як туман або наявність у повітрі соляних бризок чи забруднення.

2) Опори та конструкції: Повітряні ЛЕП використовують опори різної висоти і міцності залежно від умов місцевості та напруги. Металеві і бетонні опори найбільш поширені.

Розрізняють кілька груп опор. За матеріалом виготовлення опори бувають дерев'яними, сталевими, залізобетонними, алюмінієвими і навіть виготовленими з армованого пластику та композитних матеріалів.

За призначенням розрізняють анкерні (кінцеві і кутові), проміжні та перехідні опори. Анкерні опори забезпечують постійний натяг проводів ЛЕП та витримують значне навантаження. Анкерні кінцеві опори встановлюються на початку та в кінці повітряної лінії, а кутові – в місцях повороту траси.

Проміжні опори зустрічаються на лініях найчастіше та призначені для підтримання проводів між двома анкерними опорами на прямих ділянках траси і не розраховані на навантаження від натягування проводів вздовж лінії. А перехідні – використовуються при перетині трасою ЛЕП будь-яких великих перешкод природного або інженерного характеру (мостів, підвісних канатних доріг, річок, озер, каналів, ярів тощо). Вони мають більшу вагу і висоту та несуть найбільші навантаження.

Існують також спеціальні види опор: транспозиційні (дозволяють змінювати порядок розміщення проводів на опорах), відгалужувальні (служать для організації відгалужень від повітряних ліній), перехресні (встановлюються на перетині повітряних ліній двох напрямків) та противітрові (встановлюються для посилення механічної міцності).

За конструктивним виконанням опори можуть бути одно-, дво- і багатоланцюгові та призначені для підвішування відповідно однієї, двох і більше паралельно прокладених ліній.

Грозозахисні троси служать для захисту ліній від грозових розрядів. Це переважно сталеві або сталеоалюмінієві троси, що розміщуються над фазовими проводами повітряної лінії електропередачі чи підстанції.

3) Проводи: Виготовляються з алюмінію або алюмінієвого сплаву, іноді використовують сталеві жили для підвищення міцності. Провідники мають достатній перетин для забезпечення мінімальних втрат електроенергії.

1.1.4. Вплив на довкілля та соціальні фактори

ЛЕП, особливо повітряні, можуть мати значний вплив на довкілля, зокрема:

- Зміна ландшафту. Великі металеві опори можуть впливати на естетику природи, особливо в туристичних або сільських зонах.
- Ризик для птахів. Високовольтні ЛЕП можуть становити загрозу для мігруючих птахів, які часто стикаються з проводами.
- Електромагнітне випромінювання. Повітряні ЛЕП випромінюють електромагнітні поля, що може бути небажаним в житлових зонах.

1.1.5. Експлуатаційні характеристики

- Енергетичні втрати: На довгих відстанях електроенергія втрачається через опір проводів. Високовольтні ЛЕП знижують ці втрати завдяки підвищенню напруги, що дозволяє передавати більше енергії з меншими втратами.
- Ремонт і обслуговування: Повітряні лінії простіше ремонтувати через легкий доступ до проводів. У кабельних лініях пошук і усунення пошкоджень потребує складніших технологій, наприклад, спеціального діагностичного обладнання.

1.1.6. Економічні аспекти

- Повітряні ЛЕП мають нижчі початкові витрати на будівництво, що робить їх більш привабливими для передачі електроенергії на великі відстані.
- Кабельні ЛЕП дорожчі в прокладанні та експлуатації, але є більш надійними в міських умовах або при складному рельєфі, наприклад, під водою або в гірських районах.

1.1.7. Використання нових технологій

У сучасній енергетиці з'являються нові технології, що підвищують ефективність і безпеку ЛЕП:

- Надпровідні матеріали. Надпровідники дозволяють значно знизити втрати електроенергії під час її передачі.

- Використання відновлюваних джерел енергії. З інтеграцією сонячних і вітрових станцій зростає необхідність у розумних мережах і ефективних ЛЕП.

- Автоматизація та моніторинг. Використання інтелектуальних систем управління дозволяє автоматизувати процеси обслуговування та оперативно виявляти проблеми в мережі.

Таким чином можна підсумувати, що різні види ЛЕП мають свої особливості залежно від типу, напруги та умов експлуатації. Вибір між повітряними і кабельними лініями залежить від конкретних вимог і обставин, таких як відстань передачі, вартість, надійність і вплив на навколишнє середовище.

1.2. Заземлювачі: призначення, типи та особливості

Заземлювачі є критично важливими елементами електричних установок і систем блискавкозахисту, що забезпечують безпечну роботу електричних мереж. Їх основне завдання – забезпечити безпечне відведення електричних струмів у землю для запобігання ураженню людей електричним струмом, захисту електрообладнання від перенапруг і стабілізації роботи електричних систем.

1.2.1 Призначення заземлювачів

1) Захист людей і тварин від електричних ударів. Заземлювачі знижують потенціал на металевих частинах електроустановок і споруд, які можуть стати небезпечними через пошкодження ізоляції або виникнення перенапруги. Це дозволяє уникнути ураження струмом людей і тварин, що можуть опинитися у безпосередній близькості від обладнання.

2) Захист обладнання від перенапруг. Виникнення перенапруг в електромережах може спричиняти пошкодження електрообладнання. Заземлювачі дозволяють перенаправляти надлишкову електричну енергію в землю, мінімізуючи ризик пошкодження.

3) Захист від блискавки. Системи блискавкозахисту, до складу яких входять заземлювачі, забезпечують відведення електричних зарядів блискавки в землю, зменшуючи небезпеку для будівель, людей і техніки.

4) Стабілізація напруги. Заземлення сприяє вирівнюванню потенціалу в електромережі, що стабілізує роботу обладнання та знижує ймовірність аварійних ситуацій.

1.2.2 Типи заземлювачів

Заземлювачі класифікуються за різними критеріями, такими як конструкція, матеріали, форма, та спосіб встановлення. Кожен тип має свої переваги та недоліки, залежно від умов використання і характеру об'єкта. Розглянемо типи заземлювачів з різними підходами до класифікації.

– Класифікація за конструкцією

1) Природні заземлювачі. Це металеві частини споруд або інфраструктури, які вже мають контакт із землею. Наприклад, металеві труби, залізобетонні конструкції або сталеві каркаси будівель можуть використовуватися як природні заземлювачі. Їх перевага полягає в тому, що вони не потребують додаткового встановлення, але їх провідність і корозійна стійкість можуть бути непередбачуваними.

2) Штучні заземлювачі. Це спеціально встановлені металеві елементи, призначені для заземлення. Штучні заземлювачі можуть бути різних типів, в залежності від форми та розташування:

- Стрижневі заземлювачі: Металеві стрижні або прутки, що вбиваються у землю вертикально. Використовуються у місцях, де глибоке проникнення у ґрунт забезпечує кращий контакт із землею. Такі заземлювачі виготовляють з міді або оцинкованої сталі.

- Пластинчасті заземлювачі: Металеві пластини, які закопуються у ґрунт на певну глибину. Вони забезпечують великий контакт із землею завдяки великій площі поверхні.

- Стрічкові заземлювачі: Металеві стрічки або дроти, що прокладаються горизонтально у землі. Використовуються для створення контурів заземлення у великих інфраструктурних об'єктах, таких як промислові будівлі або електростанції.

- Класифікація за матеріалом

- 1) Мідні заземлювачі. Мідь є одним із найкращих матеріалів для заземлювачів через свою високу електропровідність та стійкість до корозії. Мідні заземлювачі застосовуються в системах, де вимагається висока надійність, наприклад у лікарнях, дата-центрах або на промислових підприємствах.

- 2) Оцинковані сталеві заземлювачі. Це дешевший варіант у порівнянні з мідними. Сталь, покрита цинком, має підвищену стійкість до корозії, що збільшує термін експлуатації таких заземлювачів. Оцинковані сталеві заземлювачі широко використовуються в будівництві і побутових системах.

- 3) Алюмінієві та сталєалюмінієві заземлювачі. Вони є компромісом між вартістю і ефективністю. Алюміній легший, але менш стійкий до корозії порівняно з міддю. Сталєалюмінієві заземлювачі поєднують у собі переваги обох металів.

- Класифікація за способом монтажу

- 1) Вертикальні заземлювачі. Це зазвичай стержневі заземлювачі, що встановлюються вертикально у ґрунт. Використовуються в умовах обмеженого простору, а також там, де необхідно забезпечити глибокий контакт із землею (наприклад, у посушливих або кам'янистих місцевостях).

- 2) Горизонтальні заземлювачі. Це смуги або кабелі, що прокладаються горизонтально у ґрунті. Вони використовуються для створення замкнутих контурів заземлення або ж у випадках, коли є можливість прокласти заземлювачі на великій площі.

- Класифікація за сферою використання

1) Захисне заземлення. Використовується для захисту людей та обладнання від небезпечних струмів, що можуть виникнути при пошкодженні ізоляції або через перенапругу. Основне завдання – забезпечити відведення струму від металевих частин електроустановки.

2) Робоче заземлення. Застосовується для нормальної роботи електрообладнання та підтримання стабільного потенціалу у електричній мережі. Це заземлення забезпечує ефективну роботу електронних і комп'ютерних систем, які чутливі до коливань напруги.

3) Блискавкозахисне заземлення. Цей тип заземлення призначений для відведення струмів блискавки у землю, що захищає будівлі та обладнання від механічних і термічних ушкоджень, а також від пожеж.

1.2.3 Вибір заземлювачів

При виборі видів заземлювачів слід враховувати кілька факторів:

- Тип ґрунту: Провідність і корозійні властивості ґрунту впливають на ефективність заземлення. Вологий і глинистий ґрунт сприяє кращій роботі заземлювачів, тоді як піщані або кам'яністі ґрунти можуть ускладнити процес заземлення.

- Кліматичні умови: Вибір заземлювачів залежить від кліматичних умов, таких як глибина промерзання ґрунту та рівень ґрунтових вод. У холодних регіонах необхідно встановлювати заземлювачі глибше, щоб вони не втрачали контакт із землею взимку.

- Тип об'єкта: Великі промислові або інфраструктурні об'єкти потребують потужних систем заземлення, тоді як для індивідуальних житлових будинків можуть використовуватися спрощені варіанти заземлення.

1.2.4 Вимоги до заземлювачів та стандарти

Заземлювачі повинні відповідати технічним вимогам і стандартам, що регулюють їх конструкцію, матеріали та ефективність. В Україні основними нормативними документами є стандарти ДСТУ EN 62305 (для систем

блискавкозахисту), а також ДСТУ 3647-97, що регулює загальні вимоги до заземлення електроустановок. Важливо враховувати також міжнародні стандарти, такі як IEC 60364, що регламентує загальні принципи заземлення і захисту від ураження електричним струмом.

Висновки до розділу

Заземлювачі є невід'ємною частиною сучасних електричних систем, що забезпечують безпеку, стабільність і надійність їхньої роботи.

1. Основне призначення заземлювачів полягає у захисті людей, тварин і обладнання від небезпек, спричинених електричними перенапругами, струмами витоку та блискавковими розрядами.

2. Різноманіття типів заземлювачів (за конструкцією, матеріалом і способом встановлення) дозволяє обирати оптимальні рішення залежно від специфіки об'єкта, типу ґрунту і кліматичних умов.

3. Використання сучасних матеріалів, таких як мідь, оцинкована сталь або сталевалюмінієві сплави, сприяє підвищенню ефективності та довговічності систем заземлення.

4. Дотримання національних і міжнародних стандартів забезпечує безпечну експлуатацію електроустановок і ефективний захист інфраструктури.

Таким чином, правильний вибір і проектування систем заземлення є ключовим фактором у забезпеченні безпеки та ефективної роботи електричних мереж у різних умовах експлуатації. Подальший розвиток технологій сприятиме створенню більш надійних і економічних рішень для потреб сучасної електроенергетики.

2 СУЧАСНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЗАЗЕМЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

2.1 Методи розрахунку заземлюючих пристроїв у різних режимах

При розрахунку заземлюючого пристрою (ЗП) з заданими впливом струму блискавки чи КЗ ставиться мета - знайти потенціали, поздовжні і стікаючі струми елементів ЗП, його опір, напругу дотику, крокові напруги, а також розподіл напруження електричного і магнітного полів [1-3].

Для вирішення даної задачі застосовуються теорії антен, довгих ліній і ланцюгів з зосередженими параметрами. Теорія антен надто трудомістка і надлишкова за точністю на фоні похибок вихідних даних ЗП і структури землі. Застосування теорії довгих ліній з параметрами, розрахованими виходячи зі статичного приближення, вимагає дискретизації ЗП на елементи малої довжини і тому не дає переваг в порівнянні з теорією ланцюгів. При розрахунку параметрів ліній на основі рівнянь електромагнітного поля рішення стає трудомістким.

Найбільш простим і адекватним розрахунковим інструментом сучасних ЗП, систем блискавкозахисту та зрівнювання потенціалу, що представляють тривимірну сітчасту конструкцію з коротких провідників, є теорія ланцюгів з зосередженими параметрами.

При чисельних розрахунках ЗП розбивається на елементи, розміри яких істотно менше довжини електромагнітної хвилі. Елементи моделюються симетричними П-подібними чотириполусниками з поздовжніми активно-індуктивними опорами і поперечними активно-емнісними провідностями. Елементи об'єднані гальванічними, емнісними і індуктивними зв'язками, а відповідні їм матриці GCM є повністю заповненими. З урахуванням специфіки методів розрахунку електричних полів GS-параметри елементів визначаються у середніх, а не вузлових точках, як потрібно для П-подібних чотириполусників. Виникає завдання еквівалентного перенесення GS-параметрів із середніх точок у вузли елементів. Зауважимо, що найпростіша методика її розв'язання шляхом

ділення параметрів навпіл непридатна для ланцюгів з електромагнітно зв'язаними елементами.

В основу першої моделі ЗП [1] покладена ітераційна процедура приведення матриць власних і взаємних параметрів чотиріполюсників до діагонального вигляду, що відповідає ланцюгової схемі з еквівалентними власними (далі робочими) параметрами ланок. У першому наближенні ЗП приймається еквіпотенціальними, $\varphi = \text{const}$, і рішенням системи $R \cdot J = \varphi$, де R - матриця власних і взаємних опорів елементів, знаходяться стікають струми J і робочі провідності елементів $g_i = J_i / \varphi = 1, \dots, N$, які діляться навпіл і включаються у вузли чотиріполюсника. Аналогічно визначаються робочі індуктивності і ємності. Таким чином, завдяки усуненню взаємних зв'язків між елементами параметри схеми заміщення ЗП знайдені найпростішим способом. Далі розраховуються потенціали вузлів, і струми гілок, при розбіжності яких з початковими значеннями цикл повторюється.

Аналітичне дослідження подібних ітераційних алгоритмів на модельних задачах показало, що їх збіжність залежить від частоти, розмірів ЗП та питомого опору землі. Стосовно ізолюваного стрижня довжиною l в однорідному ґрунті з питомим опором ρ , метод простої ітерації проводить до збіжної ітераційної послідовності з будь-якого початкового наближення зі швидкістю геометричної прогресії зі знаменником q за умови $q = \pi \mu_0 l^2 / 2\rho < 1$. Тому на низьких частотах збіжність ітераційного процесу висока, але зі збільшенням частоти (або зменшенням тривалого фронту хвилі) збіжність сповільнюється і може бути відсутнім у віддалених від джерела точках.

Таким чином, розглянуту модель ЗП у вигляді ланцюгової схеми з робочими параметрами, отриманим ітераційним шляхом, доцільно використовувати для розрахунку ЗП в режимах КЗ, але не в завданнях блискавки захисту.

Математичною моделлю ЗП в [3] являється ланцюгова схема з електромагнітозв'язаними чотиріполюсниками, які описуються законом Ома і першим законом Кірхгофа відносно потенціалів вузлів і струмів гілок. Поперечні провідності елементів, розраховані в середніх точках, вдається включити в ці рівняння на основі припущення про рівномірне розтікання поперечного струму елементу через два вузли П-подібних чотиріполюсників. На жаль, ця методика не дозволяє виразити матрицю поперечної провідності вузлів в явному виді, що виключає застосування інших, ефективніших, ніж закони Ома і Кірхгофа методів розрахунку ланцюгів. Звідси надмірність вхідних параметрів, що описують топологію ланцюги, і подвоєна розмірність системи рівнянь в порівнянні з методом вузлових потенціалів.

У математичній моделі ЗП [4] щільність стікаючого струму в межах кожного елементу сприймається лінійною функцією і визначається щільністю струму у вузлах, що дозволяє уникнути характерну для інших моделей процедуру перенесення поперечних параметрів з середніх у вузлові точки елементів. Проте замість однієї проблеми виникає дві нові. Розрахунок взаємних опорів вузлів проводиться чисельним інтегруванням, тоді як за стандартною методикою з кусочно-постійною апроксимацією щільності струму – аналітично[5]. Щільність струму у вузлах, де сполучення провідників ЗП не є гладким, має особливості і вимагається їх виділення [6], інакше лінійна апроксимація не являється обґрунтованою. Це завдання вирішується введенням додаткових вузлів і фокусуванням сітки, що збільшує трудомісткість. У результаті, дана модель ЗП представляє безперечний інтерес для дослідників, але є надмірною при рішенні інженерних завдань.

Особливістю математичної моделі ЗП [7] являється використання Т-подібних чотиріполюсників, що припускає розподіл подовжніх опорів елементів, знайдених в середніх точках, на дві частини. Це завдання,

складніше в порівнянні з перетвореннями П-подібних схем, в [7] вирішена без урахування взаємної індуктивності стержнів. Іншим недоліком Т-подібних чотириполюсників являється наявність зайвого (середнього) вузла, що далеко не завжди компенсує об'єднанням крайніх вузлів сусідніх чотириполюсників. Застосування Т-подібних чотириполюсників в схемі заміщення типового ЗП з більшим числом перетинів стержнів проводиться до суттєвого збільшення числа вузлів і тому недоцільно.

У даному розділі кваліфікаційної роботи пропонується математична модель ЗП у вигляді багатоланкової схеми з симетричними електромагнітозв'язаними П-подібними чотириполюсниками (БЕМЗ модель ЗП). Визначені параметри, моделі, розглянуті методи розрахунку сталих і перехідних процесів в ЗП з урахуванням частотно-залежних елементів.

2.2 Багатоланкова електромагнітно зв'язана модель ЗП

Прийmemo припущення. Задача лінійна: параметри землі ($\mu_0 \epsilon$) і матеріали ЗП ($\mu_0 \gamma$) постійні. Земля двошарова горизонтально-шариста з постійними питомими опорами шарів ρ_1, ρ_2 . Заземлювальний пристрій складається з елементів круглого перерізу, довжина яких істотно більша радіусу, $L > 10a$. Джерела поля (стікають і поздовжні струми, заряди) зосереджені на осях елементів. Лінійна щільність джерел в межах елемента постійна.

Довжина елемента в результаті дискретизації ЗП задовольняє умові

$$10_a \leq l \leq \lambda / 10 = \sqrt{10^5 \rho / f}, \quad (2.1)$$

де λ - довжина електромагнітної хвилі частотою в провідному середовищі з питомим опором ρ .

Наприклад, при частоті струму блискавки = 1 МГц (імпульс 0,25 / 100 мкс) і характерному значенні ρ - 100 Ом довжина елемента в землі $L = 3$ м. Знайдемо параметри БЕМЗ моделі ЗП, вказаного на (рис. 2.1). Активний опір і внутрішню індуктивність елементів (з урахуванням поверхневого ефекту) опишемо діагональними матрицями R і L [8]:

$$R_{ii} = \text{Re}(Z_{ii}), L_{ii} = \text{Im}(Z_{ii} / \omega), Z_{ii} = \frac{lq J_0(qa)}{2\pi a \gamma J_1(qa)}, \quad (2.2)$$

$$q = \sqrt{-j\omega\mu\gamma}, \quad (1.3)$$

де L , a — довжина і радіус i -го елемента.

Електричні і магнітні зв'язки між елементами описуються квадратними, повністю заповненими матрицями власних і взаємних провідностей G , ємностей C , індуктивностей M . Матриця провідностей виходить зверненням матриці опорів $G = R^{-1}$, матриця ємностей виходить зверненням матриці потенційних коефіцієнтів $C = a^{-1}$.

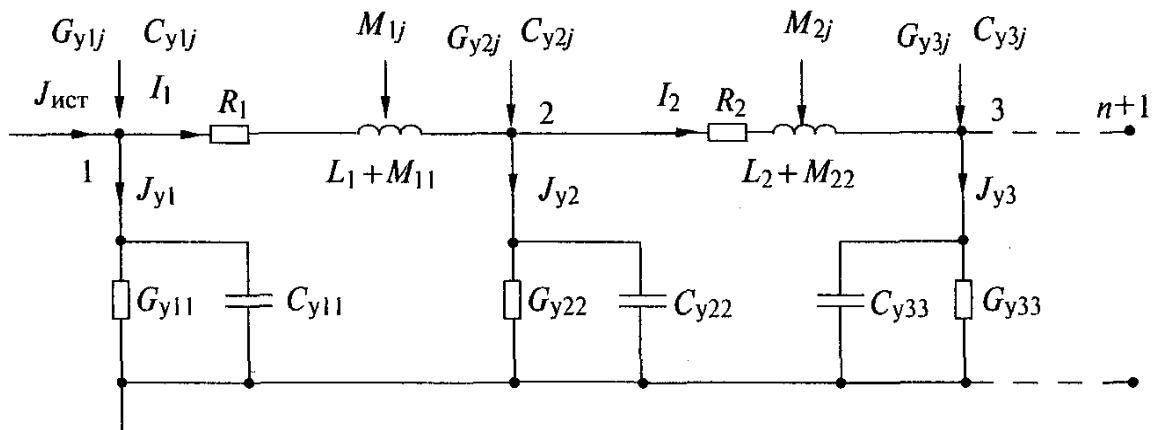


Рисунок 2.1 - Багатоланкова електромагнітно зв'язана модель стрижневого заземлювача

Взаємний опір R_{ij} між j -м елементом qm (джерелом поля) і середньою точкою i -го елемента в однорідному середовищі з питомою опором, згідно (рис. 2.1), розраховується аналогічно [5]:

$$R_{ij} = R(p, q, l) = \frac{p}{4\pi|l|} \ln \frac{(q+l-p)l + |q+l-p||l|}{(q-p)l + |q-p||l|}, \quad (2.4)$$

де $q = (x_q, y_q, z_q)^T$; $m = (x_m, y_m, z_m)^T$; $l = l_j = m - q = (x_l, y_l, z_l)^T$;

$p = (x_p, y_p, z_p)^T$ - геометричні параметри елементів.

Власний опір елемента

$$R_{ii} = \frac{p}{2\pi|l|} \ln \frac{|l|}{a}, \quad (2.5)$$

Вплив кордону розділу «земля-повітря» враховується дзеркальним відображенням елемента відносно поверхні землі:

$$R'_{ij} = R'(p, q, l) = R(p, q, l) + R(p, q', l'), \quad (2.6)$$

де $q' = (x_q, y_q, -z_q)^T$; $l' = (x_l, y_l, -z_l)^T$ - координати зображення.

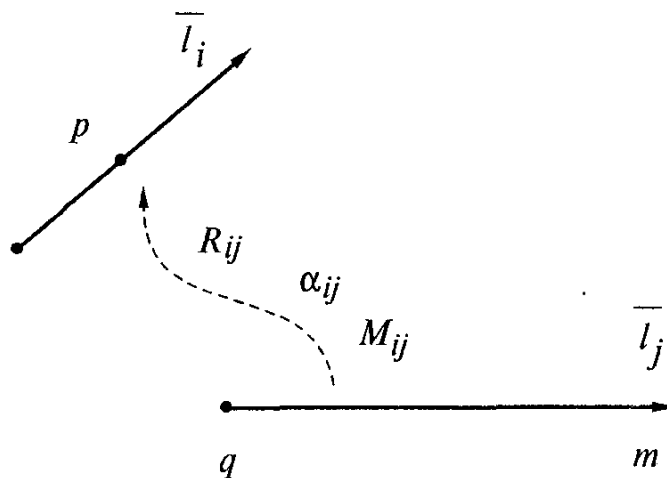


Рисунок 2.2 - До визначення взаємних параметрів двох стрижнів

Взаємний опір в двошаровій землі визначається нескінченним числом віддзеркалень джерела від меж розділу шарів землі і межі з повітрям і виражається через функції опору для однорідної землі [5]:

$$R_{ij} = \begin{cases} R'(p, q, l) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n [R'(p, q + 2nh, l) + R'(p, q' + 2nh, l')], \\ \quad p_3 < h_3, q_3 < h_3; \\ (1-k) \sum_{n=0}^{\infty} k^n [R(p, q - 2nh, l) + R(p, q' - 2nh, l')], \\ \quad p_3 > h_3, q_3 < h_3; \\ R(p, q, l) - kR(p, q' + 2h, l') + (1-k^2) \times \\ \quad \times \sum_{n=0}^{\infty} k^n R(p, q', -2nh, l'), \quad p_3 < h_3, q_3 < h_3; \\ (1+k) \sum_{n=0}^{\infty} k^n R'(p, q + 2nh, l), \quad p_3 < h_3, q_3 > h_3, \end{cases} \quad (2.7)$$

де $h = (0, 0, h_3)^T$; h_3 - потужність верхнього шару землі; $k = (p_2 - p_1) / (p_1 + p_2)$ коефіцієнт відбиття; стержні не перетинають межу розділу середовищ, що досягається на етапі дискретизації ЗП; збіжність нескінченних рядів при $|k| < 1$ доводиться за ознакою Лейбніца.

Знакозмінних ряди ($p_1 > p_2$) володіють високою збіжністю, збіжність знакопостійних рядів ($p_1 > p_2$) істотно нижче, особливо при значенні коефіцієнта $k > 0,9$, характерному для ґрунту з ізолюючою (скельним) підставою. Трудомісткість розрахунку ЗП в подібному ґрунті, для якого потрібно підсумовування десятків членів ряду, неприпустимо висока.

До суттєвого прискорення збіжності призводить метод виділення [9], коли з повільно схожого ряду виділяється з відомою сумою типу

$$S = \sum_{n=1}^{\infty} k^n / n = -\ln(1-k), \quad |k| < 1, \quad (2.8)$$

що має аналогічні асимптотичні властивості, і залишається швидкозбіжним рядом.

Таким чином, елементи матриці опорів R знайдені. Елементи матриць потенційних коефіцієнтів і взаємних індуктивностей знайдемо з урахуванням відомої аналогії між статичними полями:

$$a_{ij} = R'_{ij} / \rho\epsilon, \quad M_{ij} = \mu_0(\overline{i_i i_j})R_{ij} / \rho, \quad (2.9)$$

R_{ij}, R'_{ij} - взаємні опори елементів в обмеженому середовищі однорідної землі - визначені раніше. Нагадаємо, що $G = R^{-1}, C = \alpha^{-1}$.

У результаті розрахунку електричного поля GC - параметри елементів визначені в середніх точках елементів і повинні бути перенесені у вузли Π - подібного чотириполюсника в БЕМЗ моделі ЗП (див. рис. 2.1). Для цього виконаємо еквівалентне перетворення матриці GC у вузлові матриці $G_y C_y$ із умови незмінності стікаючого струму елементів.

Прийmemo допущення, що поперечний струм кожного вузла Π - подібного чотириполюсника дорівнює половині стікаючого струму елемента, а потенціал елемента дорівнює середньому потенціалу вузлів моделюючого його чотириполюсника. Опишемо топологію поздовжніх гілок схеми (див. рис 2.1) Матриці сполук A і введемо матрицю B ($b_{i,j} = |a_{i,j}| / 2$), яка дозволяє зв'язати стікаючі струми елементів J с поперечними струмами J_y вузлів чотириполюсників $J_y = B J$, а також потенціали середніх точок елементів з потенціалами U вузлів чотириполюсників $\varphi = B^T U$. Наприклад, для дволанкової схеми (див. рис 2.1.)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}; B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 10 \\ 11 \\ 01 \end{bmatrix}; J_y = B \cdot J = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_1 + J_2 \\ J_2 \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

$$\varphi = B^T \cdot U = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} U_1 + U_2 \\ U_2 + U_3 \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

Таким чином, стікаючі струми і потенціали елементів перенесені у вузли схеми заміщення.

Розрахуємо схему (див. рис. 2.1) при дії джерел синусоїдального струму методом вузлових потенціалів [8, т.1]. Перший закон Кірхгофа для потенційних вузлів схеми в матричній формі має вигляд:

$$A \cdot J = J_{уст} - J_y, \text{ или } A \cdot I + B \cdot J = J_{уст}, \quad (2.12)$$

де I , J_y , J , $J_{уст}$ — вектори поздовжнього, поперечного, що стікає і задає струм джерела відповідно.

Вектор стікаючого струму:

$$J = Y \cdot \varphi = Y \cdot B^T \cdot U, \quad (2.13)$$

де $Y = G + j\omega C$ - матриця поперечних провідностей елементів; φ , J , G , C - параметри елементів в середніх точках, U - шуканий вектор потенціалів вузлів.

Струм гілок знаходимо за законом Ома:

$$I = Z^{-1} \cdot A^T \cdot U, \quad (2.14)$$

де $Z = R + j\omega(L + M)$ - матриця поздовжніх опорів гілок.

Підставив (2.13), (2.14) в (2.12), отримаємо запис вузлових рівнянь в матричній формі:

$$(A \cdot Z^{-1} \cdot A^T + B \cdot Y \cdot B^T) \cdot U = J_y \cdot U = J_{ист}, \quad (2.15)$$

де Y_y — матриця вузлових провідностей.

Рішенням (2.15) знаходимо потенціали вузлів і далі стікаючі (2.13) і подовжні струми (2.14).

Другий доданок в (2.15) є матрицею вузлових провідностей поперечних гілок схеми (див. рис. 2.1), що дозволяє записати формули приведення матриць провідності і місткості, знайдених в середніх точках елементів ЗП, до вузлових матриць:

$$G_y = B \cdot G \cdot B^T; \quad C_y = B \cdot C \cdot B^T \quad (2.16)$$

Таким чином, виконаний еквівалентний перенос матриць провідності і місткостей, знайдених методами теорії поля в середніх точках елементів, у вузли схеми заміщення. В результаті розглянута модель ЗП інваріантна до методу розрахунку електричного ланцюга. Вузлові матриці (2.16) характеризуються діагональним переважанням, що забезпечує хорошу обумовленість системи (2.15) і можливість застосування як прямих, так і ітераційних методів її рішення.

При реалізації БЕМЗ моделі ЗП слід врахувати сильну розрідженість матриці з'єднань A . При середньому числі елементів, підключених до вузла сітки, $n=4$ доля ненульових елементів при типовому для ЗП загальному числі елементів $p = 1000$ складає $n/p = 0,4\%$. З урахуванням цієї особливості топологія ланцюга і її параметри задаються топологічним списком — матрицею S , кожен рядок якої описує один елемент. У першому стовпці

записані номери вузлів, з яких гілки виходять, в другому стовпці — номери вузлів, в які гілки входять. Третій стовпець містить номер шару, на які підрозділяється геометрія ЗП. Операції з розрідженими матрицями в (2.13) — (2.15) замінюються послідовними діями із строками матриці S (обробкою топологічного списку), що підвищує ефективність розрахунків ЗП великій розмірності.

Підведемо підсумки. Для формування БЕМЗ моделі ЗП (див. рис. 2.1) необхідно:

- Задати топологічний список (матрицю S), визначуваний автоматично по геометрії ЗП, і вектор джерел струму $J_{\text{ист}}$.
- Методами теорії поля розрахувати особисті і взаємні параметри елементів ЗП — матриці R , L , G , Z , M .
- Визначити матриці вузлової провідності S_u і місткостей схеми S_c .

Розрахунок БЕМЗ моделі ЗП в сталому режимі проводиться методом вузлових потенціалів, але може бути використаний і інший метод.

Багатоланкова електромагнітно зв'язана модель ЗП дозволяє усунути основні проблеми існуючих методик розрахунку ЗП [10], а саме забезпечити коректне обчислення власних і взаємних індуктивностей (місткостей і провідностей) елементів ЗП методами теорії поля, а на їх основі і хвильових параметрів.

Ця модель ЗП дозволяє моделювати хвильові процеси у ВЛ і протяжних заземлювачах з урахуванням затримки і загасання електромагнітної хвилі. Побудована на обліку усіх механізмів зв'язку між елементами БЕМЗ модель ЗП дозволяє вирішувати завдання ЕМС в широкому діапазоні частот для довільної конфігурації ЗП, зокрема за наявності сторонніх заземлених комунікацій.

Серед сформульованих в [10] вимог не вирішеним завданням залишається моделювання безпідставної структури землі, проте її рішення, а також уточнення характеристик елементів ЗП під вищіть точність

параметрів, але не відіб'ється на структурі БЕМЗ моделі ЗП. Наявність нелінійних характеристик (іскровідтворення в землі, коронування дротів, насичення сталі) не є обмеженням для БЕМЗ моделі ЗП при використанні ітерацій аналогічно [4]. Запропонована БЕМЗ модель ЗП може бути доповнена зосередженими елементами — їх провідність підключаються до вузлів схеми (див. рис. 2.1).

2.3 Перехідні процеси в ЗП

Перехідний процес (ПП) при розтіканні імпульсного струму з широким спектром частот виникає в ЗП внаслідок удару блискавки або комутації високовольтного устаткування. Для розрахунку ГІП зазвичай приймаються метод дискретних схем (МДС)[2], частотний метод (ЧМ) - за наявності електромагнітних екранів [3], а також операторний метод ОМ [11].

Застосування ЧМ є природним для обліку частотно-залежних елементів, проте його трудомісткість при аперіодичних діях занадто вища, ніж у МДС. Найбільш ефективними методами розрахунку ПП в ЗП являються МДС і ОМ, реалізація яких з обліком частотно-залежних параметрів розглянута далі.

2.3.1 Метод дискретних схем

Застосуємо неявну формулу Ейлера для інтеграції диференційного рівняння котушки з індуктивністю L (чи взаємною індуктивністю M) і конденсатора C на n -м тимчасовому кроці завдовжки h [8, т.2]:

$$L \frac{di}{dt} = u, \frac{L}{h} (i_{n+1} - i_n) = u_{n+1}, u_{n+1} = \frac{L}{h} i_{n+1} - \frac{L}{h} i_n, \quad (2.17)$$

$$C \frac{du}{dt} = i, i_{n+1} = \frac{C}{h} u_{n+1} - \frac{C}{h} u_n, \quad (2.18)$$

Цим рівнянням відповідають схеми заміщення рис 2.3., де $R = L/h$, $G = C/h$, $E_n = Ri_n J_n = Gu_n$, $h = const$ - довжина кроку. Замінивши котушки і конденсатори в БЕМЗ моделі ЗП (див. рис. 2.1) дискретними схемами (рис. 2.3), зведемо розрахунок ПП в ЗП до покрокового розрахунку резистивної схеми з додатковими джерелами ЕРС і струму, що враховують початкові умови кожного кроку.

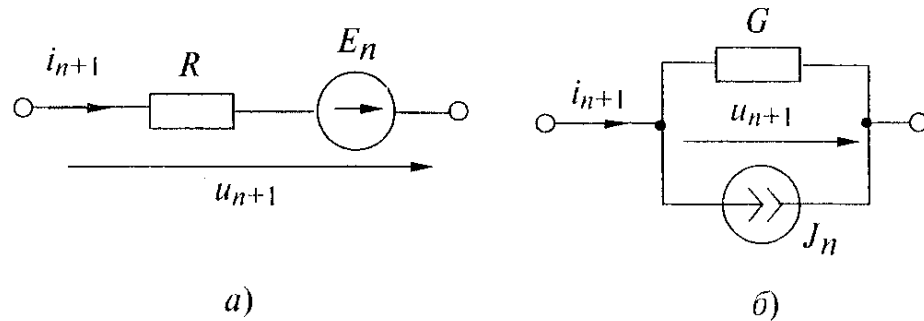


Рисунок 2.3 - Дискретні схеми заміщення котушки (а) і конденсатора (б)

2.3.2 Операторний метод

Скористаємося нестандартною формою теореми про відрахування [12]:

$$f(t) = \sum_{i \cdot z_i} \operatorname{Re} sF(z_i / t) e^{z_i}, \quad z = st, \quad (2.19)$$

де замість полюсів операторної функції $F(s)$ використовуються полюса експоненти.

При апроксимації експоненти дрібно-раціональною функцією третього порядку ($n=1, \tau=2$)

$$e^z \approx \frac{a_0 + a_1 z + \dots + a_n z^n}{1 + b_1 z + \dots + b_m z^m} = \frac{1 + z/3}{1 - 2z/3 + z^2/6}, \quad (2.20)$$

маємо два комплексно-сполучених полюса $z = 2 \pm \sqrt{2}j$ що дозволяє записати теорему про відрахування у вигляді [12]:

$$f(t) = \operatorname{Re}((-2 + 5\sqrt{2}j)F(s)) / t, \quad s = (2 + \sqrt{2}j) / t, \quad t > 0, \quad (2.21)$$

Тут неприпустимі стрибкоподібні функції, але для джерел струму в ЗП ця вимога виконується. Для розрахунку оригіналу потрібно одне обчислення операторної функції. Таким чином, отримана формула третього порядку, що на порядок перевершує формулу трапецій і на два порядки формулу Ейлера. Реалізація крокового алгоритму розрахунку ПП на основі (2.21) полягає в наступному. Замінімо котушки і конденсатори на схемі заміщення (див. рис. 2.1) їх дискретними моделями - рис. 3, де $R = sL$, $G = sC$, $E_n = Li_n$, $J_n = Cu_n$, $s = (2 + \sqrt{2}j) / h$, $h = \text{const}$ - довжина кроку; початкові умови першого кроку нульові. Операторне зображення джерела струму отримуємо прямим перетворенням Лапласа. Проводимо покроковий розрахунок комплексної схеми за формулами (2.13) - (2.15). Рішення у часовій області отримуємо по (2.21). Кроковий алгоритм стійкий при інтегруванні тестового диференціального рівняння $x' = \lambda x$ при $\lambda < 0$, а також більшою частиною правою півплощини при $\lambda > 0$.

Розглянутий алгоритм являється більше точним, але і більше трудомістким в порівнянні з МДС, оскільки призводить до комплексної схеми заміщення ЗП замість резистивної схеми в МДС.

2.3.3 Облік частотно-залежних параметрів у МДС та ОМ.

Типовим частотно-залежним елементом ЗП являється сталевий провідник з урахуванням поверхневого ефекту. Від частоти залежать електромагнітні екрани в завданнях ЕМС, опір землі в завданнях грозозахисту ПЛ.

При інженерних розрахунках ЗП частотної залежністю внутрішнього опору стержнів зазвичай нехтують, проводячи розрахунки за схемою

рис.2.4, а на еквівалентній частоті імпульсу $f=0,25/T_1$, де T_1 - тривалість фронту хвилі. Однак погрішність подібного підходу не аналізувалась. Для обліку частотних залежностей елементів можуть бути побудовані еквівалентні схеми з заданими характеристиками, але в крокових алгоритмах МДС і ОМ використання цієї методики пов'язано з істотним збільшенням числа гілок, що недоцільно. В [13] показана можливість моделювання частотних властивостей елементів послідовною схемою з постійним опором і змінної ЕДС, визначальною початкові умови кожного кроку. Ця ідея реалізується в цій дипломній роботі, але більш просто.

Нехай задано опір частотнозалежного елемента $Z(j\omega)$ або його операторний аналог $Z(s)$. Для переходу під тимчасову область проінтегруємо $Z(s)$ у просторі зображень і, перейдемо до оригіналу, отримаємо перехідний опір $Z(t) = L^{-1}[Z(s)/s]$ пов'язує між собою напругу і струм в інтегралі Дюамеля:

$$u(t) = z(t)i(0) + \int_0^t z(t-x)i'(x)dx \quad (2.22)$$

Скористаємося дискретної формою запису цього інтеграла на тимчасовій сітці з вузлами $t_n = (n-1)h$, $n=1, \dots, N+1$, де N — число інтервалів довжиною h . Прийmemo, що похідна струму в межах величини кожного інтервалу $i'_n = const$.

Тоді

$$U_{n+1} = \sum_{m=1}^n \frac{i_{m+1} - i_m}{h} \int_{t_m}^{t_{m+1}} z(t_{n+1} - x)dx = \sum_{m=1}^n (i_{m+1} - i_m)R_{n-m+1} \quad (2.22)$$

де R_j , $j=1, \dots, N$ — дискретний перехідний опір інтервалу.

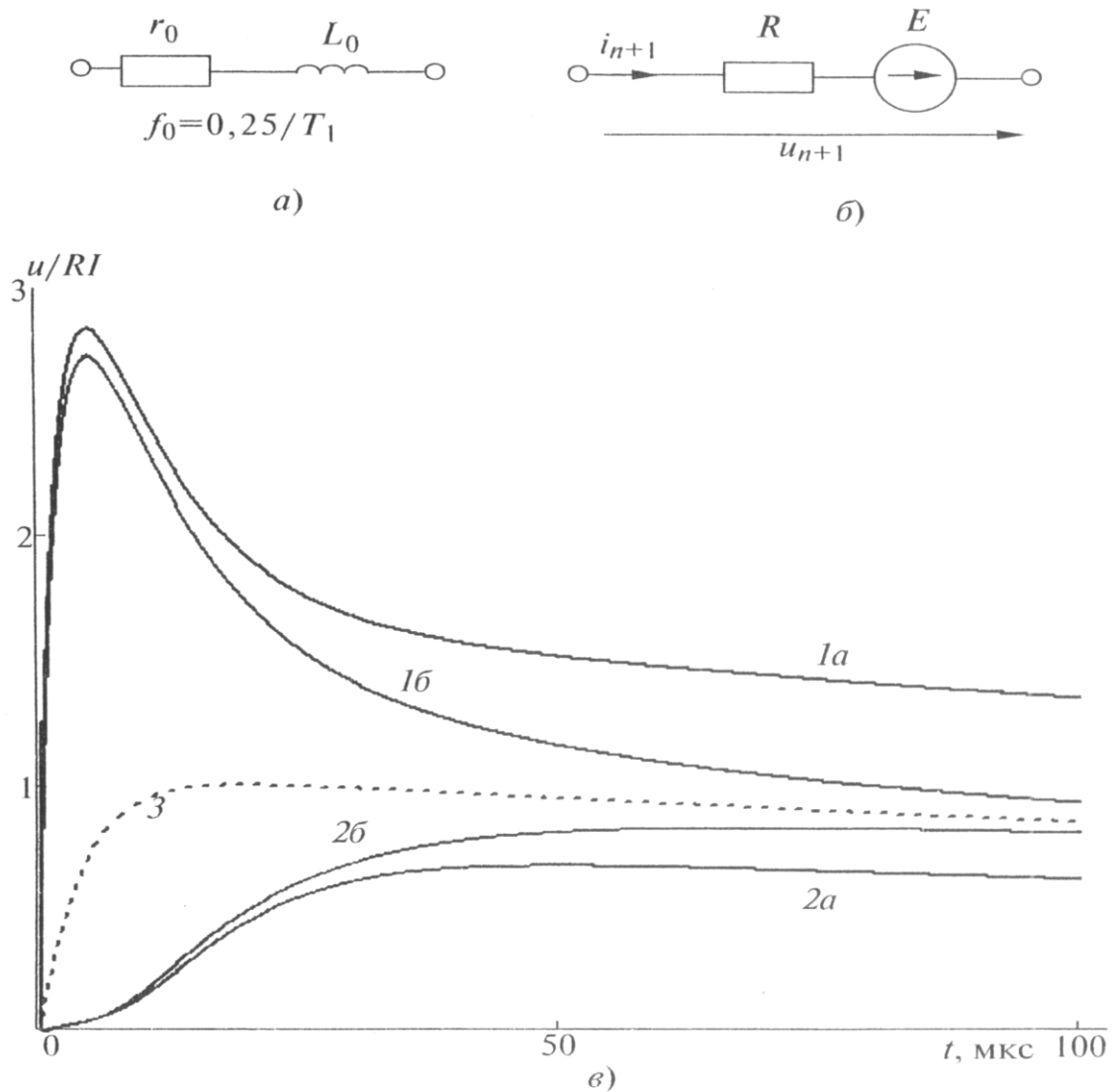


Рисунок 2.4 - Схема заміщення внутрішнього опору сталевго стрижня на еквівалентній частоті (а) і дискретна схема (б) зміни потенціалу сталевго стрижня ($\mu = 600$, $\gamma = 7$ См/м, $L = 100$ м, $D = 16$ мм, $t = 0,5$ м) в однорідній землі ($\rho = 100$ Ом·м, $\epsilon = 10$) на початку (1а і 1б) і кінці (2а і 2б) стержня при імпульсі струму $10/350$ мкс (в); потенціал на стаціонарному опорі R стрижня (3).

Виділяючи перший доданок, остаточно отримаємо:

$$U_{n+1} = R_1 i_{n+1} - \sum_{m=2}^n (R_{n-m+1} - R_{n-m+2}) i_m = R_1 i_{n+1} + E_n \quad (2.23)$$

Виразу (1.23) відповідає дискретна схема заміщення з постійним опором і змінною ЕДС (див. рис. 2.4, б). Ця схема аналогічна дискретній схемі котушки (див. рис. 2.3, а), тому легко реалізується в крокових алгоритмах МДС і ОМ. Таким чином, для обліку частотно-залежних елементів досить знайти дискретні перехідні опори.

2.3.4 Приклад розрахунку

Опір сталевого стержня при різко вираженому поверхневому ефекті має вигляд [8]:

$$Z(s) = \frac{l\sqrt{s\mu/\gamma}}{2\pi a} \quad (2.24)$$

Звідки перехідний опір:

$$z(t) = L^{-1}[Z(s)/s] = \frac{l\sqrt{\mu/\gamma}}{2\pi a\sqrt{\pi t}} \quad (2.25)$$

Дискретні перехідні опори на інтервалах:

$$R_i = \frac{1}{h} \int_{(i-1)h}^{ih} z(y) dy = \frac{1\sqrt{\mu/\gamma}}{a\pi\sqrt{\pi h}} (\sqrt{i} - \sqrt{i-1}), \quad i = 1, \dots, N \quad (2.26)$$

залежать лише від номера кроку і легко перераховуються при зміні параметрів стрижня.

Застосуємо розроблену методику для розрахунку потенціалу сталевого стрижня з урахуванням поверхневого ефекту при дії імпульсу 10/350 мкс і порівняємо результати з даними, отриманими на еквівалентній частоті (див. рис. 2.4, в). Погрішність розрахунку в області максимуму потенціала не перевищує 5%, як в даній задачі, так і для інших типових стержнів ЗП. Низька погрішність (крім адекватного вибору еквівалентної частоти) пояснюється наявністю зовнішньої індуктивності стержня, що не залежить від частоти.

Зі збільшенням часу ($t > T_1$) еквівалентна частота все більше не відповідає поточному моменту часу, тому похибка наближеного розрахунку зростає (див. рис. 2.4). Зіставляючи потенціал стержня з його активною складовою R_j , до якої потенціал прагне по завершенні ПП, бачимо (див. рис. 2.4), що розрахунки на еквівалентній частоті не дозволяють точно визначити постійну часу ПП і стаціонарне опір ЗП.

Таким чином, проста методика розрахунків параметрів сталевих стрижнів на еквівалентній частоті обґрунтована для практично важливої задачі розрахунку перенапруг, але непридатна для синтезу еквівалентних схем заміщення ЗП і ряду інших завдань.

2.3.5 Результати моделювання

Розглянута математична модель і методи розрахунку ЗП реалізовані в Mathcad-програмі ЗУМ, що дозволяє проводити розрахунки ЗП, систем блискавкозахисту, зрівнювання потенціалу електричних станцій і підстанцій. Головною проблемою є висока розмірність задачі при обмежених ресурсах 32-розрядної операційної системи. Рішенням є формування адекватних розрахункових моделей обмеженої розмірності (до 2000 елементів) для конкретного режиму і заміна фрагментів ЗП еквівалентними ЛХС-схемами з заданими частотними характеристиками.

Введення геометрії ЗП виділений в окреме завдання, вирішуване в системі AutoCAD з пошаровою деталізацією. Активні шари в dxf-форматі

імпортуються в системі Mathcad, де проводяться розрахунки. Компіляція трудомістких операцій, не реалізованих стандартними функціями, дозволяє обмежити час рахунку декількома хвилинами. Результати зображуються тривимірними графіками і анімаційними файлами.

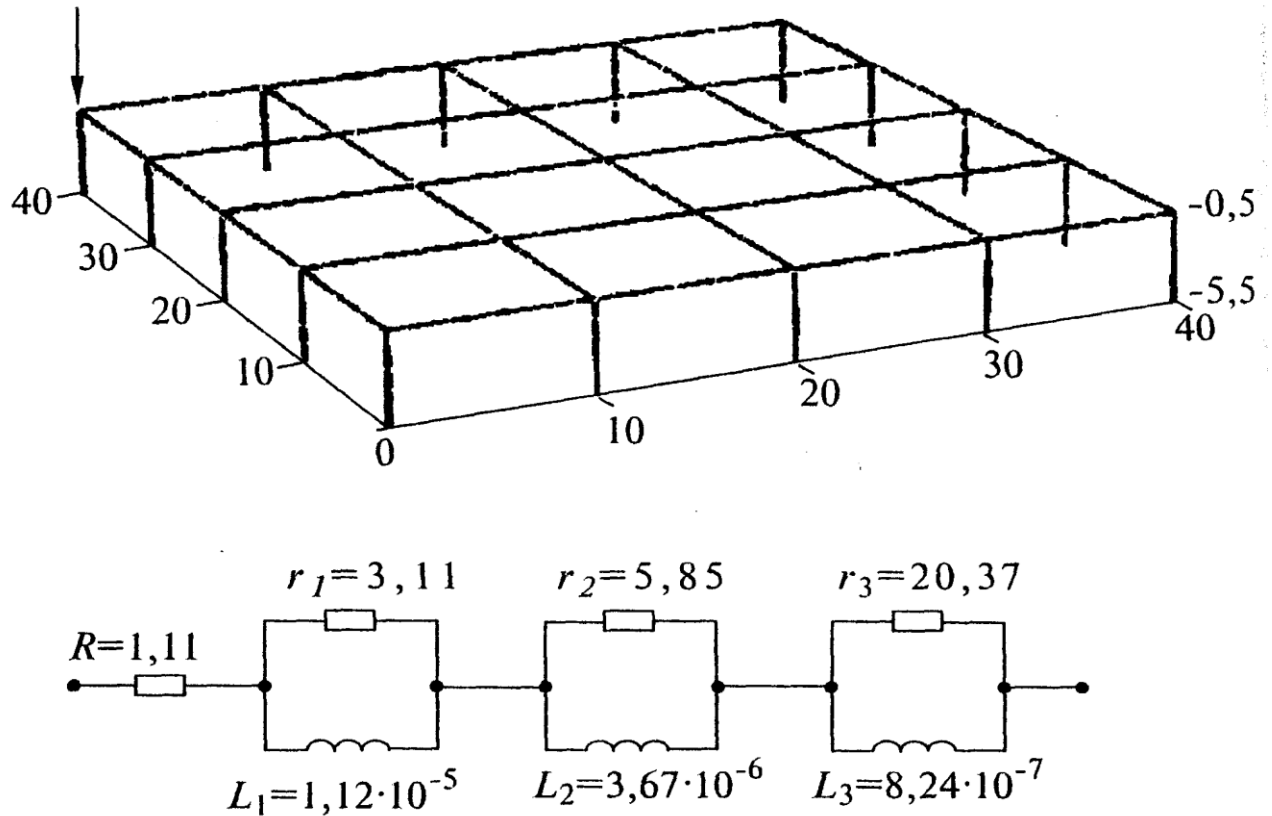


Рисунок 2.5 - Схема заміщення заземлювача з мідних стрижнів
($\gamma = 5,6 \cdot 10^7 \text{ См/м}$, $D = 20 \text{ мм}$, $t = 0,5 \text{ мм}$) в однорідній землі
($\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\varepsilon = 10$).

Середня похибка розрахунку статичного опору ЗП в 12 задачах [1] становить 2%. До аналогічних погрешностей призводить зіставлення вхідного опору стрижня, розрахованого за БЕМЗ моделі ЗП і рівнянням довгої лінії при $1 \leq \lambda < 10$, де λ — довжина електромагнітної хвилі. При впливі імпульсних струмів спостерігалися запізнювання хвилі, дворазове посилення струму в режимі КЗ і напруги в режимі х.х. в кінці лінії без втрат. Засобом зниження похибки є зменшення довжини елемента. У цілому

похибка реалізації БЕМЗ моделі ЗП в межах прийнятих припущень будемо оцінювати в 5%.

У програмі ЗУМ реалізована процедура синтезу еквівалентних RLC-схем заміщення ЗП, які, крім практичних додатків, є зручним засобом тестування. В якості прикладу знайдемо схему заміщення заземлювача (рис. 2.5) щодо кутовий точки. Розрахуємо перехідний опір $z(t)$, який відповідає схемі заміщення (рис. 2.5), яка застосовується для частотного діапазону $f \leq 1$ МГц з похибкою до 2%.

Висновки до розділу

Розроблено математичну модель ЗП у вигляді багатоланкової схеми з симетричними електромагнітозв'язаними П-подібними чотирьополіусниками (БЕМЗ модель ЗП) та визначено її параметри.

Розрахунок сталих процесів в режимі КЗ проводиться методом вузлових потенціалів. Розрахунок перехідних процесів в імпульсних режимах проводиться методом дискретних схем і операторних методом з урахуванням частотно-залежних елементів.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ҐРУНТУ ВІД ВОЛОГОСТІ І ТЕМПЕРАТУРИ

3.1 Загальний стан проблеми

При проектуванні і розрахунку заземлюючих пристроїв використовуються залежності [14,1], в котрих входить питомий електричний опір ґрунту, що стикається з заземлювачем (ρ), значення якого можуть коливатися від 10^{-6} Ом·м (графіт) до 10^6 Ом·м (кам'яна сіль) [16]. Крім того, цей опір вельми істотно залежить від вологості, температури і структури породи [3].

Найвні в літературі емпіричні формули і сезонні коефіцієнти дають можливість отримати для різних ґрунтів лише дуже приблизну картину зміни ρ в залежності від перерахованих вище параметрів [1-14]. Так, при розрахунку ρ піску за формулою [16]:

$$\rho = a\rho_w \Phi^{-m} S^{-n} \quad (3.1)$$

(де ρ_w — питомий електричний опір міститься в породі води, Φ - пористість; S - частка порового об'єму, заповненого водою; m, n - емпіричні параметри).

Вважаючи відповідно до [1] для річкової води $\rho_w = 10$ Ом·м; $\Phi = 0,15$; $a = 0,62$; $m = 2,15$, отримуємо $\rho_1 = 6 \cdot 10^7$ Ом·м для порового простору менше 30% і $n = 10$, $i = 370$ Ом·м для $S = 1$. У роботі [1] для сухого піску $\rho_1 = 1500 \div 4200$ Ом·м і для піску, сильно зволожені ґрунтовими водами, $\rho_2 = 10 \div 60$ Ом·м.

Аналогічні розбіжності з результатами розрахунків показали і наші експерименти (див. далі). Вони підтвердили, що формула розрахунку опору вологоутримуючого ґрунту в залежності від температури [16]:

$$\rho = \rho_{20} e^{-0,022(t-20)} \quad (3.2)$$

де ρ_{20} - питомий опір при температурі 20 °С;

t - температура ґрунту застосовна, як стверджують і її автори, тільки для позитивних температур.

Щодо негативних температур відмічається, що при замерзанні порової вологи ρ ґрунту зростає в кілька разів, але яка закономірність цього росту в залежності від вологості в [1-14], як і в інших відомих нам джерелах, не вказується.

У дипломній роботі зроблена спроба розробити методикку побудови моделі для визначення залежності питомої електричного опору від вологості і температури, придатну для любого типу ґрунту. Від температури - за допомогою експерименту та побудови звичайних регресійних залежностей, від вологості - за допомогою регресійного моделювання з застосуванням розробленої Лотфі Заде теорії нечітких множин (ТНМ), що дозволяє виконувати завдання з непаркими вихідними даними [17]. У нашому випадку нечітко характеризується вологість, наприклад, «сухо» - це, коли вологість складає приблизно від 0 до 5%, «помірно волого» - приблизно від 4 до 14%, «сильно волого» - від 12% до насичення ґрунту вологою. Але можна вважати «сухо», коли вологість становить від 0 до 3%, а «волого» - від 2% до насичення. І перший і другий варіанти правомірні через відсутність чіткої межі між лінгвістичними поняттями «сухо» і «волого». З тієї ж причини правомірні і перекриття інтервалів між ними (перекриття мають особливе значення в ТНМ) і те, що ми відносимо, наприклад, 4,5% і до «сухо» і до «помірно волого». Для отримання об'єктивного результату і оцінки впливу на нього кількості і широти меж цих понять будемо розглядати дві моделі з наведеними трьома і двома

нечіткими перекриваючими один одного інтервалами. Попередньо сформулюємо основні постулати ТНМ. Нечіткою множиною називають множину A , для якої функція $\mu_A(x)$ приналежності елемента x до A може приймати будь-які значення від 0 до 1 (таким чином розширюється Канторова поняття множини). При цьому $x \in A$, При цьому, де E - універсальна безліч, що має деяку властивість R , причому A - підмножина в E $E(x \in A)$, і для елементів x в A немає однозначної відповіді «так», «ні» щодо властивості R . Між областями, де має значення 0 і 1, існує так звана область перемикання (перекриття). У ній і працює функція $\mu_A(x)$, визначаючи наскільки дане значення (наприклад 4,5% вологості) належить обраної, часто дуже приблизно, інтервалу. Це пояснює необхідність мати перекриваючі інтервали в наших моделях.

3.2 Опис моделі для визначення залежності електричного питомої опору від вологості

Для кожного виду ґрунту розробляється система розмитих правил, яка відповідно до роботи [17] в загальному вигляді записується наступним образом:

$$\begin{aligned} &IF(x_1 \in A_{1i})I(x_2 \in A_{2i})I...I(x_k \in A_{ki}); \\ &THEN y = \eta_i(x), i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (3.3)$$

де A_i — нечітке підмножина, тобто нечіткий інтервал для змінної x_j с функцією приналежності $\mu_A(x)$;

N — число правил (число інтервалів); $y = \eta_i(x)$ — функція, що визначає локальне рішення моделі від набору $x = (x_1, \dots, x_k)$.

Для одновимірної залежності (мова йде о параметрі вологість ґрунту) система розмитих правил (3.3) набуває вигляду:

$$IF x \in A_i THEN y = \eta_i(x), i = 1, \dots, N, \quad (3.4)$$

де A_i мають функцію приналежності $\mu_{A_i}(x)$.

Для визначення функцій приналежності використовуємо прямий метод [17], в якому для кожного $x \in A$ задається значення $\mu_A(x)$. Це правомірно, оскільки метод застосовується для вимірних понять, таких як тиск, температура і т.д., а вологість, безсумнівно, відноситься до цих понять.

Для опису нечіткої належності до інтервалів прийняті, як це зазвичай робиться при вирішенні завдань з використанням нечітких множин, експоненціальні функції:

$$\mu_{A_1}(x) = e^{-c(x-d)^2} \text{ и } \mu_{A_2}(x) = 1 - e^{-c(x-d)^2} \quad (3.5)$$

де коефіцієнти c і d характеризують ступінь нечіткості (плавність перемикавання) і положення на числовій осі параметра вологість (початок нечіткої межі); коефіцієнт c визначається методом безпошукової ідентифікації, d - нашим поданням про поняття вологість, наприклад у другому розглянутому варіанті це цифра 2 (2%).

Для отриманої моделі функції приналежності мають вигляд, показаний на (рис. 3.1), де $v = x$, а v - вологість. Значення інтервалів вологості v_1 («сухо») і v_2 («волого») спочатку визначались дуже приблизно, а потім уточнювались на основі експериментальних даних (див. далі). Зауважимо, що в області перемикавання, де сусідні μ_i і μ_{i+1} мають нульові значення, завжди виконується рівність $\mu_{i+1} = 1 - \mu_i$.

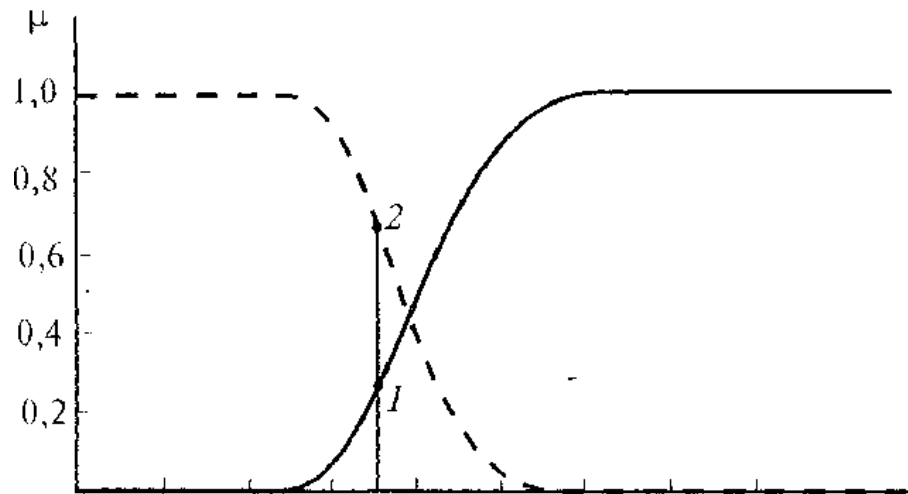


Рисунок 3.1 - Сімейство функцій приналежності для нечітких інтервалів вологості: функція належності до інтервалу значень «сухо» (v_1); до інтервалу «волого» (v_2).

Визначити на рис. 3.1, до якого інтервалу приналежить, наприклад, пісок вологістю 2,8%, можна за значенням функції приналежності, відновив перпендикуляр з точки 2,8 до перетину з обома лініями. Тоді приналежність до інтервалу «сухо» характеризується значенням $\mu_1=0,34$ (Точка 1), а до інтервалу «волого» значенням $\mu_2=0,66$ (точка 2). При вологості 4,5% $\mu_1=0,02$, $\mu_2=0,98$.

При моделюванні ρ функції $\eta_i(v)$ визначались у вигляді:

$$\eta_i(x) = b_0 + b_1 v, \quad \eta_i(x) = b_0 + b_1 v \quad (3.6)$$

де v - вологість ґрунту; b_0 и b_1 — параметри рівняння регресії, які оцінюються за методом найменших квадратів для кожного з інтервалів окремо.

Загальний вигляд моделі питомого опору:

$$\rho = \sum_{i=1}^M \eta_i(v) \mu_{A_i}(v) \quad (3.7)$$

Для визначення параметрів моделі створена лабораторна установка, що дозволяє проводити експерименти при температурах від +20 до -20 ° С при зміні вологості приблизно від 0 до насичення ґрунту водою 18 ÷ 25%.

3.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка (рис. 3.2) виготовлена з органічного скла у вигляді лабіринту для збільшення довжини провідного шару. Електроди виконані з мідної пластини, розміри електродів 44x40 мм, довжина провідного шару ґрунту 1,65 м, перетин шару дорівнює площі електродів. Загальний обсяг розміщується в установці ґрунту 0,003 м³. У неї вміщався ґрунт певній вологості і температури. Для визначення вологості зразок ґрунту висушується, зважувався, змочують і зважувався знову. Температура контролювалась за допомогою термометрів, встановлених в різних точках. Їх свідчення були практично однакові. Через незначної товщини ґрунту різниця температур в нижньому та верхньому шарах ґрунту була менш 0,2 ° С. Установка підключалася до джерела змінного струму з частотою 50 Гц. Опір ρ вимірювалися при трьох різних напругах $U_1 < U_2 < U_3$, результати вимірювань усереднювались. Значення напружень (не перевищували 220 В) $U_1 < U_2 < U_3$ підбиралася таким чином, щоб і їх і струми, які вони створювали, можна було заміряти з відносною похибкою не перевищують 4-10%. Наприклад, при проведенні експериментів з супесчанним ґрунтом 17%- вологості на пластини подавалася напруга 60, 80, 100 В при позитивних значеннях температури. Потім при зниженні температури

двох і визначати функції приналежності для трьох нечітких підмножин вологості). Аналіз експериментальних даних (рис. 3.3) і розроблених систем нечітких правил для піску і супіски дозволив привести кордону нечітких інтервалів вологості до одного значення (через їх незначного відзнаки). Так на інтервалі вологості від 0 до 2% характер зміни $\rho(v)$ (функція $\eta_1(v)$) різко відрізняється від характеру зміни ρ на інтервалі від 6% і до насичення (функція $\eta_2(v)$). На інтервалі від 0 до 2% сильніше вплив властивостей електропровідності ґрунту, а при збільшенні вологості параметр ρ вже більше залежить від води, що міститься в ґрунті. Після приведення системи нечітких правил для піску і супіски до єдиного вигляду модель стала виглядати наступним чином: число нечітких інтервалів $N = 2$, перший інтервал $0 < v < 2$, другий інтервал $v > 6$, область перемикання $2 < v < 6$,

Функції приналежності $\mu_A(v)$:

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, & 0 \leq v < 2 \\ e^{-0,8(v-2)^2}, & 2 \leq v \leq 6; \\ 0, & v > 6 \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < 2 \\ 1 - e^{-0,8(v-2)^2}, & 2 \leq v \leq 6. \\ 1, & v > 6 \end{cases}$$

Відзначимо, що числа 2 і 6 у формулі (3.8) - кінець і початок інтервалів на осі «вологість» (рис. 3.1), і при уточненні визначені (у відсотках) приблизно.

Виходячи з (3.6) - (3.8), отримано такі залежності питомих опорів для піску і супіску ρ_{II} і ρ_C від вологості при 20 °С:

$$\rho_{II} = 6,83 \cdot 0,39^v \mu_1(v) + 1,48 \cdot 0,89^v \mu_2(v), \text{ кОм} \cdot \text{м} \quad (3.9)$$

$$\rho_C = 95,6 \cdot 0,1^v \mu_1(v) + 0,32 \cdot 0,8^v \mu_2(v), \text{ КОМ} \cdot \text{М}$$

Параметри першої функції $\eta_1(v)$ обчислювалися при зміні вологості в інтервалі від 0 до 3%, тобто від сухого до злегка зволоженого стану, другий — $\eta_2(v)$ в інтервалі від 3% до насичення ґрунту водою. Аналогічно (9) для піску і супіски побудовані залежності ρ від v при інших температурах. Вони представлені на рис. 3.3 на логарифмічних координатах (логарифм при основі 10) і на інтервалі від 5% до насичення майже скрізь співпадають з експериментальними точками. При зменшенні вологи від 5% до нуля відхиляються від них незначно. Тому форма смуги розсіювання експериментальних точок не показана, і криві рис. 3.3 можна використовувати для визначення динаміки зміни ρ даного виду ґрунту в діапазоні від +20 до -20 ° С при будь-якої вологості.

3.5 Опис і Аналіз одержуваної залежності ρ від t

Як показали наші експерименти з піском і супіском (криві 1-3 на рис.3.4), ці залежності в діапазоні негативних температур навіть орієнтовно не описуються формулою (3.2), за якою побудована крива 4. При сухому ґрунті з пониженням температури ρ зменшується по експоненті. При вологому - в районі від 0 до - 1 ° С відбувається різке збільшення ρ , для піску і супіски може бути обчислено за такими формулами, отриманими за координатами експериментальних точок шляхом вибору (з-за менших похибок апроксимації) функції у вигляді многочлена та визначення його коефіцієнтів з рішення системи лінійних рівнянь::

$$\begin{aligned} \rho_{П1} &= \rho_{П0} (-342,8v^2 + 85,5v - 0,87) \\ \rho_{С1} &= \rho_{С0} (236v^2 - 2,21v + 1,15) \end{aligned} \quad (3.10)$$

де $\rho_{п0}$ і $\rho_{с0}$ — питомі опору піску і супіски при 0, а $\rho_{п1}$ і $\rho_{с1}$ при -1°C .

Подальша зміна температури від -1 до -20°C веде до збільшення ρ відповідно до наступних залежностей, побудованими аналогічно (3.10):

$$\rho_{п} = \rho_{п1}^{0,87^{(i+1)}}; \rho_{с} = \rho_{с1} 0,88^{(i+1)} \quad (3.11)$$

Аналіз значень ρ , отриманих за допомогою розробленої моделі, показує, що вони знаходяться в діапазонах, зазначених в [15]. Відзначимо, що розглянута методика дає можливість знайти електричні характеристики шаруватих ґрунтів, визначивши ρ кожного шару і використовуючи метод оптичної аналогії [15] (ρ входять до рекурентних формул методу).

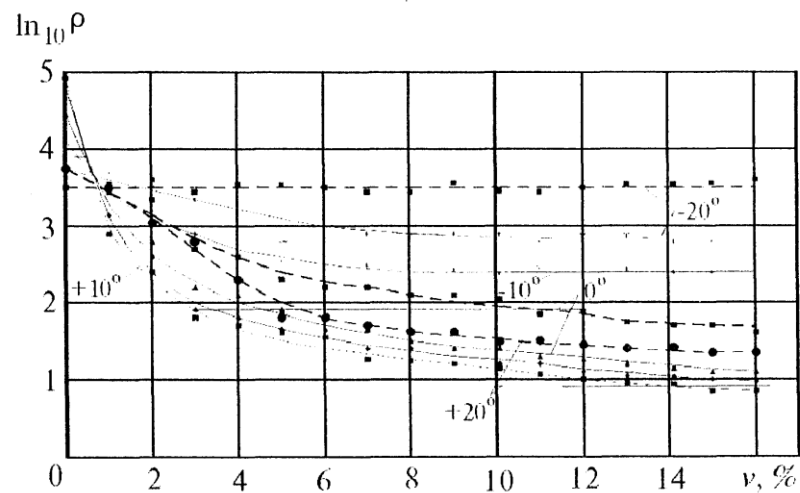


Рисунок 3.3 - Залежності ρ от v для супіску (-----) та піску (- - -) при різних температурах

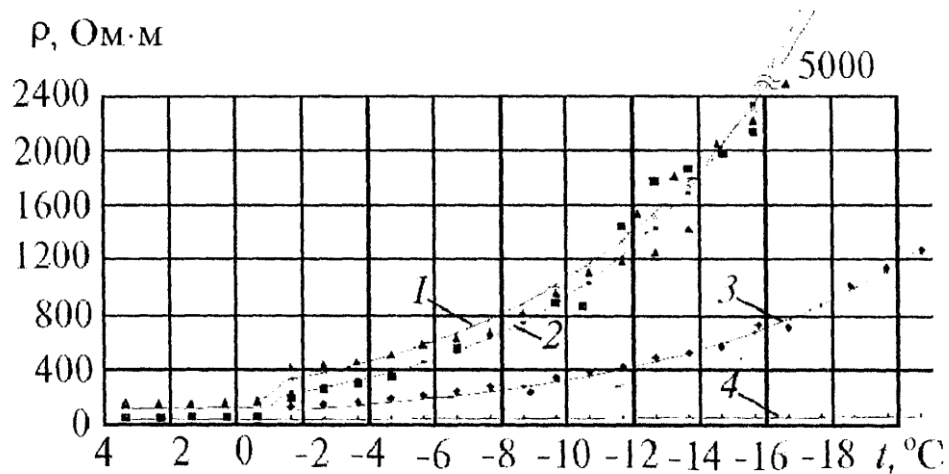


Рисунок 3.4 - Залежності питомого електричного опору ρ від температури t : 1 - для піску вологістю 5%; 2 - для піску вологістю 16%, 3 - для супіски вологістю 16% (1-3 - побудовані по (10) і (II)); 4 - для піску вологістю 16% (за формулою (2)); експериментальні данні: ■ — пісок 16%; ♦ — супісок 16%; ▲ — пісок 5%

3.6 Побудова моделі

Після збору лабораторної установки експериментально знаходиться ρ для $t = 20^\circ\text{C}$ при різних значеннях вологості досліджуваного ґрунту. Визначається число інтервалів вологості та їх межі. Для кожного з інтервалів методами обробки експериментів відшукуються вигляд функції $\eta_i(v)$ і її параметри. З використанням ТНМ знаходяться функції приналежності $\mu_A(v)$. За (3.7) обчислюється значення ρ_{20} ґрунту при заданій вологості і потім ρ по (3.2) для будь-якого $t \geq 0$.

Для $t < 0$ відповідно до зазначеного раніше знаходиться ρ при 0°C . Потім за формулами, аналогічним (3.10) і (3.11), обчислюються ρ при -1°C , якщо $-1^\circ\text{C} \geq t_1 \geq -20^\circ\text{C}$.

Висновки до розділу

Розроблена методика дозволяє будувати моделі для визначення питомого електричного опору ρ будь-якого типу ґрунту від вологості і температури з достатньою для практики точністю.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ОПОРІВ ЗАЗЕМЛЮВАЧІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Значення імпульсного опору заземлювачів опори справляє визначальний вплив на захищеність ПЛ від прямих ударів блискавки. Струми повторних розрядів блискавки I мають в 2 рази менше значення, але на порядок більшу крутизну. При цьому збільшується індуктивна складова імпульсного опору так, що зосереджені заземлювачі можуть стати протяжними.

При зменшенні часу передрозряду збільшується пробивна напруженість ґрунту, що зменшує іскроутворення в землі. Однак пробивна напруженість ґрунтів визначена тільки для протікання головного розряду блискавки.

Як відомо, найбільші труднощі виникають при спорудженні заземлювачів в піщаних ґрунтах (не рахуючи скельних ґрунтів). Заземлювачі на ПЛ виконуються, в основному, у вигляді вертикальних труб (стрижневих заземлювачів), горизонтальних смуг (променевих заземлювачів) або їх поєднань.

При розрахунках приймемо деякі допущення:

- нехтуємо нелінійністю вольт-амперної характеристики ґрунту, а також поздовжнім активним опором заземлювачів; вважаємо, що еквіградієнтні поверхні заземлювачів співпадають з екіпотенціальними;
- вважаємо струм заданим, тому що опір каналу блискавки набагато більше опору заземлювача.

4.1 Вертикальні заземлювачі

Підраховані раніше імпульсні опір заземлювачів ПЛ [18,19] відповідають найбільш ймовірного часу з моменту початку перебігу струму блискавки першого розряду, рівному 3-10 мкс. Імпульсний опір стрижневих

заземлювачів довжиною L і радіусом r_0 підраховувалася за формулою без урахування ємності й індуктивності заземлювача:

$$R_n = (\rho / 2\pi l) \ln + (1 + \sqrt{1 + (r_\phi / l)^2 l / r_\phi}), \quad (4.1)$$

де $r_\phi = (\sqrt[3]{(1/2 + M)} + \sqrt[3]{(1/2 - M)})r_{\phi.m.}$ - фіктивний (еквівалентний по опору) радіус зони іскроутворення;

$$M = \sqrt{(1/4 + 1/27(l/r_{\phi.m.})^6)}, \quad (4.2)$$

$$r_{\phi.m.} = \sqrt[3]{((I / 2\pi E_{np})^2 / r_0)}, \quad (4.3)$$

Ці формули справедливі при довжині заземлювача $l_k \leq 2\pi\epsilon\epsilon_0\rho$, де ρ - $\epsilon\epsilon_0$ — питомий електричний опір і діелектрична проникність ґрунту відповідно; $v = 1/\sqrt{LC}$ - швидкість поширення хвилі в землі; E_{np} - пробивна міцність ґрунту в однорідному електричному полі; $r_{\phi.m.}$ — радіус зони іскроутворення точкового джерела.

Якщо розглядати стрижневий заземлювач як глибинний, в загальному випадку необхідно враховувати його індуктивність L і ємність C . Крім того, якщо довжина більше критичної l_k , у виразі для імпульсного опору довгої лінії виникають експоненціальні складові [20]:

$$Z_{II} = R_{II}(1 - (1 - \exp(-2\delta t)) / 2\delta t) + (L_p l_p / 3t)(1 - 9/4 \ln(l_p / r_0)) - 3S / \pi^2, \quad (4.4)$$

де R_{II} визначається за (4.1 - 4.3), причому в (4.3) вноситься уточнення, що з урахуванням параметрів протяжного заземлювача:

$r_{\phi.з.} = \sqrt[3]{(1/r_0)((\rho I f)/(2\pi E_{np}))^2}$; $\partial = 1/\varepsilon\varepsilon_0\rho$ - коефіцієнт загасання довгої лінії;

$$\sum_{n=1}^m (1/n^2)[(1 - (\ln n\pi y))/(\ln(l/r_0)) \times (1 + \partial/\sqrt{\partial^2 - n\pi/\tau_p})^2 \exp(-\partial - \sqrt{\partial^2 - (n\pi/\tau_p)^2}t)], \quad (4.5)$$

сума кількох експоненційних складових, причому m - ціле число без дробової частини: $m \leq l_p/l_k$;

$$f = 1 - (1 - \exp(-2\partial t) + L_p l_p (1 - \exp(-\partial t))/3tR_0), \quad (4.6)$$

наближене значення імпульсного коефіцієнта заземлювача при малому струмі;

$$R_0 = (\rho/2\pi l) \ln(2l/r_0), \quad (4.7)$$

опір розтіканню заземлювача при малому струмі при промисловій частоті;

$$L_p = 0,2(\ln(l_p/r_0) - 0,31), \quad (4.8)$$

питома розрахункова індуктивність; $\tau_p = l_p/v$; $l_p = vt/2$ — розрахункова довжина. Інша частина заземлювача як би відкидається. Імпульсний опір визначається до часу, рівного тривалості фронту. При цьому повний струм блискавки I стікає з заземлювача довжини, яка може бути багато менше повної довжини заземлювача.

Як видно з (4.4), формула імпульсного опору складається зі стаціонарного опору, ємнісної та індуктивної складових. При цьому у (4.4), на відміну від [19], введені більш точні вирази для ємнісної й індуктивної складової з [20] для обліку малої тривалості фронту струму повторних блискавок.

4.2 Горизонтальні заземлювачі

Імпульсний опір променевих і протяжних заземлювачів, прокладених вздовж поверхні землі, що раніше визначалося за умови, що у протяжних заземлювачах радіус зони іскроутворення набагато менше довжини заземлювача [19, 20]. Це не відповідає скороченню розрахункової довжини при малій тривалості фронту повторних блискавок.

При підрахунку імпульсного опору протяжних заземлювачів розрахункова довжина $l_p = vt/2$ (як і для глибинного заземлювача). Щоб врахувати збільшення радіусу зони іскроутворення до довжини заземлювача і навіть далі, розглянемо протяжний заземлювач та його дзеркальне зображення в «безмежній» землі.

4.3 Фіктивний радіус зони іскроутворення

Якщо нехтувати нелінійністю вольт-амперної характеристики ґрунту, то зниження імпульсного опору при великих імпульсних струмах відбувається тільки за рахунок іскроутворення в землі і збільшення таким чином розмірів заземлювача.

Струм I , який стікає із заземлювача, заданий, і такий же струм стікає із дзеркального зображення. У наслідку напруженість на межі зони іскроутворення залежить від двох струмів: власного струму і струму дзеркального зображення, яке розташоване на відстані $2h$, де h - глибина закладення заземлювача:

$$E = E_1 + E_2 = (\rho If / 2\pi)(1/r_\phi \sqrt{(r_\phi^2 + l^2)} + 1/(r_\phi + 2h) \sqrt{(r_\phi + 2h)^2 + l^2}), \quad (4.9)$$

де імпульсний коефіцієнт f визначається за (4.6).

Критична напруженість на кордоні зони іскроутворення

$$E_k = E_{np} \sqrt{(r_0 / r_\phi)}. \quad (4.10)$$

Прирівнюючи (4.9) і (4.10), отримуємо рівняння для визначення фіктивного радіуса зони іскроутворення:

$$E_{np}\sqrt{(r_0/r_\phi)} = (\rho If / 2\pi)(1/r_\phi\sqrt{(r_\phi^2+l^2)} + 1/(r_\phi+2h)\sqrt{(r_\phi+2h)^2+l^2}), \quad (4.11)$$

Напруга на заземлювачі в місці введення струму визначається за (4.4) і (4.5). Однак стаціонарний імпульсний опір враховує розташування заземлювача уздовж поверхні землі:

$$R_H = (\rho / 2\pi l_p) \ln[(1 + \sqrt{1 + (r_\phi + l_\phi)^2}) \times (1 + \sqrt{1 + ((r_\phi + 2h) / l_p)^2}) / r_\phi(r_\phi + 2h)l_p^2] \quad (4.12)$$

Щоб розраховувати імпульсний опір за наведеними формулами, необхідно мати параметри заземлювачів та прилеглого до них ґрунту. У тому числі потрібно визначити пробивну міцність ґрунту в однорідному електричному полі, а також перевірити, чи буде розвиватися іскроутворення за такий короткий час.

4.4 Пробивна напруженість ґрунту в однорідному електричному полі

Іскроутворення на заземлювачі починається, коли напруженість на його поверхні досягає значення, що визначається в однорідному електричному полі, незважаючи на те, що розрахункове поле навколо заземлювача - циліндричне. Це впливає як з багатьох натурних випробувань, так і з результатів моделювання.

На рис. 4.1 наведені залежності пробивних напруженостей в однорідному електричному полі від часу передрозряду для піщаного ґрунту. Ці пробивні напруженості отримані при пробою проміжку 4 мм в однорідному електричному полі - між кулями діаметром близько 5 см в піщаному ґрунті (без домішки перегною). Напруга - лінійно наростаючий. З

рис. 4.1 видно, що чим менше часу тим більше залежність пробивної напруги від часу. Штриховими лініями показані оціночні залежності. При цьому пробивна електрична міцність піску в однорідному електричному полі може досягати 40 кВ / см. Зі збільшенням питомого опору ґрунта відбувається в основному збільшення пробивної напруженості ґрунту.

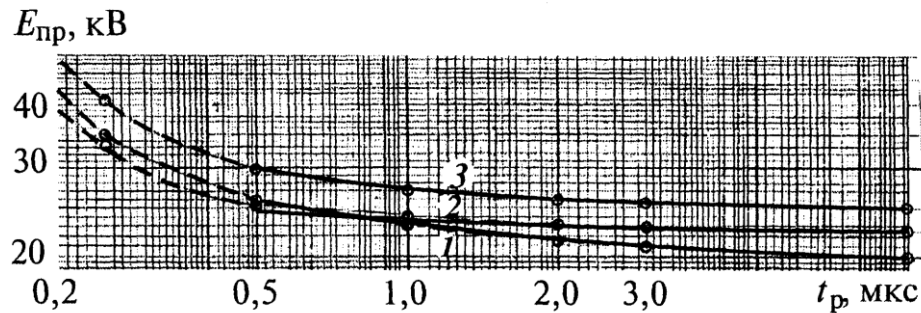


Рисунок 4.1 - Залежності пробивної напруженості піщаного ґрунту в однорідному електричному полі від часу перерозряду: 1 - $\rho = 500$ Ом; 2 - 2000 Ом; 3 - 10000 Ом

4.5 Дослідження іскроутворення на моделі

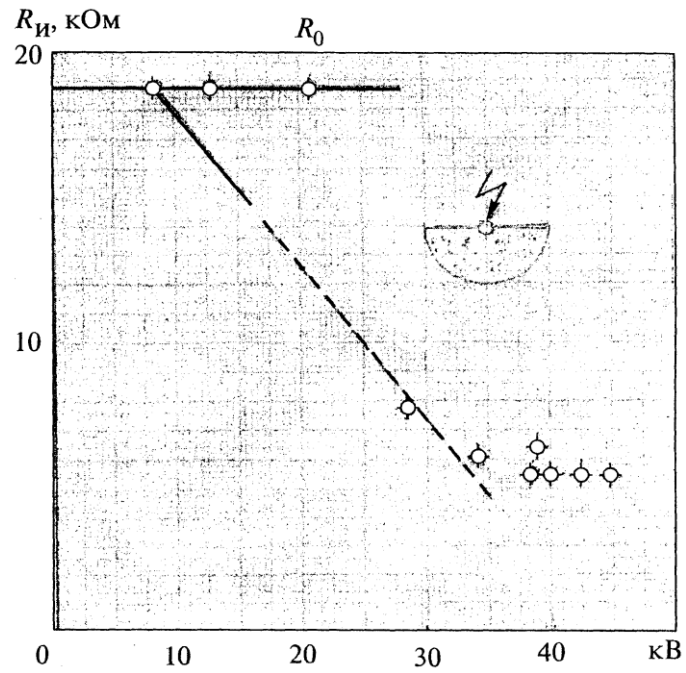
Дослідження іскроутворення навколо заземлювача в піщаному ґрунті проводилося в циліндричних конденсаторах. Перевірялися основні закономірності іскроутворення в землі: початок іскроутворення при пробивній напруженості в однорідному електричному полі і подальший розвиток іскроутворення по критичній напруженості, яка визначається за (4.10), в тому числі можливість одержання досить низьких імпульсних коефіцієнтів (таких, як при часі 3-10 мкс).

Результати лабораторних експериментів представлені на рис. 4.2 пісок також не містив перегною. Модель № 1 була «коритної» форми, так що провід радіусом 1 мм лежав на поверхні піску. Торці моделі були виконані з оргскла для зручності спостереження за іскроутворенням в піску. Однак це виявилось неможливим навіть у повній темряві. Але як тільки дріт був відокремлений від піску, по всій його довжині стало видно дуговий розряд у

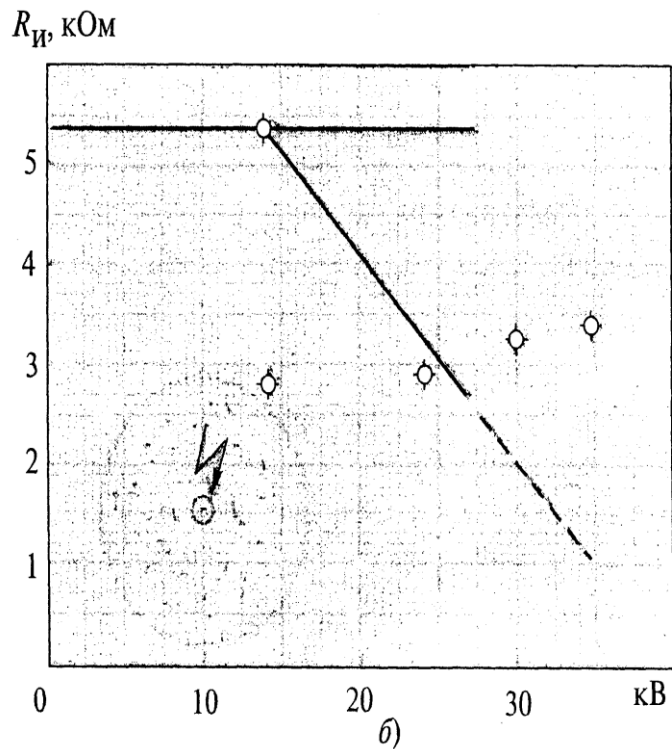
вигляді яскравого спалаху. Представляється, що коронування в повітрі і іскроутворення в землі істотно відрізняються. Іскри в землі представляє величезним числом окремих стримерів дуже малого діаметру. З збільшенням довжини стримерів - радіуса іскроутворення - діаметр закінчення стримера зменшується, в результаті чого критична напруженість падає відповідно до формули (4.10). Велике число стримерів підкріплює теорію іскроутворення у вигляді циліндра навколо заземлювача. Час фронту імпульсу склало 1 мкс. При цьому часі в однорідному електричному полі пробивна міцність дорівнює 25 кВ / см.

Для поліпшення стабільності результатів при висиханні піщаного ґрунту, а також для збільшення діаметру була виконана модель № 2 більшої довжини і більшого діаметру. Довжина фронту імпульсу 0,5 мкс, але струм і напруга вимірювалися за осцилограмами при часі 0,2 мкс. При цьому часі пробивна міцність (за рис. 4.1) близько 40 кВ / см.

Як видно з рис. 4.2, результати експериментів у загальному збігалися з розрахунками. Однак необхідно відзначити великий розкид результатів, нехарактерний для імпульсів з фронтом 3-10 мкс. При зменшенні часу з 1 до 0,2 мкс (у 5 разів) імпульсний коефіцієнт збільшився з 0,3 до 0,55 (в 1,8 рази).



а)



б)

Рисунок 4.2- Залежність імпульсного опору від напруги:
 а — моделі № 1: $t = 1$ мм, $D=15,2$ см, $\rho = 2700$ Ом·мм, $E_{пр}=25$ кВ/см, $t = \tau_{фр} = 1$ мкс;
 б — моделі № 2: $t = 1,4$ мм, $D=26,5$ см, $\rho = 1620$ Ом·мм, $E_{пр}= 40$ кВ/см, $t = 0,2$ мкс, $\tau_{фр} = 0,5$ мкс; результати ----експерименту;-----розрахунок

4.6 Результати розрахунків імпульсних коефіцієнтів

Результати розрахунків за формулами (4.1) - (4.4) представлені в табл. 3.1.

Таблиця 4.1 Результати розрахунків для зосереджених заземлювачів

Питомий електричний опір , Омм	Імпульсні опори (чисельник) і імпульсні коефіцієнти (знаменник) стрижневого заземлювача довжиною 2,5 м при різних значеннях повторного струму блискавки, кА			
	10	20	50	100
10	4,3/1,3	4,3/1,3	4,3/1,3	4,4/1,0
20	7,5/1,2	7,5/1,2	7,5/1,2	6,8/1,0
50	17,1/1,1	17,1/1,1	14,7/0,9	10,4/0,64
100	32,5/1,0	31,5/0,97	20,3/0,62	12,5/0,38
200	61,2/0,94	44,8/0,69	24,3/0,37	13,8/0,21
500	93,5/0,58	58,7/0,36	27,3/0,17	16,4/0,1
1000	110/0,34	62,7/0,19	30/0,092	18,3/0,057

При розрахунку враховано, що при повторних розрядах блискавки пробивна напруженість ґрунту в однорідному електричному полі дорівнює 40 кВ / см. З порівняння даних табл. 4.1 з наявними даними імпульсних опорів заземлювачів при часу 3-10 мкс [18] впливає, що імпульсний опір зосереджених заземлювачів при повторних розрядах може бути в кілька разів вище, ніж при першому розряді. Тому при розрахунках блискавкозахисту необхідно враховувати не тільки перший, а й наступні імпульси струму блискавки, тим більше що наступних імпульсів у кілька разів більше, ніж перших.

У табл. 4.2 приведені аналогічні дані для горизонтального променевого заземлювача, отримані за (4.11) і (4.12).

Таблиця 4.2 – Результати розрахунків для горизонтального променевого заземлювача

Питомий електричний опір, Ом	Імпульсні опіри (чисельник) і імпульсні коефіцієнти (знаменник) протяжного заземлювача довжиною 12,5 м, радіусом 1 см, прокладеного на глибині 0,5 м при різних значеннях повторного струму блискавки, кА			
	1	10	50	100
10	4,9/4,3	4,9/4,3	4,6/4,0	4,3/3,7
100	24/2,1	24/2,1	22,4/2,0	15,8/1,4
1000	110/0,96	90/0,79	39/0,35	27/0,24
10000	211/0,19	143/0,13	46,7/0,041	32/0,028
100000	230/0,02	151/0,013	48/0,0043	33/0,0029

Найбільше з розрахованих імпульсних опорів стрижневих заземлювачів одно приблизно 30 Ом, що, загалом, досить для блискавкозахисту.

Парадоксальним є збільшення імпульсного опору з ростом довжини заземлювача. Цей ефект вперше був зафіксований в дослідях А. Л. Вайнера. Він, можливо, пояснюється зменшенням іскроутворення при збільшенні поверхні заземлювача і зменшенням густини струму. Чим більше питомий опір, тим інтенсивніше йде іскроутворення. При довжині 12,5 м збільшення струму відносно слабо зменшує імпульсний опір через наявність індуктивності.

Виведені формули справедливі також для розрахунків імпульсних опорів при першому розряді блискавки. Отримані результати свідчать про те, що одиничних заземлювачів досить для блискавкозахисту ПЛ. Однак заземлювачі, крім того, повинні задовольняти вимогам релейного захисту й техніки безпеки.

4.7 Вплив нелінійності вольт-амперної характеристики ґрунту

Як відомо, нелінійність призводить до вирівнювання електричного поля навколо заземлювача. У результаті іскроутворення затримується і може взагалі не виникнути навіть при граничних струмах блискавки. Тому в перегнійних і глинистих ґрунтах при тому ж питомому опорі ґрунту імпульсний опір більше, ніж у піщаних. Крім того, ці ґрунти краще утримують вологу і тому мають менше стаціонарного опору при невеликому струмі промислової частоти.

Наведена методика розрахунків зосереджених і протяжних заземлювачів справедлива також для розрахунків заземлювачів при протіканні струму головного розряду блискавки.

На жаль, немає досвідчених даних, отриманих при малому часі. Тому повинні бути проведені польові випробування заземлювачів при часі порядку 0,1-0,25 мкс методом від простого до складного. Основне завдання - поширення даних натурних випробувань на інші умови, в яких розташовані заземлювачі. За відсутності інших даних порівнюємо отримані результати з натурними випробуваннями протяжних горизонтальних заземлювачів при часі 2-10 мкс.

4.8 Порівняння результатів розрахунків з результатами натурних імпульсних випробувань

При випробуваннях протяжного горизонтального заземлювача довжиною 110 м і радіусом 3 мм в кам'янистому ґрунті з питомим опором понад 1000 Ом [21] була визначена імпульсна міцність ґрунту в однорідному електричному полі 10 кВ / см. Порівняння результатів випробувань та розрахунків при струмі 3,4 кА наведено на рис. 4.3.

З залежності на рис. 4.3 в діапазоні 3-10 мкс має місце практично повний збіг розрахункових даних з досвідченими результатами. Особливо,

якщо врахувати, що при подібних випробуваннях можливі помилки вимірів, у сумі перевищуючі 10%.

При струмі 7,3 кА і часу 2 мкс (не показано на рис. 4.3) імпульсний опір при досліді склав 39 Ом, а розрахунок дав 38,5 Ом. У цьому випадку також майже повний збіг.

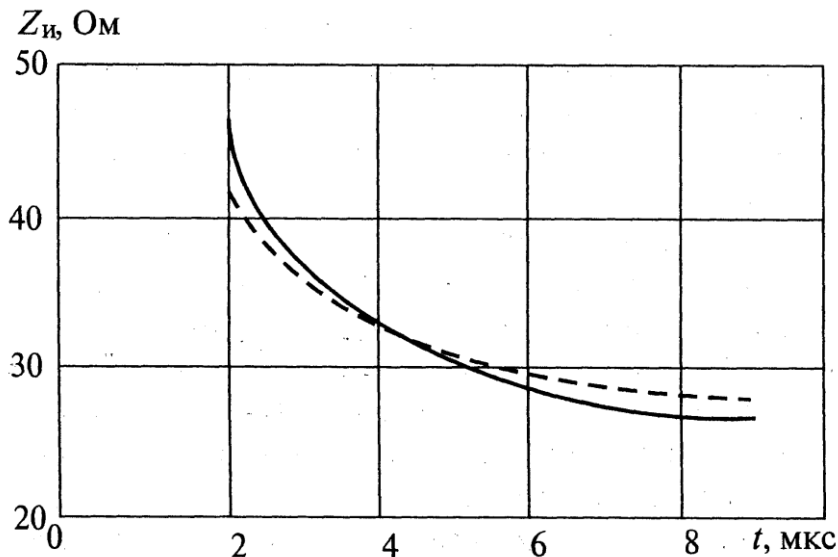


Рисунок 4.3 - Залежності імпульсного опору протяжного заземлювача від часу дії імпульсу: — — — розрахунок; - - - - натуральні випробування.

4.9 Розрахунок в неоднорідному ґрунті

При розрахунку імпульсного опору заземлювачів в неоднорідному ґрунті за питомий електричний опір ρ слід приймати еквівалентний питомий опір неоднорідної структури. Однак при визначенні значення фіктивного (еквівалентного по опору) радіуса зони іскроутворення замість ρ в (4.3) підставляється значення питомого опору верхнього шару, в якому розвивається зона іскроутворення (ρ_x). Далі наведено результати розрахунку імпульсного опору заземлювача [21] за умови, що питомий опір верхнього шару - змінна величина ($\rho = 1000$ Ом \cdot м і струм 100 кА):

ρ_1 Омм	$Z_{и}$, Ом/%
10	41,7/100
100	41,7/100
1000	38,5/92
10000	25,9/62

Як видно з наведених даних, іскроутворення в землі починається в даному випадку при питомому опорі верхнього шару, більшому 100 Омм. Облік питомого опору верхнього шару ґрунту може істотно зменшити імпульсний опір заземлювачів.

Висновки до розділу

При повторних розрядах блискавки імпульсний опір заземлювачів може бути в кілька разів більше, ніж при першому. Тому в розрахунках блискавкозахисту повинні враховуватися імпульсні опори заземлювачів і при наступних розрядах блискавки.

5 РОЗРАХУНОК ІМПУЛЬСНОГО ОПОРУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ФУНДАМЕНТІВ ОПОР ПЛ

5.1 Основні теоретичні положення

Конструкції залізобетонних підстав опор ПЛ можна розділити на три основні типи: монолітні, збірні, а також занурені в ґрунт частини залізобетонних стійок опор [23,24]. Перші збільшують опір через незавершеність процесу схоплювання і зменшують його внаслідок підтягування вологи з навколишнього ґрунту. Другі і треті - тільки зменшують опір. З плином часу, приблизно через місяць, питомий опір бетону наближається до питомого опору навколишнього ґрунту. Бетон складається з цементного каменю, до складу якого входить глина, і наповнювач у вигляді піску, щебеню або гравію. Наповнювач є ізолятором, і тому саме цементному каменю бетон зобов'язаний провідністю. Відзначається нелінійністю вольт-амперної характеристики бетону (приблизно така ж, як у глини).

Вольт-амперні характеристики всіх вивчених ґрунтів, а саме піску, глини і перегною, є статичними функціями [26]. Напруженість електричного поля визначається як:

$$E = AJ^\beta = E_n^{1-\beta} (\rho J)^\beta \quad (5.1)$$

де J — щільність струму;

A та β - коефіцієнти пропорційності і нелінійності;

ρ — питомий електричний опір;

E_n - початкова напруженість, при якій в землі починаються нелінійні процеси (до іскроутворення).

Спільним для всіх конструкцій залізобетонних підножників є велика концентрація залізобетону, а також бетонна обмазка, яка у другому і третьому випадках досить тонка і складає 10-30 мм. Спочатку із зазначених підножників для спрощення завдання розглянемо монолітний півсферний заземлювач, розташований на поверхні землі, який має обмазку з бетону. Раніше вважалося, що нелінійністю вольт-амперної характеристики ґрунту можна знехтувати, а з опором іскрової зони можна не рахуватися [27]. Тому передбачалося, що яка б не була форма заземлювача, якщо він знаходиться в межах іскрової зони, його можна розглядати як півсферичний. Вважаємо, що електричні характеристики бетону та ґрунту різні. Розрахунковий струм вважаємо заданим, тому що опір каналу блискавки багато більше, ніж імпульсний опір заземлювача.

Зі збільшенням імпульсного струму навколо заземлювача спочатку утворюється зона нелінійності, починаючи з напруженості E_n , в якій питомий електричний опір менше, ніж в іншій землі. Потім, починаючи з напруженості, яка дорівнює пробивної напруженості в однорідному електричному полі $E_{пр}$, розвивається зона іскроутворення, яка більш інтенсивно знижує імпульсний опір. Опіром цієї зони нехтуємо.

У загальному випадку навколо арматури залізобетонного підножника утворюються чотири зони (рис. 5.1, (а)): шар бетону без арматури (обмазка) (1), зона іскроутворення (2), зона нелінійності в землі (3), інша земля, де напруженість прямо пропорційна щільності струму (4).

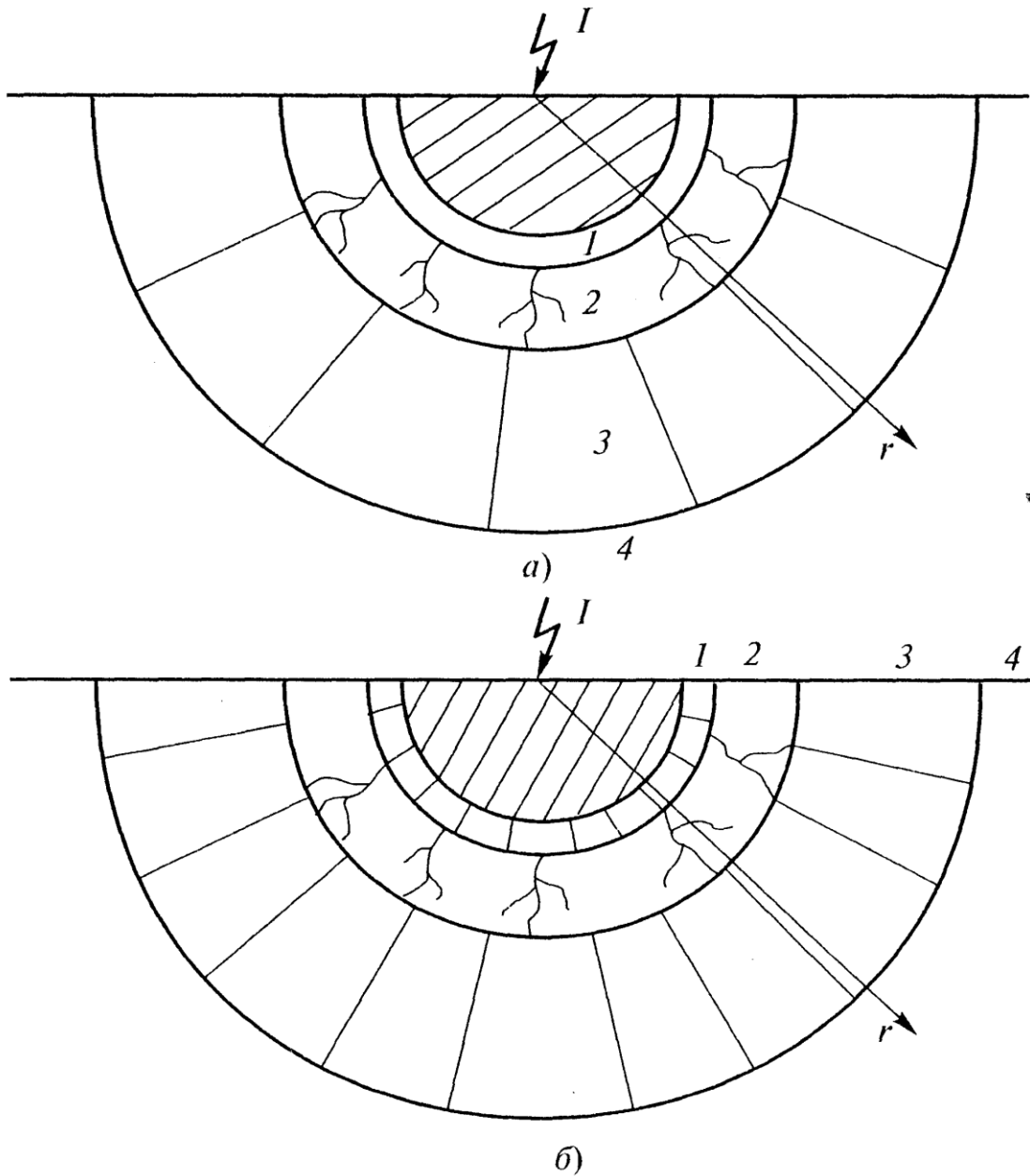


Рисунок. 5.1 - Передбачувані зони навколо напівсферичного заземлювача з бетону (а) і зона іскроутворення поза бетонної обмазки (б)

5.2 Процеси до іскроутворення

Так як струм блискавки заданий, процеси, що відбуваються в одній із зон, не впливають на інші зони, і їх можна розглядати окремо. Відповідно до [28] імпульсний опір зони нелінійності підножника у вигляді напівкулі

$$R_i = (\rho / 2\pi)^\beta (E_n / I)^{1-\beta} (r_n^{1-2\beta} - r_0^{1-2\beta}) / (1-2\beta) \quad (5.2)$$

де r_n — радіус зони нелінійності в землі.

$$r_n = \sqrt{\rho I / 2\pi E_n} \quad (5.3)$$

Аналогічно (5.2) імпульсний опір бетонної обмазки:

$$R_{ii} = (\rho / 2\pi)^{\beta_0} (E_n / I)^{1-\beta_0} (r_1^{1-2\beta_0} - r_0^{1-2\beta_0}) / (1-2\beta_0) \quad (5.4)$$

Опір решти землі:

$$R_{iii} = \rho / 2\pi r_n \quad (5.5)$$

Сумарний опір розтіканню через підножник:

$$R_n = R_i + R_{ii} + R_{iii} \quad (5.6)$$

Імпульсний коефіцієнт підножника:

$$a = R_n / R_0 \quad (5.7)$$

де R_0 — опір розтіканню при невеликому струмі промислової частоти (при напруженні менше E_n).

5.3 Кількісні електричні характеристики бетону

Для розрахунку необхідно знати пробивну напруженість в однорідному електричному полі $E_{пр}$, початкову напруженість E_n , з якою починається нелінійні процеси в землі, і коефіцієнт нелінійності β . Проте дані з

пробивної напруженості суперечливі. В [23] приведені значення від 35 до 120 кВ / см. У той же час наведене значення електричної міцності піску 91 кВ / см не відповідає дійсності. По-перше, тому що не збігається з іншими численними результатами, а по-друге, тому що ця напруженість не може бути більше електричної міцності повітря - близько 30 кВ / см.

З порівняння структур піску і глини випливає, що зі зменшенням розмірів пор в землі коефіцієнт нелінійності зменшується і при цьому нелінійність зростає. Розмір пор в бетоні на декілька порядків менше, ніж у глини. Виявляється, що коефіцієнт нелінійності бетону можна приймати близьким до найменшого виміряного значення для глини $\beta = 1 / 3$. Однак поки відсутні кількісні дані щодо електричної характеристики бетону, про нелінійність бетону можна судити тільки імовірно.

Результати розрахунків за наведеними формулами дані в табл. 5.1 та табл. 5.2, де характеристики бетону та навколишньої його глинистої землі прийняті однаковими: $E_n = 1\text{кВ/см}$, $\beta = 1/3$, $r_0 = 0,475\text{ м}$, $r_1 = 0,5$.

Таблиця 5.1– Результати розрахунків за формулами (5.1) – (5.7)

Імпульсний струм I, кА	Імпульсний опір обмазки (чисельник) і всього підножника (знаменник), Ом, без іскроутворення при різних значеннях p, Ом		
	10	100	1000
10	0,220/3,3	0,47/23,1	1/101
50	0,075/2,8	0,16/13,0	0,37/51
100	0,047/2,3	0,10/10,0	0,22/37,8
250	0,026/1,7	0,055/7,0	0,12/25

Опір обмазки при невеликому струмі промислової частоти дорівнює близько 5% опору підножника. При імпульсному струмі (табл. 5.1) це ставлення ще менше. З таблиці. 5.2 випливає, що навіть за відсутності іскроутворення імпульсні коефіцієнти можуть бути досить низькими. В

цьому випадку зменшення імпульсного опору досягається за рахунок нелінійності вольт-амперної характеристики ґрунту.

Таблиця 5.2 – Результати розрахунків за формулами (5.1) – (5.7)

Імпульсний струм I, кА	Імпульсні коефіцієнти підножника без іскроутворення при різних значеннях ρ , Ом		
	10	100	1000
10	0,98	0,69	0,30
50	0,84	0,40	0,15
100	0,69	0,30	0,11
250	0,51	0,21	0,048

5.4 Струм початку іскроутворення

Якщо вольт-амперні характеристики бетону та ґрунту однакові, мають одну і ту ж пробивну напруженість, і якщо струм достатній, то стримери будуть починати проростати в зоні з меншим діаметром - в бетоні. Однак розрахунковий струм початку іскроутворення в бетоні при $E_{пр} = 50$ кВ/см [28]:

$$I_0 = \frac{2\pi E_{пр.б.}^{1/\beta} r_0^{2-1/\beta}}{\rho E_{н.б.}^{1/\beta-1}} = \frac{2\pi(50 \cdot 10^5)^3 \cdot (0,475)^{2-3}}{1000(1 \cdot 10^5)^{3-1}} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ кА}, \quad (5.8)$$

що набагато більше струмів блискавки. Тому іскроутворення в бетоні в розглянутому випадку неможливо. Видається, що це одна з можливих причин надійної роботи підножників опор ПЛ.

Причиною відсутності іскроутворення являється зниження напруженості поблизу заземлювача. На рис. 5.2 наведені залежності напруженостей від радіальної відстані при коефіцієнтах нелінійності

$$\beta = 1/3 \text{ і } 1:$$

$$E(r) = E_n^{1-\beta} (\rho I / 2\pi r^2)^\beta \quad (5.9)$$

$$E_1(r) = \rho I / 2\pi r^2 \quad (5.10)$$

Якщо залізобетонний підножник розташований у піщаному ґрунті, то іскроутворення почнеться, але не з арматури, а з поверхні бетону. При цьому утворюються такі зони (рис. 5.1, б): шар бетону (обмазка) з електролітичною провідністю - перша зона нелінійності (1), зона іскроутворення з низьким опором, яка не враховується (2), друга зона нелінійності, розташована в землі (3), інша земля, де зберігається пропорційність між щільністю струму і напруженістю (4).

5.5 Розрахунок імпульсного опору

Імпульсний опір напівсферичного заземлювача з урахуванням зони іскроутворення було розглянуто в [27], проте при цьому критична напруженість була визначена без урахування зменшення напруженості при збільшенні радіуса іскроутворення, як було загальноприйнято. Пізніше було зроблено уточнення.

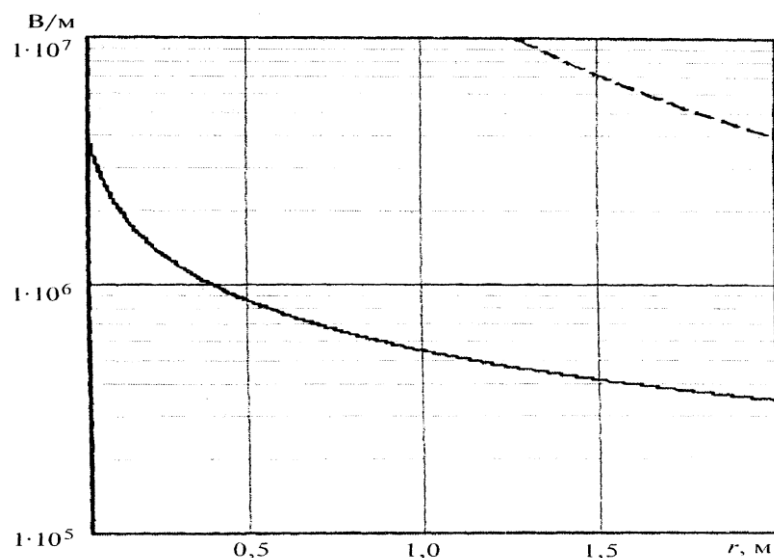


Рисунок 5.2 - Порівняння розподілу напруженостей ($r_0=0,5$ м; $\rho=1000$

Ом·м; $E_{\text{ГР}}=10$ кВ/см; $E_n=1$ кВ/см): ——— - $\beta=1$; --- - $1/3$

Щоб визначити імпульсний опір, необхідно знати розмір зони іскроутворення, який як би збільшує розмір заземлювача. Ця зона на кордоні з зоною не лінійності складається з незліченної множини стримерів дуже малого діаметру навколо заземлювача, невидимих навіть у темряві. Іноді виникають окремі стримери набагато більшого діаметру не впливають на значення опору заземлювача, так як кожен з них має порівняно великий опір. Фіктивний (еквівалентний по опору) радіус зони іскроутворення визначаємо, прирівнюючи убуваючи зі збільшенням радіуса критичну напруженість щільності струму на поверхні землі:

$$E_{np} \sqrt{(r_0 / r_\phi)} = A (I / 2\pi r_\phi^2)^\beta \quad (5.11)$$

і після перетворень одержуємо:

$$r_\phi = ((E_n / E_{np})^2 (\rho / I)^{2\beta} (1 / r_0))^{1/(4\beta-1)} \quad (5.12)$$

Результати розрахунку за формулою (5.12) наведено в табл. 5.3. Пісок має такі характеристики: $E_{np} = 12$ кВ / см [7], $E_n = 2$ кВ / см і $\beta = 0,88$ [3]; ра радіус заземлювача 0,475 м.

Таблиця 5.3 - Результати розрахунку за формулою 5.12

Імпульсний струм I, кА	Радіус зони іскроутворення (м) навколо півсферичного підножника при різному питомому опорі ρ , Ом-м (пісок)		
	10	100	1000
10	-	-	1,38
50	-	0,98	4,2
100	-	1,6	6,9
250	0,74	3,0	13,1

Примітка. Прочерк означає відсутність іскроутворення.

Найбільше значення радіуса іскроутворення перевищує 15 м.

Імпульсний опір підножника з урахуванням опору обмазки дорівнює:

$$R_{И.И} = R_i' + R_{ii} + R_{iii} \quad (5.13)$$

де R_i' визначається за виразом (5.2), але в межах від $r_{нн}$ до r_{ϕ} (5.12).

Результати розрахунку імпульсних коефіцієнтів за формулою (5.13) наведено в табл. 5.4 при тих же розрахункових даних, що і для табл. 5.3.

Фіктивний радіус зони іскроутворення, а також радіус зони нелінійності при значеннях, менших за радіус, прирівнюються до радіусу заземлювача.

При декількох підножниках опори або при підножнику, що складається з декількох елементів, розрахунковий імпульсний струм зменшується у кілька разів, а напруженість через вплив елементів один на одного дещо зростає, проте висновки залишаються практично без змін.

Таблиця 5.4 Результати розрахунку імпульсних коефіцієнтів за формулою (5.13)

Імпульсний струм I, кА	Імпульсні коефіцієнти напівсферичного підножника при різному питомому опорі p, Ом (пісок)		
	10	100	1000
10	1,0	0,96	0,328
50	0,97	0,461	0,11
100	0,91	0,289	0,066
250	0,876	0,16	0,036

5.6 Мінімальна відстань між заземлювачами в землі

При стіканні струму з одного заземлювача (окремо стоїть блискавковідведення) необхідно, щоб не було перекриття в землі на інший заземлювач (заземлюючий контур підстанції).

Існуючі правила застаріли. Здається, що перекриття відбувається, коли фіктивний радіус заземлювача, з якого стікає струм, стане рівним відстані між заземлювачами. Фіктивні радіуси (радіуси зони іскроутворення в м) для стрижневого заземлювача в піщаному ґрунті, розраховані за формулою (42) з [29], приведені далі:

Π_4	1	2	4	10	20	40	100	400
r_ϕ / l	0,018	0,07	0,027	1,0	1,9	3,3	6,2	15,9

Тут Π_4 — критерій подібності, рівний

$$\Pi_4 = \rho I / l(\sqrt{r_0 l}) E_{np} \quad (5.14)$$

Наприклад, при $\rho = 100$ Ом, $I = 100$ кА, $E_{np} = 12$ кВ / см, $r_0 = 3$ см, $L = 2$ м маємо (в ед. СИ): $\Pi_4 = 17$ и $r_\phi / l = 4,5$, тобто радіус іскроутворення більш ніж в 4 рази більше довжини заземлювача і складає 9 м.

Для напівсферичного заземлювача радіусом 0,5 м радіус зони іскроутворення складає всього 1,6 м. Таким чином, радіус зони іскроутворення, а отже і імпульсний опір, суттєво залежить від форми заземлювача.

5.7 Перевірка формул за даними польових випробувань

Автори, які проводять польові випробування заземлювачів, не визначають вольт-амперні характеристики ґрунтів у місці випробувань. Тому, вимушено, перевірку проводимо при коефіцієнті не лінійності, рівному одиниці, що відповідає піщаному ґрунті. З [22], де наведений опис імпульсних випробувань півсферичного електрода діаметром 125 см у ґрунті з питомим електричним опором 1150 Ом-м при струмі 1350 А, візьмемо значення імпульсної міцності піщаного ґрунту в однорідному

електричному полі 12 кВ / см. Використовуючи це значення, при $\beta = 1$ з (5.12) отримуємо фіктивний радіус зони іскроутворення:

$$r_{\phi} = \sqrt[3]{(\rho l / 2\pi E_{np})^2} = \sqrt[3]{(1150 \cdot 1350 / 2\pi l 2 \cdot 10^3)^2} = 0,7 \text{ м}$$

Звідси:

$$R_n = \rho / 2\pi r_{\phi} = 1150 / 2\pi 0,7 = 261 \text{ Ом} \quad (5.15)$$

що на 5% менше отриманого при випробуваннях.

При значенні $\beta = 0,87$, відповідному піщаному ґрунту, отримуємо за (5.13) з використанням (5.12) імпульсний опір півсферичного електрода, рівне 266 Ом. Розрахунковий опір дещо більше із-за вирівнювання електричного поля не лінійної вольт-амперної характеристики піску. При піщаному ґрунті не лінійність характеристики зазвичай не враховується, однак тут це зроблено для перевірки роботи розрахункових формул.

5.8 Залізобетонні заземлювачі у вигляді стійок

У теперішній час залізобетонні заземлювачі застосовуються в основному у вигляді стійок. Наприклад, в [28] випробувана стійка завдовжки 2 м і діаметром 18 см. Опір розтіканню при промисловій частоті склало 15 Ом. При струмі 18 кА напруга на стійці дорівнювало 138,7 кВ. У результаті імпульсний опір дорівнює 5,55 Ом.

У зв'язку з тим що бетонна обмазки не виказує помітного впливу на імпульсний опір, залізобетонний фундамент можна порахувати як арматуру стійки, розташовану в землі. Спочатку визначимо еквівалентний питомий опір за наведеним опором 15 Ом. Слідом за [27] вважаємо, що це значення завищена у 1,4 рази за рахунок того, що арматура стійки не є циліндром, а складається з окремих прутків. З урахуванням зазначеного завищення еквівалентний питомий опір ґрунту становить 37,8 Ом.

Попередні розрахунки показали, що таке низький імпульсний опір (5,55 Ом) неможливо отримати в глинистих або перегнійних ґрунтах. Мабуть, ґрунт у місці випробувань, був піщаний, і тому не лінійність вольт-амперної характеристики можна знехтувати. Пробивну напруженість ґрунту приймаємо рівною 12 кВ / см.

Фіктивний радіус зони іскроутворення по [29] дорівнює:

$$r_{\phi} = (\sqrt[3]{(1/2 + M)} + \sqrt[3]{(1/2 - M)})r_{\phi 1},$$

$$\text{Де} \quad M = \sqrt{(1/4 + 1/27(L/r_{\phi 1})^6)}; \quad (5.16)$$

$r_{\phi} = \sqrt[3]{1/r_0(\rho I / 2\pi E_{np})^2}$ - фіктивний радіус зони іскроутворення, чисельно рівний радіусу зони іскроутворення при півсферичній заземлювачі з радіусом, рівним r_0 .

Припустимо, в стійці було шість прутків радіусом 3 мм кожен. При цьому струм, який стікає з одного прутка 3 кА. Розрахунок фіктивного радіусу іскроутворення навколо прутка з (5.16) дає значення $r_{\phi}' = 0,018$ м. Якщо навіть отримане значення збільшити в 5 разів за рахунок впливу сусідніх прутків, то отримаємо $r_1 = 0,09$ м. Такому значенню відповідає еквівалентний радіус палі, рівний

$$r_{\text{екв}} = \sqrt[6]{(r_1 D_1 D_2 \dots D_5)} = \sqrt[6]{(0,09 \cdot 0,18 \cdot 0,09 \cdot 0,09 \cdot 0,16 \cdot 0,16)} = 0,127 \text{ м}$$

При цьому імпульсний опір

$$R_{\text{екв}} = (\rho / 2\pi L) \ln(2L / r_{\text{екв}}) = (37,8 / 2\pi 2) \ln(2,2 / 0,127) = 10,4 \text{ Ом}$$

Похибка щодо експериментального результату (5,55 Ом) - 50%. Результат розрахунку слід визнати незадовільним. Однак через нестачу даних не враховані або враховані не досить точно такі параметри, як неоднорідність ґрунту, розміри арматури, а також пробивна міцність ґрунту, які можна було б врахувати. Крім того, не враховується негладкість прутків арматури. Остання виконується для скріплення бетону і металу стійки.

Висновки до розділу

1. Однією з причин успішної роботи залізобетонних підножників, мабуть, є не лінійність вольт-амперної характеристики бетону, яка, вирівнюючи напруженість, запобігає або затримує іскроутворення у бетоні, зменшуючи напругу на бетонній обмазці.

2. Необхідно продовжити дослідження електричних властивостей бетону і глинистих ґрунтів, а також натурні випробування підножників.

3. Розрахункові формули для півсферичного заземлювача добре узгоджуються з даними натурних випробувань, при цьому допустимі відстані в землі повинні бути замінені радіусами зон іскроутворення.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі проведений аналіз особливостей ліній електропередач, розглянуті їх експлуатаційні характеристики, а також використання нових технологій в будівництві ЛЕП. Також розглянуті типи та особливості заземлювачів. Зроблено висновок, що заземлювачі є невід'ємною частиною сучасних електричних систем, які забезпечують безпеку, стабільність і надійність їхньої роботи. В роботі розглянуті сучасні методи розрахунку заземлювачів, за допомогою яких виконанні розрахунки заземлюючих пристроїв ліній електропередач.

Проведений аналіз математичних моделей пристроїв заземлення на основі теорії ланцюгів з зосередженими параметрами. Показано методіку побудови схеми заміщення заземлювального пристрою з урахуванням взаємних електричних і магнітних зв'язків між елементами. Розглянуто методи розрахунку перехідних процесів в заземлюючих пристроях.

Запропоновано методіку побудови моделей залежності питомого опору від вологості і температури на основі експериментів і теорії нечітких множин. Дано формули для досить точного визначення ρ піску і супіски в температурному діапазоні від $+20$ до -20 ° С.

Приведені розрахункові формули для імпульсного опору та фіктивного радіуса зони іскроутворення зосереджених і протяжних заземлювачів при протіканні повторних струмів блискавки. Врахована велика крутість цих струмів, збільшення пробивної напруженості ґрунту, а також обмежена розрахункова довжина з-за малої тривалості фронту. Доведено можливість виникнення зони іскроутворення.

Запропоновано відносно просту модель для розрахунку імпульсних опорів для різних опор повітряних ліній електропередачі. Такий розрахунок має важливе практичне значення, так як від опору заземлюючого пристрою опор залежить блискавкоупорність повітряних ліній.

Таким чином, мета магістерської роботи досягнута.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кунцевич, О. О. «Системи заземлення в енергетиці: принципи проєктування та експлуатація». – Київ: Техніка, 2018. – 320 с.
2. Мороз, В. І., Рибак, П. М. «Електробезпека та заземлення в електроустановках». – Харків: Основа, 2020. – 250 с.
3. Семенов, І. П., Гриценко, М. Л. «Вплив фізико-хімічних властивостей ґрунту на ефективність заземлення». – Вісник енергетики, 2021, № 4.
4. Романенко, А. С. «Імпульсні опори заземлювачів: теорія і практика». – Матеріали конференції з енергетичних систем, 2020.
5. Семенов, І. П. «Вплив апроксимації струмів на результати розрахунку опорів заземлення». – Вісник енергетики, 2021, № 4.
6. Карпенко, Д. А. «Методи розрахунку імпульсних опорів заземлювачів у ґрунтах різної провідності». – Львів: Політехніка, 2019. – 150 с.
7. Zhang B., Cui X., Zhao Z., He J., Li L. Numerical analysis of the influence between large grounded grids and two-end grounded cables by the moment method coupled with circuit equations. - IEEE Trans. Power Del., 2005, vol. 20, N 2.
8. Романенко, А. С. «Інтеграція поперечних параметрів у моделях заземлення». – Енергетика і автоматизація, 2020, № 3.
9. Карпенко, Д. А. «Моделювання заземлюючих пристроїв із урахуванням складної геометрії». – Матеріали конференції з енергетичних систем, 2019.
10. Романенко, А. С. «Складності перетворення П- і Т-подібних схем у моделюванні заземлення». – Електроенергетика і автоматизація, 2020, №3.
11. Семенов, І. П. «Застосування схем заміщення у моделюванні ЗП». – Вісник енергетики, 2021, № 4.

- 12.Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський. Електричні системи і мережі частина І: навчальний посібник: Вінниця. – ВНТУ. – 300 с.
- 13.В. А. Попов, В. В. Ткаченко, О. С. Ярмолюк. Проектування систем забезпечення споживачів електричною енергією: Київ:- КПІ ім. Ігоря Сікорського 2021. – 250 с.
- 14.Шевченко, В. П. Сучасні технології у проектуванні ЛЕП. – Львів: Техпрогрес, 2019. – 280 с.
- 15.Гуль В.І., Нижевский В.І. Експериментальне визначення електричних параметрів імпульсного режиму дня заземлювачів у природних умовах. — Вісник Харківського політехнічного інституту (№176). - Харків: Вища школа.
- 16.Соловійов, І. В., Коваленко, П. Г. Електричні мережі та системи. — Київ: Вища школа, 2018. – 400 с.
- 17.П'ятов, А. А. Кабельні лінії електропередач у сучасній енергетиці. — СПб.: Технічна література, 2019. – 350 с.
- 18.Коваленко, О. І. Електроустановки та системи заземлення. — Київ: Вища школа, 2018. – 320 с.
- 19.Струк, В. Г. Захист електроустановок від перенапруг. — Харків: Енергетика України, 2020. – 280 с.
- 20.Баранов, І. В. Системи блискавкозахисту та заземлення в будівництві. — Львів: Технічна література, 2019. – 250 с.
- 21.Мельник, П. В. «Імпульсні параметри горизонтальних заземлювачів у кам'янистих ґрунтах». – Технічний вісник Полтавської політехніки, 2022, № 1.
- 22.Гриценко, М. Л. «Дослідження параметрів заземлювачів у складних умовах експлуатації». – Електротехнічний журнал України, 2021, № 3.
- 23.Семенов, І. П. «Електрофізичні властивості матеріалів для основ опор ПЛ». – Вісник енергетики, 2021, № 4.

24. Гриценко, М. Л. «Дослідження провідності бетону в системах заземлення». – Електротехнічний журнал України, 2021, № 3.
25. Мельник, П. В. «Питомий опір бетону для основ опор ПЛ у різних кліматичних умовах». – Технічний вісник Полтавської політехніки, 2022.
26. Романенко, А. С. «Нелінійність вольт-амперної характеристики цементних матеріалів». – Енергетика і автоматизація, 2020.
27. Гриценко, М. Л. «Електричні характеристики бетонної обмазки заземлювачів». – Електротехнічний журнал України, 2021, № 4.
28. Семенов, І. П. «Особливості розрахунків залізобетонних заземлювачів у блискавкозахисті». – Вісник енергетики, 2021, № 5.
29. Семенов, І. П. «Розподіл струмів у зоні іскроутворення стрижневих заземлювачів». – Вісник енергетики, 2021, № 4.
30. Гриценко, М. Л. «Вплив щільності струму на параметри зони іскроутворення». – Електротехнічний журнал України, 2021, № 3.
31. Романенко, А. С. «Розрахунок зон іскроутворення в заземлювачах складної геометрії». – Енергетика і автоматизація, 2020, № 2.
32. Воронін, А. С. Інженерні рішення у сфері енергетики. – Київ: Наука і техніка, 2020. – 280 с.
33. Семенюк, О. І. Модернізація електромереж в Україні. – Харків: Університет енергетики, 2021. – 300 с.
34. Мельник, П. В. Розвиток систем HVDC в енергетиці Європи. – Полтава: Вид-во Полтавської політехніки, 2023. – 250 с.
35. ISO 60204-1:2016. "Safety of machinery – Electrical equipment of machines – Part 1: General requirements".
36. ДСТУ EN 62305-3:2012. "Захист від блискавки. Частина 3. Захист споруд і обладнання"
37. IEEE Std 80-2013. "Guide for Safety in AC Substation Grounding".

Додаток А

1 ANALYTICAL PART

1.1 Features of power lines

Electricity is used in many areas of human activity and in order to deliver it to direct consumers, numerous systems of cables and wires are used, stretched in the air, in the ground or on special cable structures. These wires and cables form power transmission lines.

Power transmission lines (PTL) are a complex of engineering structures and systems designed to transmit electricity from power plants to consumers. Understanding their features is important for ensuring the efficiency, reliability and safety of power systems. Since power lines play a critical role in the functioning of power networks, research into their design, types and operational characteristics is relevant.

Their features are determined by various aspects, such as the types of lines (overhead or cable), voltage level, design, and operating conditions. Let's consider the main features of power lines with different approaches to classification:

1.1.1 Classification of power lines by type

1) Overhead power lines (OPL) are open lines, the wires of which are suspended on supports and insulated with insulators. This type of power line is the most common due to its cost-effectiveness, especially over long distances.

Overhead power lines are considered the least expensive way to transmit large amounts of electricity. Compared to cable lines, they are cheaper to build, have better maintainability, do not require excavation for laying or replacing wires, provide a good visual overview of the line condition and high throughput.

The main elements of overhead power lines:

- Supports. They are installed at different distances from each other (depending on the voltage), most often made of metal, reinforced concrete or wood. Metal supports have high strength and resistance to loads, but require anti-corrosion protection.

- Wires. For the transmission of electricity, aluminum wires are mainly used (sometimes with an additional steel core to increase mechanical strength).

- Insulators. Glass or ceramic insulators are used to separate the wires from the supports and prevent short circuits.

Advantages of overhead power lines:

- Low cost of construction and materials compared to cable lines.
- Ease of repair and maintenance. Damage can be detected and eliminated relatively quickly.

Disadvantages:

- Vulnerability to natural factors such as strong winds, snow, icing, and lightning.

- Environmental impact and aesthetic problems: high poles and long wires change the landscape.

Areas of application:

- Used mainly over long distances and in open areas for high and medium voltage power transmission.

Cable power lines are laid underground or under water, which makes them more protected from weather conditions and physical damage. They are used in urban areas and in areas with limited space or complex terrain. At the same time, laying a cable line costs much more, and therefore such lines are mainly installed where laying overhead lines is difficult or impossible due to technical or aesthetic parameters. Overhead power lines are one of the main links in the energy system and are divided into alternating current overhead lines and direct current overhead lines by type of current. Direct current lines are used extremely rarely, mainly for connecting power systems and powering the contact network. In Ukraine, the only direct voltage line was decommissioned in 2014. And the vast majority of lines are used to transmit alternating voltage.

The main elements of cable power lines:

Cable. Contains several layers of insulation and shielding, which ensures safety and resistance to external influences.

Insulation. It is usually made of polyethylene or PVC, which ensures a long service life of the cables and their resistance to moisture and temperature fluctuations.

Advantages of cable power lines:

- High resistance to natural conditions such as wind, rain, snow.
- Less impact on the landscape and environment, since the cables are laid underground.
- Less electricity loss due to reduced electromagnetic radiation.

Disadvantages:

- High cost of laying and materials.
- Difficulty in carrying out repairs: detecting damage and eliminating them requires the use of special equipment.

Areas of application of cable power lines:

- Used mainly in urban areas, where it is important to maintain aesthetics and protect the lines from external factors.
- Also common in difficult conditions, such as underwater laying or in places with limited accessibility.

1.1.2 Classification by voltage level

Power lines are classified by voltage levels, which determine their design and scope of application:

1) Low-voltage lines (up to 1 kV) are used for the end consumer (for example, for supplying electricity to residential buildings).

Low-voltage power lines transmit voltages up to 1 kV and are used for the transmission and distribution of electricity over short distances within cities, villages and towns to inputs into houses or small enterprises. The length of such lines is usually 1-2 km. In cities, when implementing such lines, cable power lines are preferred

2) Medium-voltage lines (1-35 kV) are used for the transmission of electricity within urban and rural areas.

Medium-voltage overhead lines transmit voltage from 1 to 35 kV and are used for the transmission of electricity from district substations to settlements, large industrial facilities and agricultural complexes located at a distance of 10-20 km.

3) High-voltage lines (110-750 kV) are necessary for the transmission of large amounts of energy over long distances.

High-voltage overhead lines are lines with a voltage of mainly 110-330 kV. They are designed for the transmission of large capacities between power plants, individual power systems and large district substations, for connecting power plants with distribution points and supplying electricity to large cities or economic regions at a distance of 30 to 600 km.

4) Extra-high-voltage lines (over 750 kV) provide electricity transmission over very long distances with minimal losses.

Extra-high-voltage overhead lines are lines with a voltage of 400 to 750 kV, which are used to connect individual regional power systems located at a distance of up to 2000 km.

In Ukraine, the following classes of alternating voltage are mainly used for the transmission and distribution of electric energy:

- low voltage – 220 V and 380 V or, according to international standards, 230/400 V;
- medium voltage – 6 kV, 10 kV and 35 kV;
- high voltage – 110 kV, 150 kV, 220 kV and 330 kV;
- extra-high voltage – 400 kV, 500 kV and 750 kV.

Depending on the length, short power transmission lines are distinguished up to 50 km long, medium ones – from 50 to 150 km long and long ones – over 150 km long.

1.1.3 Technological features

1) Insulation: Insulators are used to separate wires from supports and prevent short circuits. Overhead lines use ceramic or glass insulators, while cable lines have multilayer polymer insulation.

There are pin insulators that support the conductor above the structure and are used on lines with voltages up to 35 kV, and suspension insulators, which are used on lines with voltages above 35 kV and often form garlands of insulators where the conductor hangs below the structure. Suspension insulators have higher mechanical characteristics than pin insulators. Insulators are mainly made of porcelain, tempered glass and polymer materials, and their number depends on the line voltage, the required lightning resistance, the altitude above sea level and environmental factors such as fog or the presence of salt spray or pollution in the air.

2) Supports and structures: Overhead power lines use supports of different heights and strengths depending on terrain conditions and voltage. Metal and concrete supports are the most common.

There are several groups of supports. According to the material of manufacture, supports can be wooden, steel, reinforced concrete, aluminum, and even made of reinforced plastic and composite materials.

By purpose, anchor (end and corner), intermediate and transitional supports are distinguished. Anchor supports provide constant tension of power line wires and withstand significant loads. Anchor end supports are installed at the beginning and end of the overhead line, and corner supports are installed at the turns of the route.

Intermediate supports are found on lines most often and are designed to support wires between two anchor supports on straight sections of the route and are not designed for loads from tensioning wires along the line. And transitional ones are used when the power line route crosses any large obstacles of a natural or

engineering nature (bridges, cable cars, rivers, lakes, canals, ravines, etc.). They have greater weight and height and carry the greatest loads.

There are also special types of supports: transposition (allowing you to change the order of the wires on the supports), branching (serve to organize branches from overhead lines), cross (installed at the intersection of overhead lines in two directions) and anti-wind (installed to increase mechanical strength).

By design, supports can be single-, double- and multi-chain and are designed to suspend one, two or more parallel lines, respectively.

Lightning protection cables are used to protect lines from lightning discharges. These are mainly steel or steel-aluminum cables placed above the phase wires of an overhead power line or substation.

3) Wires: Made of aluminum or aluminum alloy, sometimes steel cores are used to increase strength. The conductors have a sufficient cross-section to ensure minimal electricity losses.

1.1.4. Environmental and social impacts

Power lines, especially overhead lines, can have significant environmental impacts, including:

- Landscape change. Large metal poles can affect the aesthetics of nature, especially in tourist or rural areas.
- Risk to birds. High-voltage power lines can pose a threat to migratory birds, which often come into contact with the wires.
- Electromagnetic radiation. Overhead power lines emit electromagnetic fields, which may be undesirable in residential areas.

1.1.5. Performance

- Energy losses: Over long distances, electricity is lost due to wire resistance. High-voltage transmission lines reduce these losses by increasing the voltage, which allows more energy to be transmitted with less loss.

- Repair and maintenance: Overhead lines are easier to repair due to easy access to the wires. In cable lines, finding and eliminating damage requires more sophisticated technologies, such as special diagnostic equipment.

1.1.6. Economic aspects

- Overhead lines have lower initial construction costs, which makes them more attractive for transmitting electricity over long distances.

- Cable lines are more expensive to lay and operate, but are more reliable in urban environments or in difficult terrain, such as underwater or in mountainous areas.

1.1.7. Use of new technologies

In modern energy, new technologies are emerging that increase the efficiency and safety of power lines:

- Superconducting materials. Superconductors can significantly reduce electricity losses during transmission.

- Use of renewable energy sources. With the integration of solar and wind farms, the need for smart grids and efficient power lines is increasing.

- Automation and monitoring. The use of intelligent control systems allows you to automate maintenance processes and quickly identify problems in the network.

Thus, we can summarize that different types of power lines have their own characteristics depending on the type, voltage and operating conditions. The choice between overhead and cable lines depends on specific requirements and circumstances, such as transmission distance, cost, reliability and environmental impact.

1.2. Grounding switches: purpose, types and features

Grounding switches are critically important elements of electrical installations and lightning protection systems that ensure the safe operation of electrical networks. Their main task is to ensure the safe discharge of electric currents into the ground to prevent people from being electrocuted, protect

electrical equipment from overvoltages and stabilize the operation of electrical systems.

1.2.1 Purpose of grounding conductors

1) Protection of people and animals from electric shock. Grounding conductors reduce the potential on metal parts of electrical installations and structures that may become dangerous due to insulation damage or overvoltage. This avoids electric shock to people and animals that may be in close proximity to the equipment.

2) Protection of equipment from overvoltage. Overvoltage in electrical networks can cause damage to electrical equipment. Grounding conductors allow you to redirect excess electrical energy to the ground, minimizing the risk of damage.

3) Lightning protection. Lightning protection systems, which include grounding conductors, ensure that lightning electrical charges are discharged into the ground, reducing the risk to buildings, people and equipment.

4) Voltage stabilization. Grounding helps equalize the potential in the electrical network, which stabilizes the operation of equipment and reduces the likelihood of emergencies.

1.2.2 Types of grounding rods

Grounding rods are classified according to various criteria, such as design, materials, shape, and installation method. Each type has its own advantages and disadvantages, depending on the conditions of use and the nature of the object. Let us consider the types of grounding rods with different approaches to classification.

- Classification by design

1) Natural grounding rods. These are metal parts of structures or infrastructure that already have contact with the ground. For example, metal pipes, reinforced concrete structures, or steel frames of buildings can be used as natural grounding rods. Their advantage is that they do not require additional installation, but their conductivity and corrosion resistance can be unpredictable.

2) Artificial grounding rods. These are specially installed metal elements designed for grounding. Artificial earth electrodes can be of different types, depending on their shape and location:

- Rod earth electrodes: Metal rods or rods that are driven vertically into the ground. They are used in places where deep penetration into the ground provides better contact with the ground. Such earth electrodes are made of copper or galvanized steel.

- Plate earth electrodes: Metal plates that are buried in the ground to a certain depth. They provide a large contact with the ground due to their large surface area.

Grounding Rods: Metal strips or wires that are laid horizontally in the ground. They are used to create grounding loops in large infrastructure facilities such as industrial buildings or power plants.

- Classification by material

- 1) Copper grounding rods. Copper is one of the best materials for grounding rods due to its high electrical conductivity and resistance to corrosion. Copper grounding rods are used in systems where high reliability is required, such as in hospitals, data centers or industrial plants.

- 2) Galvanized steel grounding rods. This is a cheaper option compared to copper. Zinc-coated steel has increased corrosion resistance, which increases the service life of such grounding rods. Galvanized steel grounding rods are widely used in construction and domestic systems.

- 3) Aluminum and steel-aluminum ground rods. They are a compromise between cost and efficiency. Aluminum is lighter but less resistant to corrosion compared to copper. Steel-aluminum ground rods combine the advantages of both metals.

- Classification by installation method

1) Vertical earthing rods. These are usually rod earthing rods installed vertically in the ground. They are used in confined spaces and where deep contact with the ground is required (e.g. in arid or rocky areas).

2) Horizontal earthing rods. These are strips or cables laid horizontally in the ground. They are used to create closed grounding loops or in cases where it is possible to lay earthing rods over a large area.

- Classification by area of use

1) Protective grounding. Used to protect people and equipment from dangerous currents that may occur when insulation is damaged or due to overvoltage. The main task is to ensure the discharge of current from the metal parts of the electrical installation.

2) Working grounding. Used for the normal operation of electrical equipment and maintaining a stable potential in the electrical network. This grounding ensures the effective operation of electronic and computer systems that are sensitive to voltage fluctuations.

3) Lightning protection grounding. This type of grounding is designed to discharge lightning currents to the ground, which protects buildings and equipment from mechanical and thermal damage, as well as from fires.

1.2.3 Selecting Grounding Rods

Several factors should be considered when selecting grounding rod types:

- Soil type: The conductivity and corrosive properties of the soil affect the effectiveness of grounding. Wet and clayey soils contribute to better grounding rod performance, while sandy or rocky soils can complicate the grounding process.

- Climatic conditions: The selection of grounding rods depends on climatic conditions, such as the depth of soil freezing and the level of groundwater. In cold regions, grounding rods should be installed deeper so that they do not lose contact with the ground in winter.

- Type of facility: Large industrial or infrastructure facilities require powerful grounding systems, while simplified grounding options can be used for individual residential buildings.

1.2.4 Requirements for grounding conductors and standards

Grounding conductors must comply with technical requirements and standards governing their design, materials and efficiency. In Ukraine, the main regulatory documents are the standards DSTU EN 62305 (for lightning protection systems), as well as DSTU 3647-97, which regulates general requirements for grounding of electrical installations. It is also important to consider international standards, such as IEC 60364, which regulates general principles of grounding and protection against electric shock.

Conclusions to the section

Groundings are an integral part of modern electrical systems, ensuring the safety, stability and reliability of their operation.

1. The main purpose of groundings is to protect people, animals and equipment from dangers caused by electrical surges, leakage currents and lightning discharges.

2. The variety of types of groundings (by design, material and installation method) allows you to choose the optimal solutions depending on the specifics of the object, soil type and climatic conditions.

3. The use of modern materials, such as copper, galvanized steel or steel-aluminum alloys, helps to increase the efficiency and durability of grounding systems.

4. Compliance with national and international standards ensures the safe operation of electrical installations and effective protection of the infrastructure.

Thus, the correct selection and design of grounding systems is a key factor in ensuring the safety and efficient operation of electrical networks in various operating conditions. Further development of technologies will contribute to the

creation of more reliable and economical solutions for the needs of modern power engineering.

Додаток Б

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
за матеріалами X Всеукраїнської науково-практичної конференції
**«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:
ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»**
20 грудня 2024 року



Полтава 2024

УДК 004.89 + 681.51

Збірник наукових праць за матеріалами X Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика», 20 грудня, 2024 р. / Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Редколегія: О.В. Шефер (головний редактор) та ін. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. – 124 с.

У збірнику представлені результати наукових досліджень та розробок в області сучасних електромеханічних систем та автоматизації, електричних машини і апаратів, моделювання та методів оптимізації, енергозбереження в електромеханічних системах, управління складними технічними системами, проблем аварійності та діагностики в електромеханічних системах та електричних машинах, інформаційно-комунікаційних технологіях та засобах управління. Призначений для наукових й інженерно-технічних працівників, аспірантів і магістрів.

Матеріали відтворено з авторських оригіналів та рекомендовано до друку IX Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився.

Відповідальний за випуск - д.т.н., професор О.В. Шефер.

Редакційна колегія:

О.В. Шефер – головний редактор, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Н.В. Єрмілова – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

С.Г. Кислиця – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Б.Р. Боряк – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

© Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ЗМІСТ

М.О. Бікчентаєв, Б.Р. Боряк АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНО-КЕРОВАНОГО РАДІО.....	8
В.В. Руденко ОГЛЯД СТАНДАРТУ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ LORAWAN	11
К.К. Брижак, А.С. Войтенко, С.В. Польцер, С.Г. Кислиця ГЕОТЕРМАЛЬНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ГЕОТЕРМАЛЬНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ.....	14
А.М. Капітон, О.С. Дзюбан, Р.М. Талибов ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЙ КОНТЕЙНЕРИЗАЦІЇ.....	16
О.С. Фомін ШИРОКОСМУГОВИЙ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТИ.....	18
Д.В. Кислиця, Г.М. Кожушко, С.Г. Кислиця ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКОНФОРТНОЇ БЛИСКОСТІ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ ЗІ СВІТЛОДІЮДНИМИ СВІТИЛЬНИКАМИ.....	19
О.С. Фомін ШИРОКОСМУГОВИЙ АДАПТИВНИЙ ДЖАММЕР ДЛЯ КОМЕРЦІЙНИХ ДРОНІВ.....	21
О.А. Іванов, Н.В. Єрмілова КОНТРОЛЬ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В СОНЯЧНІЙ ПАНЕЛІ.....	22
О.В. Шефер, О.Г. Дрючко, С.С. Удовик З'ЯСУВАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ Й ОБЛАСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ВІДДАЛЕНОГО УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЧИМИ ОБ'ЄКТАМИ.....	24
Л.І. Леві, Б.В. Качуровський СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО КЕРУВАННЯ СУПУТНЬО-ПЛАСТОВИМИ ВОДАМИ.....	28
В.О. Малород, Р.В. Захарченко, А.І. Криворот, П.Б. Митрофанов СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО НАПРЯМКІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АЗОТНОЮ СТАНЦІЄЮ.....	30
В.О. Тітов, Н.В. Єрмілова МОДЕРНІЗАЦІЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ПІДСТАНЦІЇ 110/10 кВ З ЖИВЛЯЧОЮ ПОВІТРЯНОЮ ЛІНІЄЮ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	33

<i>В.О. Пантелєєв</i> ІНТЕГРОВАНІЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ ІНЦИДЕНТІВ.....	35
<i>С.В. Індик, В.В. Панич</i> ПРОЄКТУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ КОРПОРАТИВНОЇ МЕРЕЖІ.....	37
<i>М.В. Обілець, Р.В. Захарченко</i> ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДВОСТОРОННІХ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА ПРАКТИЧНОМУ ДОСЛІДІ.....	39
<i>А.В. Марчук</i> СЕРВІСИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ ДЛЯ ІНТЕГРАЦІЇ З ОБ'ЄКТНИМИ ХМАРНИМИ СХОВИЩАМИ.....	41
<i>О.С. Марченко, В.М. Галай</i> РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕВАТОРОМ.....	43
<i>О.В. Шефер, В.І. Романенко</i> ПОБУДОВА СЕНСОРНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВИТОКУ ГАЗУ З ГАЗОПРОВОДУ.....	45
<i>І.М. Дюдюк, О.С. Фомін</i> УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОТИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ З ПІДВИЩЕНОЮ ЗАВАДОСТІЙКІСТЮ.....	47
<i>О.В. Шефер, С.В. Мигаль</i> ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ 5G ТА 6G В КОНТЕКСТІ СПОЖИВЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	49
<i>О.Г. Дрючко, О.В. Сухорєбрий, О.О. Куденко</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ ОРГАНІЗАЦІЇ РОБОТИ ТРАКТУ OTN DWDM.....	51
<i>С.Г. Кислиця, С.І. Демус</i> РОЗВИТОК МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ МАЙБУТНЬОГО ПОКОЛІННЯ.....	54
<i>О.В. Шефер, І.П. Плюйко, Я.О. Зоць</i> ПРИНЦИПИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХИСТУ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ВІД ЗОВНІШНІХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВПЛИВІВ.....	56
<i>С.Г. Кислиця, Н.М. Слєпченко</i> ЗАСОБИ АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ.....	58
<i>С.С. Удовик</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ Li-Fi ДЛЯ ПОБУДОВИ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ ПІДПРИЄМСТВА.....	60

<i>I. Silin, V. Lysechko</i> MODELS FOR DESCRIBING THE CONDITIONS OF RADIO WAVE PROPAGATION INSIDE BUILDINGS.....	62
<i>С.В. Індик, В.О. Михайленко</i> ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ІР ТЕЛЕФОНІЇ.....	63
<i>М.М. Губіцький</i> МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНІЗМУ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ЦЕГЛИ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА.....	64
<i>С.Г. Кислиця, А.І. Остапенко</i> ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ.....	66
<i>О.Г. Дрючко, Б.С. Гребенюк, Д.А. Погрібняченко, Д.О. Фещенко, Р.А. Белей</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФІЗИЧНИХ СЕРЕДОВИЩ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ.....	68
<i>В.М. Галай, Д.П. Плешкань</i> РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО СОРТУВАННЯ ПОСИЛОК.....	72
<i>А.В. Марчук</i> ВИКОРИСТАННЯ СИМУЛЯТОРА AWS СЕРВІСІВ LOCALSTACK ДЛЯ НАВЧАННЯ РОБОТІ З ХМАРНИМИ СЕРВІСАМИ ТА ІНФРАСТРУКТУРОЮ.....	74
<i>А.М. Капітон, Р.М. Талибов, О.С. Дзюбан</i> ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ..	76
<i>Є.О. Мельник</i> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ....	78
<i>С.Г. Кислиця, Є.В. Вітченко</i> ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ГІДРОАГРЕГАТУ МІНІ-ГЕС.....	79
<i>О.В. Шефер, А.В. Пащенко</i> ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ У ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	81

О.Г. Дрючко, Н.В. Бунякіна, І.А. Штанько, М.Ю. Першін, М.В. Качан З'ЯСУВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ УСТАНОВКИ КОМПЛЕКСНОЇ ПІДГОТОВКИ ГАЗУ.....	83
Е.V. Kyslytsia, О.В. Petryaeva MANAGEMENT SKILLS OF A HEALTHCARE FACILITY MANAGER IN THE CONTEXT OF TREATING PATIENTS WITH COMBAT INJURIES.....	85
С.Г. Кислиця, А.С. Боровик НАДІЙНІСТЬ ДУБЛЬОВАНОЇ МЕРЕЖІ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО УПРАВЛІННЯ.....	87
А.М. Федоренко МОДЕЛЬ НАЗЕМНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ УСУНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ У ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ.....	89
С.С. Голубцов ОРГАНІЗАЦІЙНА СТРУКТУРА СИСТЕМИ КІБЕРБЕЗПЕКИ В ІТС ПОЛЬОВИХ ВУЗЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ПУ РІЗНИХ ЛАНОК УПРАВЛІННЯ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ.....	90
С.В. Волоський, М.А. Штомпель АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ТРИВАЛИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	92
П.В. Соловійов, Л.О. Токар ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ АДАПТИВНОЇ БАЗОВОЇ КЛАСТЕРІЗАЦІЇ У МЕРЕЖІ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ VANET.....	94
О. Sokolov INTELLIGENT ROUTING IN AD HOC NETWORKS USING NEURAL NETWORKS.....	97
Л.І. Леві, М.О. Шеремет ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ КОМПРЕСОРІВ.....	100
С.Г. Кислиця, А.О. Ткаченко РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СКРУЧУВАННЯ.....	102
О.В. Шефер, О.С. Ястреба, О.С. Педченко АНАЛІЗ ЧИННИКІВ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ У ВНУТРІШНЬОМУ ПРОСТОРІ БПЛА.....	104

О.І. Євдоченко ОСОБЛИВОСТІ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ КОДІВ РІДА – СОЛОМОНА.....	106
Є.М. Заніздра АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ТА РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИКИ ДЛЯ ТЕПЛООВОГО ВУЗЛА КОРПУСУ.....	107
С.Г. Кислиця, І.О. Вишневський РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ВЕНТИЛЬНОМУ ІНДУКТОРНОМУ ДВИГУНІ.....	109
І.О. Єндіяров, Н.В. Єрмілова РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЄКТУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОМУНАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ БАГАТОПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ.....	112
С.Г. Кислиця, Р.М. Ковган ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ БАГАТОМОТОРНОГО ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНОВОГО ШАРОВОГО КОНВЕЄРУ.....	114
О.А. Мешко, Н.В. Єрмілова РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ЗАЗЕМЛЕННЯ ДЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ.....	116
В.В. Пушкарь СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕРСТАТІВ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ОБМЕЖЕННЯХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	118
О.М. Федоренко РОЗРОБКА МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ НАЗЕМНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ.....	119
А.О. Говстяниця, Б.Р. Боряк АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНО-КЕРОВАНОВОГО РАДІО.....	120

УДК 621.314.2

О.А. Мешко, магістрант,

Н.В. Єрмілова, к.т.н., доцент

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ЗАЗЕМЛЕННЯ ДЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Електрика застосовується у багатьох сферах людської діяльності і для того, аби її доставити до безпосередніх споживачів, використовуються численні системи кабелів та проводів, протягнутих у повітрі, в землі або по спеціальним кабельним спорудам. Ці проводи та кабелі формують лінії електропередачі (ЛЕП). ЛЕП мають різні особливості, залежно від типу, напруги та умов експлуатації. Вибір між повітряними і кабельними лініями залежить від конкретних вимог і обставин, таких як відстань передачі, вартість, надійність і вплив на навколишнє середовище.

Заземлювачі є критично важливими елементами електричних установок і систем блискавкозахисту, що забезпечують безпечну роботу електричних мереж. Їх основне завдання – забезпечити безпечне відведення електричних струмів у землю для запобігання ураженню людей електричним струмом, захисту електрообладнання від перенапруг і стабілізації роботи електричних систем [1].

Різноманіття типів заземлювачів (за конструкцією, матеріалом і способом встановлення) дозволяє обирати оптимальні рішення залежно від специфіки об'єкта, типу ґрунту і кліматичних умов.

Використання сучасних матеріалів, таких як мідь, оцинкована сталь або сталюалюмінієві сплави, сприяє підвищенню ефективності та довговічності систем заземлення [2]. Дотримання національних і міжнародних стандартів забезпечує безпечну експлуатацію електроустановок і ефективний захист інфраструктури.

Таким чином, правильний вибір і проектування систем заземлення є ключовим фактором у забезпеченні ефективної роботи електричних мереж у різних умовах експлуатації. Подальший розвиток технологій сприятиме створенню більш надійних і економічних рішень для потреб сучасної електроенергетики.

В роботі була поставлена мета знайти сучасні методи розрахунку заземлюючих пристроїв, дослідити залежності питомого електричного опору ґрунту від вологості та температури, також дослідити імпульсні опори заземлювачів повітряних ЛЕП та розрахувати імпульсний опір залізобетонних фундаментів опору повітряних ліній.

Практичною цінністю дослідження є те, що результати роботи дозволять розробити ефективніші методи розрахунку заземлюючих пристроїв, що зменшить витрати на їх проектування та будівництво, а також покращить їх надійність в експлуатації. Також вивчення імпульсних опорів заземлювачів сприятиме підвищенню захисту електроустановок від наслідків коротких

замикань та блискавкових розрядів, що зменшить ризики для людей, тварин і обладнання.

Дослідження залежності питомого електричного опору ґрунту від вологості та температури дозволить враховувати регіональні особливості ґрунтів та клімату, забезпечуючи оптимальну роботу заземлюючих пристроїв навіть у складних умовах (наприклад, у посушливих або морозних регіонах) [3].

Отримані результати можуть бути використані при будівництві нових повітряних ЛЕП, реконструкції існуючих мереж, а також у модернізації застарілих заземлюючих систем, що сприятиме зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню надійності енергопостачання. Удосконалення систем заземлення сприятиме зменшенню втрат електроенергії, що позитивно вплине на екологію за рахунок зменшення непродуктивного споживання енергії.

Результати роботи можуть бути використані для уточнення норм та стандартів, які стосуються проектування і будівництва систем заземлення, що забезпечить їх відповідність сучасним вимогам електробезпеки.

Отримані дані допоможуть обґрунтувати використання нових матеріалів або комбінованих конструкцій (наприклад, сталесалюмінієвих заземлювачів) для забезпечення ефективного заземлення при зниженні витрат. Розроблені методики можуть бути адаптовані для об'єктів із підвищеними вимогами до безпеки, таких як енергетичні підприємства, медичні установи, дата-центри або військові об'єкти.

Ці практичні аспекти підкреслюють важливість проведеного дослідження для енергетичної галузі України та інженерної практики.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Кунцевич, О. О. Системи заземлення в енергетиці: принципи проектування та експлуатація.* – Київ: Вид-во «Техніка», 2018. – 320 с.
2. *Мороз, В. І., Рибак, П. М. Електробезпека та заземлення в електроустановках.* – Харків: Вид-во «Основа», 2020. – 45 с.
3. *Карпенко, Д. А. Методи розрахунку імпульсних опорів заземлювачів у ґрунтах різної провідності.* – Львів: Вид-во «Політехніка», 2019. – 78 с.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF GROUNDING SYSTEMS FOR OVERHEAD POWER LINES

O. Meshko, Master's Student,

N. Yermilova, Ph.D., Associate Professor

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"

Додаток В
Плакати графічної частини

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Розроблення та дослідження систем
заземлення для повітряних ліній
електропередач**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконала:

Студентка 2 мМЕ групи

Мешко О.А.

Керівник:

доцент, канд. техн. наук

Єрмілова Н.В.

Полтава 2025

2

Актуальність теми полягає у необхідності модернізації систем заземлення для забезпечення безпеки, надійності та енергоефективності електроустановок, особливо в умовах старіння інфраструктури, змін клімату та зростаючих енергетичних потреб. Врахування регіональних особливостей ґрунтів і клімату є ключовим для адаптації систем до сучасних викликів в Україні.

Метою роботи є вдосконалення сучасних методів розрахунку заземлюючих пристроїв для повітряних ліній електропередач (ЛЕП).

Для виконання поставленої мети в роботі необхідно виконати наступні **завдання**:

- Провести огляд існуючих конструкцій і технологій заземлення для повітряних ЛЕП, враховуючи вимоги стандартів та нормативів;
- Дослідити залежність питомого електричного опору ґрунту від вологості, температури та інших фізико-хімічних характеристик.
- Вивчити процеси розтікання струмів у ґрунті та їхній вплив на ефективність заземлювачів.
- Розробити математичну модель для розрахунку імпульсних опорів заземлювачів різних типів.
- Виконати експериментальні дослідження роботи заземлюючих пристроїв за реальних умов експлуатації.
- Розробити рекомендації щодо вибору матеріалів і конструкцій для заземлювачів із урахуванням природних та експлуатаційних умов.

3

- **Об'єкт дослідження** – фізичні процеси, що відбуваються в заземлюючих пристроях повітряних ЛЕП, зокрема розтікання струмів у ґрунті, і залежність цих процесів від характеристик ґрунту, типів заземлювачів та їх конструкцій.
- **Предмет дослідження** – системи заземлення повітряних ліній електропередач, які включають заземлюючі пристрої, методики їхнього розрахунку та особливості експлуатації у різних природних умовах.

Наукова новизна роботи:

- Удосконалено методику розрахунку імпульсних опорів заземлюючих пристроїв з урахуванням змінних фізичних властивостей ґрунту.
- Розроблено математичну модель багатоланкових систем заземлення, що дозволяє враховувати вплив температури, вологості та типу ґрунту на ефективність роботи.
- Уперше проведено комплексне дослідження імпульсного опору залізобетонних фундаментів опор ЛЕП у реальних умовах.
- Запропоновано конструктивні рекомендації для створення економічно вигідних і довговічних заземлюючих пристроїв, адаптованих до природних умов України.

4

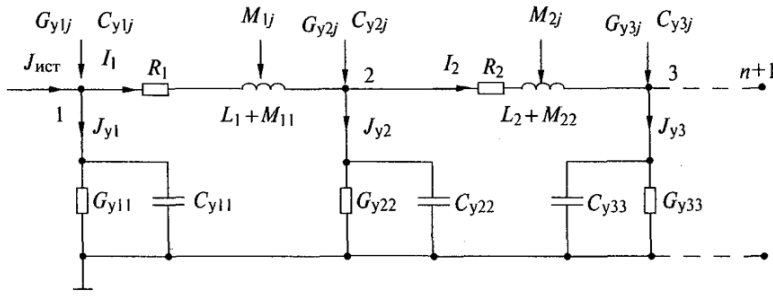


Рисунок 2.1 - Багатоланкова електромагнітно зв'язана модель стрижневого заземлювача

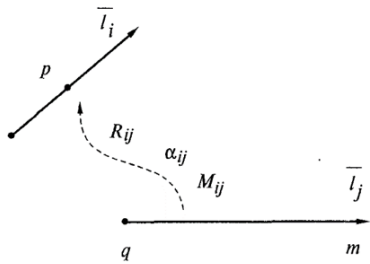


Рисунок 2.2 - До визначення взаємних параметрів двох стрижнів

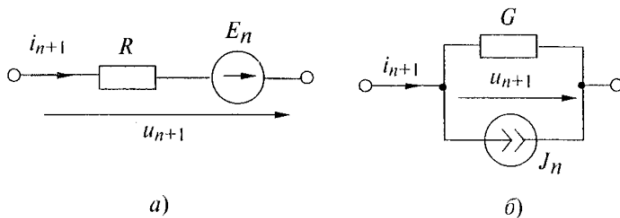


Рисунок 2.3 - Дискретні схеми заміщення котушки (а) і конденсатора (б)

5

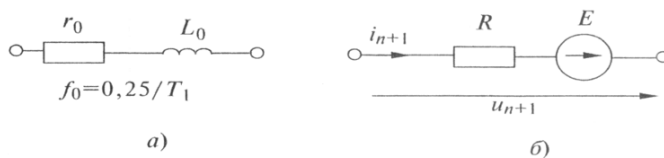
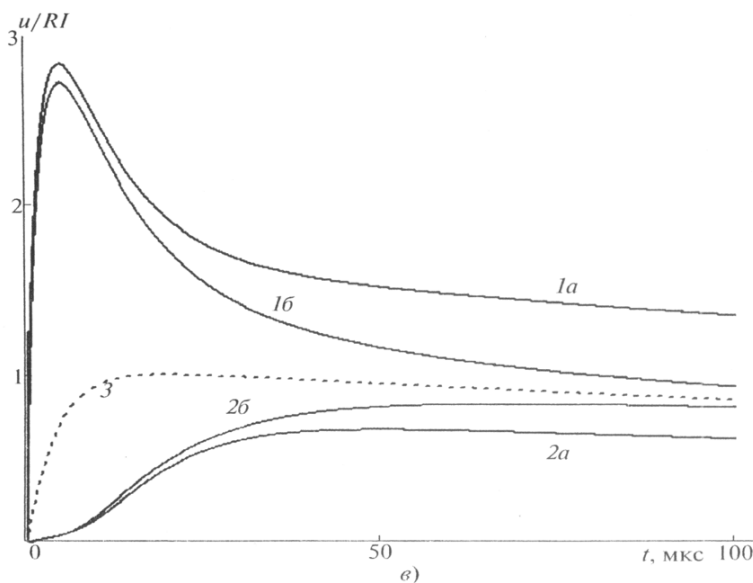


Рисунок 2.4 - Схема заміщення внутрішнього опору сталевго стрижня на еквівалентній частоті (а) і дискретна схема (б) зміни потенціалу сталевго стрижня ($\mu = 600$, $\gamma = 7$ См/м, $L = 100$ м, $D = 16$ мм, $t = 0,5$ м) в однорідній землі ($\rho = 100$ Ом·м, $\epsilon = 10$) на початку (1а і 1б) і кінці (2а і 2б) стержня при імпульсі струму $10/350$ мкс (в); потенціал на стаціонарному опорі R стрижня (3)



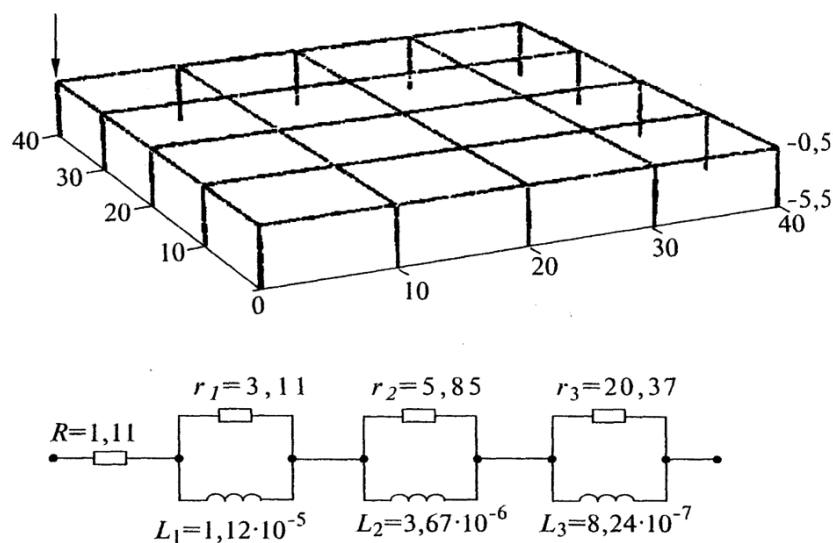


Рисунок 2.5 - Схема заміщення заземлювача з мідних стрижнів в однорідній землі

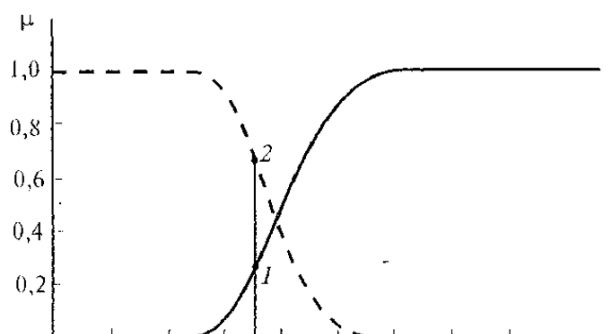


Рисунок 3.1 - Сімейство функцій приналежності для нечітких інтервалів вологості: функція належності до інтервалу значень «сухо» (v_1); до інтервалу «волого» (v_2).

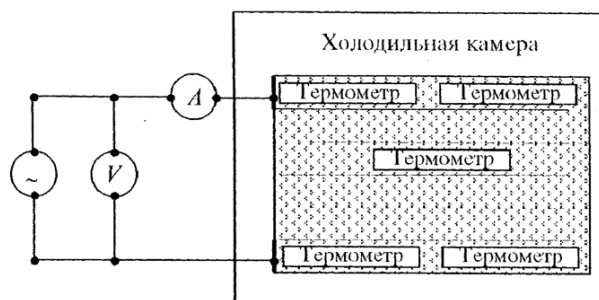


Рисунок 3.2 - Схема лабораторної установки для визначення питомої електричної опору ґрунту

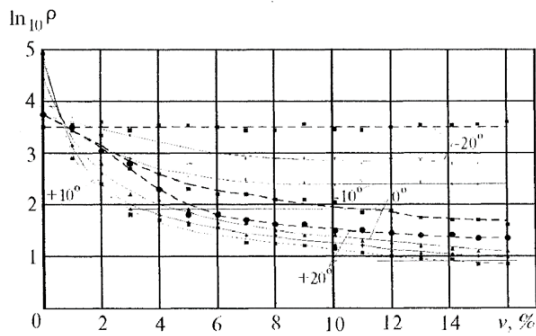


Рисунок 3.3 - Залежності ρ от v для супіску (-----) та піску (- - -) при різній температурі

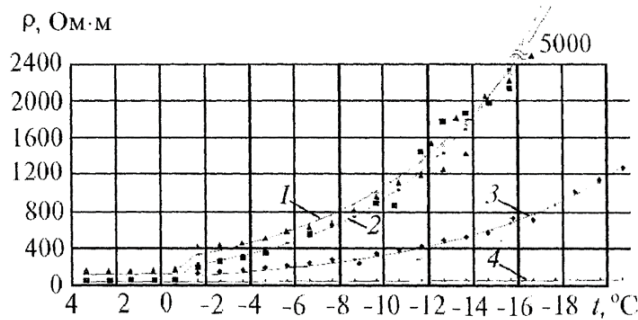


Рисунок 3.4 - Залежності питомого електричного опору ρ від температури t : 1 - для піску вологістю 5%; 2 - для піску вологістю 16%; 3 - для супіску вологістю 16% (1-3 - побудовані по (10) і (11)); 4 - для піску вологістю 16% (за формулою (2)); експериментальні данні: ■ — пісок 16%; ◆ — супісок 16%; ▲ — пісок 5%

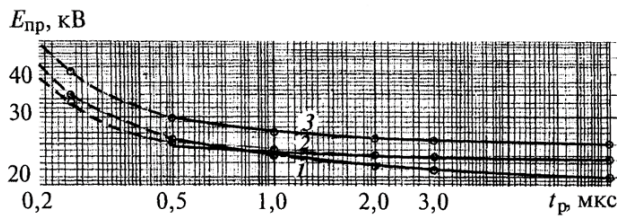


Рисунок 4.1 - Залежності пробивної напруженості піщаного ґрунту в однорідному електричному полі від часу перерозряду: 1- $\rho = 500$ Омм; 2 - 2000 Омм; 3 - 10000 Омм

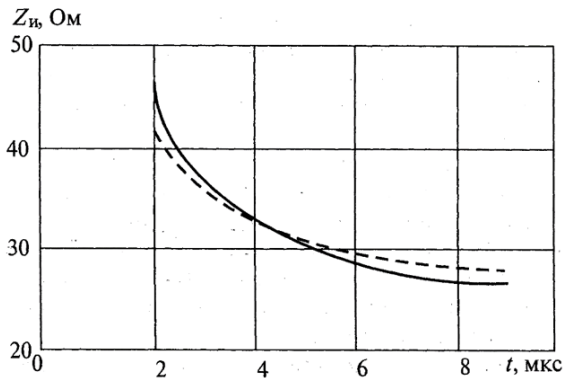


Рисунок 4.3 - Залежності імпульсного опору протяжного заземлювача від часу дії імпульсу: — — розрахунок; ---- натуральні випробування

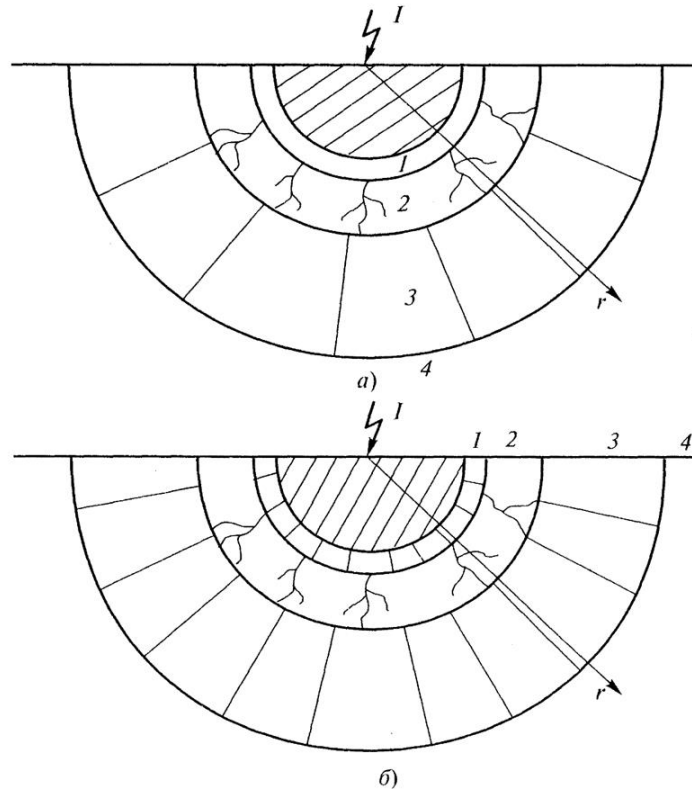


Рисунок. 5.1 - Передбачувані зони навколо напівсферичного заземлювача з бетону (а) і зона іскроутворення поза бетонної обмазки (б)

Висновки

1. В роботі проведений аналіз особливостей ліній електропередач, розглянуті їх експлуатаційні характеристики, а також використання нових технологій в будівництві ЛЕП, розглянуті типи та особливості заземлювачів
2. Зроблено висновок, що заземлювачі є невід'ємною частиною сучасних електричних систем, які забезпечують безпеку, стабільність і надійність їхньої роботи
3. Проведений аналіз математичних моделей пристроїв заземлення на основі теорії ланцюгів з зосередженими параметрами.
4. Запропоновано методикку побудови моделей залежності питомого опору від вологості і температури на основі експериментів і теорії нечітких множин.
5. Приведені розрахункові формули для імпульсного опору та фіктивного радіуса зони іскроутворення зосереджених і протяжних заземлювачів при протіканні повторних струмів блискавки
6. Запропоновано відносно просту модель для розрахунку імпульсних опорів для різних опор повітряних ліній електропередачі.