

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

Кваліфікаційна робота
магістра

на тему Підвищення ефективності роботи системи заземлення та захисту
від блискавки на електричній підстанції

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКзм-22
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____ **Катерина БАЙКОВА**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник зав.каф. ЕлІн, к.т.н., доц., О. КОЛЛАРОВ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ **Е. НЕМЦЕВ**

(підпис)

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

Студент

_____ (підпис)

_____ (дата)

_____ (дата)

ЛУЦЬК – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Катерині БАЙКОВІЙ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності роботи системи заземлення та захисту від блискавки на електричній підстанції

керівник роботи Олександр КОЛЛАРОВ, зав.каф. ЕлІн, к.т.н., доцент
 (ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 10 травня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: висота опор блискавковідводів – 24 м,
довжина заглибленої частини опори – 4 м, середній діаметр заглибленої
частини опори – 0,5 м, висоті прохідного порталу – 18 м, площу захисту –
40x20 м, опір природних заземлювачів – не більше 0,5 Ом, глибина укладання
заземлювача – 0,7 м, збільшення питомого опору шару сезонних змін ґрунту –
у 1,4 рази, товщина шару сезонних змін – 1,5 м, коефіцієнт подібності – 0,8,
коефіцієнт врахування зниження опору променевого заземлювача – 0,5, струм
іскроутворення – 100 кА, імпульсний коефіцієнт заземлювача – 1, ступінь
надійності захисту ВРП від прямих ударів блискавки – 0,99, ймовірність
переходу імпульсного перекриття ізоляції в силову дугу – 0,9, число грозових
годин на рік – 40 годин, площа ВРП – 75000 м².

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд заземлюючих систем та захисту від блискавки на електричних підстанціях.
 2. Визначення причини неефективної роботи систем заземлення та блискавкозахисту на електричних підстанціях.
 3. Огляд теоретичних питань при облаштуванні систем заземлення та блискавкозахисту.
 4. Розробка і розрахунок системи заземлення та блискавкозахисту.
 5. Моделювання та візуалізація картини роботи системи заземлення і блискавкозахисту.
 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)
- Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 5	О. КОЛЛАРОВ, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЕМЦЕВ		

7. Дата видачі завдання 19 лютого 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	19.02.24 – 05.03.24	
2.	Розділ 2	06.03.24 – 21.03.24	
3.	Розділ 3	22.03.24 – 06.04.24	
4.	Розділ 4	07.04.24 – 22.04.24	
5.	Розділ 5	23.04.24 – 10.05.24	
6.			

Студент _____
(підпис)

Катерина БАЙКОВА
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олександр КОЛЛАРОВ
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Катерина БАЙКОВА. Підвищення ефективності роботи системи заземлення та захисту від блискавки на електричній підстанції / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2024.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі здійснено загальний огляд заземлюючих систем та захисту від блискавки на електричних підстанціях.

У другому розділі було виконано огляд теоретичних питань при облаштуванні систем заземлення та блискавкозахисту.

У третьому розділі здійснено розрахунок системи заземлення та блискавкозахисту підстанції.

У четвертому розділі було здійснено моделювання та візуалізація картини роботи системи заземлення і блискавкозахисту.

Ключові слова: система заземлення, система блискавкозахисту, електрична підстанція, властивості ґрунту, пристрої захисту від ударів блискавки, зона захисту від блискавки, відкритий розподільний пристрій, програмне середовище, моделювання

SUMMARY

Kateryna BAIKOVA. Enhancing the efficiency of the grounding system and lightning protection at an electrical substation / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Lutsk, 2024.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four chapters, conclusions, a list of used literature and appendices.

In the first chapter, a general overview of grounding systems and lightning protection at electrical substations was carried out.

In the second chapter, an overview of theoretical issues in the arrangement of grounding and lightning protection systems was performed.

In the third section, the grounding and lightning protection system of the substation is calculated.

In the fourth chapter, modeling and visualization of the picture of the grounding and lightning protection system was carried out.

Keywords: grounding system, lightning protection system, electrical substation, soil properties, lightning protection devices, lightning protection zone, open switchgear, software environment, simulation.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД ЗАЗЕМЛЮЮЧИХ СИСТЕМ ТА ЗАХИСТУ ВІД БЛИСКАВКИ НА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЯХ	10
1.1 Важливість заземлюючих систем та захисту від блискавки на електричних підстанціях	10
1.2 Взаємодія між системами заземлення та блискавкозахисту	12
1.3 Проблемні питання при впровадженні ефективних систем заземлення та захисту від блискавки	13
1.4 Причини неефективної роботи систем заземлення та блискавкозахисту на електричних підстанціях	16
2 ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ПИТАНЬ ПРИ ОБЛАШТУВАННІ СИСТЕМ ЗАЗЕМЛЕННЯ ТА БЛИСКАВКОЗАХИСТУ	22
2.1 Визначення спільних параметрів системи заземлення та блискавкозахисту	22
2.2 Вплив властивостей ґрунту на роботу систем заземлення при різних значеннях частоти струму	32
2.3 Огляд статей, з питань що досліджуються	36
3 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ ТА БЛИСКАВКОЗАХИСТУ	44
3.1 Вимоги до пристроїв заземлення та захисту від блискавки на підстанції	44
3.2 Визначення місць розташування пристроїв захисту від ударів блискавки	45
3.3 Визначення зон захисту від блискавки на підстанції	46
3.4 Облаштування та розрахунок заземлюючого пристрою електричної підстанції	49

3.5 Оцінка надійності роботи відкритого розподільного пристрою підстанції при прямих ударах блискавки	58
4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ КАРТИНИ РОБОТИ СИСТЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ І БЛИСКАВКОЗАХИСТУ	62
4.1 Теоретичні основи роботи систем заземлення та блискавкозахисту для здійснення моделювання	62
4.2 Використання програмного середовища SafeGrid для моделювання процесів роботи системи заземлення	63
4.3 Моделювання системи заземлення	67
ВИСНОВКИ	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	77
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	81
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	85

ВСТУП

У сфері енергетики забезпечення безпеки та надійності систем живлення має першочергове значення. Електричні підстанції є критичними вузлами в мережах розподілу електричної енергії та вимагають особливої уваги через їх вразливість як до внутрішніх збоїв, так і до зовнішніх впливів. Одними з найсерйозніших можуть бути порушення, що викликані ударами блискавки, які можуть викликати стрибки напруги, завдати перешкод роботі обладнання та пошкодити його. Система заземлення підстанцій розробляють крім усього іншого для захисту від таких небезпечних явищ, забезпечуючи шлях для струмів пошкодження та грозових розрядів, тим самим зменшуючи потенційні пошкодження та забезпечуючи стабільність роботи енергосистеми.

Таким чином, ефективність роботи систем заземлення та блискавкозахисту має суттєве значення, а оптимізація цих систем може призвести до значного покращення загальної безпеки та функціональних показників роботи підстанції. На електричних підстанціях це можна реалізувати за допомогою інноваційних методів та передових технологічних рішень. Актуальність такої роботи можна пояснити збільшенням частоти та серйозності випадків впливу погодних умов у поєднанні зі зростаючим попитом на надійність електропостачання.

Системи заземлення є невід'ємною частиною захисних заходів на електричних підстанціях. Вони виконують найважливіші функції стабілізації напруги під час нормальної роботи, забезпечуючи контролювання значення наведеної напруги, захищаючи обладнання та персонал та сприяючи безпечному розсіюванню струмів пошкодження та грозових перенапруг. Традиційні методи заземлення часто не справляються зі складними та високоамплітудними імпульсними струмами, що генеруються ударами блискавки. Це положення підкреслює

необхідність всебічного перегляду та вдосконалення існуючих методів заземлення.

Метою роботи є пошук шляхів підвищення ефективності роботи системи заземлення та захисту від блискавки на електричній підстанції.

Завданнями роботи є:

- аналіз існуючих практик заземлення та блискавкозахисту, що застосовуються на електричних підстанціях,
- визначення обмежень та проблем, пов'язаних з експлуатацією існуючих систем,
- дослідження інноваційних матеріалів та технологій, що можуть підвищити ефективність заземлення,
- запропонувати оптимізовану конфігурацію для систем заземлення та блискавкозахисту, яка зменшує ризик відмови обладнання та підвищує надійність роботи підстанції.

Об'єкт роботи є електрична підстанція, зокрема, зосереджена увага на її інфраструктурі, пов'язаній із системами заземлення та механізмами блискавкозахисту.

Предметом роботи є методології та технології, залучені до заземлення та блискавкозахисту, що включає в себе вивчення традиційних і сучасних матеріалів заземлення, принципів проектування систем заземлення, розміщення блискавковідводу та інтеграцію інноваційних технологій, таких як провідний бетон або передові заземлювальні мати.

1 ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД ЗАЗЕМЛЮЮЧИХ СИСТЕМ ТА ЗАХИСТУ ВІД БЛИСКАВКИ НА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЯХ

1.1 Важливість заземлюючих систем та захисту від блискавки на електричних підстанціях

Електричні підстанції мають та відіграють вирішальну роль при передачі та розподілі електроенергії. Вони виступають вузлами, у яких з'єднуються та комутуються лінії електропередач і де відбувається перетворення напруг. Це твердження вимагає забезпечення цілісності та безпечної їх роботи. Одним із фундаментальних аспектів ефективного функціонування підстанції є належна робота системи заземлення в поєднанні з надійністю системи захисту від блискавок. Останні системи необхідні для захисту електричного обладнання та забезпечення безпеки працівників. Системи заземлення на електричних підстанціях призначені для досягнення трьох основних цілей [1]:

- забезпечення безпеки персоналу шляхом обмеження крокової напруги та напруги дотику,
- захисту обладнання від електричних збоїв,
- створення шляху для розсіювання струмів блискавок та комутаційних перенапруг.

Зазвичай, система заземлення складається з розгалуженої мережі провідників, з'єднуючих елементів і заземлюючих стрижнів, які закопано в землю. Ефективність роботи системи заземлення значною мірою залежить від значення питомого опору ґрунту, конструкції зазначеної системи та належного і своєчасного технічного обслуговування. Основна функція системи заземлення на електричних підстанціях – створення «опорної точки». Заземлюючи одну точку системи живлення (як правило, нейтраль трансформатора або генератора), ця система забезпечує стабільність значення напруги відносно «землі» під час нормальної роботи. Це дозволяє

уникнути коливань значення напруги, які можуть призвести до збоїв у роботі обладнання та неефективності його роботи. Іншою роллю системи заземлення є захист компонентів підстанції від електричних несправностей. У разі виникнення несправності система заземлення забезпечує шлях для струму замикання до «землі». Це допомагає швидко привести в дію захисні пристрої, які можуть ізолювати несправну частину від решти системи, щоб запобігти пошкодженню обладнання та підтримувати стабільність роботи системи. Крім того, системи заземлення є важливими для забезпечення безпеки роботи персоналу, що працює на підстанціях. При належному функціонуванні системи заземлення зменшується ризик ураження електричним струмом, гарантується забезпечення відсутності різниці потенціалів у досяжних межах, тим самим запобігаючи небезпеці виникнення «крокової напруги» та «напруги дотику» [2].

Розряди блискавок становлять значну небезпеку для електричних підстанцій. Лише один удар блискавки може «виплеснути» десятки тисяч вольт, що здатні викликати пошкодження електричного обладнання та серйозні збої в його роботі. Системи блискавкозахисту призначені для захисту підстанцій від цих ризиків. Зазвичай ці системи складаються з повітряних струмоприймчів, струмопроводів і заземлюючих електродів. Усі ці компоненти працюють спільно для належного «перехоплювання» ударів блискавки та безпечного розсіювання електричної енергії в «землю», тим самим захищаючи електрообладнання та забезпечуючи безперервну його роботу. Проектування систем блискавкозахисту передбачає розрахунок «захисного кута» або «сфери, що котиться» для того, щоб визначити розміщення повітряних конструкцій для перехоплення потенційних ударів блискавки. Вірне встановлення та технічне обслуговування є досить важливими, оскільки вихід із ладу одного компонента може поставити під загрозу ефективність роботи усієї системи [3].

1.2 Взаємодія між системами заземлення та блискавкозахисту

Системи заземлення та блискавкозахисту, хоч і слугують різним цілям, є взаємозалежними. Правильно і відповідним чином спроектована система заземлення підвищує ефективність системи блискавкозахисту, забезпечуючи шлях до землі з низьким опором, сприяючи швидкому та безпечному розсіюванню потужних струмів, викликаних ударами блискавки. Обидві системи повинні бути інтегровані одна до одної та з загальною конструкцією підстанції. Це гарантує, що у разі ударів блискавки або електричних збоїв системи працюють узгоджено, щоб зменшити будь-які потенційні пошкодження та забезпечити безпеку персоналу та обладнання.

Проектування систем заземлення електричних підстанцій регулюється різними стандартами та нормативами. Ці документи гарантують, що система заземлення забезпечить належну безпеку та ефективну роботу в різних умовах експлуатації. Зазначені стандарти містять вказівки щодо того, як розрахувати розміри системи заземлення та необхідні матеріали на основі питомого опору ґрунту, напруги системи та умов наявних несправностей. Процес проектування передбачає визначення конфігурації мережі, яка мінімізує опір заземлення та гарантує, що «крокова напруга» та «напруга дотику» знаходяться у припустимих межах. У якості застосованих матеріалів використовують мідь або оцинковану сталь завдяки їх стійкості до корозії, оскільки це визначає довговічність і надійність системи заземлення [4].

Належне конструювання, улаштування та регулярне обслуговування системи заземлення і системи блискавкозахисту мають вирішальне значення для роботи електричної підстанції. Конструкція цих систем має відповідати новітнім досягненням, що гарантуватиме надійність роботи та забезпечувати найменший можливий опір. Регулярне технічне

обслуговування передбачає огляд і тестування системи заземлення для виявлення та усунення таких проблем, як корозія матеріалів, ослаблення з'єднань і зміна питомого опору ґрунту. Ці фактори можуть з часом збільшити опір землі та знизити ефективність роботи системи [4].

Нормативні документи та стандарти містять вичерпні вказівки щодо оцінки ризику удару блискавки та відповідного проектування систем захисту. Ефективність системи блискавкозахисту на підстанції значною мірою залежить від детальної оцінки ризику, яка враховує частоту гроз, розташування підстанції та чутливість встановленого обладнання. На основі цієї оцінки визначається необхідний рівень захисту та конструкція системи для перехоплення та безпечного відведення струмів блискавки «на землю». Комплексний підхід до проектування системи заземлення та захисту від блискавки передбачає спільне проектування для підвищення загальної безпеки та надійності роботи підстанції. Це може гарантувати мінімізацію амплітуд напруги всередині підстанції у разі виникнення несправності або ударів блискавки. Досить важливо, щоб системи заземлення та блискавкозахисту працювали синхронно з іншими механізмами захисту підстанції для належного контролю перенапруг та запобіганню виходу системи з ладу.

1.3 Проблемні питання при впровадженні ефективних систем заземлення та захисту від блискавки

Однією з головних проблем у впровадженні ефективних систем заземлення на електричних підстанціях є їх робота у різних умовах та при різних значеннях питомого опору ґрунту. Питомий опір ґрунту може значно вплинути на роботу систем заземлення, оскільки його значення суттєво впливає на значення опору заземлення та ефективність

розсіювання струмів. Території з високим питомим опором ґрунту вимагають облаштування більш складних і розгалужених конструкцій заземлюючої системи, що може збільшити витрати на встановлення та обслуговування. Іншою проблемою може бути відзначена застаріла інфраструктура багатьох підстанцій. «Старі» системи заземлення можуть не відповідати поточним діючим стандартам і з часом можуть погіршити свої властивості через корозію та фактори навколишнього середовища, що призводить до збільшення опору заземлення та зниження ефективності роботи системи. Модернізація «старих» систем може бути досить дорогим і викликати збої в роботі електричних підстанцій [5].

Для вирішення зазначених проблем можна використати інноваційні рішення та сучасні досягнення. Інноваційні методи передбачають використання матеріалів для зменшення опору заземлення, які являють собою високопровідні сполуки, що покращує провідність ґрунту навколо заземлюючих електродів. Зазначені матеріали утримують вологу та зменшують питомий опір ґрунту, таким чином підвищуючи загальну ефективність системи заземлення.

Системи блискавкозахисту також можуть стикаються з деякими проблемами, особливо в регіонах, де спостерігається висока грозова активність. Основна проблема при цьому полягає в тому, щоб система могла швидко впоратися з кількома послідовними ударами блискавки. Крім того, необхідно підтримувати цілісність конструкції цих систем у «суворих» умовах навколишнього середовища, що може бути складним завданням, оскільки з часом їх компоненти можуть бути пошкоджені або погіршені їх властивості. Розробка більш надійних і ефективних систем блискавкозахисту може бути здійснено шляхом використання удосконалених матеріалів і новітніх технологій. Широке впровадження в останній час отримують технології інтелектуального моніторингу, що інтегруються в системи блискавкозахисту, і які використовують датчики для постійного моніторингу стану та ефективності роботи окремих

компонентів. Дані, зібрані з цих датчиків, дозволяють здійснювати аналіз для прогнозування збоїв і відповідного планування технічного обслуговування [6].

З розвитком електричних мереж, системи заземлення та блискавкозахисту на підстанціях потребують та зазнають значних змін. Серед таких визначальних тенденцій можна виділити [3]:

- більш широке використання інструментів моніторингу та діагностики, що можуть визначати стан систем в режимі реального часу та безперервно оцінювати ефективність систем заземлення та блискавкозахисту, сприяючи відповідному обслуговуванню та підвищенню їх надійності,
- більш широке використання новітніх нетоксичних матеріалів із кращими провідними властивостями та більшою довговічністю,
- розробка нових удосконалених нормативних документів, що регулюють проектування та безпеку використання зазначених систем в умовах ускладнення та розгалуження електричних мереж,
- більш широке впровадження покращених конструкцій захисних пристроїв.

Важливість систем заземлення та блискавкозахисту на електричних підстанціях важко переоцінити. Вони мають вирішальне значення для забезпечення безпеки, надійності та ефективності мережі розподілу електроенергії. Оскільки мережа стає все складнішою та вимоги до неї збільшуються, ці системи повинні розвиватися за допомогою технологічних інновацій і дотримання суворих стандартів та вимог нормативних документів. Продовження досліджень і розробок у цій галузі мають важливе значення для вирішення майбутніх викликів і забезпечення того, що електричні підстанції зможуть витримувати збільшене навантаження та модернізацію мереж.

1.4 Причини неефективної роботи систем заземлення та блискавкозахисту на електричних підстанціях

Системи заземлення на електричних підстанціях мають важливе значення для забезпечення безпеки та захисту обладнання від електричних збоїв і стрибків напруги. Однак деякі незадовільні параметри їх роботи можуть поставити під загрозу загальну ефективність, що може призвести до потенційних загроз безпеці та до виникнення операційних проблем. Виявлення та усунення таких недоліків має вирішальне значення для підвищення надійності роботи обладнання електричних підстанцій [3]:

- невірна оцінка значення питомого опору ґрунту: одним з фундаментальних аспектів проектування системи заземлення є визначення питомого опору ґрунту, який суттєвим чином впливає на ефективність роботи системи заземлення. У багатьох випадках помилка полягає у недостатній кількості випробувань по визначенню питомого опору ґрунту, що призводить до застосування систем, які не відповідають належним чином місцевим умовам. Таке положення може призвести до підвищеного значення опору заземлення, ніж очікувалося, і зменшити здатність системи безпечно розсіювати струми замикання та призводячи до потенційної появи небезпечної «крокової напруги» та «напруги дотику» на неструмопровідних частинах обладнання,

- природна та електролітична корозія компонентів заземлення: системи заземлення зазвичай містять мережу металевих провідників, занурених під землю. Ці компоненти є досить чутливими до корозії різних видів, особливо в середовищах з високою вологістю або агресивним ґрунтом. Наявність корозії на поверхнях може збільшити електричний опір цих компонентів, тим самим зменшуючи здатність системи ефективно проводити струми. Згодом це може призвести до збоїв у захисті як обладнання, так і персоналу,

– недостатній об'єм технічного обслуговування: регулярне технічне обслуговування має вирішальне значення для забезпечення ефективності роботи систем заземлення протягом усього терміну їх експлуатації. Нехтування обслуговуванням може призвести до численних проблем: накопичення іржі та корозії, ослаблення з'єднань і загальне погіршення стану системи. На багатьох підстанціях технічне обслуговування систем заземлення не проводиться так часто або настільки ретельно, як це необхідно, часто через бюджетні обмеження або недогляд,

– використання застарілих стандартів при проектуванні: з розвитком електричних мереж повинні створюватися нові технологічні стандарти та методи проектування систем заземлення. Велика кількість підстанцій працює із системами заземлення, розробленими відповідно до застарілих стандартів, які можуть не відповідати поточним умовам навантаження або останнім вимогам забезпечення безпеки.

Зазначені недоліки не лише ставлять під загрозу безпеку та функціональність електричних підстанцій, але і сприяють збільшенню експлуатаційних витрат і простою електричних систем. Вирішення цих проблем вимагає системного підходу до оцінки та модернізації систем заземлення на основі сучасних стандартів і реальних умов.

Серед конкретних недоліків, які можуть перешкоджати ефективній роботі систем захисту від блискавок можна відзначити [3]:

– недостатність площі покриття та просторового розміщення повітряних веж: ефективність систем блискавкозахисту значною мірою залежить від вірного розміщення блискаковідводів, що призначені для «захоплення» ударів блискавки. Ця невідповідність розміщені заперечує розповсюджені методи рухомої сфери або теорії захисного кута, що призводить до появи «прогалин» у захисті. Це може призвести до ударів блискавки в обхід системи захисту та прямого впливу на електричне обладнання підстанції,

– недостатня ступінь або хибність схеми заземлення компонентів блискавкозахисту: у той час як повітряні вежі «вловлюють» блискавку, успіх цього перехоплення значною мірою залежить від того, наскільки ефективно здійснюється його відведення в «землю». Таке виникає, коли компоненти системи заземлення та системи блискавкозахисту належним чином не інтегровані в загальну систему, що викликає необхідність руху струму шляхами з високим опором,

– використання невідповідних або пошкоджених матеріалів у конструктивних елементах системи: матеріали, що використовуються в системах блискавкозахисту, повинні мати високу електропровідність і бути достатньо міцними, щоб протистояти повторним ударам блискавки та відповідати умовам навколишнього середовища. Використання неякісних матеріалів або систем, компоненти яких з часом можуть погіршитися, може призвести до критичних збоїв,

– відсутність або погана координація з пристроями захисту від перенапруги: системи захисту від блискавки повинні бути ефективно скоординовані з пристроями захисту від перенапруг, які можуть виникнути внаслідок прямих ударів або ударів поблизу. Неефективна координація та невідповідність рівнів захисту або невірно інтегровані компоненти системи, може призвести до перевантаження системи через стрибки напруги, що, як наслідок, призведе до відмови обладнання.

Для усунення зазначених проблемних питань необхідно здійснити ретельну оцінку поточного стану та зробити відповідні оновлення для того, щоб переконатися, що системи блискавкозахисту здатні справлятися з конкретними умовами та загрозами, з якими стикається кожна підстанція. Удосконалення технологій і дотримання найновітніших практик облаштування та обслуговування є ключовими для вирішення зазначених проблем.

Оскільки ефективна робота систем заземлення та блискавкозахисту на електричних підстанціях залежить не лише від окремих компонентів, а й

від того, як ці системи інтегруються в загальний проект підстанції та відповідають нормативним стандартам, можна виділити наступні проблемні питання [3]:

- незадовільна інтеграція між системами заземлення та блискавкозахисту – для оптимальної роботи системи заземлення та блискавкозахисту мають бути тісно інтегровані. На багатьох підстанціях ці системи проектуються та встановлюються окремо без урахування того, як вони взаємодіють,

- невідповідність оновленим стандартам: стандарти для електричних систем розвиваються з метою найшвидшого впровадження найновіших методів для підвищення безпеки та технологічності процесу енергопостачання. На деяких підстанціях системи, що розглядаються, не оновлюють свої головним чином через витрати або складності, пов'язані з модернізацією старих установок. Ця вимога передбачає необхідність здійснення регулярних перевірок та оновлення для того, щоб гарантувати відповідність існуючих системи заземлення та блискавкозахисту чинним стандартам,

- недостатня ступінь здійснення тестування та перевірки систем: ці процеси мають вирішальне значення для забезпечення належної роботи систем заземлення та блискавкозахисту. На підстанціях часто спостерігається положення неповноцінного або нечисельного тестування. У деяких випадках комплексне тестування системи здійснюють після встановлення або серйозної модернізації, покладаючись при цьому на «теоретичну надійність». Відсутність ретельних перевірок може залишити невизначені слабкі місця в системах, які можуть виявитися лише при збоях у роботі.

- недостатність досвід та/або навчання обслуговуючого персоналу: проектування, встановлення та обслуговування складних систем заземлення та блискавкозахисту потребують спеціальних знань і навичок. На багатьох підстанціях спостерігається брак або відсутність спеціально

навченого персоналу, який міг би ефективно керувати та/або обслуговувати дані системи.

Щоб вирішити наведені проблеми інтеграції та відповідності, підстанції потребують цілісного підходу до проектування та обслуговування систем, розширених програм навчання персоналу та вимог дотримання нормативів і стандартів. Щоб подолати виявлені проблеми систем заземлення та блискавкозахисту на підстанціях, необхідно звернути особливу увагу як на негайні заходи, так і на довгострокові стратегії. Серед основних напрямків можна відзначити:

- впровадження удосконалених інструментів діагностики та сучасні інтелектуальні технології – це може значно покращити моніторинг і обслуговування систем заземлення та блискавкозахисту. Отримані зі спеціальних датчиків в реальному часі дані моніторингу, можуть надати відомості про поточний стан цих систем і дають змогу проводити профілактичне технічне обслуговування або обслуговування за потребою,

- застосування досягнень у матеріалознавстві – останні розробки в галузі матеріалознавства пропонують багатообіцяючі рішення для подолання проблем, пов'язаних із корозією та деградацією матеріалів у системах заземлення та блискавкозахисту. Нові матеріали з підвищеною провідністю, стійкістю до корозії та тривалішим терміном служби дадуть змогу покращити працездатність і довговічність роботи даних систем,

- більш широке впровадження програм комплексного навчання та сертифікації, які дають впевненість у тому, що системи заземлення та блискавкозахисту встановлені та обслуговуються належним чином. Зазначені програми мають охоплювати найновіші стандарти, найкращі практики та технологічні досягнення,

- здійснення регулярних перевірок та оновлень систем – на електричних підстанціях повинні бути розроблені графіки регулярних перевірок для оцінки та модернізації їх систем заземлення та блискавкозахисту. Ці перевірки повинні враховувати зміни в робочому

середовищі, прогрес у технологіях та оновлення стандартів. Постійно оновлюючи ці системи, підстанції можуть підтримувати високий рівень ефективності та безпеки.

Ефективна робота систем заземлення та захисту від блискавки вимагає багатогранного підходу, який включає технологічні інновації, дотримання нормативних вимог і постійне навчання персоналу. Зосередившись на цих областях, підстанції можуть підвищити ефективність роботи, скоротити час простою та підвищити загальну безпеку та надійність.

2 ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ПИТАНЬ ПРИ ОБЛАШТУВАННІ СИСТЕМ ЗАЗЕМЛЕННЯ ТА БЛИСКАВКОЗАХИСТУ

2.1 Визначення спільних параметрів системи заземлення та блискавкозахисту

Найбільш потужним джерелом електричних впливів на підстанціях є блискавки. Всупереч тому, що вважається, що блискавка обов'язково шукає найвищу точку, коли влучає в поверхню Землі. Скоріш за все необхідно говорити про те, що блискавка «шукає» поверхню з протилежним зарядом. Такий «протилежний заряд» може знаходитись у вежах (природніх і штучних) або в повітряній лінії електропередачі, але найчастіше – на земній поверхні [7].

Незважаючи на те, що струми блискавки можуть проходити різними шляхами, одним із найпоширеніших випадків є те, що блискавка влучає в повітряні лінії та прямує по цим провідникам до електричного обладнання, викликаючи його серйозні пошкодження. У разі, коли блискавка вдаряє в землю, завдяки площі мережі електричного заземлення можемо отримати підвищення електричного потенціалу. Найкраща ситуація, коли місце удару знаходиться поблизу заземлювача підстанції – блискавка проникає через цю систему «в заземлю».

Блискавка також може влучити в будівлю підстанції, яка за правилами повинна бути заземленою, створюючи при цьому кілька перехідних струмів у системі заземлення (рис. 2.1) [8].

Удари блискавки завжди супроводжуються виникненням потужних магнітних полів. Ці магнітні поля можуть індукувати перехідні процеси в електричних системах навіть без прямих гальванічних зв'язків – це може відбуватися також у підземних кабельних лініях. Досягнувши землі, удар блискавки підвищує електричний потенціал землі у цьому місці. Струм, що викликано блискавкою, проходить через землю та знаходить шлях до

проектуються та монтуються просторові структурні системи блискавкозахисту. Ці системи, які зазвичай встановлюються у найвищих точках і призначені для «притягування» блискавки та забезпечення шляху проходження струмів до землі.

Системи заземлення на електричних підстанціях відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки експлуатації та захисту обладнання та людей. Ефективність системи заземлення в основному визначається її здатністю безпечно проводити небажані електричні струми «на землю» [8].

Основним теоретичним принципом роботи систем заземлення є закон Ома, який пов'язує напругу, струм і опір в електричному ланцюзі. У контексті заземлення метою є мінімізація опору заземлення, щоб гарантувати безпечне розсіювання будь-якого струму замикання без суттєвого підвищення потенціалу «на землі». На опір системи заземлення впливає кілька факторів, включаючи питомий опір ґрунту, матеріал використаних провідників, глибина, на яку їх закладена, та їх просторова форма та конфігурація.

Питомий опір ґрунту є критичним фактором при проектуванні ефективних систем заземлення. Питомий опір впливає на те, наскільки легко струм розсіюється «в землі» – менший питомий опір означає менший опір землі. Опір заземлення можна оцінити за формулою [8]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{8L}{d}\right), \quad (2.2)$$

де ρ – питомий опір ґрунту, Ом/м,

L – довжина електрода, м,

d – діаметр електрода, м.

Це співвідношення показує, що довші електроди в ґрунті з меншим питомим опором зменшують загальний опір заземлювача.

Заземлення підстанції зазвичай включає в себе мережу з'єднаних між собою стрижнів і провідників, закладених під землею. Конфігурація та взаємозв'язок цих компонентів призначені для створення шляху до землі з можливо низьким значенням опору. Загальний опір сітки можна приблизно визначити, якщо стрижні розташовані на достатній відстані (зазвичай більше, ніж глибина стрижнів) [8].

Блискавкозахист на електричних підстанціях має вирішальне значення для захисту електрообладнання та безперервності електропостачання. Ці системи призначені для захоплення та безпечного розсіювання енергії від ударів блискавки, тим самим запобігаючи пошкодженню обладнання підстанції.

Удар блискавки – це електричний розряд, спричинений накопиченням заряджених частинок у грозових хмарах. Коли відбувається удар блискавки, вона може нести струм силою до 200 кА. Щоб керувати такими високими струмами, системи блискавкозахисту повинні мати досить низькомічний шлях до землі [9].

Розташування повітряних веж, які ще називають блискавковідводами, визначається методом сфери, що котиться, який моделює захисну зону, що забезпечується вежею. Відповідно до цього методу, уявна сфера (зазвичай радіусом від 20 до 60 метрів залежно від рівня захисту) перекочується по конструкціях підстанції. Будь-яка точка, до якої торкається сфера, вважається захищеною повітряною вежею у верхній частині цієї сфери.

Радіус захисту на рівні землі визначається за залежністю [9]:

$$r = \sqrt{h \cdot (h + 2R)} \quad (2.3)$$

де h – висота вежі,

R – радіус сфери, що котиться.

До струмопровідників і заземлення висуваються певні вимоги – після того, як удар блискавки буде перехоплено вежею, заряд повинен бути безпечно перенаправлений «у землю». Це можна реалізувати завдяки відводам, що з'єднують повітряні вузли з системою заземлення. Ефективність цього шляху є критичною та визначається станом та матеріалом виготовлення провідника, площею поперечного перерізу та опором заземлення. Інтеграція системи блискавкозахисту і системи заземлення на підстанціях має вирішальне значення для забезпечення високого ступеня безпеки. З огляду на це необхідно передбачити можливість підключення провідників до сітки заземлення для забезпечення рівномірного потенціалу в зоні підстанції та зменшення «крокової напруги» та «напруги дотику». Цей рівномірний розподіл потенціалу має вирішальне значення під час ударів блискавки, щоб виключити виникнення перепадів напруги, які можуть призвести до небезпечного іскроутворення або утворення дуг [9].

Усе зазначене підкреслює складність та важливість розробки та проектування ефективних систем блискавкозахисту та заземлення для підстанцій. Системи заземлення та блискавкозахисту, незважаючи на відмінність у своїх основних функціях, повинні працювати разом, щоб забезпечити безпеку та функціональність електричних підстанцій. Оптимальна продуктивність систем блискавкозахисту значною мірою залежить від ефективності системи заземлення. Коли удар блискавки перехоплюється повітряними елементами, потужний потік струму повинен бути спрямований у землю через систему заземлення. Цей процес регулюється згідно принципу, що загальний опір шляху від точки перехоплення блискавки до землі має бути мінімальним для запобігання виникненню потенціалів високої напруги на рівні землі.

Під час удару блискавки раптове надходження струму в систему заземлення спричиняє тимчасове підвищення потенціалу землі. Високе значення цього потенціалу може становити серйозну небезпеку як для

обладнання, так і для персоналу через потенціал виникнення дуг та індукування напруги. Для пом'якшення ризиків, пов'язаних з високими потенціалами, конструкція системи заземлення повинна містити численну кількість точок заземлення та більш широке використання провідних матеріалів для більш рівномірного розподілу електричної енергії по заземлюючій мережі. Приєднання всіх металевих об'єктів до заземлюючої сітки допомагає підтримувати на усіх електричних об'єктах однакові електричні потенціали та зменшити ймовірність виникнення електричних дуг.

Іншою ознакою позитивної взаємодії між системою заземлення та блискавкозахистом є можливість керування «кроковою напругою» та «напругою дотику» під час удару блискавки.

«Крокова напруга» – це напруга між стопами людини, що стоїть поблизу заземленого предмета, що знаходиться під напругою [9]:

$$U_{кр} = 0,116 \cdot I \cdot R \quad (2.4)$$

де I – струм пошкодження, А,

R – опір поверхневого шару землі.

«Напруга дотику» – це напруга між рукою і ногою (ногами) при торканні предмета, що знаходиться під напругою. Формули для їх розрахунку [9]:

$$U_{торк.} = 0,157 \cdot I \cdot R \quad (2.5)$$

Для мінімізації зазначених напруг вирішальне значення для забезпечення питань безпеки має питання розробки та конструювання системи заземлення. Розуміння цих взаємодій і управління ними за допомогою ретельного проектування та відповідного обслуговування є життєво важливими для надійності та безпеки роботи підстанцій.

Вимоги до електричних підстанцій знаходяться у постійному розвитку, що викликає необхідність удосконалення та адаптації систем заземлення та блискавкозахисту. Системи, що розглядаються є частотно-залежними з відповідним їх відгуком та поведінкою. Поведінка систем заземлення за умов використання змінного струму та виникненні перехідних процесів є досить складною через скін-ефекти та частотну залежність опору землі [9].

Під час потужних потоків струму від ударів блискавки, ґрунт навколо заземлюючих електродів може іонізуватися, що призводить до зменшення його питомого опору. Теоретичні моделі, що враховують іонізацію ґрунту, можуть забезпечити точніші прогнози поведінки системи заземлення в таких екстремальних умовах. Це може призвести до розробки ефективніших і безпечніших систем заземлення, які здатні адаптуватися до можливих змін, що вимагає впровадження динамічного моделювання та симуляцій, які забезпечують комплексний захист електричних мереж.

Прогнозне технічне обслуговування з використанням штучного інтелекту та машинного навчання може реалізувати майбутні розробки в області заземлення та захисту від блискавок. Аналізуючи дані з датчиків і показники їх роботи за попередні періоди можна ідентифікувати стані та визначити закономірності, які передують збоям, що дозволяє вчасно здійснювати технічне обслуговування [9].

У підсумку, системи заземлення та блискавкозахисту є життєво важливими компонентами безпеки та функціональності електричних підстанцій. Завдяки безперервним дослідженням, теоретичним удосконаленням і технологічним інноваціям ці системи можна оптимізувати для задоволення поточних і майбутніх потреб електроенергетичної галузі. Інтеграція передових теоретичних принципів і передбачення майбутніх технологічних тенденцій є важливими для розробки більш ефективних, надійних і безпечних систем заземлення та блискавкозахисту.

Відповідно до «Правил улаштування електричних установок» заземлення електричних установок номінальною напругою понад 1000 В повинні проходити періодичні випробування, що занотовується у протоколі випробувань, де зазначаються наступні події [10]:

- вимірювання опору системи заземлення,
- вимірювання «крокової напруги»,
- вимірювання «напруги дотику»,
- перевірка наявності гальванічного зв'язку,
- візуальна перевірка елементів і конструкцій блискавкозахисту.

Для вимірювання опору системи заземлення використовують інструментальний метод. У якості джерело живлення основного випробувального кола використовують роздільний трансформатор зі здатністю регулювати вихідну напругу. Вимірювання «крокової напруги» та «напруги дотику» здійснюють за допомогою мультиметрів з високим класом точності. Результати вимірювань повинні коригуватися у залежності від погодних умов, температури, вологості, типу ґрунту. Перевірку наявності гальванічних зв'язків здійснюють з використанням незалежного джерела постійного струму [11].

Для оцінки ризиків, яким піддається обслуговуючий персонал під час виконання ними своїх обов'язків, оцінюють шляхом визначення ймовірностей виникнення аварій.

Серед основних аварійних ситуацій, виникнення яких може загрожувати обслуговуючому персоналу, і які можуть виникнути випадково можна відзначити [12]:

- надмірне значення «крокової напруги» та «напруги дотику» через виникнення замикання на землю обладнання,
- наближення і торкання до в аварійного (несправного) елемента обладнання протягом тривалого часу.

Ймовірність виникнення надмірного значення «крокової напруги» або «напруги дотик» можна визначити за залежностями [12]:

$$P_{\text{крок}} = \frac{N_{\text{крок}}}{V_{\text{крок}}} \quad (2.6)$$

де $N_{\text{крок}}$ – кількість точок після вимірювання, у яких перевищено значення «крокової напруги»,

$V_{\text{крок}}$ – загальна кількість місць (точок) вимірювання «крокової напруги»,

$$P_{\text{дот.}} = \frac{N_{\text{дот.}}}{V_{\text{дот.}}} \quad (2.7)$$

де $N_{\text{дот.}}$ – кількість точок після вимірювання, у яких перевищено «напругу дотику»,

$V_{\text{дот.}}$ – загальна кількість місць (точок) вимірювання «напруги дотику».

Ймовірність потрапляння обслуговуючого персоналу у зону роботи несправного обладнання або знаходження в місці (точці) з надмірним (перевищеним) значенням «крокової напруги» або «напруги дотику» можна розрахувати за залежністю [12]:

$$P_{\text{потр.}} = \frac{t_{\text{нз}}}{T_{\text{потр.}}} \quad (2.8)$$

де $t_{\text{нз}}$ – середній час знаходження обслуговуючого персоналу в небезпечній зоні, с,

$T_{\text{потр.}}$ – середня тривалість циклів потрапляння обслуговуючого персоналу в небезпечну зону роботи несправного обладнання, с.

Вірогідність збігу цих подій (наявність небезпечного значення «крокової напруги» та/або «напруги дотику» і перебування обслуговуючого персоналу в небезпечній зоні під час обслуговування

ушкодженого обладнання) розраховується як творення цих ймовірностей [12]:

$$P_{ур.крок} = P_{крок} \cdot P_{потр.} \quad \text{або} \quad P_{ур.дот.} = P_{дот.} \cdot P_{потр.} \quad (2.9)$$

Ймовірність виникнення замикань «на землю» можна розрахувати за залежністю [12]:

$$P_{кз} = \frac{\lambda_{\epsilon} \cdot t_{\epsilon}}{8760} \quad (2.10)$$

де λ_{ϵ} – інтенсивність відмов – кількість усіх замикань «на землю» за рік,

t_{ϵ} – середня тривалість відмови, с.

Ймовірність події збігу виникнення короткого замикання «на землю», наявності небезпечного значення «крокової напруги» та/або «напруги дотику» і перебування обслуговуючого персоналу в небезпечній зоні під час обслуговування ушкодженого обладнання також розраховується як творення усіх цих ймовірностей [12]:

$$P_{зб} = \frac{\lambda_{\epsilon} \cdot t_{\epsilon}}{8760} \cdot \frac{t_{нз}}{T_{потр.}} \quad (2.11)$$

За цим виразом можна визначити періодичність виникнення таких станів:

$$k = \frac{T_{потр.}}{\lambda_{\epsilon} \cdot (t_{\epsilon} + t_{нз})} \quad (2.12)$$

Оцінка працездатності системи заземлення базується на вимірюванні «крокової напруги» та «напруги дотику», перевірці наявності гальванічного зв'язку між заземлювачем і обладнанням, а також контроль працездатності блискавкозахисту.

2.2 Вплив властивостей ґрунту на роботу систем заземлення при різних значеннях частоти струму

Заземлення розподільних пристроїв зможе забезпечити безпеку роботи і захист електричних пристроїв. Струмопровідні частини, що «нормально» не знаходяться під напругою, і захисні системи з'єднуються між собою через мережу заземлення для забезпечення зниження небезпечного потенціалу. При нормальних умовах роботи струм у контурі заземлення майже відсутній, а при виникненні несправності цей струм може набувати досить високих значень. Обмежувачі перенапруг, що містяться в розподільному пристрої, з'єднуються між собою та з системою заземлення. Заземлення забезпечує «скидання» високих напруг як на частоті живлення так і на частоті перехідних процесів, що можуть виникнути при блискавках. Робота заземлення напряму залежить від властивостей ґрунту та конструкції системи заземлення. Конфігурація системи заземлення складається з кількох з'єднаних між собою горизонтальних полос і вертикальних стрижнів у кількох вузлах.

При промисловій частоті питання облаштування систем заземлення регулюються вимогами стандартів та нормативними рекомендаціями, що забезпечить визначений рівень безпеки. Дані рекомендації визначають конфігурацію та конструкцію сітки заземлення за умови виникнення потужних перехідних процесів. Зазначене залежить від властивостей ґрунту, який зазвичай має складне розшарування, на стан яких суттєвий

вплив має значна кількість змінних. Серед таких чинників можна виділити такі змінні: вологість, вміст солей, розмір часток та їх форма, взаємне розташування частинок, температура та інші. Визначення залежності стану ґрунту від частоти становить суттєву проблему та вимагає оцінку властивостей ґрунту та системи заземлення на частоті живлення [13].

Опір системи заземлення є загальновизнаним показником його якості при різних значеннях частоти напруги живлення. Опір системи заземлення визначається як співвідношення між наростанням потенціалу наведеної напруги та струмом. Оскільки більша частина конструкції заземлюючої структури знаходиться в ґрунті, то «електричні» властивості ґрунту під час виникнення струму витоку впливають на забезпечення його шляху та розсіювання. Оцінку працездатності системи заземлення можна оцінити за значенням питомого опору ґрунту ($\rho_{гр.}$) і конфігурацією заземлюючого пристрою, який можна оцінити за допомогою коефіцієнта конфігурації ($K_{конф.}$) [13]:

$$R_{заз.} = f(\rho_{гр.}; K_{конф.}) \quad (2.13)$$

Отже, змінюючи конструкцію заземлюючого пристрою або властивості ґрунту можна отримати бажані характеристики опору заземлення. Основними факторами, що впливають на «електричні» властивості ґрунту, є хімічний склад, розмір зерна та пористість, температура та вологість. Для аналізу властивостей ґрунту проводять лабораторні проби та електрозондування. Метод проб дозволяє досить точно проаналізувати розподіл шарів ґрунту по глибині, хімічний склад та «електричні» характеристики у конкретному місці розташування заземлення. Вартість таких процедур є досить високою, особливо якщо враховувати площу «покриття» системи заземлення. Широкі межі зміни пористості ґрунту та зміна вмісту вологи складно піддаються моделюванню лише за лабораторними зразками, щоб отримати правильне

уявлення про поточний стан. Здійснення електричного зондування може забезпечити точність визначення загального питомого опору ґрунту [13].

При оцінці поведінки системи заземлення під час швидких перехідних процесів, що супроводжуються імпульсними струмами, що можуть бути викликані грозовими розрядами, і залежать від їх частоти. Системи заземлення через значення частоти, що відрізняється від промислової, реагує індуктивними та ємнісними ефектами. Отже, опір системи заземлення за умов змінної частоти необхідно замінити на значення повного опору [13]:

$$Z_{\text{зз.}}(f) = \frac{U(f)}{I(f)} \quad (2.14)$$

Вплив частоти на параметри ґрунту визначаються його: магнітною проникністю ($\mu_{\text{гр.}}$), діелектричною проникністю ($\varepsilon_{\text{гр.}}$), питомим опором ($\rho_{\text{гр.}}$).

Склад ґрунтової суміші та змінні фактори – температура, вологість – визначають його «електричні» параметри. За кількістю складових елементів ґрунт є досить складним, що ускладнюється залежністю від частоти струму і яку можна врахувати шляхом введення коефіцієнта діелектричної проникності ґрунту в розрахунки. Різноманітні літературні джерела характеризують значення відносної діелектричної проникності ґрунту в залежності від вмісту води і температури на рівні 5 – 80 одиниць [13].

Для облаштування системи заземлення стандартною практикою є використання знань про склад ґрунту в даній місцевості, що склалася історично і змінений при здійсненні будівництва. За допомогою різних методів будівництва та застосованих при цьому матеріалів можна отримати контрольований склад ґрунту і середовища навколо. Це

дозволить отримати рівномірно розподілений ґрунт з визначеними електричними властивостями на площі розміщення системи заземлення.

Навколо елементів заземлення, що проводять імпульсні струми від ударів блискавки, у навколишньому ґрунті створюється змінне в часі електричне поле. У залежності від питомого опору і властивостей, ґрунт проводить струм від заземлювача і розсіює його в ґрунті. Залежно від щільності струму значення електричного поля можна визначити за рівнянням [13]:

$$E_{\text{зз.}} = \rho_{\text{зр.}} \cdot j_{\text{зр.}} \quad (2.15)$$

де $j_{\text{зр.}}$ – щільності струму, А/мм.

Для провідників циліндричної форми щільність струму можна знайти за залежністю [13]:

$$j_{\text{зр.}} = \frac{0,5 \cdot I_{\text{зр.}}}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (2.16)$$

де $I_{\text{зр.}}$ – струм витоку, А,

d – діаметр дроту, мм,

l – довжина дроту, мм.

Ця залежність дійсна до значення електричного поля, що відповідає пробою ґрунту. При достатньо високих значеннях струму через провідник спостерігається іонізація навколишнього ґрунту. Параметри іонізації залежать від довжини дроту заземлювача, величини наведеного електричного поля та властивостей ґрунту. У зоні виникнення іонізації навколо заземлюючих елементів при потужному значенні електричного поля може виникнути електрична іскра та/або дуга. Крім того, потужне електричне поле може викликати розшарування та розкладання ґрунту, що

викликає зміну значення питомого опору ґрунту в області іонізації. У зоні виникнення дуги питомий опір ґрунту може значно зменшитись, або навіть стати дорівнюючим нулю.

На процес іонізації ґрунту мають вплив різноманітні фактори [13]:

- гранулометричний склад ґрунту та наявність пустот,
- щільність ґрунту,
- вологість,
- температура.

Властивості ґрунту впливають на значення напруги пробою. За деякими дослідженнями це значення знаходиться поблизу 400 кВ/м [14].

2.3 Огляд статей, з питань що досліджуються

У статті [14] проведено детальне дослідження перехідних процесів заземлюючих сіток, що піддаються впливу імпульсних струмів блискавки. У дослідженні було використано метод ліній електричної передачі із зосередженням на взаємному з'єднанні між провідниками, який дозволяє оцінити ту чи іншу конфігурацію сітки заземлення, що можуть бути розміщені як у однорідних, так і в неоднорідних ґрунтах. У роботі був здійснений аналіз, який дозволив покращити розуміння того, як системи заземлення реагують на високочастотні імпульсні струми, що можуть суттєво відрізнятися від їх поведінки при струмах промислової частоти. Зазначене дозволяє визначити необхідні заходи безпеки та визначає потенціал захисних можливостей систем заземлення під час ударів блискавки, що можуть становити суттєву небезпеку для електричної інфраструктури та обслуговуючого персоналу. Дослідниками була виконана оцінка впливу різних факторів на роботу системи заземлення. Серед таких факторів були визначені: характеристики мережі

транспортування електричної енергії, природа та стан ґрунту і розташування точки введення струму. Була здійснена перевірка двох випадків конфігурації заземлюючих сіток: одна, коли струм потрапляє в центр сітки, а інша – у її кут. Це дозволило здійснити порівняльний аналіз зміни перехідного потенціалу та зміни опору. Отримані результати моделювання показали, що конфігурація сітки з меншою відстанню між комірками дозволяє отримати найнижче значення перехідного потенціалу, коли струм подається в місці сітки з меншим питомим опором. Для сіткової мережі зі збільшеною відстанню була отримана краща її роботи при потраплянні струму в середину сітки. Здійсненні дослідження сприяє теоретичному розумінню будови систем заземлення, що знаходяться під впливом імпульсних струмів, та пропонує практичні ідеї для проектування та реалізації більш безпечної та ефективної структури заземлення.

У [15] були здійснені дослідження та розробка оптимізованої системи заземлення на підстанції високої напруги. Було проведено детальний аналіз систем заземлення, важливих для забезпечення вимог безпеки роботи підстанцій як при нормальних, так і при перехідних процесах. У дослідженні здійснюється пошук оптимальної конструкції системи заземлення електричної підстанції, яка дозволить забезпечити мінімальний вплив ушкодження обладнання підстанції та ураження персоналу і під час нормальної роботи і при виникненні ударів блискавок. Розроблена система заземлення дозволяє ефективно поратись з екстремальними перехідними струмами та зберегти при цьому встановлене значення опору заземлення та напругу дотику і кроку. У якості методології пропонується використання програмного забезпечення Matlab, що може дозволити проектувати різноманітні конфігурації систем заземлення. Створені конфігурації були проаналізовані та оптимізовані за допомогою спеціальної програми ETAP (Electrical Transient and Analysis Program). Коригування конструкцій систем заземлення за умови недопущення підвищення потенціалу заземлення та забезпечення відповідного значення

напруг дотику та крок. Результати моделювання показали, що оптимізована конструкція системи заземлення може значно зменшити ризики, пов'язані з високими значеннями перехідних струмів. Оптимізована конструкція продемонструвала помітне покращення в роботі зі струмами пошкодження та зниженні потенційної перенапруги.

У [16] автори зосередились на аналізі систем заземлення під час ударів блискавки, з акцентуванням уваги на іонізацію ґрунту. Основною метою даного дослідження було підвищення точності складених обчислювальних моделей, які можуть бути використані для прогнозування поведінки систем заземлення в перехідних умовах, наприклад, при ударах блискавки. Застосований метод дослідження дозволяє здійснити моделювання іонізації ґрунту шляхом зміни поперечних розмірів провідників та аналізу технічної системи в частотній області. Було досліджено «роботу» вертикальних стрижнів і заземлюючих сіток різного розміру при різних величинах електричного поля та рівнях питомого опору ґрунту. Методологія дослідження базувалась на застосуванні перетворення Фур'є для переходу від частотних характеристик у тимчасовій області, що дозволило досліджувати динамічну поведінку системи заземлення у реальному часі. Результати дослідження показали, що включення іонізації ґрунту до моделі значно змінює прогнозовану перехідну поведінку систем заземлення під час ударів блискавки. Врахування іонізації ґрунту забезпечує більш точне уявлення про роботу систем заземлення, особливо з точки зору зниженого опору та змінених електричних характеристик під час та після іонізації ґрунту.

У [17] було здійснено комплексне дослідження, в якому була визначена перехідна поведінка заземлюючих електродів під впливом високих імпульсних струмів, що викликаються ударами блискавки. Основною метою роботи було здійснення точного моделювання та імітація роботи різних просторових конфігурацій заземлюючих електродів за наявності високих імпульсних струмів. У якості основного інструменту

було використано метод кінцевої різниці в часовій області (FDTD). У роботі вивчалось те, як іонізація ґрунту впливає на реакцію заземлюючих електродів, що має вирішальне значення для безпечного функціонування енергетичних систем, що є вразливими до ударів блискавок. У дослідженні була застосована динамічна модель для визначення значення питомого опору ґрунту, що базується на основі зміни електричного поля в часі. Зазначена модель була інтегрована у вищезазначену модель FDTD. Це дозволило здійснити аналіз різних конфігурацій та їх реакцію на однополярні та багатополярні імпульсні струми. Було здійснено детальне моделювання відгуків заземлюючих електродів та здійснено порівняння отриманих результатів з натурними експериментальними даними, що підтвердило точність складеної моделі. Кінцеві результати продемонстрували ефективність створеної моделі для прогнозування напруги, що генерується у верхній частині заземлюючих електродів, прогнозування зниження пікового значення напруги через іонізацію ґрунту.

У [18] наводиться критична оцінка та характеристика перехідних процесів на електричних підстанціях при ударах блискавки. Для цього була створена складна модель, що містила всю лінію електропередачі, електричне обладнання та наявні приєднання до системи заземлення. Метою даного дослідження була перевірка складеної моделі, яка імітує перехідні процеси та поведінку обладнання підстанцій під час грозових розрядів. Було здійснено пошук подолання обмежень традиційних моделей, які розглядають системи заземлення як зосереджені опори з постійними значеннями і які не дозволяють отримати точне уявлення про перехідні процеси та не дозволяють оптимізувати конструктивне виконання заземлюючих систем підстанцій. Комплексний підхід до моделювання з урахуванням зміни в часі більшості параметрів, врахування явищ іонізації ґрунту навколо заземлюючих провідників дозволив забезпечити більш точний розрахунок перехідних характеристик систем

заземлення під впливом струмів блискавки. Отримані результати продемонстрували значні відмінності між результатами, отриманими з використанням складеної моделі, та результатами, отриманими з використанням традиційних спрощених методів. Дослідження підтвердили те, що перехідні характеристики систем заземлення досить сильно впливають на перехідні процеси, що викликані блискавками. Удосконалена модель дозволяє визначати та обґрунтовувати конструкції систем заземлення, які підвищують безпеку роботи на підстанціях.

У [19] автори зосередили свою увагу на впливі різних конструкцій заземлення на шлях руху імпульсу від блискавок. Дослідження було направлено на посилення захисту електричних підстанцій від ударів блискавок. Метою дослідження було визначення різних конструкцій виконання заземлюючого пристрою на здатність забезпечення ефективного придушення імпульсів від блискавки. У роботі було виконано аналіз впливу місць підключення до заземлення відвідних провідників, уточнення місць розташування вертикальних стрижнів заземлення та перехідної поведінки заземлюючих мереж на загальну картину процесу заземлення. Дослідники використали в своїй роботі різні методи моделювання, які дозволили проаналізувати поведінку заземлюючої сітки під впливом імпульсних струмів. Здійснене моделювання дозволило порівняти різні конструкції заземлення (наприклад, одноточкові та двоточкові з'єднання), вплив зміни питомого опору ґрунту та оцінити виникнення перехідних процесів у мережі та зміна потенціалу заземлювача. Проведені дослідження показали, що облаштування спеціальних конструкцій заземлюючого пристрою – утворення багатоточкових з'єднань, локальні ущільнення заземлюючої сітки навколо низхідних проводів шляхом додавання вертикальних стрижнів заземлення – можуть значно покращити поведінку системи заземлення. Однак, просте збільшення кількості вертикальних стовпів заземлення суттєво не покращує перехідні процеси, якщо не поєднувати це рішення з іншими заходами по оптимізації

конструкції системи заземлення. Результати здійсненого моделювання можуть допомогти конструкторам розробляти більш ефективні та надійні системи заземлення для електричних підстанцій, що працюють у місцях, де в атмосфері часто спостерігаються блискавки.

У [20] наведено всебічний аналіз поведінки заземлюючих пристроїв під впливом високих імпульсних струмів, що є типовими під час ударів блискавки, із зосередженням уваги на впливі іонізації ґрунту. Метою роботи було покращення розуміння роботи заземлюючих систем під впливом імпульсів блискавки, зокрема з огляду на ефекти іонізації ґрунту, які виникають за умов потужних струму, шляхом здійснення моделювання. Створена модель включає змінні в часі параметри, що дозволяє більш точно передбачити поведінку систем заземлення під час перехідних явищ. Зокрема, представлена модель містить зосереджені змінні в часі параметри, що дозволяє здійснити моделювання перехідних характеристик заземлюючих мереж під час ударів блискавки. Результати дослідження показали, що іонізація ґрунту суттєво впливає на перехідні процеси при «відгуку» системи заземлення. Отримані результати демонструють, що запропонована модель може точно відображати нелінійні та динамічні зміни властивості ґрунту під впливом високих імпульсних струмів, що дозволяє проектувати більш ефективні конструкції систем блискавкозахисту. У дослідженні також було вивчено вплив різних факторів, таких як розмір, конфігурація та властивості ґрунту навколо заземлюючої системи, на її імпульсну стійкість. Одним із важливих висновків є те, що більші та складніші системи заземлення можуть краще розсіювати енергію від ударів блискавки завдяки як підвищеній іонізації та зниженому значенню опору. Зазначене гарантує, що такі системи краще обладнані для роботи в екстремальних умовах, викликаних ударами блискавки, що в кінцевому підсумку призводить до більш безпечної і надійної роботи систем живлення.

У [21] дослідники доводять складність визначення опору заземлення в контексті наявності високоімпульсних струмів, які зазвичай викликаються ударами блискавки. Основна мета даного дослідження полягає у доведенні необхідності ретельного вимірювання опорів заземлення та аналіз цієї характеристики у залежності від стрибків напруги для різних систем заземлення за наявності високоімпульсних струмів, які можуть досягати значень 40 кА. Робота дозволяє зрозуміти, як змінюється опір заземлення в таких екстремальних умовах з огляду на нелінійність характеристик і явища іонізації ґрунту, які значно впливають на ефективність заземлення під час виникнення потужних імпульсів. Методологія роботи передбачала проведення «широких» польових вимірювань за допомогою мобільного генератора імпульсної напруги, здатного генерувати струми до кількох десятків кА. Дослідження дозволяє оцінити значення перехідних напруг та струмів на різних заземлюючих електродах. Аналіз здійснювався за допомогою перетворення Лапласа, що дозволило оцінити значення перехідного опору з отриманням ступінчастої характеристики. Даний підхід дозволив дослідникам спостерігати залежності від струму та гістерезисних характеристик опорів заземлення. Результати досліджень показали, що опори заземлення демонструють суттєву залежність від величини прикладених струмів з одночасною демонстрацією гістерезисних характеристик. Опір заземлення демонструє енергетичну залежність, що є вирішальним для розробки більш точних моделей опору заземлення для енергопостачальних систем. Результати роботи можна вважати фундаментальними, оскільки вони дають емпіричне підтвердження теоретичним моделям, показуючи, що опір заземлення зменшується зі збільшенням струму через іонізацію ґрунту та згодом не повертається до початкових значень негайно.

У [22] автори зосередились на дослідженні проблем функціонування систем заземлення і розробці програмного забезпечення для їх проектування на підстанціях високої напруги. Були складені кілька

цифрових алгоритмів, спрямованих на вдосконалення послідовності та необхідних кроків, що дозволяють здійснювати ефективне проектування систем заземлення. Метою дослідження були підвищення точності та ефективності проектування системи заземлення на підстанціях високої напруги з використанням передових обчислювальних засобів і методологій. Це можна було зробити завдяки оптимальній оцінці параметрів ґрунту за допомогою провідних методів вимірювання питомих опорів, попереднього проектування заземлюючих електродів і точного визначення коефіцієнтів розподілу інтенсивності та окремих і загальних опорів системи. Розроблений модель у своїй основі використовує метод розв'язання диференціальних рівнянь другого порядку, що дозволяє здійснити оптимальну оцінку параметрів ґрунту, розглядаючи його як двошарову модель. Модель допомагає точно розрахувати потенціал на поверхні ґрунту, що є вирішальним для визначення напруги кроку та дотику в системах заземлення. Створені алгоритми дозволяють скоригувати конструкцію заземлення для забезпечення її відповідності стандартам безпеки та забезпечити припустимі значення опору, що може бути особливо важливим для підтримки безпеки у високовольтних мережах. Ефективність була продемонстрована застосуванням складених алгоритмів у програмному середовищі. Розроблений інструмент моделювання дозволяє суттєво спростити процес проектування, підвищити точність та надійність роботи систем заземлення на підстанціях.

3 РОЗРАХУНОК СИСЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ ТА БЛИСКАВКОЗАХИСТУ

3.1 Вимоги до пристроїв заземлення та захисту від блискавки на підстанції

Пристрої заземлення та захисту від блискавки на підстанції повинні бути облаштовані у відповідності до вимог «Правил улаштування електроустановок», «Правил технічної експлуатації», «Паспортів електроустановок» та інших нормативних документів [10, 23, 24].

Пристрої захисту підстанції формують шляхом облаштування просторової конструкції, до складу якої входять стрижневі та тросові елементи. Ці елементи мають визначені геометричні розміри, які задовольняють вимогам забезпечення належного ступеню захисту обладнання підстанції під час блискавкових розрядів, що потрапляють у область роботи підстанції. Принцип дії цієї конструкції засновано на властивостях блискавки «розряджатися» на об'єктах, що мають найвище розташування і мають гальванічний зв'язок з «заземленими» об'єктами. Фактично, пристрої вловлювання блискавок повинні мати певну видовжену форму та розташовуються на певній висоті над рівнем об'єктів, що захищаються у межах території підстанції та «відводять» «захоплені розряди» «на землю» [25].

Під захистом пристроїв захисту можуть знаходитись практично усі об'єкти електричної підстанції, але особлива увага повинна приділятися найважливішим її складовим: відкриті та закриті розподільні пристрої, струмопроводи, силові трансформатори, реактори, оливозбірники, будівлі та споруди [25].

3.2 Визначення місць розташування пристроїв захисту від ударів блискавки

Існує безліч способів розташування пристроїв захисту від ударів блискавки у залежності від конфігурації підстанції та типу і габаритів обладнання, що захищається.

По-перше, необхідно передбачити заходи по захисту самої будівлі підстанції, що може бути реалізовано шляхом заземлення усіх металевих частин, що знаходяться у найвищих місцях цієї будівлі, тобто на покрівлі. Для залізобетонної покрівлі це можна забезпечити шляхом накладання плоскої металевої сітки, яку виконують з металевого дроту ($\varnothing$ 6-8 мм), окремі хлести яких зварюють для утворення комірок розміром 4х4 м і яка укладається на покрівлю поверх шару гідроізоляції та негорючого утеплювача [3].

Для захисту пристроїв, що знаходяться «на відкритому повітрі» (наприклад, трансформатори, відкриті розподільні пристрої, повітряні лінії електропередачі) доцільно застосування стрижневих елементів та тросових з'єднань, що утворюють спільну конструкцію системи блискавковідведення.

Основне завдання блискавковідводів – забезпечення належних умов розтікання струму від блискавки по пристроям заземлення. Для підвищення надійності розтікання небезпечних струмів необхідно передбачити два і більше напрямків його розтікання. Опір заземлення блискавковідводів залежить від опору заземленої частини заземлюючого контуру підстанції на визначеній відстані від місця приєднання.

Відстань по повітрю від блискавковідводів до відокремлених заземлювачів визначається за умовою [26]:

$$l_{нов.} = 0,1 \cdot H + 0,12 \cdot R_3 \geq 5 \text{ м}, \quad (3.1)$$

де H – висота до точки можливого перекриття розряду блискавки над рівнем землі, м,

R_3 – опір окремого блискавковідводу, значення якого повинно бути не менше за 10 Ом.

Відстань по землі від блискавковідводів до відокремлених заземлювачів визначається за умовою [26]:

$$l_3 = 0,2 \cdot R_3 \geq 3 \text{ м}. \quad (3.2)$$

3.3 Визначення зон захисту від блискавки на підстанції

Зона захисту від блискавок на підстанції визначає деякий розрахунковий простір навколо блискавковідводу(ів), всередині якого будь-яке обладнання або споруда будуть захищені від прямих ударів блискавки з визначеним ступенем надійності. У якості показника надійності нормативні документи визначають значення 0,99.

До застосування у якості захисної конструкції від блискавок приймаємо систему тросів та стрижневих блискавковідводів, що мають однакову висоту і розташовані по периметру підстанції (рис. 3.1, 3.2.).

Відстань до зовнішній областей тросових блискавковідводів, м [26]:

$$h = h_{он} - 2 \quad (3.3)$$

де $h_{он}$ – висота опори, $h_{он} = 24$ м.

$$h = 24 - 2 = 22 \text{ м.}$$

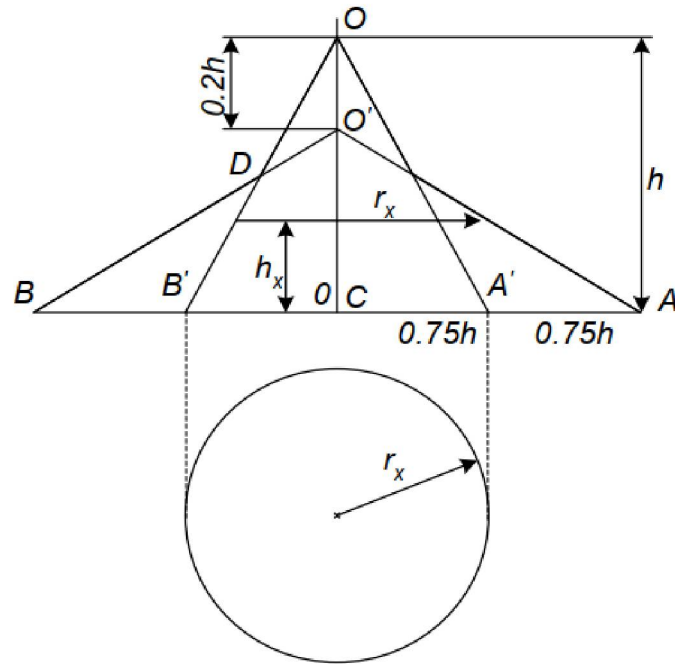


Рисунок 3.1 – Зона захисту одиночного стрижневого блискавковідводу

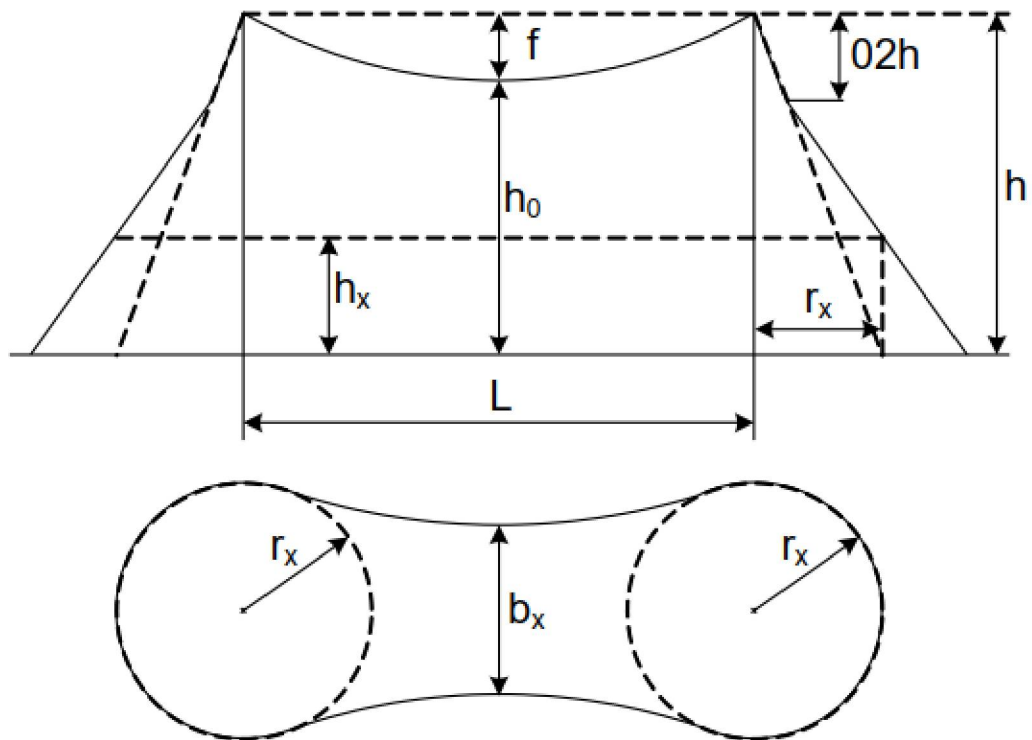


Рисунок 3.2 – Зони захисту тросового блискавковідводу

Максимальна ширина зони блискавковідведення, м [26]:

$$L_{max} = 5 \cdot h = 5 \cdot 22 = 110 \text{ м.} \quad (3.4)$$

Серединна ширина зони блискавковідведення, м [26]:

$$L_c = 2,5 \cdot h = 2,5 \cdot 22 = 55 \text{ м.} \quad (3.5)$$

Розміри для визначення місць встановлення вертикальних блискавковідводів, м [26]:

$$h_0 = 0,8 \cdot h = 0,8 \cdot 22 = 17,6 \text{ м,} \quad (3.6)$$

$$r_0 = 0,95 \cdot h = 0,95 \cdot 22 = 20,9 \text{ м.} \quad (3.7)$$

Висота провисання тросів, м [26]:

$$h_c = \frac{L_{max} - L}{L_{max} - L_c} \cdot h_0 = \frac{110 - 50}{100 - 55} \cdot 17,6 = 19,2 \text{ м.} \quad (3.8)$$

Максимальне значення напівширини зони в горизонтальному перерізі при висоті $h_x = 12$ м:

$$r_x = \frac{r_0 \cdot (h_0 - h_x)}{h_0} = \frac{20,9 \cdot (17,6 - 12)}{17,6} = 6,65 \text{ м} \quad (3.9)$$

Висоту опори блискавковідводів приймаємо $h_{on} = 24$ м. При цьому значення $r_{cx} = r_x = 6,65$ м.

Для аналізу отриманих результатів розрахунку зон захисту необхідно забезпечувати виконання наступних вимог: напівширина горизонтального перерізу в центрі між блискавковідводами r_{cx} на висоті h_c повинна бути не менше ніж 0,5 метрів. За отриманих даних ця умова виконується.

3.4 Облаштування та розрахунок заземлюючого пристрою електричної підстанції

Заземлюючий пристрій повинен забезпечити у всіх режимах експлуатації, за всяких природних умов та враховуючи опір природних заземлювачів величину опору не більше 0,5 Ом. Крім того, необхідно забезпечити умови вирівнювання електричного потенціалу та можливість зручного та «найкоротшого» приєднання електрообладнання до заземлюючого пристрою. Щоб задовольнити дану вимогу на території, що містить електричне обладнання, формується «сітка заземлення», що складається з групи поздовжніх та поперечних горизонтальних заземлювачів, що з'єднані між собою шляхом зварювання. По периметру підстанції прокладається спільний горизонтальний заземлювач, який утворює замкнутий контур і приєднується до загальної системи заземлювача [27].

Конструкція заземлювача наступна:

- горизонтальні заземлювачі – сталеві смуги 30x4 мм,
- вертикальні заземлювачі – кутник 55×55×5 мм,
- вертикальні заземлювачі – стрижні $d = 0,9$ м, $b = 0,05$ м, $l = 4$ м.

Горизонтальні поздовжні заземлювачі прокладаються вздовж осей обладнання на глибині 0,7 м від поверхні землі на відстані 1 м від фундаменту обладнання. Горизонтальні поперечні заземлювачі прокладають між обладнанням на глибині 0,7 м від поверхні землі. Розмір

заземлюючої сітки, що примикають до місць приєднання нейтралі силових трансформаторів до заземлюючого пристрою, не більше 5х5 м. Відстань від огорожі підстанції до заземлюючого пристрою повинна бути не менше 2 м.

Систему заземлення блискавковідводу умовно можна розділити на природну та штучну складові. У якості природної складової заземлювача (R_{np}) виступає фундамент блискавковідводу, а у якості штучної складової ($R_{шт}$) – металеві електроди, що поєднуються горизонтальними з'єднувальними елементами.

При розрахунку заземлювача блискавковідводу заввишки 22 м у якості природного заземлювача можна прийняти частину опори, що знаходиться під землею. Опір такого заземлювача дорівнює [27]:

$$R_{np} = \frac{\rho_e}{2 \cdot \pi \cdot l_{зч}} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot l_{зч}}{d_{зч}} \right) \quad (3.10)$$

де ρ_e – еквівалентний опір ґрунту, Ом/м,

$l_{зч}$ – довжина заглибленої частини опори, $l_{зч} = 4$ м,

$d_{зч}$ – середній діаметр заглибленої частини опори, $d_{зч} = 0,5$ м.

Для розрахунку еквівалентного опору ґрунту для вертикального заземлювача приймаємо у якості моделі неоднорідний двошаровий ґрунт. Приймаємо товщину першого шару заглибленої частини опори $h_{1e} = 4$ м.

Товщина другого шару [27]:

$$h_{2e} = H_{розр.} - h_{1e}, \quad (3.11)$$

де $H_{розр.}$ – розрахункова глибина, м:

$$H_{розр.} = (1,3 \dots 1,4) \cdot l_{зч} = (1,3 \dots 1,4) \cdot 4 = 5,2 \dots 5,6 \text{ м.} \quad (3.12)$$

Приймаємо $H_{розр.} = 5$ м.

$$h_{2e} = 5 - 4 = 1 \text{ м.}$$

Значення еквівалентного опору першого шару (ρ_{1e}) можна визначити шляхом усереднення провідності шарів ґрунту, що входять до першого шару, з урахуванням сезонних змін (питомий опір шару сезонних змін ґрунту, наприклад, для літнього періоду збільшується у 1,4 рази). Товщину шару сезонних змін $h = 1,5 \text{ м}$ [27]:

$$\begin{aligned} \rho_{1e} &= \frac{h_{1e}}{\frac{h_1}{1,4 \cdot \rho_1} + \frac{2 - h_1}{1,4 \cdot \rho_2} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3}} = \\ &= \frac{4}{\frac{0,7}{1,4 \cdot 50} + \frac{2 - 0,8}{1,4 \cdot 80} + \frac{0,8}{80} + \frac{0,4}{110}} = 111,8 \text{ Ом} \cdot \text{м.} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Еквівалентний питомий опір другого шару ρ_{2e} визначається [27]:

$$\rho_{2e} = \frac{h_{2e}}{\frac{h_3}{\rho_3}} = \frac{1}{\frac{1}{110}} = 110 \text{ Ом} \cdot \text{м.} \quad (3.14)$$

Для двошарової структури визначається еквівалентний опір ρ_e , який характеризує спільний опір двошарової моделі ґрунту.

Відношення питомих опорів першого та другого шару [27]:

$$\frac{\rho_{1e}}{\rho_{2e}} = \frac{111,8}{110} = 1,02 \quad (3.15)$$

Відношення товщин першого та другого шару [27]:

$$\frac{h_{1e}}{h_{2e}} = \frac{4}{1} = 4 \quad (3.16)$$

Для такої комбінації відношень за [27] $\rho_e = 107,8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Значення природного опору заземлювача [27]:

$$R_{\text{пр}} = \frac{107,8}{2 \cdot \pi \cdot 4} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 4}{0,5} \right) = 14,9 \text{ Ом}.$$

У якості штучного заземлювача застосовуємо двопробеневий заземлювач з вертикальними електродами, розташованими на відстані 5 м від блискавковідводу, що укладено на глибині 0,7 м, довжина променів 6 м, діаметр стрижня 0,02 м, довжина вертикального електрода, виконаного кутом – 5 м з діаметром 0,05 м.

Значення штучного опору заземлювача, що складається з n -ї кількості променів [27]:

$$R_{\text{шт}} = \frac{\rho_e \cdot k_{\text{под}} \cdot k_{\text{зо}}}{l_{\text{пр}}} \quad (3.17)$$

де $k_{\text{под}}$ – коефіцієнт подібності, $k_{\text{под}} = 0,8$,

$k_{\text{зо}}$ – коефіцієнт, що враховує зниження опору променевого заземлювача при додаванні вертикальних електродів, $k_{\text{зо}} = 0,5$.

Розрахункова глибина ґрунту з огляду на довжину вертикального електрода (l_e) [27]:

$$H_{\text{розр.}} = (1,3 \dots 1,4) \cdot l_e = (1,3 \dots 1,4) \cdot 5 = 6,5 \dots 7,0 \text{ м}. \quad (3.18)$$

Розрахункова глибина ґрунту з огляду на довжину горизонтальних електродів (l_2) та їх кількості (n_2) [27]:

$$H_{розр.} = (0,1...0,2) \cdot l_6 \cdot n_2 = (0,1...0,2) \cdot 6 \cdot 2 = 1,2...2,4 \text{ м.} \quad (3.19)$$

Приймаємо значення $H_{розр.} = 6,5 \text{ м.}$

Розрахунок еквівалентного опору здійснюємо аналогічно попередньому випадку: $h_{1e} = h = 0,7 \text{ м, } h_{2e} = 5,8 \text{ м.}$

$$\rho_{1e} = \frac{\frac{h_{1e}}{h_1}}{1,4 \cdot \rho_1} = \frac{\frac{0,7}{0,7}}{1,4 \cdot 50} = 70 \text{ Ом} \cdot \text{м.} \quad (3.20)$$

$$\rho_{2e} = \frac{\frac{h_{2e}}{\frac{2-h_1}{1,4 \cdot \rho_2} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3}}}{\frac{2-0,7}{1,4 \cdot 80} + \frac{0,7}{80} + \frac{3}{110}} = \frac{5,8}{\frac{2-0,7}{1,4 \cdot 80} + \frac{0,7}{80} + \frac{3}{110}} = 121,77 \text{ Ом} \cdot \text{м.} \quad (3.21)$$

Для отриманих значень ρ_{1e} і ρ_{2e} за [27] знаходимо значення $\rho_e = 110 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$

Значення штучного опору:

$$R_{шт} = \frac{110 \cdot 0,8 \cdot 0,5}{6} = 7,33 \text{ Ом.}$$

Загальне значення опору блискавковідводу:

$$R_{зб} = \frac{R_{пр} \cdot R_{шт}}{R_{пр} + R_{шт}} = \frac{14,9 \cdot 7,33}{14,9 + 7,33} = 4,91 \text{ Ом.} \quad (3.22)$$

При розрахунку імпульсного опору заземлювача блискавковідводу використовуємо теорію подібності та поняття іскрової зони – зони в ґрунті, яка охоплюється розрядом, межі якого визначаються характеристичним розміром і критичним значенням напруженості електричного поля.

Для визначення імпульсного опору заземлювача (R_i) розрахуємо критичне значення струму, що стікає із заземлювача і який характеризує початок процесу іскроутворення ($I_{искр.}$). З цією метою розрахуємо критеріальні параметри подібності K_1 і K_2 , що характеризують стаціонарне значення опору заземлювача. При цьому характеристичний розмір, що визначає ступінь проникнення розряду у землю згідно початкових даних буде дорівнювати: $S = 6,04$ м. Критеріальні параметри подібності будуть дорівнювати [27]:

$$K_1 = \frac{R_{шт} \cdot S}{\rho_e} = \frac{7,33 \cdot 6,04}{110} = 0,426. \quad (3.23)$$

$$K_2 = e^{\frac{\ln\left(\frac{0,256}{K_1}\right)}{K_1}} = e^{\frac{\ln\left(\frac{0,256}{0,426}\right)}{0,426}} = 0,303. \quad (3.24)$$

Пробивна напруженість ґрунту [27]:

$$\begin{aligned} E_{пр} &= (6,9 \cdot \lg(\rho_e) - 0,6 \cdot (\lg(\rho_e))^2 - 3,4) \cdot 100 = \\ &= (6,9 \cdot \lg(110) - 0,6 \cdot [\lg(110)]^2 - 3,4) \cdot 100 = 818,5 \text{ Вт/см}. \end{aligned} \quad (3.25)$$

Струм іскроутворення дорівнюватиме [27]:

$$I_{искр.} = \frac{K_2 \cdot S^2 \cdot E_{пр}}{\rho_e} = \frac{0,303 \cdot 6,04^2 \cdot 818,5}{110} = 82,25 \text{ кА} \leq 100 \text{ кА}. \quad (3.26)$$

Визначимо виконання умови до величини струму іскроутворення ($I_i = 100$ кА) при проходженні через природний і штучний опір [27]:

$$I'_{искр.} = I_i \cdot \frac{R_{np.}}{R_{np.} + R_{ум.}} = 100 \cdot \frac{14,9}{14,9 + 7,33} = 67,03 \text{ кА} \leq 82,25 \text{ кА}. \quad (3.27)$$

Обидві умови виконуються.

З урахуванням значення струму $I_{искр.}$ відкоригуємо значення критеріального параметра подібності K_2 [27]:

$$K_2 = \frac{I_{искр.} \cdot \rho_e}{S^2 \cdot E_{np}} = \frac{82,25 \cdot 110}{6,04^2 \cdot 818,5} = 0,303. \quad (3.28)$$

Оскільки розраховане значення K_2 не відрізняється від попередньо розрахованого, приймаємо для подальших розрахунків те ж значення K_1 .

Значення імпульсного опору [27]:

$$R_{им.} = \frac{K_1 \cdot \rho_e}{S} = \frac{0,426 \cdot 110}{6,04} = 7,76 \text{ Ом}. \quad (3.28)$$

Перевірка значення відстаней по повітрю та відстаней по підлозі між трансформаторними осередками та блискавковідводами на висоті прохідного portalу $H = 18 \text{ м}$:

– відстань по висоті [27]:

$$l_B = 0,12 \cdot R_{им.} + 0,1 \cdot H = 0,12 \cdot 7,76 + 0,1 \cdot 18 = 2,73 \text{ м} \leq 5 \text{ м}, \quad (3.30)$$

тому приймаємо $l_B = 5 \text{ м}$.

– відстань по підлозі [27]:

$$l_B = 0,2 \cdot R_{им.} = 0,2 \cdot 7,76 = 1,55 \text{ м} \leq 3 \text{ м}, \quad (3.31)$$

тому приймаємо $l_n = 3$ м.

Для розрахунку прохідного порталного блискавковідводу вибираємо блискавковідводи висотою 24 м з огляду на площу захисту 40х20 м.

Довжина сторони сітки:

$$\sqrt{S} = \sqrt{40 \cdot 20} = \sqrt{800} = 28,28 \text{ м.} \quad (3.32)$$

Сумарна довжина горизонтальних електродів:

$$L = 40 \cdot 3 + 20 \cdot 5 = 220 \text{ м.} \quad (3.33)$$

Число комірок для заданих параметрів сітки буде дорівнювати [27]:

$$m = \frac{L}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1 = \frac{220}{2 \cdot 28,28} - 1 \approx 3. \quad (3.34)$$

Значення опору заземлюючої сітки на глибині 0,7 м у неоднорідному ґрунті [27]:

$$R_{\text{іскр.}} = \frac{0,56 \cdot \rho_e}{\sqrt{S}}, \quad (3.35)$$

де ρ_e – еквівалентний опір ґрунту, значення якого розрахуємо для неоднорідного ґрунту, що являє собою двошарову модель.

Товщину першого шару приймаємо дорівнюючою глибині закладання сітки $h_{1e} = 0,7$ м.

Товщина другого шару [27]:

$$h_{2e} = H_{\text{розр.}} - h_{1e}, \quad (3.36)$$

де $H_{\text{розр.}}$ – розрахункова глибина, м:

$$H_{розр.} = (0,1...0,2) \cdot l_l = (0,1...0,2) \cdot 50 = 5,0...10,0 \text{ м.} \quad (3.37)$$

Приймаємо $H_{розр.} = 8 \text{ м.}$

$$h_{2e} = 8 - 0,7 = 7,3 \text{ м.}$$

Еквівалентний опір першого шару (ρ_{1e}) визначаємо шляхом усереднення провідності шарів ґрунту, що входять до нього, з урахуванням сезонних змін. Товщину шару сезонних змін приймаємо $h = 1,5 \text{ м}$ – цей шар є єдиним, тому еквівалентний опір першого шару дорівнюватиме [27]:

$$\rho_{1e} = 1,4 \cdot \rho_1 = 1,4 \cdot 50 = 70 \text{ Ом} \cdot \text{м.} \quad (3.38)$$

Еквівалентний питомий опір другого шару ρ_{2e} визначається [27]:

$$\rho_{2e} = \frac{h_{2e}}{\frac{h_1}{1,4 \cdot \rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3}} = \frac{7,3}{\frac{1,3}{1,4 \cdot 50} + \frac{0,7}{80} + \frac{3}{110}} = 153,36 \text{ Ом} \cdot \text{м.} \quad (3.39)$$

Для двошарової структури визначається еквівалентний опір ρ_e , який характеризує спільний опір двошарової моделі ґрунту.

Відношення питомих опорів першого та другого шару [27]:

$$\frac{\rho_{1e}}{\rho_{2e}} = \frac{70}{153,36} = 0,456. \quad (3.40)$$

Знаходимо відношення товщини першого шару до сторони сітки [27]:

$$\frac{h_{1e}}{\sqrt{S}} = \frac{0,7}{28,28} = 0,0248. \quad (3.41)$$

Для такої комбінації відношень за [27] $\rho_e = 138,41 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Отже, штучний опір прохідного порталного блискавковідводу [27]:

$$R_{\text{іскр.}} = \frac{0,56 \cdot 138,41}{28,28} = 2,74 \text{ Ом.}$$

Імпульсний опір заземлюючого контуру підстанції [27]:

$$R_{\text{імп}} = \alpha_i \cdot R, \quad (3.42)$$

де α_i – імпульсний коефіцієнт заземлювача, $\alpha_i = 1$,

R – стаціонарний опір заземлюючого контуру, $R = R_{\text{іскр.}}$.

$$R_{\text{імп}} = R_{\text{іскр}} = 2,74 \text{ Ом.}$$

3.5 Оцінка надійності роботи відкритого розподільного пристрою підстанції при прямих ударах блискавки

Надійність захисту відкритого розподільного пристрою (ВРП) підстанції при прямих ударах блискавки можна оцінити шляхом розрахунку числа випадків перекриття ізоляції протягом року при проривах блискавки через зону захисту блискавковідводів і зворотних перекриттів.

Число перекриттів ізоляції за рік через прориви блискавки до зони захисту блискавковідводів [28]:

$$\beta_1 = P_{\text{пр}} \cdot P_{\text{д}} \cdot N_{\text{р}} \cdot P_{\text{пер}}, \quad (3.43)$$

$P_{\text{пр}}$ – ймовірність «прориву» блискавки в зону захисту блискавковідводу. Для забезпечення надійності захисту ВРП від прямих ударів блискавки на рівні 0,99: $P_{\text{пр}} = (1 - 0,99) = 0,01$.

$P_{\text{д}}$ – ймовірність переходу імпульсного перекриття ізоляції в силову дугу, $P_{\text{д}} = 0,9$ [28].

$N_{\text{р}}$ – число грозових розрядів у ВРП підстанції за рік [28]:

$$N_{\text{р}} = P_{\text{о}} \cdot S_{\text{н}} \cdot 10^{-6}, \quad (3.44)$$

де $P_{\text{о}}$ – ймовірнісна кількість грозових розрядів:

$$P_{\text{о}} = 0,05 \cdot n_{\text{о}}, \quad (3.45)$$

де $n_{\text{о}}$ – число грозових годин на рік, $n_{\text{о}} = 40$ годин.

$$P_{\text{о}} = 0,05 \cdot 40 = 2,$$

$S_{\text{н}}$ – площа ВРП, яку обмежено крайніми блискавковідводами, $S_{\text{н}} = 75000 \text{ м}^2$.

$$N_{\text{р}} = 2 \cdot 75000 \cdot 10^{-6} = 0,15. \quad (3.46)$$

Еквівалентна ширина, з якої ВРП може вловити бічні розряди блискавок при висоті блискавковідводів ≤ 30 м [28]:

$$r_{\text{екв.}} = 5 \cdot h - \frac{2 \cdot h^2}{30} = 5 \cdot 22 - \frac{2 \cdot 22^2}{30} = 77,73 \text{ м.} \quad (3.47)$$

$P_{пер}$ – ймовірність перекриття при ударі блискавки в зону ошиновки [28]:

$$P_{пер.} = e^{(-0,04 \cdot I_{кр.})}, \quad (3.48)$$

де $I_{кр.}$ – значення критичного струму, при якому можливе перекриття ізоляції [28]:

$$I_{кр.} = \frac{2 \cdot U_{50\%}}{Z_k}, \quad (3.49)$$

де $U_{50\%}$ – п'ятидесятивідсоткове значення розрядної напруги для імпульсів негативної полярності [28]:

$$U_{50\%} = U_{50\%}^- \cdot \left[0,92 - 0,012 \cdot I_{бдг}^{(0,74 - 0,06 \cdot I_{бдг})(1_{бдг} - 3)} \right], \quad (3.50)$$

де $U_{50\%}^-$ – розрядна напруга імпульсів негативної полярності [28]:

$$U_{50\%}^- = 120 + 550 \cdot I_{бдг}, \quad (3.51)$$

$l_{бдг}$ – будівельна довжина гірлянди ізоляторів [28]:

$$l_{бдг} = n \cdot H_{бдг} \quad (3.52)$$

де n – кількість ізоляторів, $n = 18$,

$H_{бдг}$ – будівельна довжина одного ізолятора, $H_{бдг} = 0,128$ м (тип ПС70Е).

$$l_{бдг} = 18 \cdot 0,128 = 2,304 \text{ м},$$

$$U_{50\%}^- = 120 + 550 \cdot 2,304 = 1387,2 \text{ кВ},$$

$$U_{50\%} = 1387,2 \cdot \left[0,92 - 0,012 \cdot 2,304^{(0,74 - 0,06 \cdot 2,304) \cdot (2,304 - 3)} \right] = 1264,49 \text{ кВ.}$$

$Z_{\text{хв}}$ – хвильовий опір ошиновки ВРП з урахуванням корони,
 $Z_{\text{хв}} = 400 \text{ Ом.}$

$$I_{\text{кр.}} = \frac{2 \cdot 1264,49}{400} = 6,32 \text{ кА.}$$

Тоді ймовірність перекриття при ударі блискавки в ошиновку ВРП:

$$P_{\text{пер.}} = e^{(-0,04 \cdot 6,32)} = 0,776.$$

Нарешті, кількість перекриттів ізоляції підстанції на рік внаслідок проривів блискавки в зону захисту блискавковідводів:

$$\beta_1 = 0,01 \cdot 0,9 \cdot 0,15 \cdot 0,776 = 10,48 \cdot 10^{-4}.$$

Число зворотних перекриттів ізоляції підстанції на рік при ударах блискавки в блискавковідводи [28]:

$$\beta_2 = N_c \cdot (1 - P_{\text{пр}}) \cdot P_{\text{зв}} \cdot P_d, \quad (3.53)$$

де $P_{\text{зв}}$ – ймовірність зворотного перекриття при ударі блискавки в блискавковідвід, $P_{\text{зв}} = 0,01$ [28].

$$\beta_2 = 0,15 \cdot (1 - 0,01) \cdot 0,01 \cdot 0,9 = 13,37 \cdot 10^{-4}.$$

У підсумку можна сказати, що система захисту блискавковідводів від прямих ударів блискавки здатне захистити електричне обладнання, що знаходиться в зоні захисту.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ КАРТИНИ РОБОТИ СИСТЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ І БЛИСКАВКОЗАХИСТУ

4.1 Теоретичні основи роботи систем заземлення та блискавкозахисту для здійснення моделювання

Системи заземлення та блискавкозахисту не достатньо вивчені через складність отримання реальної картини та інформацію про потужність процесів, що у них протікають. Це питання необхідно вивчати для запобігання небезпечних заходів, що вимагає точного розрахунку параметрів процесу.

Блискавка – це природне явище, яким людина не може керувати, але системами захисту нам підвладні. Спільна робота системи заземлення та блискавкозахисту будуються з огляду на забезпечення шляху для струмів високої потужності в ґрунт. Ефективна система заземлення та блискавкозахисту призводить до зменшення впливу грозових розрядів і покращення параметрів надійності на підстанції [29].

Удари блискавки викликають появу значної різниці потенціалів в електричних системах, які можуть призвести до виникнення збоїв у лініях живлення. Тому, досить важливо здійснювати дослідження та проводити аналітичний аналіз, що зможе визначити шляхи забезпечення високого рівня захисту обладнання підстанції. Для будови моделі можна використовувати різноманітні програмні засоби та програмне забезпечення. Безумовно, для будови моделей необхідно мати просторову структуру системи заземлення та блискавкозахисту [29].

Блискавка здебільшого вражає у найвищу точку на підстанції, а утворені струми на своєму шляху може завдати значної шкоди обладнанню підстанції, що може призвести до її повної зупинки [29].

На електричних підстанціях використовуються різні значення напруги, які можуть піддаватися різному ступеню впливу. Більш того, на

етапі проектування системи заземлення та блискавкозахисту необхідно призначити припустиму вірогідність виникнення аварійної ситуації, що дозволить визначити конструктивне виконання цих систем та використати визначений рівень ізоляції обладнання.

Місце розташування пристроїв блискавкозахисту часто визначають за допомогою методу сфер, що котяться. Крім того, системи заземлення та блискавкозахисту конструюються виходячи з вірогідності виникнення аварійних станів, що визначається виходячи з кількості грозових днів на рік та щільності спалахів, що досягають землі. При влучанні блискавки в опору, будівлю або ВРП, генерується різниця потенціалів та велика кількість заряджених часток, що рухаються вперед і назад уздовж опори і призводить до високої напруги на ізоляторах та у місцях з'єднання. При перевищенні перехідної напруги від блискавки вище рівня опору ізоляції, утворюється електрична дуга. При виникненні дуги на провідному шарі корпусних елементів виникають струми витоку, що підвищує температуру і вологість на поверхні ізоляції [29].

Дослідження виокремлюють три типи імпульсів блискавки: позитивний, негативний і зворотний імпульс. Усі ці хвилі струму можна описати математично за допомогою функції, що може бути використана для моделювання.

4.2 Використання програмного середовища SafeGrid для моделювання процесів роботи системи заземлення

У програмному середовищі SafeGrid ядром моделювання перехідних процесів виступає спеціальний «обчислювальний модуль», який надає можливості для детального аналізу реакції електричних систем на різні впливаючі фактори [30].

У основі обчислень застосовано перетворення Фур'є, яке дозволяє аналізувати електричні сигнали у широкому діапазоні частот. Це є важливим для розуміння впливу короткотривалих явищ, таких як імпульсні перенапруги та удари блискавки, які можуть призводити до значних коливань параметрів роботи електричних мереж.

Обчислювальний модуль дозволяє налаштовувати різні параметри моделювання, вибрати тип досліджуваного сигналу та задавати його характеристики. Зазначене забезпечує гнучкість налаштування середовища для моделювання. Система може підтримувати широкий спектр сигналів, включаючи імпульсні, а також користувацькі налаштування для специфічних сценаріїв поведінки. Завдяки цьому користувач може адаптувати параметри моделювання під свої потреби та завдання, забезпечуючи отримання максимально точних даних при здійсненні досліджень [30].

Одним із ключових аспектів здійснення точного моделювання системи заземлення є врахування характеристик ґрунту, які впливають на загальне значення опору заземлення. Програмне середовище здатне підтримати багат шарові моделі ґрунту, врахувати різні рівні опорів, діелектричну та магнітну проникність, які залежать від частоти сигналу. Дана особливість є надзвичайно важливою для здійснення оцінки ефективності заземлюючих систем.

Для більш точного моделювання заземлення програмне забезпечення SafeGrid використовує різні алгоритми для розрахунку опору в залежності від частоти. При цьому враховуються реальні умови, що можуть суттєво вплинути на результати моделювання систем високої напруги, де точність розрахунків безпосередньо впливає на ефективність заземлення та безпеку системи в цілому [30].

Використовуючи вбудовані інструменти або імпортуючи дані з CAD-файлів, можна створити досить точні моделі сітки заземлення, враховуючи складність геометрії та структури і складність конфігурації заземлюючих

систем для електричних підстанцій. Проектування сітки заземлення містить можливості для визначення розташування точок встановлення заземлюючих стрижнів. Це дозволяє здійснити моделювання розподілу значень контактної напруги в різних точках сітки заземлення і визначати потенційні небезпечні зони. Крім того, можна налаштувати кількість точок визначення напруги та струму у різних провідниках, що дасть змогу отримати більш точну картину їх розподілу в системі заземлення.

Програмне середовище SafeGrid дозволяє підтримувати різні типи сигналів для моделювання перехідних процесів, що дозволяє користувачам аналізувати широкий спектр факторів, які можуть впливати на роботу системи заземлення. У якості сигналів можуть бути синусоїдні, імпульсні та інших специфічних форматів (наприклад, сигнали блискавки) [30].

Завдяки використанню розширених інструментів для аналізу напруг та струмів у програмному середовищі дозволяє здійснити точні вимірювання в різних точках мережі. Користувач може створити необхідний профіль напруги для вимірювання «крокової напруги» і «напруги дотику», що дозволяє оцінити ризик ураження обслуговуючого персоналу електричним струмом. Крім того, можна визначати параметри напруги та струму в різних точках сітки, що допомагає виявити «слабкі місця» системи заземлення та підвищити її ефективність [30].

Дане програмне забезпечення дозволяє візуалізувати результати моделювання у вигляді графіків – на площині та у просторі – що допомагає краще зрозуміти динаміку перехідних процесів та вплив різних факторів на досліджувану систему. Це особливо важливо для здійснення профілактичного і технічного обслуговування, а також для фахівців, які працюють над проектуванням та оптимізацією систем заземлення [30].

Графічний інтерфейс дає змогу переглядати значення опорів та напруг у вигляді графіків. Анімовані та інтерактивні графіки дозволяють користувачам детально розглянути поведінку системи у часі, проаналізувати вплив різних сигналів та подій на розподіл струмів та

напруг. Вбудований у програмне середовище модуль (Display Results) дозволяє створювати та налаштовувати різні типи графіків – лінійні, ступінчасті та просторові, що дозволяють аналізувати різні параметри роботи системи заземлення, та отримати повну картину поведінки системи під час перехідних процесів й визначити слабкі місця для подальшого покращення системи [30].

Програмне середовище SafeGrid підтримує широкий спектр функцій для експорту та генерації звітів. Результати моделювання можна експортувати у форматі електронних таблиць для подальшого аналізу. Крім того, користувачі можуть створювати відеозвіти та анімовані графіки, що полегшує візуалізацію складних процесів. Для формування звітів у текстових форматах підтримуються формати файлів pdf та docx. Це дозволяє створювати професійні звіти, які містять всі необхідні дані для технічного аналізу системи. [30]

Програмне середовище передбачає використання різних інструментів для аналізу, що дозволить ще глибше проаналізувати результати моделювання та визначити основні показники функціонування системи. Серед цих інструментів можна відзначити аналіз струмів і напруг в різних точках мережі, оцінити розподіл потенціалів та визначити зони з підвищеним ризиком ураження електричним струмом. Інструменти аналізу також включають розрахунок розподілу струму в заземлюючій сітці. Це дозволяє визначити навантаження на різні провідники та елементи сітки, допомагає оптимізувати її структуру та підвищити ефективність роботи системи заземлення. Підтримуються також інструменти для порівняльного аналізу різних сценаріїв моделювання, що допомагає приймати оптимальні рішення [30].

Для забезпечення максимального рівня точності моделювання програмне середовище пропонує інструменти налаштування, які дозволяють адаптувати програмне забезпечення під конкретні потреби користувачів. Інтерфейс дозволяє налаштовувати параметри моделювання,

включаючи вибір типу сигналів, частотні діапазони та інші характеристики, що впливають на точність розрахунків. Крім того, є можливість налаштування інструментів візуалізації для адаптації кінцевих графіків під індивідуальні потреби користувачів. Існує можливість створення макетів для друку та налаштування інших аспектів для отримання максимально зрозумілих та інформативних звітів. Усе це дає змогу легко сприймати результати моделювання та використовувати їх для оптимізації систем заземлення. Програмне забезпечення SafeGrid дає можливість для взаємодії з іншими програмними продуктами та інструментами для проектування електричних систем. Це дозволяє імпортувати дані з CAD-файлів та інших джерел, спрощуючи процес створення моделей заземлюючої сітки. Крім того, результати моделювання можна експортувати у формати, які підтримуються іншими програмними продуктами для подальшого аналізу [30].

Таким чином, пропонуються комплексні можливості для моделювання та аналізу систем заземлення. Інтерфейс та інструменти візуалізації забезпечують точні розрахунки та допомагають приймати оптимальні рішення щодо підвищення ефективності та надійності електричних мереж.

4.3 Моделювання системи заземлення

Для здійснення моделювання роботи системи заземлення у обраному програмному середовищі необхідно задатися площею заземлюючої сітки, встановити значення питомого опору ґрунту. Глибина шару ґрунту становить 2,5 м, а значення питомого опору – 2 Ом/м. У момент удару блискавки у будь-який елемент підстанції, частина струму блискавки проходить у ґрунт через заземлюючий провідник.

Система заземлення та блискавкозахисту складається з веж, які розташовуються на відповідній висоті, струмопроводами та сіткою заземлення. Забезпечення відповідного рівня захисту від блискавки реалізується за вимоги досягнення бажаного класу ефективності, які визначаються набором максимальних і мінімальних параметрів струму блискавки. Оцінка ризику ураження блискавкою може бути визначена шляхом моделювання та симуляції.

Струми від ударів блискавки можуть бути змодельовані за допомогою струму хвилі. Пікове значення струму становить 250 кА, а струм хвилі блискавки можна представити експоненційною функцією (рис. 4.1) [31]:

$$i(t) = k \cdot I_{\max} \cdot e^{-\alpha t} \cdot e^{-\beta t} \quad (4.1)$$

де k – поправочний коефіцієнт,

$I_{\max}$ – максимальне значення струму, А,

α – постійна часу наростання струму,

β – постійні часу падіння струму,

t – змінна часу.

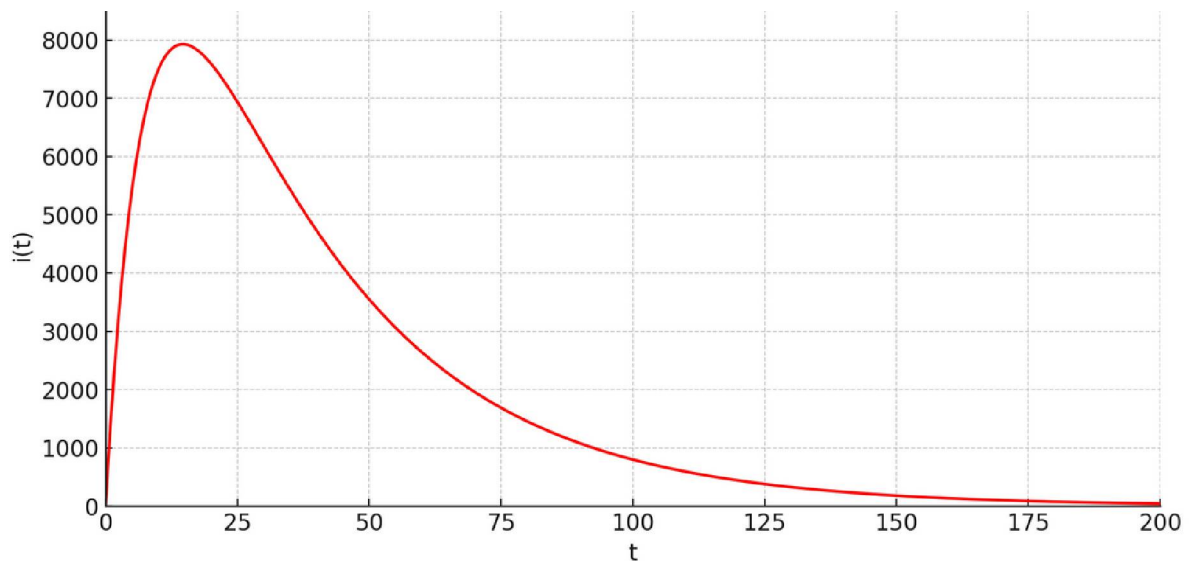


Рисунок 4.1 – Графік, що описує функцію подвійного експоненціального типу струму хвилі блискавки

Наведена залежність враховує подвійну експоненціальну функцію, що визначає наростання і падіння струму. Розрахунок струмів проводиться для провідних конструкцій з визначеним значенням опору відносно землі. Розрахунок розподілу імпульсного струму під час удару блискавки здійснюється як у вертикальних так і у горизонтальних елементах системи.

При потужних струмах від ударів блискавки електромагнітне поле в заземлювальних електродах перевищує електричну потужність ґрунту, що призводить до пробоя. Зазначене покращує характеристики заземлюючої сітки у ґрунтах з низьким значенням питомого опору. Хоча у літературних джерелах нема одностайності щодо природи цього явища, яке враховує вплив різноманітних факторів на цей процес.

Моделювання базується на обчисленнях впливу ударів блискавки – відстаней, щільності спалахів та інших параметрів. При цьому також необхідно враховувати усі відомі характеристики підстанції та припустимі значення «крокової напруги» і «напруги дотику», які можуть становити ризик для обслуговуючого персоналу при ударах блискавки [31].

Таким чином, моделювання повинно представити такий розподіл потенціалів на основі вихідних значень, що можуть показати небезпечні ділянки та визначать заходи, що дозволять запобігти всім можливим ризикам при ударах блискавки. Найбільші значення потенціалів та струмів отримаємо за значеннями опору, що відповідають наявності несправностей. Моделювання дозволяє знайти рішення для вирішення проблем, що випливають із відповідних значень характеристик ґрунту. Найбільш ефективним способом захисту підстанцій від ударів блискавки є оптимізація розміщення веж блискавкозахисту, удосконалення конфігурації сітки та зменшення опору заземлення.

На основі результатів моделювання захист підстанцій високої напруги можна здійснити за допомогою системи блискавкозахисту та заземлення. Відповідно до процесу оптимізації даних систем можна визначити розміщення окремих елементів захисту підстанції. Це може бути здійснено

поетапно шляхом підбору параметрів на основі оцінки ризиків з використанням програмного забезпечення і містить розрахунок усіх параметрів, які сприяють виникненню будь-яких можливих ризиків. Оцінка ризиків від ударів блискавки є інструментом, який можна використовувати для визначення необхідності реконфігурації системи заземлення та блискавкозахисту. «Крокова напруг» і «напруга дотику» можуть бути оцінені з огляду на вірогідність присутності обслуговуючого персоналу поблизу точок з підвищеним значенням потенціалу. Для розрахунків можуть бути використані навіть наближені методи, які мають досить високу точність для визначення піків напруг від ударів блискавки з урахуванням конфігурації системи заземлення [32].

На ефективність роботи системи заземлення мають вплив геометричні розміри сітки заземлення – розміри комірок (рис. 4.2).

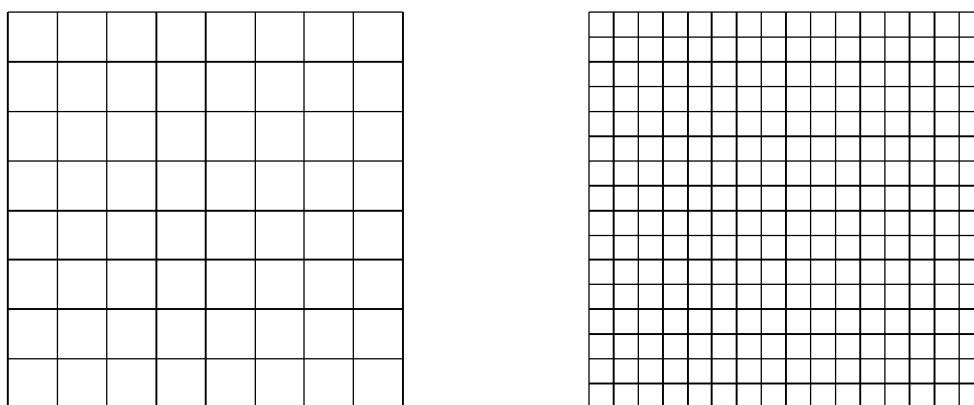


Рисунок 4.2 – Сітка заземлення високовольтної підстанції: а – 64 комірки розміром 5,0х5,0 м, б – 256 комірок розміром 2,5х2,5 м

При протіканні струмів від ударів блискавки через елементи сітки заземлення, необхідно враховувати наступні параметри:

- питомий активний опір, який залежить від питомого опору ґрунту,
- довжини заземлюючого електрода,
- індуктивність заземлюючого електрода,
- ємнісний опір заземлюючого електрода,

- радіус зони іонізації,
- магнітна проникність ґрунту,
- діелектричної проникності ґрунту.

Для визначення впливу зміни кількості комірок заземлюючої сітки та визначення імпульсної стійкості заземлення здійснено моделювання та візуалізацію стану з використанням програмного середовища SafeGrid.

Отримані результати моделювання наведено на рис. 4.3 Тривимірна поверхня зображує зміну потенціалу напруги під час перехідного процесу на заземлюючій сітці.

Детальний аналіз графічних залежностей свідчить про те, що із збільшенням кількості комірок у сітці заземлення стійкість системи до імпульсів підвищується. Це характеризується зниженням потенціалу напруги та більш рівномірним його розподілом у самій сітці.

Ефективність розсіювання потенціалу сильно залежить від частоти: на низьких частотах розмір сітки незначно впливає на цей параметр, але на високих частотах ефективність значно підвищується. Більша кількість комірок означає меншу відстань між вузлами (стрижнями) заземлення, що суттєво знижує імпульсний опір та забезпечує ширше розсіювання потенціалу в ґрунті, більш ефективно «розряджаючи» імпульсні струми.

Збільшення кількості вузлів у сітці заземлення також позитивно впливає на стабільність роботи обладнання. Більша кількість вузлів забезпечує більш ефективне розсіювання струмів, що може захистити обладнання від високовольтних імпульсів і підвищує стійкість системи в цілому. Це особливо важливо для забезпечення безпеки та надійності енергопостачання в промислових об'єктах. Загалом, збільшення кількості комірок у сітчастій системі заземлення є одним із найефективніших способів підвищення її надійності та ефективності. Ця технологія дозволяє оптимізувати розподіл потенціалу, забезпечує краще розсіювання струмів та підвищує загальну електромагнітну сумісність, що робить її незамінним рішенням для сучасних електричних мереж.

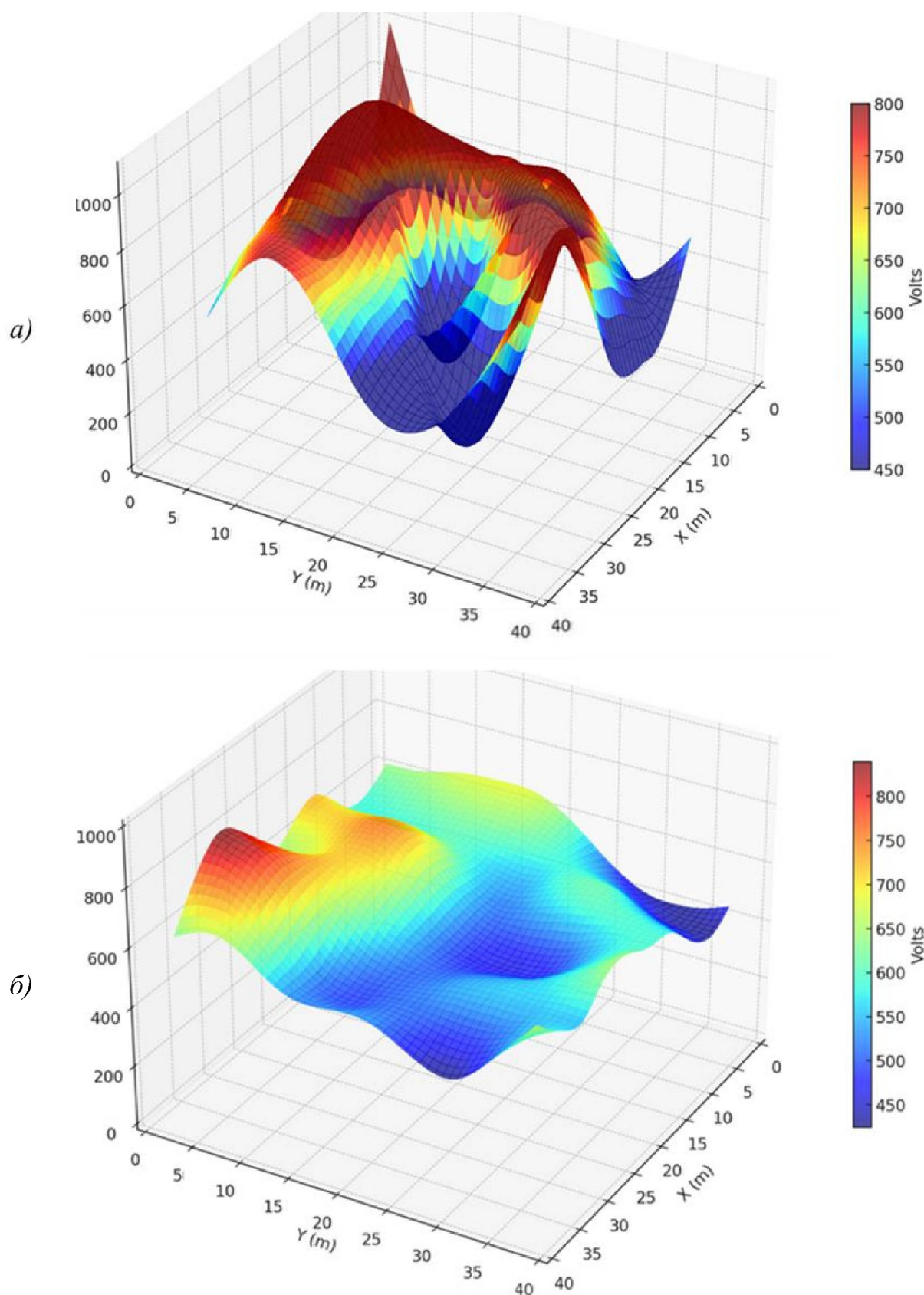


Рисунок 4.3 – Зміна потенціалу напруги на заземлюючій сітці при різних параметрах її щільності: *a* – 64 комірки розміром 5x5 м, *б* – 256 комірок розміром 2,5x2,5 м

Використання сітчастих систем заземлення особливо ефективно для високовольтних підстанцій та інших енергетичних об'єктів. Додавання більшої кількості комірок та зменшення відстані між вузлами сприяє скороченню тривалості піка перехідного потенціалу, покращуючи електромагнітну картину на високовольтній підстанції та забезпечуючи відповідний рівень електромагнітної сумісності (рис. 4.4).

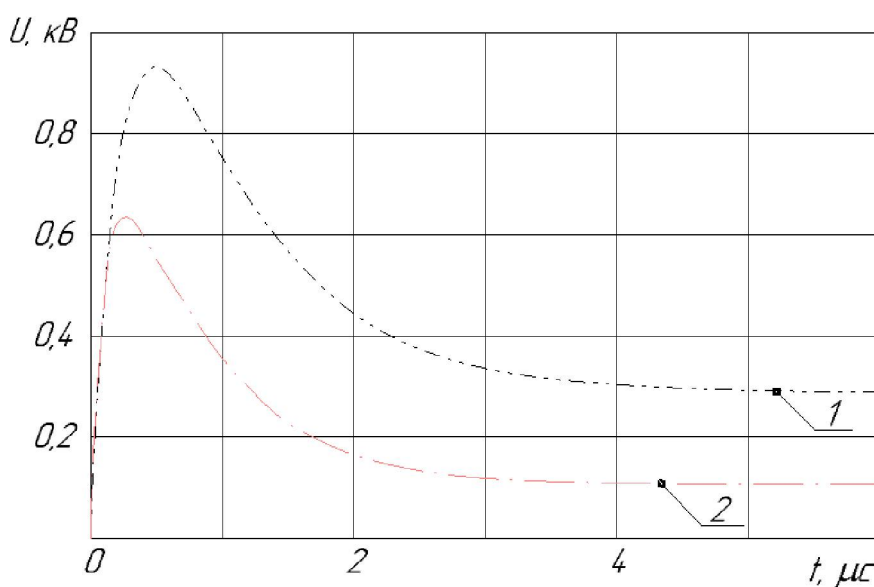


Рисунок 4.4 – Зміна та зменшення у часі максимуму перехідного потенціалу: 1 – 64 комірки розміром 5x5 м, 2 – 256 комірок розміром 2,5x2,5 м

Традиційні методи, засновані на збільшенні площі заземлення, не завжди є достатньо ефективними. Ефективнішим підходом виявляється збільшення кількості провідників і зменшення відстані між ними, що еквівалентно збільшенню кількості комірок у сітці заземлення. Це дозволяє підвищити надійність системи заземлення при перехідних процесах, які виникають внаслідок ударів блискавки.

Дослідження показали, що імпульсні струми мають мінімальний вплив на низьких частотах, оскільки система заземлення поводить себе як рівнопотенційна сітка з низькою індуктивністю. Проте, на високих

частотах, які характерні для ударів блискавки, індуктивні властивості провідників стають більш вираженими, що порушує рівномірність потенціалів у сітці та змінює перехідну реакцію системи. Скорочення часу перехідного потенціалу робить систему заземлення більш стійкою до високопотенційних імпульсів, що пояснюється більш високим значенням перехідного опору заземлення до таких імпульсів.

Імпульсна стійкість заземлення залежить не лише від геометрії системи, але й від електромагнітних властивостей ґрунту. При впливі високих імпульсних струмів на системи заземлення іонізація ґрунту навколо провідників призводить до нелінійності перехідних характеристик. У такому разі ефективні методи чисельного розрахунку, засновані на моделюванні, дозволяють шляхом зміни конкретних параметрів покращувати існуючі та проектувати нові системи заземлення для високовольтних підстанцій. Це дає змогу точно прогнозувати поведінку систем під час перехідних процесів та враховувати різноманітні чинники.

Удосконалені методи проектування сітчастих систем заземлення зменшують час реагування системи та збільшують її здатність розсіювати імпульсні струми. Такий підхід сприяє кращій стійкості до високовольтних імпульсів і покращує електромагнітну сумісність. Більш глибоке розуміння впливу різних факторів на імпульсну стійкість заземлення дозволяє більш ефективно оцінити характеристики системи і вжити необхідних заходів для її оптимізації.

Інтеграція систем заземлення в електроенергетичну мережу передбачає не тільки технічну реалізацію, але й аналіз різних сценаріїв експлуатації, щоб визначити потенційні ризики і способи їх мінімізації. Спираючись на вищенаведені дослідження та аналіз, можна сказати, що використання нових технологій і методів проектування систем заземлення суттєво підвищує їх ефективність і надійність, забезпечуючи відповідність сучасним вимогам електроенергетики.

ВИСНОВКИ

Електричні підстанції є критично важливими вузлами енергетичних мереж, і системи заземлення та захисту від блискавки відіграють ключову роль у забезпеченні їх безпеки та стабільності роботи. Основні цілі цих систем включають захист персоналу, обладнання та надання шляху для розсіювання струмів пошкодження та перенапруг. Незважаючи на різні функції, системи заземлення та блискавкозахисту тісно пов'язані між собою і повинні працювати разом, щоб забезпечити ефективну та безпечну роботу підстанцій.

Основними завданнями роботи був аналіз існуючих методів захисту, визначення обмежень та проблем, пов'язаних з експлуатацією, а також пропозиція оптимізованої конфігурації систем заземлення та блискавкозахисту.

Результати досліджень показали, що існує безліч проблем у впровадженні ефективних систем заземлення та захисту від блискавки на електричних підстанціях, зокрема неправильна оцінка опору ґрунту опору, корозія компонентів, недостатній обсяг технічного обслуговування, використання застарілих стандартів і багато інших. Існують також проблеми щодо покриття і розташування захисних систем, координації з пристроями захисту від перенапруг, використання невідповідних матеріалів.

Для вирішення цих проблем необхідно впроваджувати сучасні інструменти моніторингу та інноваційні матеріали, впроваджувати програми навчання персоналу, а також здійснювати регулярні перевірки та оновлення систем. Для визначення точного значення опору системи рекомендується регулярно проводити вимірювання, враховуючи сезонні зміни вологомисткості ґрунту, що можуть суттєво впливати на результати вимірювання. Під час проектування систем заземлення

необхідно враховувати діелектричну проникність ґрунту, що допоможе правильно розрахувати повний опір системи та підібрати відповідні матеріали. Рекомендується проводити перевірку опору заземлення, «крокової напруги» та «напруги дотику» щорічно. Особливу увагу слід приділяти стану з'єднань і корозії компонентів, які можуть збільшити опір системи заземлення. Для зменшення опору заземлення, рекомендується використовувати вертикальні електроди з мінімальною довжиною 4 метри. Їх слід розміщувати на відстані не менше 1 метра від фундаменту обладнання. Для підвищення довговічності та надійності систем заземлення рекомендується використовувати матеріали з високою стійкістю до корозії, такі як мідь або оцинкована сталь, або вдосконалені композитні матеріали. Висота блискавкоприймачів за заданих умов повинна бути не менше 24 метрів, що забезпечить ефективний захист електрообладнання підстанцій. Рекомендується застосовувати комбіновані системи блискавкозахисту, що включають повітряні вежі та струмопровідники.

Таким чином, ефективна робота систем заземлення та блискавкозахисту вимагає всебічного підходу, який включає технологічні інновації, дотримання нормативних вимог та постійне навчання персоналу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бардик Є.І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання / Є.І. Бардик, М.П. Лукаш / К.: «Політехніка» НТУУ "КПІ" 2012. – 250 с.
2. Серіков Я.О. Основи охорони праці. Навчальний посібник для студентів вищих закладів освіти / Я. О. Серіков. – Харків, ХНАМГ, 2007. – 227 с.
3. Попадченко С.А. Захист ліній та підстанцій від блискавки та атмосферних перенапруг / Попадченко С.А., Савченко О.А. – Методичний посібник – Х.: ХНТУСГ імені Петра Василенка, 2019. – 120 с.
4. ДСТУ ІЕС 62305-1:2012. Захист від блискавки. Частина 1. Загальні положення (ІЕС 62305-2:2010, ІОТ). [Чинний від 2012-08-01]. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2012.– 99 с.
5. Перехідні процеси в системах електропостачання / Півняк Г.Г., Винославський В.Н., Рибалко А.Я., Несен Л.І. и др. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. – 600 с.
6. Шостак В. Блискавкоприймачі: різновиди та характеристики. 4.1-4. // Промелектро, №1-4, 2009.
7. Дривецкий С.І. Дослідження індукованих перенапруг на лініях електропередавання напругою 6-35 кВ з різними типами проводів / С.І.Дривецкий, С.Ю. Шевченко // Тези доповідей ХХІІІ міжнародної науково-практичної конференції. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016.
8. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі: навч. посібник / Ю.Ф. Романюк. – К.: Знання, 2007. – 292 с.
9. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: Підручник / М. С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.

10. Правила улаштування електроустановок. – 2-ге вид., переробл., і допов. – Харків: Форт, 2009. – 736 с.
11. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015 Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. Київ: Мінрегіон, 2016. – 79 с.
12. Електричні мережі та системи. Режими роботи розімкнених мереж: Навчальний посібник з дисципліни для всіх форм навчання та студентів іноземців напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»/Уклад. В.В.Кирик. – К.: НТУУ «КПІ». 2014. – 130 с.
13. Кирильчук А.А. Хімія ґрунтів. Основи теорії і практикум: навч. посібник / А.А. Кирильчук, О.С. Бонішко. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка. 2011. – 354 с.
14. Amina D., Boubakeur Z., Tahar S., Djillali M. Evaluation and performance of grounding grids buried in soil under impulse lightning current. 1-st International Conference on communications, Control systems and signal processing (CCSSP), 2020. doi:10.1109/ccssp49278.2020.9151549.
15. Ghanian S.M. Optimum design of grounding system inside high voltage substations for transient conditions. IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2016. doi:10.1109/ichve.2016.7800808.
16. Salgado L., Guardado J., Torres J., Hernandez E. Transient analysis of grounding systems under lightning strikes considering soil ionization. IEEE Industry applications society annual meeting, 2010. doi:10.1109/ias.2010.5614431.
17. Otani K., Shiraki Y., Baba Y., Nagaoka N., Ametani A., Itamoto N. FDTD simulation of grounding electrodes considering soil ionization. International conference on lightning protection (ICLP), 2012. doi:10.1109/iclp.2012.6344295.
18. R. Zeng, P. Kang, J. He, B. Zhang, S. Chen, J. Zou. Lightning transient performance analysis of substation based on complete transmission line

model of power network and grounding systems. IEEE Transactions on Magnetism, 42(4), 2006. doi:10.1109/tmag.2006.871462.

19. Meng Y., Chen W., Liu C., Luo X., Huang X., Tan, H. Influence of grounding design around down lead on lightning impulse behavior of substation grounding grid. 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), 2019. doi:10.1109/apl.2019.8816049.

20. R. Zeng, X. Gong, J. He, B. Zhang, Y. Gao. Lightning impulse performances of grounding grids for substations considering soil ionization. IEEE Transactions on Power Delivery, 23(2), 2008. doi:10.1109/tpwrd.2007.915194.

21. Sekioka S., Hayashida H., Hara T., Ametani A. Measurements of grounding resistances for high impulse currents. IEE Proceedings - generation, transmission and distribution, 145(6), 1998. doi:10.1049/ip-gtd:19982009.

22. Del Alamo J. L. (n.d.). A powerful tool for grounding design in high voltage substations. 6th Mediterranean Electrotechnical Conference. 1991. doi:10.1109/melcon.1991.162114.

23. ДНАОП 0.00-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – К.: ВП «ГРАНМНА», 2001. – 117 с.

24. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT): ДСТУ EN 50160: 2014. – [Чинний від 2014-10-01]. – К.: Мінекономрозвитку, 2014. – 27 с. – (національний стандарт України).

25. ДСТУ ІЕС 62305-1:2012. Захист від блискавки. Частина 3. Фізичні руйнування споруд та небезпека для життя людей (EN 62305-3:2011, IDT). [Чинний від 2012-08-01]. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2012. – 219 с.

26. Бахор З.М., Журахівський А.В. Проектування підстанцій електричних мереж: – Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 308 с.

27. Костишин В. С. Електрична частина станцій та підстанцій: навч. посіб. / В.С. Костишин, М.Й. Федорів, Я.В. Бацала. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 243 с.

28. [Електронний ресурс]. – Методичні рекомендації з розрахунку та проектування системи. Режим доступу: <http://fs-lps.com/wp-content/uploads/2019/09/Metodychka-z-rozrahunku-LPS-FS.pdf>

29. [Електронний ресурс]. – Рівень блискавкозахисту об'єктів різного призначення. Режим доступу: <https://rem-group.com.ua/blog-ua/riven-klas-bliskavkozahistu-ua>

30. [Електронний ресурс]. – ELEK SafeGrid Earthing Software. Режим доступу: <https://elek.com/electrical-software/safegrid-earthing/>

31. Перехідні процеси в системах електропостачання / Півняк Г.Г., Винославський В.Н., Рибалко А.Я., Несен Л.И. и др. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. – 600 с.

32. Остапчук Ж.І., Кулик В.В., Тептя В.В. Моделювання в задачах розвитку електричних систем. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 128 с.

33. Жежеленко І.В., Рабінович М.Л., Божко В.М. Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.

34. Півняк Г.Г., Шидловський А.К., Кігель Г.А., Рибалко А.Я., Хованська О.І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.

35. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навчальний посібник / М.Й. Бурбело, О.О. Бірюков, Л.М. Мельничук – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 204 с.

36. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень: навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2013.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

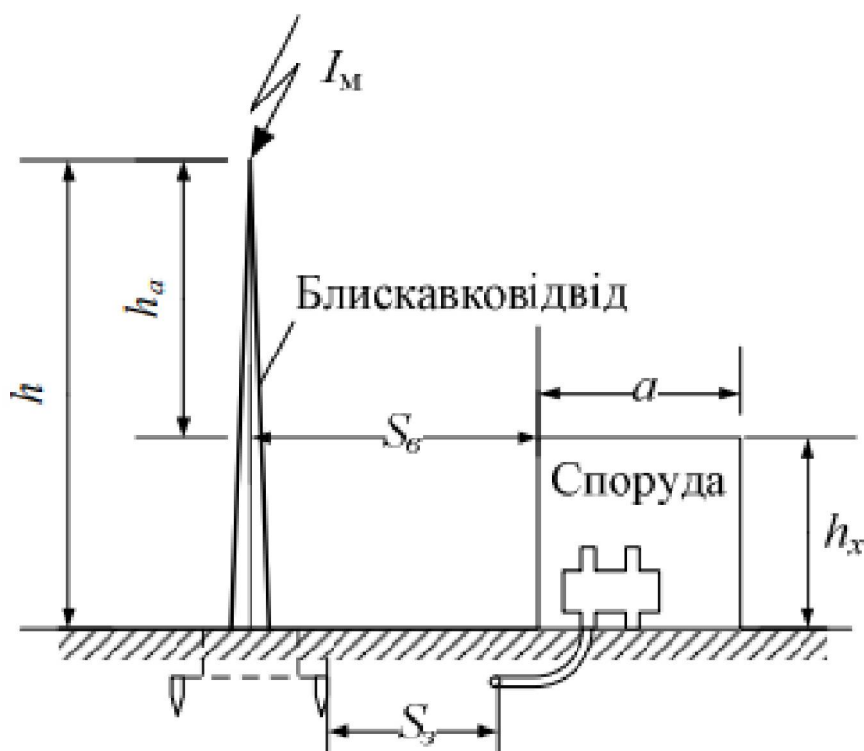
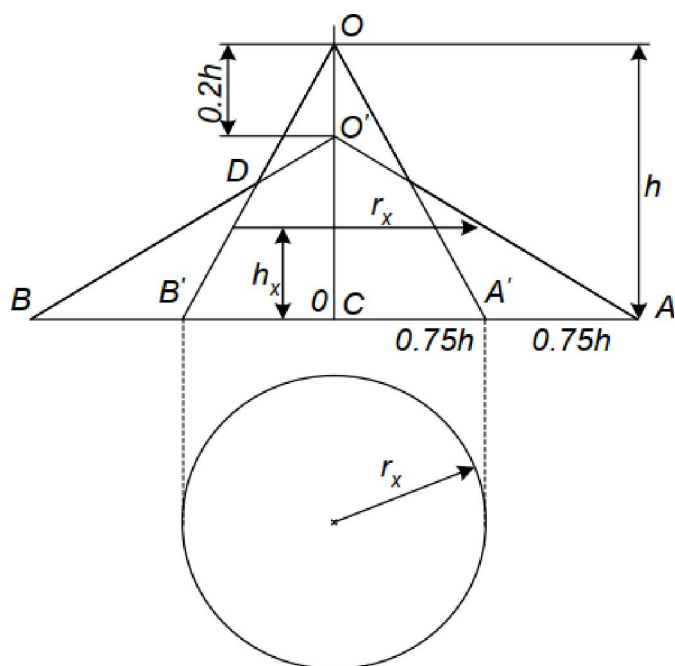
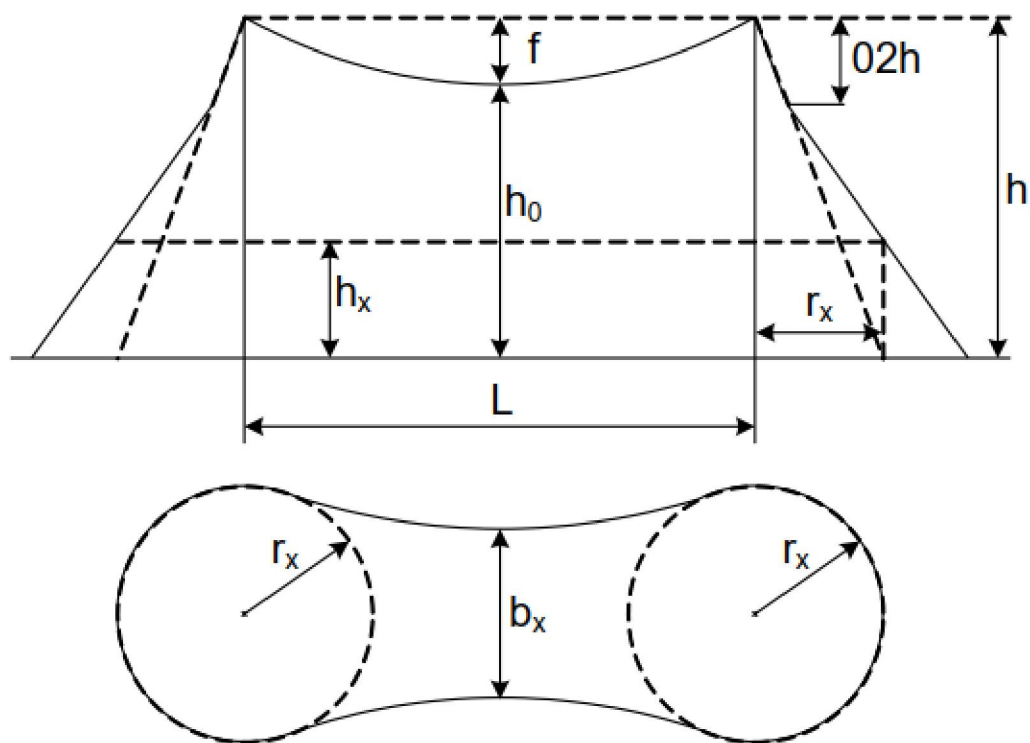


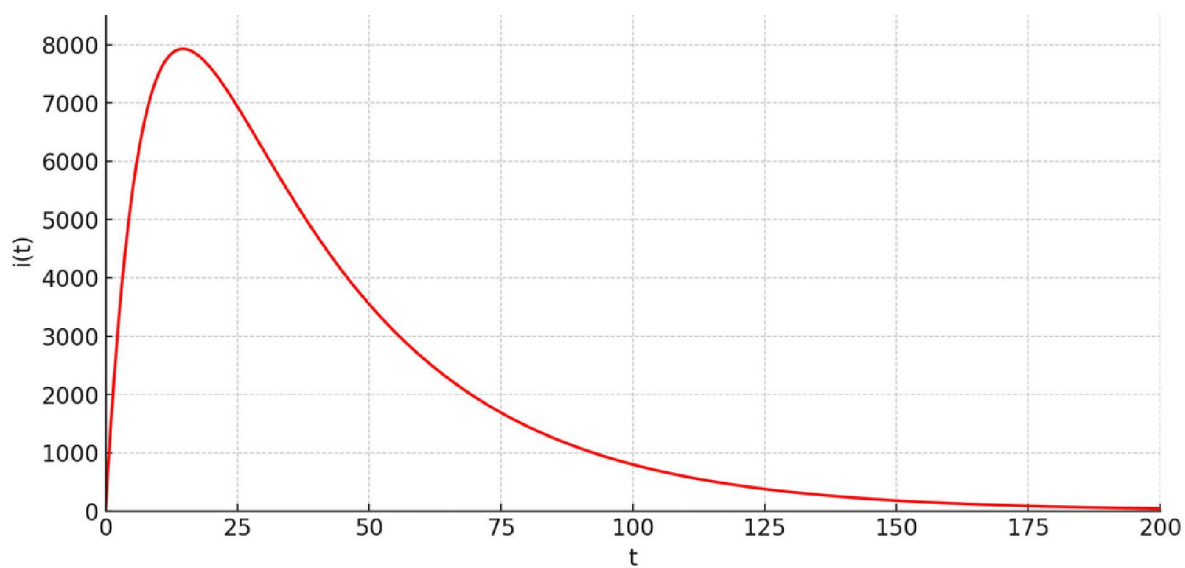
Схема захисту будівлі підстанції за допомогою системи заземлення та блискавкозахисту



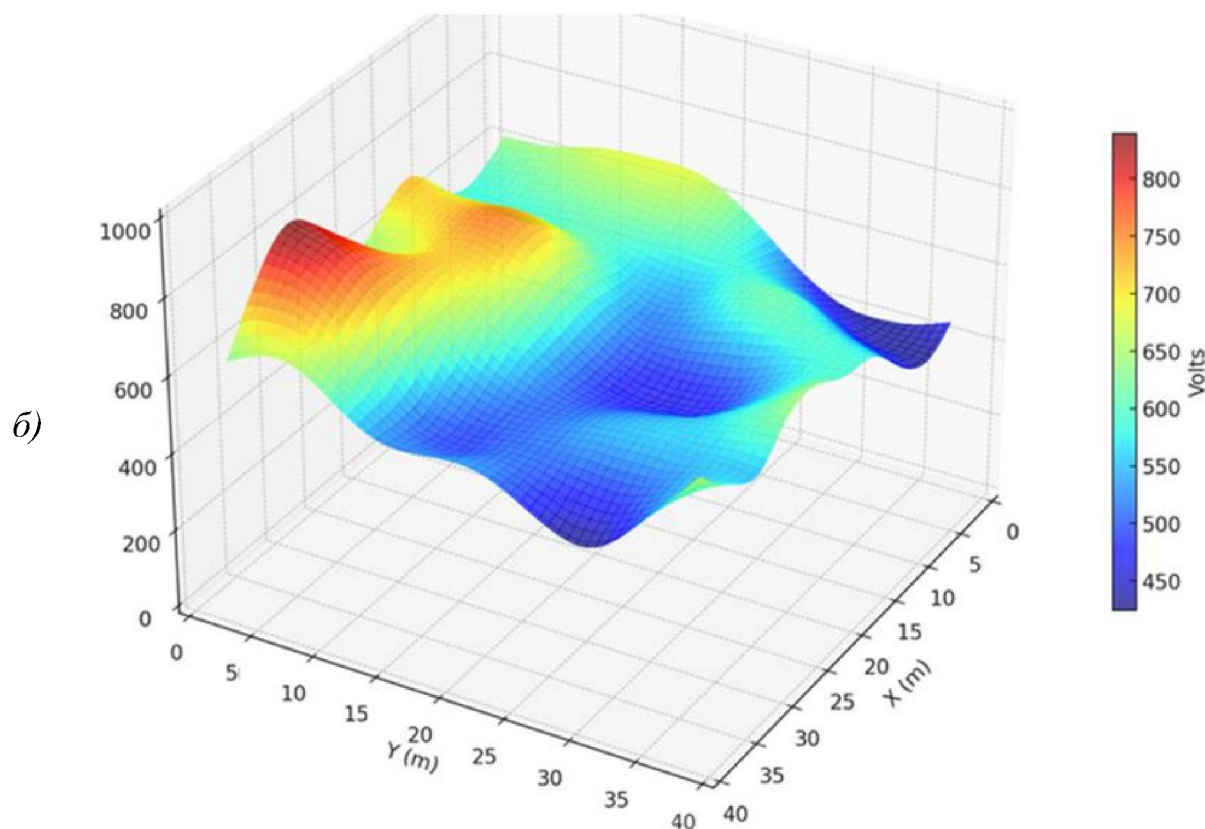
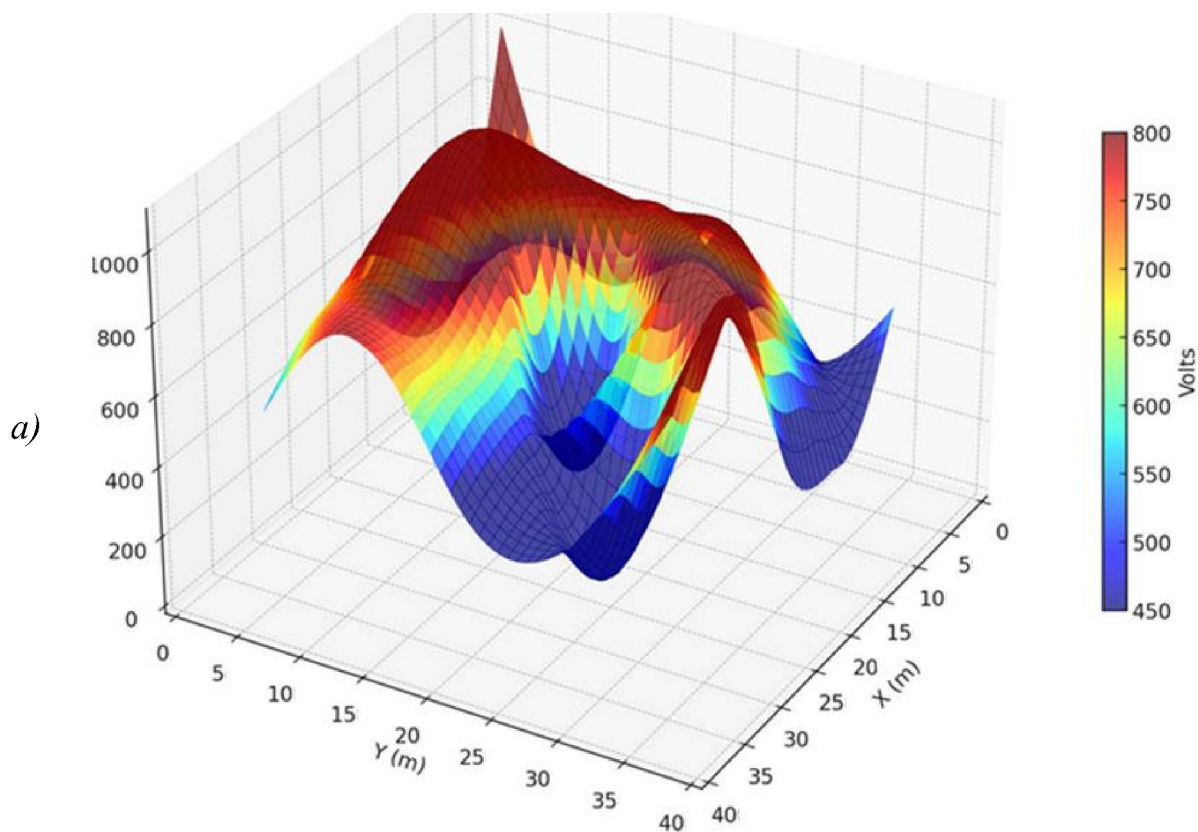
Зона захисту одиночного стрижневого блискавковідводу



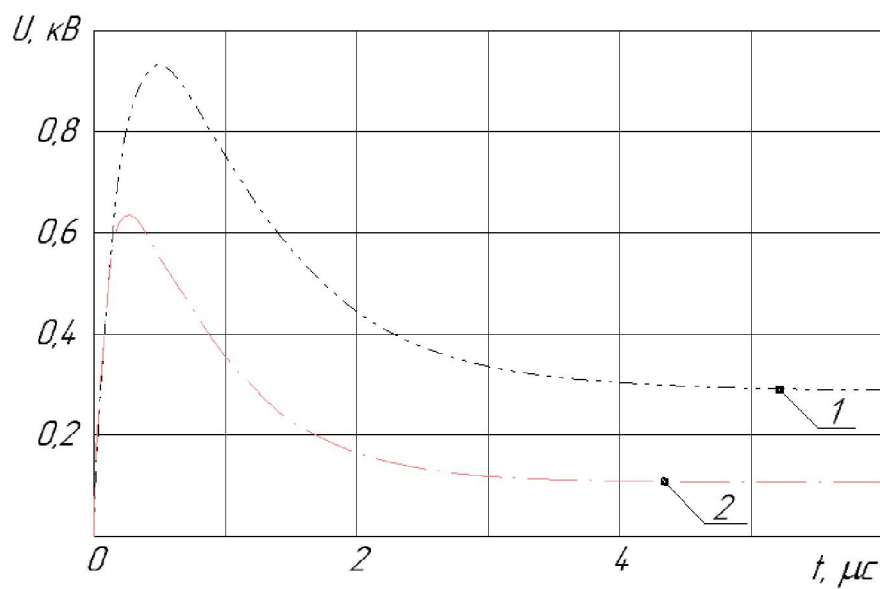
Зони захисту тросового блискавковідводу



Графік, що описує функцію подвійного експоненціального типу струму хвилі блискавки



Зміна потенціалу напруги на заземлюючій сітці при різних параметрах її щільності: *a* – 64 комірки розміром 5x5 м,
б – 256 комірок розміром 2,5x2,5 м



Зміна та зміщення у часі максимуму перехідного потенціалу:

1 – 64 комірки розміром 5x5 м, 2 – 256 комірок розміром 2,5x2,5 м

ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____