

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

НІЖЕВСЬКИЙ ІЛЛЯ ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.316.99

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ І КОНТРОЛЮ
ПАРАМЕТРІВ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ
МІСЬКИХ ПІДСТАНЦІЙ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Бондаренко Володимир Омелянович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри передачі електричної
енергії.

Офіційні опоненти доктор технічних наук, професор
Говоров Пилип Парамонович,
Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова,
професор кафедри світлотехніки і джерел
світла;

кандидат технічних наук, доцент
Чернюк Артем Михайлович,
Українська інженерно-педагогічна академія,
доцент кафедри фізики, електротехніки та
електроенергетики.

Захист відбудеться « 7 » грудня 2017 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий « 2 » листопада 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



С.Ю. Шевченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Заземлювальний пристрій (ЗП) підстанції (ПС) має три основних призначення: робоче заземлення, захисне заземлення та захист від ударів блискавки. Нормальна робота електроенергетичних систем та їх основного обладнання, такого, як трансформатори, повітряні лінії, кабельні лінії, обмежувачі перенапруг, пристрої релейного захисту та автоматики тощо, залежить від стану ЗП ПС.

Основними параметрами, що визначають якість ЗП ПС, є його електричний опір та напруга дотику. Контроль стану ЗП підстанції виконується у відповідності до нормативних документів після його монтажу та періодично під час експлуатації.

Існуючі методи визначення електричних характеристик ЗП ПС мають суттєві похибки. Як показує досвід обстеження ЗП ПС виміряти опір з достатньою точністю практично неможливо. Необхідно зазначити, що на теперішній час відсутні способи, за допомогою яких можна здійснити вимірювання опору ЗП на ПС великої площі, а також на ПС, які знаходяться в умовах щільної міської забудови. Якісне виконання діагностики та аналіз отриманих результатів дозволяє виявити відхилення параметрів ЗП від визначених нормативними документами. Це сприяє уникнути аварійних ситуацій та небезпечних для обслуговуючого персоналу. Результати отримані під час діагностики, досить часто, виявляють необхідність проведення реконструкції ЗП ПС.

Реконструкція ПС включає в себе перевірку стану ЗП на відповідність проектній документації. Однак в багатьох випадках такої документації в енергетичних компаніях немає. Окрім того слід зауважити, що реконструкція ЗП ПС представляє з себе досить складну проблему, яку іноді неможливо вирішити. Тому, пошук шляхів, що спрощують проведення реконструкції ПС та її ЗП, розробка нових конструкцій ЗП, та методів вимірювання їх електричних параметрів являє собою актуальну науково-технічну задачу, оскільки від стану ЗП залежить надійність роботи електричних систем та мереж та їх обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі передачі електричної енергії НТУ «ХП» у рамках науково-дослідної роботи за темою «Розробка варіанта дворівневого заземлювального пристрою на прикладі підстанції «Павлівська» (ДР № 0108U002224) згідно госпдоговору № 92814 НТУ «ХП» та АК «Харківобленерго» (м. Харків), де здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення методів контролю параметрів і модернізації заземлювального пристрою міських підстанцій.

Для досягнення мети були визначені наступні задачі дослідження:

1. Провести аналіз сучасного стану проблем, існуючих методів реконструкції і способів контролю електричних параметрів ЗП ПС.

2. Розробити і удосконалити математичні моделі для дослідження електричних параметрів ЗП у вигляді простих дворівневих конструкцій з горизонтальних або кільцевих електродів.

3. Розробити метод розрахунку опору складного дворівневого ЗП і розподілу потенціалів по поверхні землі на території ПС.

4. Дослідити вплив глибини закладення сітки верхнього рівня дворівневого ЗП ПС на його електричні характеристики для вибору оптимального варіанту.

5. Провести дослідження впливу товщини шару зволоження, просихання або промерзання ґрунту і конструкції ЗП ПС на його електричні характеристики на основі математичної моделі дворівневого ЗП для вибору найбільш ефективної конструкції.

6. Виконати теоретичне обґрунтування та розробку методу вимірювання опору ЗП ПС, в тому числі і в умовах щільної забудови території.

7. Виконати експериментальні дослідження дворівневого ЗП ПС для вимірювання його опору і потенціалів по поверхні землі в електролітичній ванні методом фізичного моделювання.

Об'єкт дослідження - процеси різної фізичної природи в ЗП ПС, які знаходяться в умовах тривалої експлуатації, в тому числі, розташованих в межах міста.

Предмет дослідження - електричні характеристики ЗП ПС та методи їх визначення в умовах обмеженого доступу.

Методи дослідження. В основу роботи покладено системний підхід при проведенні теоретичних і експериментальних досліджень, що базується на фундаментальних положеннях теорії електричних кіл при розробці методу вимірювання опору ЗП і розрахунку потенціалів на окремих взаємовпливаючих ЗП, техніки високих напруг при проведенні фізичного моделювання ЗП і при розрахунках опорів простих і складних ЗП. Всі основні розрахунки виконані на ПЕОМ за оригінальними програмами, які розроблені автором дисертаційної роботи, а також з використанням сучасного прикладного програмного забезпечення (Mathcad). Надійність розробки забезпечена коректним використанням методів дослідження, підтверджена експериментальними дослідженнями і промисловим впровадженням модернізації ЗУ ПС і методу вимірювання його опору.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено математичну модель для аналізу електричних характеристик ЗП ПС в двошаровому ґрунті, яка відрізняється тим, що дозволяє визначити електричні характеристики ЗП, які складаються з двох рівнів і довільним розташуванням їх щодо кордону розділу шарів.

2. Вперше запропоновано метод вибору конструкції ЗП ПС, суть якого полягає у врахуванні і впливу товщини шару зволоження, промерзання або висихання ґрунту на електричні характеристики ЗП, що дозволяє підвищити його експлуатаційні характеристики.

3. Удосконалено метод вимірювання опору ЗП ПС за допомогою трьохелектродної установки, який відрізняється тим, що по черзі змінюються функції вимірювальних електродів, а це дозволило проводити вимірювання без відшукування точки нульового потенціалу.

4. Удосконалено метод вирівнювання електричних потенціалів по поверхні землі над чарунками ЗП ПС і за межами контуру ЗП ПС, який відрізняється тим, що встановлено зв'язок розмірів чарунки сітки з глибиною її укладання, а це дозволило рівномірно розподілити потенціали і забезпечити мінімальну напругу дотику.

Практичне значення отриманих результатів для електроенергетичної галузі.

Розроблено алгоритм і програму розрахунку електричних параметрів ЗП у вигляді дворівневої конструкції. Програма дозволяє автоматизувати розрахункові роботи при виборі ЗП.

Основні наукові результати роботи знайшли своє застосування в створенні дворівневої конструкції ЗП, що дозволило проводити модернізацію ЗП. Запропоновано і запатентовано ЗП (патент України на корисну модель № 18292), який реалізовано в АК «Харківобленерго» при модернізації ЗП підстанції «Павлівська».

Запропоновано і запатентовано два нових способи вимірювання опору ЗП (патенти України на корисну модель № 19760 та № 58994), які дозволяють застосовувати їх для будь-якого об'єкта без його відключення і в умовах промислової і міської забудови.

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних в дисертації, розроблена дворівнева конструкція ЗП, яка використана при модернізації ЗП підстанцій. Це дозволяє запобігти пошкодженню основного обладнання підстанцій електричних мереж України, а також відмові систем РЗ і автоматики, які могли б бути викликані дефектами ЗП до його модернізації.

Результати роботи впроваджені в АК «Харківобленерго» при модернізації ЗП ПС. Теоретичні положення і практичні висновки використовуються в науково-дослідних роботах та навчальному процесі кафедри ПЕЕ НТУ «ХП» для підготовки студентів за спеціальністю 05070102 - «Електричні системи і мережі».

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові положення і отримані результати, які містяться в дисертації і виносяться на захист, розроблені і отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз результатів обстеження сучасного стану існуючих ЗП ПС; розробка та удосконалення математичних моделей простих дворівневих конструкцій ЗП; розробка методу і програми розрахунку електричних характеристик дворівневого ЗП ПС; дослідження впливу глибини залягання сітки верхнього рівня дворівневого ЗП ПС на його електричні характеристики; дослідження впливу товщини шару зволоження, просихання або промерзання ґрунту і конструкції ЗП ПС на його електричні характеристики; теоретичне обґрунтування методу і розробка способу вимірювання опору ЗП ПС; експериментальні дослідження електричних характеристик дворівневого ЗП ПС методом фізичного моделювання в електролітичній ванні.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати дисертаційної роботи представлялися, доповідалися автором і обговорювалися на Міжнародних науково-практичних конференціях та симпозіумах:

«Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія та практика» (Харків, 2008, 2010, 2016), «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2011, 2013-2016), «Кабельна техніка сучасного рівня й ізоляція» (Харків, 2008-2014, 2016), «Стан електричних мереж обленерго й основні напрямки підвищення їхньої ефективності. Зменшення втрат електроенергії в електромережах» (Кореїз, АР Крим, 2006-2013), «Перенапруги в електроенергетичних системах і захист від них» (Харків, 2013-2015).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 31 опублікованій науковій праці, в тому числі: 18 в наукових фахових виданнях України (13 - у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 3 патенти України на корисну модель, 10 - у матеріалах конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 233 сторінок, в тому числі 36 рисунків по тексту, 31 рисунок на 19 окремих сторінках, 17 таблиць по тексту, 18 таблиць на 15 окремих сторінках, список з 134 найменувань використаних джерел на 16 сторінках, 6 додатків на 25 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертації обґрунтована актуальність теми, сформульована мета роботи та основні задачі дослідження, визначені об'єкт і предмет дослідження, вказані методи дослідження, зв'язок з науковими програмами і темами, наведена загальна характеристика.

У **першому розділі** проведено аналіз опублікованих робіт з обстеження електричних характеристик ЗП ПС, що знаходяться в тривалій експлуатації, з урахуванням їх корозії в процесі експлуатації.

Проаналізовано основні функції ЗП ПС, виділені основні параметри, які визначають його технічний стан і працездатність в період експлуатації, тобто готовність виконати свої функції із заданою надійністю в будь-який момент. До основних параметрів відносяться: опір ЗП, потенціал на ЗП і напруга дотику.

Виявлено основні тенденції удосконалення використовуваних конструкцій ЗП існуючих ПС.

Проведено аналіз існуючих вимог до періодичного контролю електричних параметрів ЗП, а також способів і методів їх вимірювання і тенденції їх розвитку. На підставі цього аналізу сформульовані мета і наукова задача розробки і дослідження нових конструкцій ЗП і нових способів контролю їх електричних параметрів з урахуванням вимог, які впливають з умов роботи ЗП в електричних мережах.

Показано, що в умовах щільної забудови території в місці розташування ПС часто не можна виконати необхідні вимірювання в зв'язку з неможливістю розносу електродів в схемі вимірювання на великі відстані, як цього вимагає існуюча методика (ЗД, де Д - велика діагональ ЗП).

У **другому розділі** розглянуто існуючу математичну модель ЗП ПС.

Проаналізовано недоліки існуючих рекомендацій по реконструкції ЗП і запропонована їх модернізація. Наведено методи вимірювання опору простих і складних ЗП, що застосовуються в Україні.

Отримано аналітичні вирази для розрахунку електричного поля і опору розтікання традиційно елементарних (горизонтальний, кільцевий) електродів ЗП, розташованих на різних рівнях по глибині в однорідному і двошаровому ґрунті. Розрахунок дворівневого заземлювача зводиться до вирішення системи двох рівнянь, написаних для заземлювачів першого і другого рівнів

$$\left. \begin{aligned} U_1 = \varphi_{M1} &= \alpha_{11}I_1 + \alpha_{12}I_2 \\ U_2 = \varphi_{M2} &= \alpha_{21}I_1 + \alpha_{22}I_2 \end{aligned} \right\}$$

Якщо $U_1=U_2=U$, тоді опір розтіканню заземлювача визначається за виразом

$$R_{\sim} = \frac{U}{I_1 + I_2} = \frac{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2}{\alpha_{11} + \alpha_{22} - 2\alpha_{12}}$$

де α_{11} і α_{22} власні, а $\alpha_{12} = \alpha_{21}$ взаємні опори заземлювачів.

Аналогічно розроблена математична модель складного дворівневого ЗП ПС, яка реалізована у вигляді програми «ВЕКТОР» в пакеті Mathcad для розрахунку електричних характеристик ЗП. Точність розрахунку оцінювалась шляхом порівняння результатів розрахунків з експериментальними значеннями модельних і натурних заземлювачів у відкритому ґрунті, а також з результатами розрахунків інших авторів.

Третій розділ. Виконано дослідження електричних характеристик дворівневого ЗП ПС як в однорідній, так і в двошаровій структурі ґрунту. Вирішення цього завдання виконувалося методом обчислення потенційних коефіцієнтів на основі векторних операцій.

Обстеження встановило відсутність (повну або часткову) сітки ЗП, покладеної «давно» на глибині 0,7-1,0 м згідно з проектом. Це призводить до виходу електричних характеристик ЗП ПС за межі нормованих значень и до збільшення ризику виникнення аварійних ситуацій. В цьому випадку є два варіанти:

а) відновити сітку ЗП на колишній (проектній) глибині;

б) виконати заміну часткову (або повну) сітки поблизу поверхні ґрунту на території ЗП.

Варіант б) з урахуванням можливого збереження вихідної сітки (або її частини) призводить до дворівневого ЗП, тобто до модернізації вихідного ЗП.

Розроблена програма, що дозволила провести дослідження зміни основних електричних характеристик ЗП (R , U_z , $U_{\text{дот}}$) в залежності від геометричних параметрів ЗП, його розташування в ґрунті і характеристик останнього.

Дослідження дворівневого ЗП виконано на фізичних і математичних моделях в широкому діапазоні змін питомого опору верхнього шару ґрунту ρ_1 , яке приймалося рівним 20 Ом·м, 100 Ом·м, 500 Ом·м і 1000 Ом·м, а нижнього ρ_2 100 Ом·м.

Запропоновано і досліджено два можливих варіанти модернізації існуючого ЗП ПС. Перший варіант передбачає укладання додаткових горизонтальних електродів сітки в землі на глибині $t_2=(0,3...0,35)$ м, а не на глибині $t_1 = 0,7$ м, як це передбачено реконструкцією і показано (пунктир) на рис. 1. Другий варіант передбачає укладання повної сітки на другому (верхньому) рівні, тобто на глибині $t_2=0,3...0,35$ м, як показано на рис. 2.

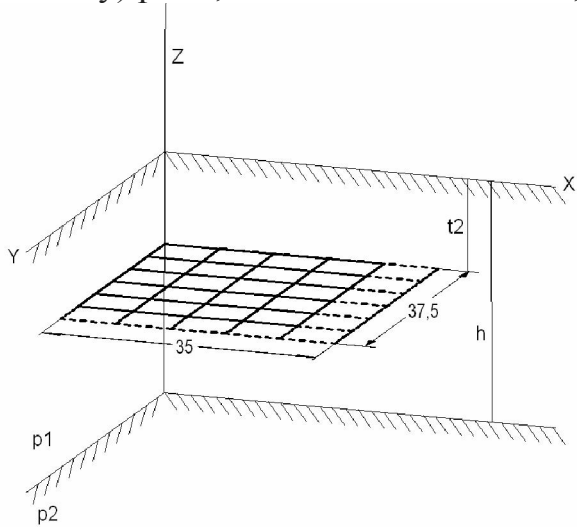


Рисунок 1 – Вид ЗП ПС після застосовуваної реконструкції

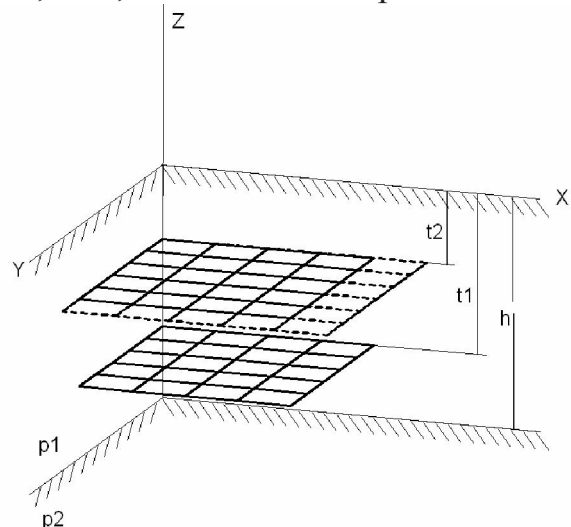


Рисунок 2 – Вид ЗП ПС після модернізації (дворівневий ЗП)

Результати досліджень електричних характеристик ЗП ПС представлені на рис. 3 в першому (крива 2) і другому (крива 1) варіантах модернізації, а також після реконструкції (крива 3).

Після модернізації ЗП ПС залежність $\varphi_M/\varphi_3=f(t)$ розташована вище, тобто знижується напруга дотику. Зменшення глибини t укладання сітки ЗП від $t=0,7$ м до $t=0,3$ м призводить до зниження відносного потенціалу φ_M/φ_3 менш ніж на 0,2%, тобто практично не впливає на параметри електробезпеки. Подальше зменшення глибини t призводить до більш істотного зниження φ_M/φ_3 .

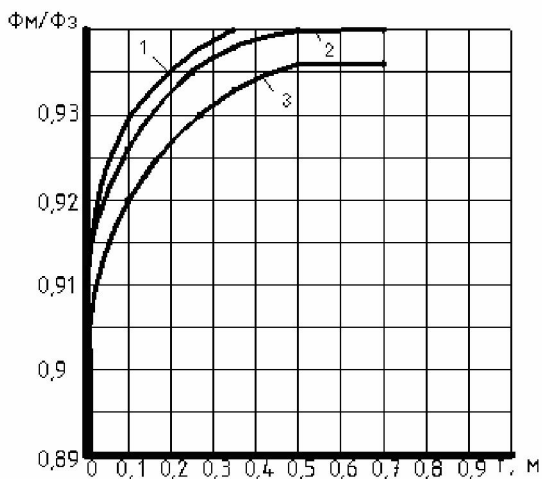


Рисунок 3 – Залежність відносного потенціалу φ_M/φ_3 в центрі кутової чарунки сітки ЗП ПС від глибини t його закладення

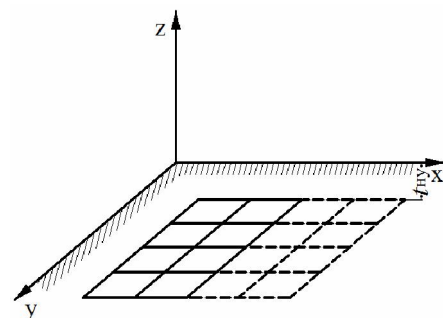


Рисунок 4 – Існуюча сітка ЗП ПС в результаті руйнування її частини корозією (пунктир)

Аналіз результатів виконаних досліджень показав, що з погіршенням стану вихідного ЗП внаслідок корозії або помилок проектувальників і

монтажників застосування дворівневого заземлювача на ПС дозволяє не тільки відновити його електричні характеристики, але і поліпшити їх. Встановлено, що глибина закладання сітки верхнього рівня повинна бути не менше 0,3 м, так як подальше зменшення глибини призводить до збільшення $U_{\text{дот}}$.

Дослідження ЗП ПС, яке показано на рис. 4, виконано для різних випадків: зволоження, просихання, промерзання верхнього шару землі при варіюванні товщини h цього шару.

На рис. 5 наведено залежності $\varphi_i/\varphi_3=f(x)$ на поверхні землі в напрямку x від центру сітки по діагоналі для трьох випадків: 1 – перед реконструкцією; 2 – після реконструкції; 3 – після модернізації. Зміна відносного потенціалу φ_i/φ_3 в центрі кутової чарунки ЗП в залежності від товщини h верхнього шару землі показана на рис. 6. Тут криві 1а і 2а відповідають зволоженню землі, а криві 1б і 2б її просиханню або промерзання. При цьому криві 1 відповідають модернізації ЗП, а криві 2 відповідають ЗП після обстеження. Зволоження верхнього шару землі призводить до зниження напруги дотику $U_{\text{дот}}$ зі збільшенням товщини шару до глибини рівній глибині укладання $h=t_{\text{вр}}$ сітки верхнього рівня дворівневого ЗП, або $h=t_{\text{нр}}$ в разі ЗП перед модернізацією. Подальше збільшення товщини шару в обох випадках призводить до незначного зниження $U_{\text{дот}}$. У разі висихання (промерзання) верхнього шару землі $U_{\text{дот}}$ збільшується з ростом товщини h шару. При перевищенні товщини шару ґрунту понад глибини укладання сітки, збільшення $U_{\text{дот}}$ істотно сповільнюється.

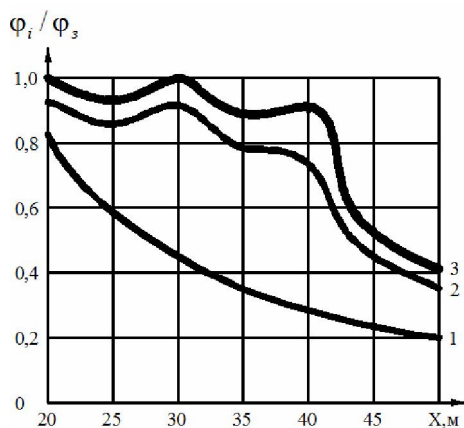


Рисунок 5 – Зміна відносного потенціалу φ_i/φ_3 на поверхні землі для ЗП у вигляді сітки при товщині шару зволоження $h=0,4$ м

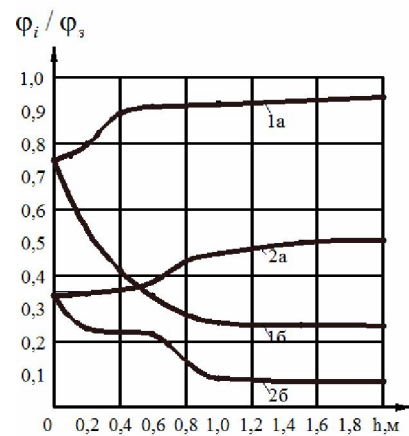


Рисунок 6 – Зміна відносного потенціалу φ_i/φ_3 в центрі кутової чарунки ЗП в залежності від товщини h верхнього шару землі

Встановлено, що застосування сітки верхнього рівня дворівневого ЗП в порівнянні з існуючим ЗП для всіх випадків дає найменше значення опору ЗП, а також найбільшу величину відносного потенціалу в будь-якій точці на поверхні землі, в тому числі і в кутовій чарунці.

Виконано дослідження квадратного заземлювача (сторона $a=2,5$ м діаметр електрода $d=18$ мм), закладеного в двошаровому ґрунті з товщиною верхнього шару $h=1$ м, при варіюванні глибини t його закладення в межах від

0,1 м до 1,5 м. Отримано розподіл електричного потенціалу по поверхні землі в перпендикулярному до боку квадрата напрямку, що проходить через його центр за межі протилежної сторони. Результати дослідження при $t=0,7$ м представлені на рис. 7 (пунктирна лінія) у вигляді залежностей $\varphi/\varphi_3=f(x)$.

По поверхні землі над квадратним заземлювачем і за його межами величина φ/φ_3 знижується з ростом відношення ρ_1/ρ_2 тим більше, чим більше цей показник при будь-якому розмірі квадратного заземлювача. Величина φ/φ_3 над центром квадратного заземлювача буде вищою, ніж над електродом при $\rho_1/\rho_2 \leq 1$, а при зростанні $\rho_1/\rho_2 > 1$ величина φ/φ_3 стає менше і знижується з ростом ρ_1/ρ_2 . Збільшення розміру сторони квадрата до деякої величини a призводить до аналогічних результатів, після чого величина φ/φ_3 на поверхні землі в точці над центром квадратного заземлювача при всіх значеннях відношення ρ_1/ρ_2 менше, ніж над електродом.

На рис. 8 представлені залежності $\varphi/\varphi_3=f(t/a)$ на поверхні землі в точці над центром квадрата (суцільна лінія) і над електродом (пунктирна лінія) в точці, розташованій посередині боку квадрата в ґрунтах з різним питомим опором верхнього шару землі ρ_1 .

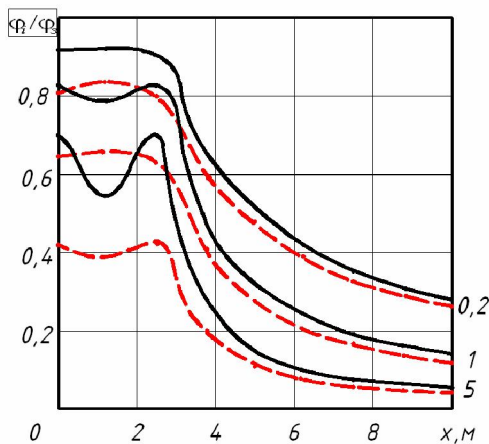


Рисунок 7 – Залежності $\varphi/\varphi_3=f(x)$ для квадратного заземлювача

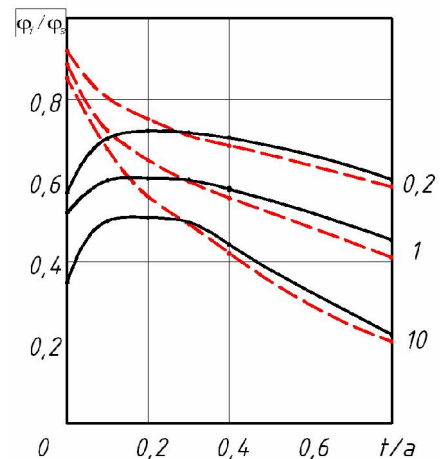


Рисунок 8 – Залежності $\varphi/\varphi_3=f(t/a)$ для квадратного заземлювача ($a=5$ м)

Величина φ/φ_3 на поверхні землі в точці над центром квадратного заземлювача при збільшенні t/a від 0,1 до 0,3 зростає до максимального значення, а при подальшому збільшенні t/a , знижується. Чим вище питомий опір ґрунту ρ_1 , тим нижче зміщується крива залежності $\varphi/\varphi_3=f(t/a)$, при цьому швидкість зниження φ/φ_3 збільшується з ростом ρ_1 .

Крива залежності $\varphi/\varphi_3=f(t/a)$, отримана для точки на поверхні землі над електродом квадратного заземлювача, перетинається з кривою залежності $\varphi/\varphi_3=f(t/a)$ для точки на поверхні землі над його центром при значенні $t/a=0,3$. Це спостерігається при будь-якому значенні як питомого опору ґрунту ρ_1 в розглянутому діапазоні, так і розміру a .

Таким чином, близький до рівномірного розподіл електричних потенціалів по поверхні землі спостерігається при глибині закладення квадратного заземлювача, яка визначається за виразом $t=0,3a$.

Результати дослідження залежності $\phi/\phi_3=f(a)$ в тих же точках наведені на рис. 9, при цьому глибина закладення квадратного заземлювача $t = 0,5$ м, крива 1 відповідає відношенню $(\rho_1/\rho_2)=0,2$, крива 2 - $(\rho_1/\rho_2)=1$, крива 3 - $(\rho_1/\rho_2)=10$.

Крива залежності $\phi/\phi_3=f(a)$ для точки на поверхні землі над центром квадратного заземлювача з ростом a спочатку зростає до максимального значення відносного потенціалу ϕ/ϕ_3 , а потім починає спадати, причому швидкість спаду зростає з ростом відношення ρ_1/ρ_2 . Криві залежності $\phi/\phi_3=f(a)$ перетинаються в точці, яка визначає допустимий максимальний розмір a при якому, величина ϕ/ϕ_3 над електродом і над центром квадратного заземлювача рівні. Результати дослідження показали, що нерівномірність у розподілі електричних потенціалів по поверхні землі для квадратного заземлювача зі стороною $a = 5$ м не перевищує 30-35% при $\rho_1=1000$ Ом·м і знижується з його зменшенням. При $a=2$ м ця нерівномірність на порядок нижче і не перевищує 2-3%, тобто на поверхні землі над заземлювачем в межах його кордонів виявляється практично повне вирівнювання відносного потенціалу.

Досліджено квадратний дворівневий заземлювач, тобто на нижньому рівні (глибина залягання $t_{\text{нр}}=0,7$ м) розташований квадратний заземлювач аналогічний наведеному вище, а на верхньому рівні (глибина залягання $t_{\text{вр}}=0,35$ м) співвісно розташовувався квадратний заземлювач таких же геометричних розмірів. Результати дослідження у вигляді графіків залежності $\phi/\phi_3=f(x)$ показані на рис. 7 (суцільна лінія). Відмінність одержаних результатів полягає в тому, що криві залежності $\phi/\phi_3=f(x)$ розташовуються вище, ніж в разі однорівневого квадратного заземлювача, тобто характеристики електробезпеки заземлювача поліпшуються.

Досліджено також складний заземлювач у вигляді сітки, що складається з чарунок розміром 5×5 м², $2,5 \times 2,5$ м² або 1×1 м², при цьому зайнята ними площа в усіх випадках однакова. Для кутової чарунки такого заземлювача на рис. 10 показані залежності $\phi/\phi_3=f(t/a)$ над внутрішнім електродом чарунки (пунктирна лінія) і над її центром (суцільна лінія). Отримані залежності $\phi/\phi_3=f(t/a)$ якісно аналогічні наведеним вище для квадратного заземлювача.

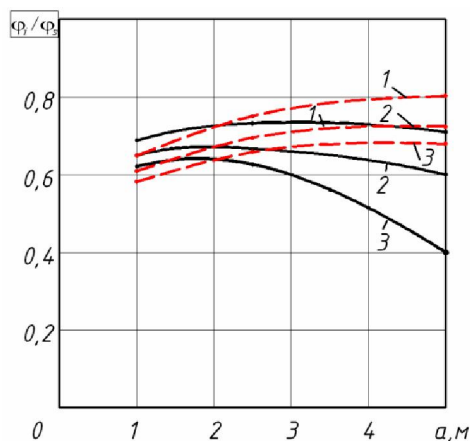


Рисунок 9 – Залежність $\phi/\phi_3=f(a)$ для квадратного заземлювача

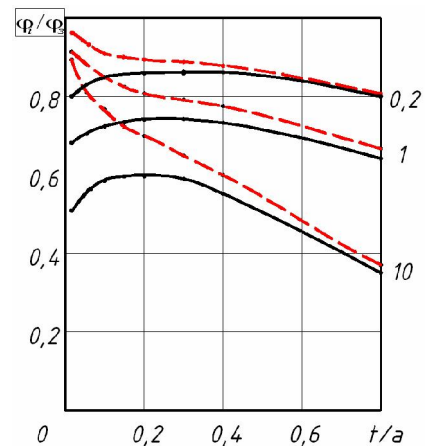


Рисунок 10 – Залежність $\phi/\phi_3=f(t/a)$ для заземлювача у вигляді сітки ($a=5$ м)

Залежність $\varphi/\varphi_3=f(t/a)$ для точки на поверхні землі над електродом кутової чарунки заземлювача розташовується вище, ніж над її центром. При великих значеннях t/a ці залежності практично збігаються, а при зменшенні вони повільно розходяться аж до значення $t/a=0,2$, після чого розбіжність істотно зростає і тим більше, чим більше розмір чарунки. Однак, при зменшенні відносини t/a до значення рівного 0,2, розбіжність в відносних потенціалах у всіх випадках не перевищує 2-10%, при цьому більший відсоток відноситься до великих розмірів чарунки і великих значень ρ_1 .

Встановлено, що максимально допустимий розмір a чарунки сітки більше, ніж для квадратного заземлювача при однаковому вирівнюванні електричних потенціалів по поверхні землі, і може визначатися по співвідношенню $a=t/0,2$. Таким чином, максимально допустимий розмір чарунки складного заземлювача залежить як від глибини його залягання, так і від числа чарунок при незмінній займаній ним площі.

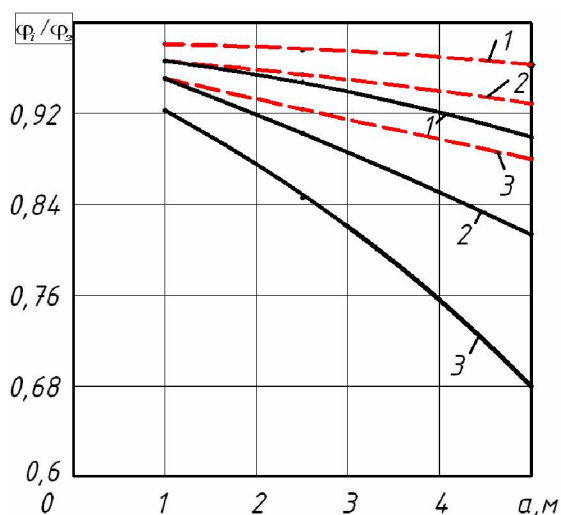


Рисунок 11 – Залежність $\varphi/\varphi_3=f(a)$ для дворівневої заземлювальної сітки
1 – $(\rho_1/\rho_2)=0,2$; 2 – $(\rho_1/\rho_2)=1$; 3 – $(\rho_1/\rho_2)=10$

Дослідження складного дворівневого заземлювача. На нижньому рівні, на глибині $t_1=0,7$ м, і на верхньому рівні, на глибині $t_2=0,35$ м, закладені однакові сітки з такими ж розмірами і кількістю чарунок, як і раніше розглянута, обидві сітки електрично пов'язані між собою. На рис. 11 представлені залежності $\varphi/\varphi_3=f(a)$ над внутрішнім електродом (пунктирна лінія) і над центром (суцільна лінія) кутової чарунки.

Наведені залежності показують, що зі зменшенням розміру a чарунки відносний потенціал на поверхні землі зростає як над електродом, так і над центром кутової чарунки. Крім того, криві залежності зближуються, тобто поліпшується вирівнювання електричних потенціалів на поверхні землі і зменшується напруга дотику.

Залежності $\varphi/\varphi_3=f(a)$ для дворівневого заземлювача (див. рис. 11) розташовані вище, ніж аналогічні залежності для заземлювача тільки нижнього рівня (див. рис. 9).

Встановлено, що неоднорідність ґрунту не впливає на отримані результати, які дозволяють обґрунтовано оптимізувати витрати металу і обсяг земляних робіт при модернізації ЗП, а також істотно підвищити надійність виконання вимог електробезпеки.

У **четвертому розділі** запропонований удосконалений метод вимірювання опору ЗП ПС без відшукання точки нульового потенціалу.

Для трьох (електрично не зв'язаних) ЗП, розташованих певним чином на території (рис. 12,а), початково для вимірювань доступні три точки: 1, 2, 3. Еквівалентна схема заміщення представлена на рис. 12,б.

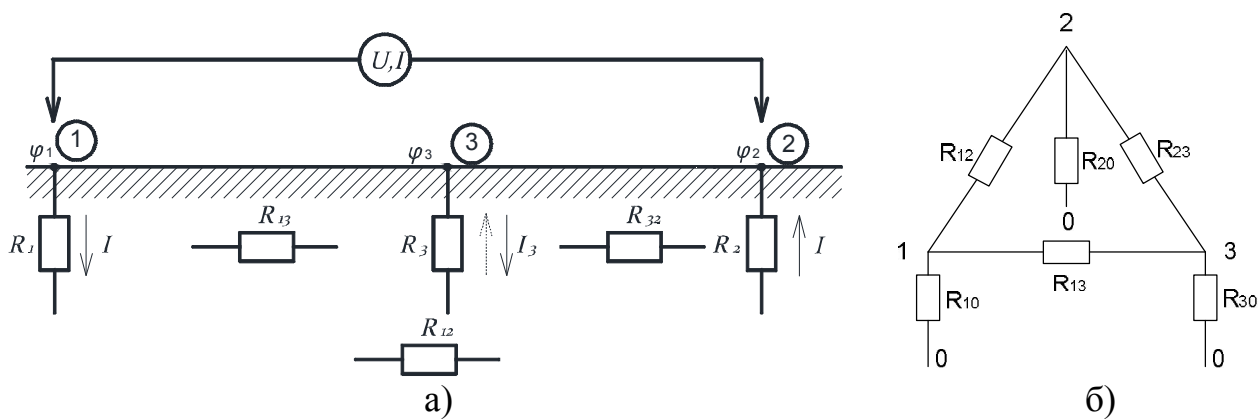


Рисунок 12 – Трьохелементна система заземлювачів, дослід А

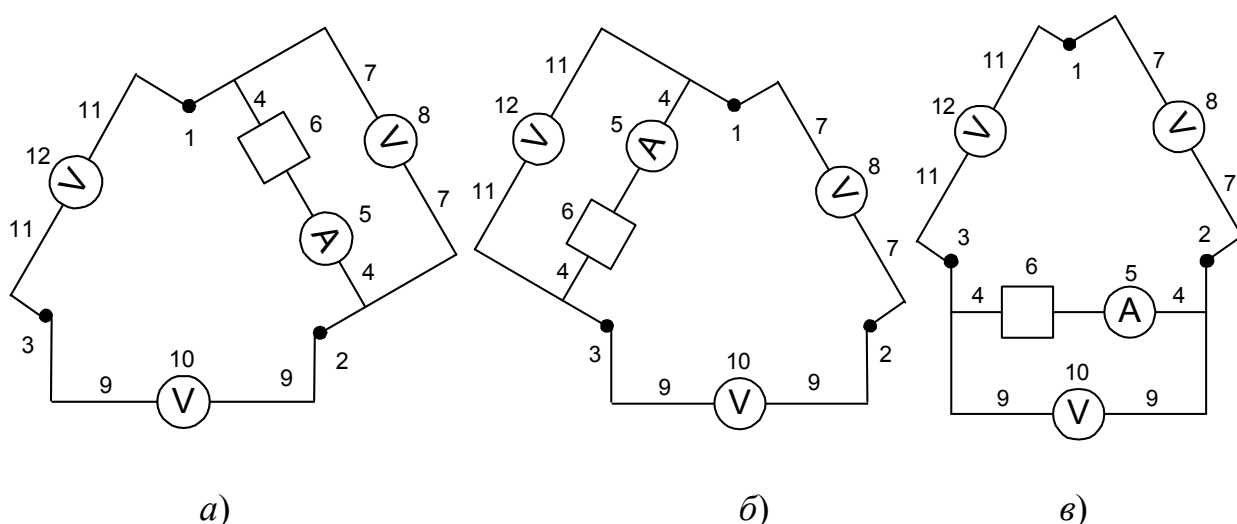


Рисунок 13 – Підключення джерела і вимірювані напруги і струм в групі заземлювачів по рис. 12

Деяке джерело (U , наприклад, трансформатор) підключаємо по черзі до двох точок системи і вимірюємо прикладену напругу і струм, що протікає в ланцюзі, а також напруги третьої точки щодо двох, підключених до джерела. Окремі досліди (А, Б і В) показані на рис. 13 і позначені як a , b і v відповідно.

Під час експерименту А активні електроди 1 і 2, обтічні загальним струмом I від джерела, створюють потенційне поле для пасивного електрода 3, яке визначає потенціал останнього

$$\varphi_3 = R_{13}I - R_{32}I = I(R_{13} - R_{32}) = IR_{3E}. \quad (1)$$

З'являються напруги U_{13} і U_{32} . Наприклад, при $U_{32} < U_{13}$ і вплив електрода 2 на формування φ_3 більше в порівнянні з електродом 1. Під дією φ_3 в електроді 3 протікає струм $I_3 = \varphi_3 / R_3$. У разі $U_{32} < U_{13}$ струм I_3 збігається за напрямком зі струмом в опорі R_2 ; напрямом струму I в електроді 1 прийнято позитивним, а в електроді 2 - негативним.

Появу струму I_3 слід врахувати для активних електродів 1 і 2 через відповідні взаємні опори в рівняннях Максвелла. З урахуванням виразу (1) для активного електрода 1 з'являється додатак

$$-I_3 R_{13} = -I \frac{(R_{13} - R_{32})}{R_3} R_{13},$$

і потенціал для електрода 1 визначається як

$$\varphi_1 = R_1 I - R_{12} I - I \frac{(R_{13} - R_{32})}{R_3} R_{13} = I \left[R_1 - R_{12} - \frac{(R_{13} - R_{32}) R_{13}}{R_3} \right] = I R_{1E}. \quad (2)$$

Аналогічно отримуємо потенціал і для активного електрода 2

$$\varphi_2 = I \left[R_2 - R_{12} + \frac{(R_{13} - R_{32}) R_{32}}{R_3} \right] = I R_{2E}. \quad (3)$$

Потенціали φ_1 , φ_2 і φ_3 , відповідно до рівнянь (1), (2) і (3), виражені через струм джерела I і величини резисторів (власні R_1 , R_2 і R_3 і взаємні $R_{12}=R_{21}$, $R_{13}=R_{31}$ і $R_{23}=R_{32}$).

Вимірювання напруг між пасивним 3 і активними 1 і 2 електродами відповідно визначає

$$\begin{aligned} U_{13} &= \varphi_1 - \varphi_3 \\ U_{32} &= \varphi_3 - \varphi_2. \end{aligned}$$

Отже,

$$U_{13} = I(R_{1E} - R_{3E}); \quad \frac{U_{13}}{I} = R_{1E} - R_{3E}; \quad (4)$$

$$U_{32} = I(R_{3E} - R_{2E}); \quad \frac{U_{32}}{I} = R_{3E} - R_{2E}. \quad (5)$$

Введення джерела (U , I) в точки 1 і 2 рис. 13,а (дослід А) і вимір напруг U_{13A} і U_{32A} при струмі I_A , дає можливість розрахувати входні опори:

$$\frac{U_{13A}}{I_A} = R_{(1-3)A}; \quad \frac{U_{32A}}{I_A} = R_{(3-2)A}.$$

Ці опори є лівими частинами двох рівнянь зв'язку з шістьма резисторами. Згідно з рівнянь (1), (2) і (4) отримуємо

$$R_{(1-3)A} = \left[(R_1 - R_{12}) - \frac{(R_{13} - R_{32}) R_{13}}{R_3} \right] - (R_{13} - R_{32}), \quad (6)$$

а з рівнянь (1), (3) і (5)

$$R_{(3-2)A} = \left[(R_2 - R_{12}) + \frac{(R_{13} - R_{32}) R_{32}}{R_3} \right] + (R_{32} - R_{13}). \quad (7)$$

Дослід Б, введення джерела (U , I) в точки 1 і 3 рис. 13,б і вимір напруг U_{32B} і U_{12B} при струмі I_B , дає аналогічно наступні два рівняння.

Під час експерименту В, введення джерела (U , I) в точки 3 і 2 рис. 13,в, вимір напруг U_{13B} і U_{12B} при струмі I_B , маємо аналогічно ще два рівняння.

В результаті отримуємо систему (8) з шістьма невідомими (R_1 , R_2 , R_3 , R_{12} , R_{13} , R_{23}) при відомих за вимірюваннями значеннях опорів $R_{(1-3)A}$, $R_{(3-2)A}$, $R_{(1-2)B}$, $R_{(3-2)B}$, $R_{(1-2)B}$, $R_{(1-3)B}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{(1-3)A} = \left[(R_1 - R_{12}) - \frac{(R_{13} - R_{32})R_{13}}{R_3} \right] - (R_{13} - R_{32}) \\ R_{(3-2)A} = \left[(R_2 - R_{12}) + \frac{(R_{13} - R_{32})R_{32}}{R_3} \right] + (R_{32} - R_{13}) \\ R_{(1-2)B} = \left[(R_1 - R_{13}) - \frac{(R_{23} - R_{12})R_{12}}{R_2} \right] - (R_{23} - R_{12}) \\ R_{(3-2)B} = \left[(R_3 - R_{13}) + \frac{(R_{23} - R_{12})R_{23}}{R_2} \right] - (R_{23} - R_{12}) \\ R_{(1-2)B} = \left[(R_2 - R_{32}) + \frac{(R_{13} - R_{12})R_{12}}{R_1} \right] + (R_{12} - R_{13}) \\ R_{(1-3)B} = \left[(R_3 - R_{32}) - \frac{(R_{13} - R_{12})R_{13}}{R_1} \right] + (R_{12} - R_{13}) \end{array} \right. \quad (8)$$

Рішення отриманої системи (8) виконано за допомогою розробленої в пакеті Mathcad програми «РЕЗУЛЬТАТ».

На фізичних моделях в електролітичній ванні були проведені дослідження з трьома заземлювачами без їх зв'язку з корпусом ванни. В даному випадку джерело вводиться між заземлювачами 1 і 2, як показано на рис. 14. При цьому вимірювався струм I_{12} , що протікає в ланцюзі, і напруга між заземлювачами 1 і 2 (U_{12}), заземлювачами 1 і 3 (U_{13}), заземлювачами 2 і 3 (U_{23}), а також напруга між кожним заземлювачем (1, 2 або 3) і стінкою (корпусом) ванни, тобто U_{10} , U_{20} і U_{30} , як показано на рис. 14 для заземлювача 3.

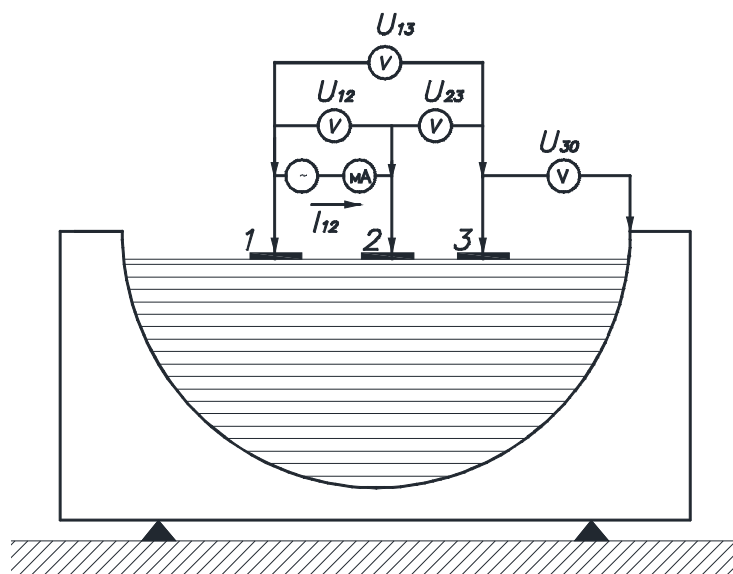


Рисунок 14 – Схема вимірювань для трьох заземлювачів без їх зв'язку з корпусом ванни

Аналогічні вимірювання були виконані при введенні джерела між заземлювачами 2 і 3 рис. 14, а також між заземлювачами 1 і 3 рис. 14.

За результатами вимірювань напруг U_{13} і U_{23} і струму I_{12} при введенні джерела між заземлювачами 1 і 2 (дослід А) отримані вхідні опори $R_{(1-3)A} = U_{13} / I_{12}$ та $R_{(3-2)A} = U_{23} / I_{12}$. Аналогічні результати отримані при введенні джерела між заземлювачами 2 і 3 (дослід Б), а також заземлювачами 1 і 3 (дослід В).

Підставляючи отримані значення вхідних опорів в ліві частини рівнянь системи (8) і вирішуючи її розробленою програмою в пакеті Mathcad, отримуємо шукані опори схеми заміщення.

Розроблений метод вимірювання опору ЗП апробований на фізичних моделях в електролітичній ванні. Показано, що прийнята розрахункова модель схеми для вимірювання опору ЗП добре узгоджується з експериментом - похибка не більше 10%, що відповідає похибці, обумовленій вимірювальними приладами. Це дає можливість не тільки збільшити точність вимірювання основних параметрів ЗП, але і проводити вимірювання опору ЗП в тих випадках, в яких існуючими методами виконати це не представлялося можливим.

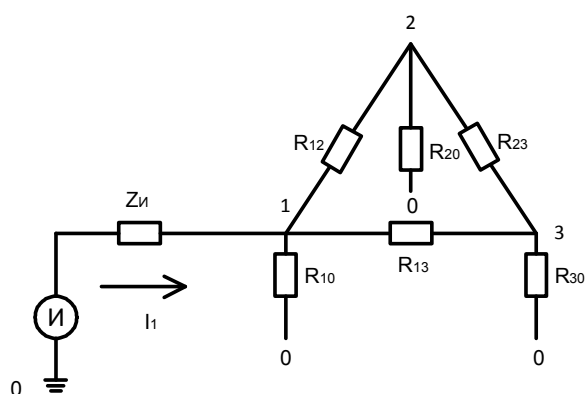


Рисунок 15 – Використання елемента R_{10} як заземлювача для зовнішнього джерела $I(E, Z_i)$

створює на цьому заземлювачі потенціал ϕ_1 . Взаємні опори разом з власними опорами визначають появу потенціалів в точках 2 (ϕ_2) і 3 (ϕ_3) рис. 15.

У розділі показана необхідність таких розрахунків в умовах щільної забудови території, коли є три заземлювача, а реально передбачуваний взаємовплив робить проблематичним коректне відшукування точки нульового потенціалу. Встановлено, що навіть використання такої точки для одного з заземлювачів за традиційною методикою не дає уявлення про взаємовплив заземлювачів, тоді як запропонований метод знімає це обмеження.

Запропоновано метод визначення на території ЗП розташування вимірювального електрода з близьким до нуля потенціалом і оцінки опору заземлення такого ЗП, який дозволяє оцінити потенціал в розрахунковому режимі роботи ЗП ПС окремого заземлювача на ПС за умови виключення гальванічного зв'язку цього заземлювача з контуром ЗП.

Представлені результати дослідження згасаючих функцій ЗП ПС на фізичних моделях, які показали, що додавання сітки другого (верхнього) рівня в разі модернізації ЗП призводить до зниження напруги дотику на території ПС у порівнянні з випадком реконструкції існуючої сітки нижнього рівня (рекомендованої). Запропонована модернізація ЗП ПС замість існуючої реконструкції.

На підставі досліджень, виконаних автором в рамках договору з АК «Харківобленерго» при розробці рекомендацій щодо модернізації ЗП ПС «Павлівська» 110/10/6 кВ, дана оцінка економічної ефективності шляхом

П'ятий розділ містить основні положення щодо використання отриманих в дисертації результатів. Запропоновано практичне застосування нового методу вимірювання опору розтікання складного ЗП, який полягає в тому, що за результатами вимірювань виконується розрахунок розподілу потенціалів в системі взаємовпливаючих ЗП (рис. 15) при КЗ. Точка 1 (або 2, 3) рис. 15 використовується як точка заземлювача і підключення джерела $I(E, Z_i)$

укрупненого розрахунку вартості виконання робіт при реалізації розроблених рекомендацій.

Показано, що запропонована модернізація ЗП ПС дозволяє отримати не тільки технічний, але і обґрунтований економічний ефект, а також вирішує проблему відновлення нормованих параметрів ЗП значно дешевше, ніж реконструкція. Модернізація фактично подвоює термін служби ЗП підстанцій.

У **додатках** наведені: розрахунок кільцевих ЗП, обґрунтування коректності розрахунків, особливості та обмеження вимірювань опору ЗП, фізичне моделювання ЗП, список публікацій, акти впровадження.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлена та вирішена науково-технічна задача удосконалення методів модернізації і контролю параметрів заземлювального пристрою міських підстанцій, що має важливе значення для надійності функціонування електричних систем и мереж. В рамках даного напрямку отримані наступні результати:

1. Проведено аналіз результатів обстеження сучасного стану існуючих ЗП ПС, на основі якого зроблено висновок про те, що виявлені серйозні порушення, які обумовлені або наявністю відступів від проекту при спорудженні ЗП і недотриманням технології монтажу ЗП, або порушенням цілісності елементів в процесі проведених на ПС реконструкцій (розширення ВРУ, монтаж нового обладнання і т.п.) або в процесі корозії, котрі призводять до відтоку параметрів від норми і підкреслює актуальність завдання модернізації ЗП ПС шляхом створення дворівневої його конструкції.

2. Розроблено та вдосконалено математичні моделі для дослідження електричних характеристик ЗП у вигляді простих дворівневих конструкцій з горизонтальних або кільцевих електродів. В результаті дослідження електричного поля виявлено, що потенціал на поверхні землі над центром квадратного (кільцевого) заземлювача може бути вище, ніж над електродом. Це дозволило вдосконалити конструкції складних ЗП ПС.

3. Аналіз методів розрахунку електричних характеристик ЗП ПС показав необхідність вдосконалення існуючої математичної моделі ЗП шляхом створення математичної моделі дворівневого ЗП ПС. У зв'язку з цим розроблено метод розрахунку електричних характеристик дворівневого ЗП ПС, що дозволяє розраховувати нормовані параметри ЗП ПС.

4. Виконано дослідження впливу глибини залягання сітки верхнього рівня ЗП ПС на його електричні характеристики для вибору оптимального варіанту конструкції.

5. Проведено дослідження впливу товщини шару зволоження, просихання або промерзання ґрунту і конструкції ЗП ПС на його електричні характеристики на основі математичної моделі дворівневого ЗП для вибору найбільш ефективної конструкції. Дослідження показали, що модернізація ЗП у вигляді дворівневої його конструкції призводить не тільки до відновлення нормованих параметрів ЗП: опору ЗП ПС, напруги на ЗП, але в ряді випадків призводить до зменшення напруги дотику проти норми.

6. Виконано теоретичне обґрунтування методу і розроблені способи вимірювання опору ЗП ПС, в тому числі і в умовах щільної забудови території. Метод вимірювання опору ЗП ПС заснований на використанні трьохелектродної установки при будь-якому характері неоднорідності ґрунту, будь-яких розмірах і конфігурації ЗП, довільному розміщенні вимірювальних електродів і складається з двох етапів: експериментального і розрахункового.

Запропонований метод дозволяє оцінити власні та взаємні опори заземлювачів всіх електродів в трьохелектродній установці вимірювання опору ЗП. При цьому розносити вимірювальні електроди на великі відстані в вимірювальній схемі трьохелектродної установки немає необхідності. Крім того, в запропонованому методі немає обмежень в розташуванні вимірювальних електродів в зв'язку з місцевими умовами навіть в разі щільної забудови території за межами досліджуваного заземлювача. Відпадає необхідність як в знаходженні точки нульового потенціалу на місці вимірювань для потенційного електрода, так і в розрахунку кордону нульовий похибки, що представляють собою дуже трудомісткий процес.

7. Виконано експериментальні дослідження дворівневого ЗП ПС по вимірюванню його опору і потенціалів по поверхні землі методом фізичного моделювання в електролітичній ванні на фізичних моделях і в реальних умовах. Отримані результати показали хороший збіг з результатами розрахунків.

8. Розроблені на основі досліджень з використанням алгоритму розрахунку електричних характеристик дворівневого ЗП ПС рекомендації впроваджені в АК «Харківобленерго». Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес на кафедрі передачі електричної енергії НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Нижегородский И.В. Электрические характеристики двухуровневого эквипотенциального заземлителя из одиночных горизонтальных электродов / В.И. Гуль, В.И. Нижегородский, И.В. Нижегородский // Электротехника і Електромеханіка. – 2006. – № 5. – С. 33-35.

Здобувачем запропоновані формули для розрахунку електричних характеристик дворівневого еквіпотенційного заземлювача з одиночних горизонтальних електродів.

2. Нижегородский И.В. Определение на территории заземляющего устройства месторасположения измерительного электрода с близким к нулю потенциалом и оценка сопротивления заземления такого заземляющего устройства / В.И. Гуль, В.И. Нижегородский, И.В. Нижегородский, А.А. Маковецкий // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. пр. Тем. вип.: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 28. – С. 43-46.

Здобувачем запропонований метод визначення на території заземлювального пристрою розташування вимірювального електрода з близьким до нуля потенціалом та оцінки опору заземлення такого заземлювального пристрою.

3. Нижегородский И.В. Исследование электрического поля в грунте в

окрестностях кольцевого заземлителя / В.И. Нижегородский, И.В. Нижегородский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 3/4 (33). – С. 54-57.

Здобувачем отримані формули і досліджено електричне поле в ґрунті біля кільцевого заземлювача.

4. Нижегородский И.В. Электрические характеристики двухуровневого эквипотенциального заземлителя из одиночных кольцевых электродов / В.И. Нижегородский, И.В. Нижегородский // Электротехника і Електромеханіка. – 2008. – № 4. – С. 44-47.

Здобувачем зроблено вивід формул для розрахунку електричних характеристик дворівневого еквіпотенційного заземлювача з одиночних кільцевих електродів.

5. Nizhevskiy I.V. Die Erarbeitung des neuen Herangehens nach der Versorgung der normierten Parameter die Erdungsanlagen auf den existierenden Unterstationen (Umspannungswerken) / I.V. Nizhevskiy, V.I. Nizhevskiy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2009. – № 4/11 (40). – С. 53-54.

Здобувач обґрунтував переваги дворівневої конструкції ЗП ПС.

6. Нижегородский И.В. Экспериментальное исследование двухуровневого заземляющего устройства подстанции на физических моделях / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 5/6 (41). – С. 61-65.

Здобувачем розроблена методика, проведено експериментальне дослідження дворівневого заземлювального пристрою підстанції на фізичних моделях і виконано аналіз отриманих результатів.

7. Нижегородский И.В. Исследование влияния глубины укладки заземляющей сетки верхнего уровня двухуровневого заземлителя подстанции на распределение потенциалов по поверхности земли / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский, С.Л. Шишигин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 6/6 (42). – С. 41-45.

Здобувачем розроблена методика, виконано дослідження впливу глибини закладки заземлюючої сітки верхнього рівня дворівневого заземлювача підстанції на розподіл потенціалів по поверхні землі і проведено аналіз отриманих результатів.

8. Нижегородский И.В. Исследование влияния конструкции заземляющего устройства подстанции на его сопротивление растеканию / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский, В.Е. Сердюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 4/7 (46). – С. 21-23.

Здобувачем проведено дослідження та виконано аналіз впливу конструкції заземлювального пристрою підстанції на його опір.

9. Нижегородский И.В. Восстановление нормируемых параметров заземляющих устройств на действующих подстанциях // Вестник НТУ «ХПИ». Зб. наук. пр. Тем. вып. : Проблемы удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2010. – № 16. – С. 83-88.

10. Нижегородский И.В. К вопросу измерения с приемлемой погрешностью сопротивления заземления объекта в условиях ограничения разноса электродов

схемы измерения / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский, В.И. Гуль // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2010. – № 5. – С. 62-65.

Здобувач запропонував і обґрунтував ідею вимірювання з прийнятною похибкою опору заземлення об'єкта в умовах обмеження розносу електродів схеми вимірювання.

11. Нижегородский И.В. Расчет потенциалов на каждом из отдельных взаимовлияющих заземляющих устройств / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский, В.И. Гуль // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Зб. наук. пр. Тем. вып.: Энергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2010. – № 1. – С. 141-144.

Здобувач запропонував і обґрунтував метод розрахунку потенціалів на кожному з окремих взаємовпливаючих заземлювальних пристроїв.

12. Нижегородский И.В. Исследование влияния промерзания (просыхания) верхнего слоя земли на сопротивление заземляющего устройства подстанции // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Зб. наук. пр. Тем. вып.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2011. – № 60. – С. 135-140.

13. Нижегородский И.В. К вопросу расчета собственных и взаимных сопротивлений трех взаимовлияющих заземлителей / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Зб. наук. пр. Тем. вып.: Энергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2012. – № 23. – С. 124-134.

Здобувач запропонував і досліджував методи розрахунку власних і взаємних опорів трьох взаємовпливаючих заземлювачів.

14. Нижегородский И.В. Исследование распределения потенциалов на поверхности грунта у вьездов (входов) и углов заземляющего контура подстанции / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский, А.А. Крупенко // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Зб. наук. пр. Серия: Энергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2013. – № 59 (1032). – С. 112-116.

Здобувачем проведено дослідження розподілу потенціалів на поверхні ґрунту біля в'їздів (входів) і кутів заземлюючого контуру підстанції.

15. Нижегородский И.В. Исследование влияния увлажнения, просыхания или промерзания верхнего слоя земли на электрические характеристики заземляющего устройства / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2014. – № 1. – С. 62-65.

Здобувачем проведено дослідження та виконано аналіз впливу зволоження, просихання або промерзання верхнього шару землі на електричні характеристики заземлювального пристрою.

16. Нижегородский И.В. Исследование выравнивания электрических потенциалов по поверхности земли на занятой заземлителем территории / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский, С.Л. Шишигин // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2014. – № 4. – С. 71-77.

Здобувачем проведено дослідження вирівнювання електричних потенціалів по поверхні землі на зайнятій заземлювачем території і виконано аналіз отриманих результатів.

17. Нижегородский И.В. Методика измерения сопротивления заземляющего устройства / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский // Электротехника і Електромеханіка. – 2016. – № 3. – С. 50-57.

Здобувач теоретично обґрунтував метод вимірювання опору заземлювального пристрою.

18. Нижегородский И.В. Экспериментальное обоснование метода измерения сопротивления заземляющего устройства / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский, В.Е. Бондаренко // Электротехника і Електромеханіка. – 2016. – № 6. – С. 60-64.

Здобувач експериментально обґрунтував метод вимірювання опору заземлювального пристрою.

19. Пат. на корисну модель № 18292 Україна, МПК⁷ Н02В 1/00. Пристрій заземлення / Гуль В.І., Ніжевський В.І., Ніжевський І.В.; заявник та патентовласник Ніжевський В.І. – № u200603019; заявл. 21.03.2006; опубл. 15.11.2006, бюл. № 11. – 4 с.

Здобувачем запропонована конструкція дворівневого заземлювального пристрою і принцип відновлення його нормованих параметрів.

20. Пат. на корисну модель № 19760 Україна, МПК⁷ G01R 27/20. Спосіб вимірювання опору розтіканню окремих взаємозв'язаних заземлювачів / Гуль В.І., Ніжевський В.І., Ніжевський І.В., Ганус О.І.; заявник та патентовласник Ніжевський В.І. – № u200608963; заявл. 11.08.2006; опубл. 15.12.2006, бюл. № 12. – 8 с.

Здобувачем запропонований спосіб вимірювання опору окремих взаємопов'язаних заземлювачів.

21. Пат. на корисну модель № 58994 Україна МПК⁷ G01R 27/20. Спосіб вимірювання опору розтіканню окремих взаємозв'язаних заземлювачів / Гуль В.І., Ніжевський В.І., Ніжевський І.В.; заявник та патентовласник Ніжевський В.І. - № u201014231; заявл. 29.11.2010; опубл. 26.04.2011, бюл. № 8. – 6 с.

Здобувачем запропонований і обґрунтований спосіб вимірювання опору окремих взаємопов'язаних заземлювачів.

22. Нижегородский И.В. Модернизация заземляющих устройств подстанций // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХІХ міжнародної науково-практичної конференції. Ч.ІІ (01-03 червня 2011 р., Харків) / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків, НТУ «ХПШ». – С. 217.

23. Нижегородский И.В. Математическое моделирование двухуровневой конструкции заземляющих устройств подстанций / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХІХ міжнародної науково-практичної конференції. Ч.ІІ (01-03 червня 2011 р., Харків) / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків, НТУ «ХПШ». – С. 218.

Здобувачем запропоновано і обґрунтовано математичну модель дворівневого заземлювального пристрою.

24. Нижегородский И.В. Многоуровневый заземлитель в виде системы кольцевых электродов с изменяющимся диаметром в неоднородном грунте //

Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції. Ч.ІІ (29-31 травня 2013 р., Харків) / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 222.

25. Нижегородский И.В. Программа расчета электрических параметров многоуровневого заземлителя / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції. Ч.ІІ (29-31 травня 2013 р., Харків) / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 223.

Здобувачем розроблена програма розрахунку електричних параметрів багаторівневого заземлювача.

26. Нижегородский И.В. Исследование электрического поля квадратного заземлителя / И.В. Нижегородский // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Наукове видання. Тези доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ (21-23 травня 2014 р., Харків) / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 237.

27. Нижегородский И.В. Расчет заземлителей в неоднородной земле / И.В. Нижегородский // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Наукове видання. Тези доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ (21-23 травня 2014 р., Харків) / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 238.

28. Нижегородский И.В. Расчет взаимного сопротивления двух взаимовлияющих заземлителей / И.В. Нижегородский // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Наукове видання. Тези доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ (20-22 травня 2015 р., Харків) / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 173.

29. Нижегородский И.В. Измерение электрических характеристик заземлителей в электролитической ванне / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский, Б. Инояттов, С. Насриддини // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Наукове видання. Тези доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ (20-22 травня 2015 р., Харків) / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 175.

Здобувачем розроблена методика вимірювання електричних параметрів моделей заземлювачів.

30. Нижегородский И.В. Измерение взаимных сопротивлений между тремя взаимовлияющими заземлителями / И.В. Нижегородский // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Наукове видання. Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ (18-20 травня 2016 р., Харків) / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 171.

31. Нижегородский И.В. Снятие градиентных кривых и измерение электрических потенциалов заземлителей / И.В. Нижегородский, В.И. Нижегородский, Е.В. Мирошниченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Наукове видання. Тези доповідей XXIV міжнародної науково-

практичної конференції, Ч.ІІ (18-20 травня 2016 р., Харків) / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 172.

Здобувачем розроблений метод вимірювання електричних потенціалів заземлювачів шляхом зняття градієнтних кривих.

АНОТАЦІЇ

Ніжевський І.В. Удосконалення методів модернізації і контролю параметрів заземлювального пристрою міських підстанцій. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2017.

Дисертація присвячена актуальній науково-практичній проблемі пошуку і розробки нових способів для вимірювання опору ЗП, розробки нових конструкцій ЗП, що дозволяють спростити реконструкцію ПС, а також створення і вдосконалення математичних моделей і програм для розрахунку електричних характеристик ЗП довільних конструкцій.

Аналіз результатів обстеження існуючих ЗП ПС, виявив серйозні порушення, які призводять до відхилення параметрів від норми і до необхідності модернізації ЗП ПС. Показано, що модернізація ЗП призводить до відновлення його нормованих параметрів.

Розроблено математичні моделі ЗП простих дворівневих конструкцій з горизонтальних або кільцевих електродів. В результаті дослідження електричного поля виявлено, що потенціал на поверхні землі над центром квадратного заземлювача може бути вище, ніж над електродом.

Удосконалено математичну модель складного дворівневого ЗП ПС, розроблений метод розрахунку його електричних характеристик.

Проведено дослідження впливу глибини закладення сітки верхнього рівня ЗП ПС, товщини шару зволоження, просихання або промерзання ґрунту і конструкції ЗП на його електричні характеристики.

Виконано теоретичне обґрунтування методу та розроблено спосіб вимірювання опору ЗП ПС в умовах щільної забудови території. Метод застосовуємо при будь-якому характері неоднорідності ґрунту, будь-яких розмірах і конфігурації ЗП і довільному розміщенні вимірювальних електродів без відшукання точки нульового потенціалу.

Експериментально досліджені електричні характеристики дворівневого ЗП ПС методом фізичного моделювання в електролітичній ванні. Отримані результати показали хороший збіг з результатами розрахунків.

Ключові слова: міська підстанція, заземлювальний пристрій, модернізація, дворівнева конструкція, електричні характеристики, математична модель, метод вимірювання опору, теоретичне обґрунтування, фізичне моделювання, експериментальні дослідження, нормовані параметри

Нижевский И.В. Усовершенствование методов модернизации и контроля параметров заземляющего устройства городских подстанций. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2017.

Диссертация посвящена актуальной научно-практической проблеме поиска и разработки новых способов для измерения сопротивления ЗУ, разработки новых конструкций ЗУ, позволяющих упростить реконструкцию ПС, а также создания и совершенствования математических моделей и программ для расчета электрических характеристик ЗУ произвольных конструкций.

Проведен анализ результатов обследования современного состояния существующих ЗУ ПС, выявлены серьезные нарушения, которые приводят к уходу параметров от нормы и к необходимости модернизации ЗУ ПС. Показано, что модернизация ЗУ приводит к восстановлению его нормируемых параметров.

Проанализированы основные функции ЗУ подстанций, выделены основные параметры, которые определяют его техническое состояние и работоспособность в период эксплуатации, т.е. готовность выполнить свои функции с заданной надежностью в любой момент. К основным параметрам относятся: сопротивление ЗУ, потенциал на ЗУ и напряжение прикосновения.

Выявлены основные тенденции усовершенствования используемых конструкций ЗУ существующих подстанций.

Проведен анализ существующих требований к периодическому контролю электрических параметров ЗУ, а также способов и методов их измерения и тенденции их развития.

Показано, что в условиях плотной застройки территории в месте расположения подстанции зачастую нельзя выполнить необходимые измерения в связи с невозможностью разноса электродов в схеме измерения на большие расстояния, как этого требует существующая методика (ЗД, где Д – большая диагональ ЗУ).

Разработаны математические модели ЗУ простых двухуровневых конструкций из горизонтальных или кольцевых электродов. В результате исследования электрического поля выявлено, что потенциал на поверхности земли над центром квадратного заземлителя может быть выше, чем над электродом. Это позволило совершенствовать конструкции ЗУ ПС.

Усовершенствована математическая модель сложного ЗУ ПС. Разработан метод расчета электрических характеристик двухуровневого ЗУ, позволяющий рассчитывать его нормируемые параметры.

Проведено исследование влияния глубины заложения сетки верхнего уровня ЗУ ПС, толщины слоя увлажнения, просыхания или промерзания грунта и конструкции ЗУ на его электрические характеристики. Показано, что модернизация ЗУ приводит к восстановлению его нормируемых параметров.

Выполнено теоретическое обоснование метода и разработан способ измерения сопротивления ЗУ ПС, в том числе и в условиях плотной застройки территории. Метод применим при любом характере неоднородности грунта, любых размерах и конфигурации ЗУ, произвольном размещении измерительных электродов без отыскания точки нулевого потенциала и расчета границы нулевой погрешности.

Экспериментально исследованы электрические характеристики двухуровневого ЗУ ПС методом физического моделирования в электролитической ванне. Полученные результаты показали хорошее совпадение с результатами расчетов.

Ключевые слова: городская подстанция, заземляющее устройство, модернизация, двухуровневая конструкция, электрические характеристики, математическая модель, метод измерения сопротивления, теоретическое обоснование, физическое моделирование, экспериментальные исследования, нормируемые параметры

Nizhevsky I. V. Grounding devices in city substations modernization and parameters control methods improvement. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Ph.D., specialty 05.14.02 - power stations, networks and systems. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, 2017.

The dissertation is devoted to the actual and practical problem of search and development of new methods for measurement of resistance of the grounding devices; developments of new designs of the grounding devices allowing to simplify reconstruction of substations; creation and enhancement of mathematical models and programs for calculation of electric characteristics of the grounding devices of any designs.

The analysis of the results of the inspection of existing grounding devices of substations revealed serious violations that lead to deviation of parameters from the norm and to the need for modernization of grounding devices of substations. It is shown that the modernization of grounding devices leads to the restoration of its normalized parameters.

Mathematical models of grounding devices of simple two-level structures of horizontal or ring electrodes are developed. As a result of the investigation of the electric field, it is revealed that the potential on the surface of the ground above the center of the square grounding electrode can be higher than above the electrode.

The mathematical model of complex two-level grounding devices of substations is enhanced. The method of its electrical characteristics calculating is developed.

The influence of the depth of the grid of the upper level of the grounding devices of the substations, the thickness of the humidification layer, the drying or freezing of the soil and the design of the grounding devices on its electrical characteristics was studied.

Based on the theoretical substantiation of the method, a technique for measuring the resistance of grounding devices of substations in conditions of dense

building of the territory is developed. The method is applicable for any kind of ground heterogeneity, any size and configuration of grounding devices and arbitrary placement of measuring electrodes without finding a zero potential point.

Electric characteristics two-level the grounding devices of substations are experimentally researched by method of physical modeling in an electrolytic bathtub. The received results showed good coincidence to results of calculations.

Key words: city substation, grounding device, modernization, two-level design, electrical characteristics, mathematical model, resistance measurement method, theoretical reasons, physical modeling, experimental studies, standardized parameters.

A handwritten signature in black ink, consisting of several stylized, overlapping strokes that form a unique, cursive-like mark.