

В. О. БАЛАЛАЄВ, О. М. ФЕДОСЕЄНКО

РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ПІДВИЩЕНОЇ ПРОВІДНОСТІ РОЗТІКАННЮ ДЛЯ СКЛАДНИХ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Проведено аналіз методів розрахунку електричних характеристик заземлювачів при протіканні аварійних струмів промислової частоти по елементах заземлювальних пристроїв. Запропоновано метод вдосконалення складних заземлювальних пристроїв електроустановок шляхом оптимізації їх конструктивних параметрів. Пропонований метод полягає у встановленні штучного електрода заземлення зі збільшеною площею контакту його поверхні з ґрунтом, що дозволяє підвищити провідність розтіканню заземлювача. Використання зазначених електродів на території проєктованих або діючих електроустановок забезпечує доведення величин нормованих параметрів заземлювальних пристроїв до припустимих значень. Використання методу наведеного потенціалу при розрахунках складних заземлювальних пристроїв вимагає заміщення об'ємних заземлювачів сукупністю лінійних вертикальних електродів. Розрахункова модель обґрунтовується по рівнозначним електричним характеристикам стосовно двошарової моделі електричної структури землі. Еквівалентна модель була отримана шляхом досягнення заданого наближення електричних характеристик сукупності прямолінійних електродів в процесі нарощування їх числа до рівнозначних характеристик еталонної моделі. В свою чергу визначення електричних характеристик еталонної моделі було здійснено безпосередньо за допомогою вирішення крайової задачі для потенціалу, яка задовольняє рівнянню Лапласа, методом кінцевих різниць. Проведено теоретичні дослідження з використанням методу наведених потенціалів і методів розрахунку розгалужених електричних кіл із розподіленими параметрами для розрахунку електричного поля і опору складного нееквіпотенціального заземлювача в землі з двошаровою структурою. Розроблені електроди підвищеної провідності розтіканню змонтовані як експериментальні зразки і беруть участь у формуванні електричних характеристик заземлювального пристрою.

Ключові слова: заземлювальний пристрій, електрична підстанція, вертикальний електрод заземлення, розподіл потенціалу, двошарова модель землі, метод наведеного потенціалу, електропровідність, опір розтіканню.

В. А. БАЛАЛАЄВ, Е. Н. ФЕДОСЕЄНКО

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ ПОВЫШЕННОЙ ПРОВОДИМОСТИ РАСТЕКАНИЮ ДЛЯ СЛОЖНЫХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Проведен анализ методов расчета электрических характеристик заземлителей при протекании аварийных токов промышленной частоты по элементам заземляющих устройств. Предложен метод совершенствования сложных заземляющих устройств электроустановок путем оптимизации их конструктивных параметров. Предлагаемый метод заключается в установке искусственного электрода заземления с увеличенной площадью контакта его поверхности с почвой, позволяющего повысить проводимость растеканию заземления. Использование указанных электродов на территории проектируемых или действующих электроустановок обеспечивает доведение величин нормированных параметров заземляющих устройств до допустимых значений. Использование метода приведенного потенциала при расчетах сложных заземляющих устройств требует замещения объемных заземлителей совокупностью линейных вертикальных электродов. Расчетная модель обосновывается по равнозначным электрическим характеристикам относительно двухслойной модели электрической структуры земли. Эквивалентная модель была получена путем достижения заданного приближения электрических характеристик совокупности прямолинейных электродов в процессе наращивания их числа к равнозначным характеристикам эталонной модели. В свою очередь определение электрических характеристик эталонной модели было осуществлено непосредственно с помощью решения краевой задачи для потенциала, удовлетворяющей уравнению Лапласа, методом конечных разностей. Проведены теоретические исследования с использованием метода наведенного потенциала и методов расчета разветвленных электрических цепей с распределенными параметрами для расчета электрического поля и сопротивления сложного неэквипотенциального заземлителя в земле с двухслойной структурой. Разработанные электроды повышенной проводимости растеканию смонтированы как экспериментальные образцы и участвуют в формировании электрических характеристик заземляющего устройства.

Ключевые слова: заземляющее устройство, электрическая подстанция, вертикальный электрод заземления, распределение потенциала, двухслойная модель земли, метод наведенного потенциала, электропроводимость, сопротивление растеканию.

V. BALALAEV, O. FEDOSENKO

DEVELOPMENT AND MODELLING OF HIGH SPREAD CONDUCTIVITY EARTH ELECTRODES FOR COMPLEX EARTHING ARRANGEMENTS

The analysis of methods for calculating the electrical characteristics of earth electrodes in case of emergency currents of industrial frequency flowing through the elements of earthing arrangements is carried out. A method for improving complex earthing arrangements of electrical installations by optimization of their design parameters is proposed. The proposed method consists in installing an artificial earth electrode with an increased contact area of its surface with the ground, which makes it possible to increase the conductivity of earthing spreading. The use of these electrodes on the territory of projected or operating electrical installations ensures that the values of the normalized parameters of earthing arrangements are brought to permissible values. The use of the method given in the calculations of earthing arrangements requires the replacement of volumetric earth electrodes with a set of linear vertical electrodes. The design model is substantiated by equivalent electrical characteristics relative to the two-layer model of the electrical structure of the earth. The equivalent model was obtained by a given approximation of the electrical characteristics of a set of straight electrodes in the process of increasing their number to the equivalent characteristics of the reference model. In turn, the determination of the characteristics of the reference model was carried out directly by solving the boundary value problem for the potential satisfying Laplace equation using finite difference method. Theoretical investigations using induced potential method and methods of calculation of branched electric circuits with distributed parameters for calculation of electric field and resistance of the complex non-equipotential earth electrode in the ground with two-layer structure have been carried out. The developed electrodes of increased spread conductivity are mounted as experimental samples and are involved in the formation of the electrical characteristics of the earthing arrangements.

Keywords: earthing arrangement, electrical substation, vertical earth electrode, induced potential method, the potential distribution, a two-layer ground model, conductivity.

© В. О. Балалаєв, О. М. Федосєєнко, 2021

Вступ. Виконання складного комбінованого заземлювача повинно бути таким, щоб забезпечувалася відповідність його характеристик допустимим значенням нормативних параметрів. Якість виконання функціональних заземлювальних пристроїв (ЗП) в значній мірі визначає безпечну експлуатацію і нормальне функціонування електроустановок. Складні комбіновані заземлювачі електроустановок конструктивно виконуються як електрично пов'язані між собою штучні поздовжні і поперечні горизонтальні електроди заземлення, що утворюють заземлювальну сітку, і вертикальні електроди, розташовані по периметру ЗП [1].

При короткому замиканні (КЗ) на землю на шинах розподільного пристрою (РП) в мережах з ефективно заземленою нейтраллю найбільший струм промислової частоти протікає по ЗП [2]. Середній потенціал ЗП щодо точки з нульовим потенціалом, яка теоретично знаходиться на нескінченній відстані від ЗП, підвищується. Таким чином значна різниця потенціалу буде прикладена до вторинних кабелів, що проходять в межах ЗП об'єкта та виходять за його межі, і до відповідних вихідних апаратів. Різниця потенціалів залежить від питомого опору землі, конфігурації, перетину і матеріалу заземлювача. Якщо різниця потенціалів на ЗП перевищить випробувальну напругу для контрольних кабелів, що підходять до пристроїв системи автоматизованого керування і автоматичних систем технологічного керування, можливе зворотне перекриття ізоляції кабелів або пристроїв. Струм КЗ, розтікаючись по заземлених оболонках кабелів і екранів, може спричинити перевищення допустимих по термічній стійкості струмових навантажень і термічне руйнування оболонок і екранів. Протікання струму КЗ в силових ошиновках і за елементами ЗП створює магнітне поле амплітудою до декількох сотень А/м [3]. Це поле створює наведення на вторинні кабелі в разі їх зближення з трасою протікання струму КЗ. Магнітне поле при КЗ небезпечне і для самої апаратури, якщо вона розміщується поблизу ошиновок або шляху розтікання струму КЗ за елементами ЗП. Обидва ці чинники часто діють одночасно, викликаючи значні перенапруги для апаратури та ізоляції кабелів [2].

Зниження рівнів поздовжніх струмів, що протікають по заземлювачах, забезпечує, тим самим, зниження рівня електромагнітних впливів на вторинне обладнання. Вирішення як цього завдання, так і завдання доведення до нормативних значень параметрів ЗП діючих електроустановок, може бути виконано з використанням штучного електрода заземлення, що має досить велику поверхню, яка контактує з ґрунтом, за умови його технологічності. Назвемо такий електрод електродом заземлення підвищеної провідності розтіканню струму. Використання електродів підвищеної провідності розтіканню можливе за умови отримання необхідних технічних рішень і направлене на оптимізацію конструктивних характеристик складних ЗП електроустановок.

Аналіз основних досягнень і літератури.

Значний внесок у розвиток теорії і практичного використання ЗП внесли вчені Є. М. Базелян, В. В. Бургедорф, Є. С. Колечицький, Р. Н. Карякін, О. М. Костромінов, О. В. Котельников, В. Є. Мітрохін, М. Р. Найфельд, О. В. Наумов, А. Б. Ослон, О. Я. Рябкова, Ю. В. Целебровській, С. Л. Шишигин, О. І. Якобс та інші. Серед іноземних вчених виділимо класичні роботи Ф. Оллендорфа, Р. Рюденберга, Е. Зунде. Активні теоретичні та експериментальні дослідження з даної тематики проводяться китайськими вченими.

Розвиток електротехніки і безперервне вдосконалення застосовуваного телекомунікаційного електрообладнання вимагає пошуку нових технічних рішень конструкцій ЗП, в тому числі для переходу від традиційних до сучасних модульно-стрижневих [4]. Важливими умовами надійної роботи модульних систем заземлення є застосування матеріалів і конструкцій, стійких до корозії [5] і використання рішень, що підвищують продуктивність робіт.

Вертикальні електроди використовують, якщо співвідношення питомих опорів шарів двошарової розрахункової моделі землі $\rho_1/\rho_2 > 0,8$ (при співвідношенні $0,1 \leq \rho_1/\rho_2 \leq 0,8$ необхідне значення опору заземлення можуть забезпечити тільки горизонтальні електроди). Довжину вертикальних електродів доцільно вибирати в залежності від товщини верхнього шару (h) по співвідношенню $lv \geq 2h$, але не менше 5 м (h – товщина верхнього шару, lv – довжина вертикальних електродів [1]). В роботі [6] рекомендується при виконанні складних комбінованих заземлювачів з дотриманням вимог, що пред'являються до їх характеристик, застосовувати вертикальні заземлювачі підвищеної довжини, якщо з глибиною від поверхні землі її питомий опір знижується. Зниження перенапруги, обумовленої електромагнітним зв'язком між джерелом впливу і колами, схильними до впливу, рекомендується [7] за рахунок установки додаткових вертикальних електродів заземлення або виконання виносного заземлення. У [8] пропонується технічне рішення, згідно з яким виконання вертикальних електродів в обмеженому свердловиною обсязі технічного вуглецю ефективно покращує електричні характеристики складного комбінованого заземлювача. Доцільність застосування рекомендацій щодо приведення величин нормованих параметрів ЗП до допустимих значень повинна бути підтверджена розрахунковими даними і результатами вимірювань зазначених параметрів в умовах діючих електроустановок.

Мета роботи. Метою роботи є вдосконалення ЗП електроустановок шляхом оптимізації конструктивних параметрів при проектуванні або під час доведення до нормативних значень параметрів складних комбінованих заземлювачів діючих електроустановок шляхом використання штучних електродів заземлення підвищеної провідності розтіканню.

Постановка задачі. Приведення величин нормованих параметрів до допустимих значень виконується за допомогою заходів, що дозволяють в

кожному конкретному випадку удосконалити заземлювач, застосовуючи одне з відомих конструктивних рішень. До числа таких заходів належить варіант технічного рішення щодо виконання вертикальних електродів підвищеної провідності.

Результати дослідних випробувань з діагностики стану ЗП діючої підстанції 110 кВ показали, що ЗП виконано з дотриманням вимог до його опору, проте, в деяких місцях порушено конструктивне виконання заземлювача, яке повинно забезпечувати вимоги техніки безпеки по напрузі дотику. Результати виконаних розрахунків, згідно з протоколом дослідних випробувань з діагностики стану ЗП підстанції показали, що після проведення ремонтно-відновлювальних робіт для умов однофазного КЗ на території відкритого розподільного пристрою 110 кВ підстанції значення напруги дотику на робочих місцях біля обладнання, на якому можуть проводитись оперативні перемикання, знизилася, але перевищує допустиме значення.

Внаслідок необхідності забезпечення нормативних значень напруги дотику, де воно перевищує допустимі значення, була поставлена задача вибору рішення по відновленню параметрів ЗП і підтвердження доцільності застосування обраного варіанту.

Оптимізація конструктивних параметрів ЗП. В роботі рекомендовано при виконанні складних комбінованих заземлювачів з дотриманням вимог, що пред'являються до їх характеристик, застосовувати вертикальні електроди підвищеної провідності розтіканню. Відповідно до запропонованого технічного рішення, заглиблення вертикальних електродів заземлення виконується шляхом розміщення кожного з них в центрі свердловини діаметром не більше 50 діаметрів електрода, яка заповнюється дрібнодисперсним технічним вуглецем, причому на поверхні електрода для зниження швидкості корозії попередньо формується тверда струмопровідна плівка (рис. 1).

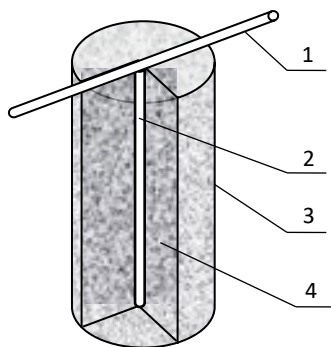


Рисунок 1 – Вертикальний електрод заземлення в обмеженому об'ємі технічного вуглецю:

- 1 – горизонтальний електрод; 2 – вертикальний електрод;
3 – свердловина; 4 – дрібнодисперсний технічний вуглець, що заповнює вільний об'єм свердловини

Розглянуті технічні рішення можна рекомендувати як варіант доведення до нормованих значень параметрів ЗП діючих електроустановок. При

цьому рекомендується виконувати з периферійного боку ЗП кілька вертикальних електродів в обмеженому об'ємі технічного вуглецю (рис. 2); на поверхні електродів може бути сформована струмопровідна захисна плівка. При цьому досягається механізація земляних робіт – свердловина виконується за допомогою ямобура, який експлуатується в електричних мережах. Технічний вуглець широко випускається промисловістю. Число таких електродів можна визначити на підставі розрахунку, виходячи з реального значення опору розтікання ЗП підстанції.

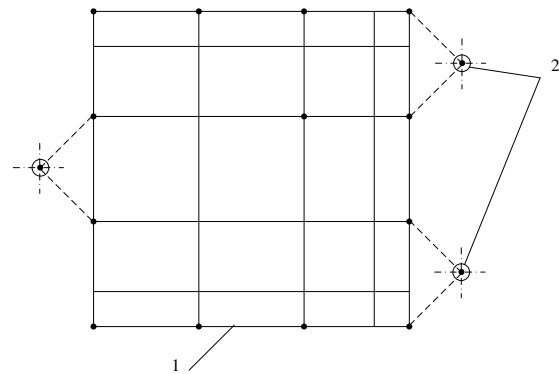


Рисунок 2 – Складний заземлювач електроустановки:

- 1 – вертикальні і горизонтальні електроди ЗП електроустановки; 2 – вертикальний електрод в обмеженому об'ємі технічного вуглецю

з метою забезпечення нормативних значень напруги дотику, де вона перевищує допустимі значення, на додаток до рекомендацій, згідно з протоколом дослідних випробувань з діагностики стану заземлюючих пристроїв на відкритому розподільному пристрої 110 кВ були виконані два вертикальних електроди підвищеної провідності розтіканню. Осторонь від сітки заземлення (мінімальна відстань від периферійних горизонтальних електродів ЗП 5,5 м) були пробурені дві свердловини діаметром 0,33 м і глибиною 3 м, відстань між якими склала 5,1 м. У центр кожної свердловини розміщено електрод зі сталеві штаби 40x4 мм² довжиною 2,5 м, причому один з електродів мав струмопровідне антикорозійне покриття. Засипка свердловин проведена гранульованим технічним вуглецем марки П-803. Підключення вертикальних електродів підвищеної провідності розтіканню виконано мідним ізолюваним проводом перерізом 10 мм². Змонтовані експериментальні зразки електродів знаходяться в дослідно-промисловій експлуатації [9].

Методи розрахунку заземлювачів. В роботі було проведено аналіз методів розрахунку електричних характеристик заземлювачів при протіканні аварійних струмів промислової частоти по елементах ЗП.

Суть основних положень, які складають основу методів розрахунку при проектуванні та діагностиці ЗП, полягає в наступному [1, 7]. У провідному середовищі потенціал в певній точці η , обумовлений розташованим в ній джерелом струму довільної форми, пов'язаний з нормальною до поверхні джерела

складовою вектора щільності струму j_n співвідношенням:

$$\varphi(\eta) = \iint_S j_n(\lambda) \psi(\lambda, \eta) d\lambda. \quad (1)$$

Функція $\psi(\lambda, \eta)$ являє собою потенціал, який створюється в точці η одиничним точковим джерелом струму, розташованим у розглянутому середовищі в точці λ . В якості точки η може розглядатися точка, розташована як в ґрунті, так і на поверхні заземлювача. Інтегрування у співвідношенні (1) виконується по поверхні S джерела струму.

Повний струм I , що потрапляє в заземлювач з електричної мережі і стікає з його поверхні в ґрунт, буде дорівнювати [1]:

$$I = \iint_S j_n(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Згідно із законом Ома щільність струму $j_n(\lambda)$ пов'язана з похідною потенціалу у напрямку нормалі до поверхні джерела струму $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$ наступним співвідношенням:

$$j_n(\lambda) = -\frac{1}{\rho(\lambda)} \frac{\partial \varphi}{\partial n}. \quad (3)$$

де $\rho(\lambda)$ – значення питомого електричного опору ґрунту в точці λ .

Таким чином, якщо маємо потенціал, який створюється точковим джерелом струму, то при певному розподілі поверхневої щільності струму джерела складної форми легко обчислюється потенціал, який створюється цим джерелом.

Вирішення задачі електричного поля, створюваного точковим джерелом, часто називають ключовим завданням, тим самим підкреслюючи її значимість. Розподіл потенціалу φ , який створюється джерелом постійного струму, у будь-якій точці ґрунту, в якій відсутні інші джерела струму, описується диференціальним рівнянням виду:

$$\operatorname{div} \left(\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} \varphi \right) = 0. \quad (4)$$

При цьому питомий електричний опір неоднорідного ґрунту ρ може бути довільною функцією координат. Крім зазначеного вище, потенціал повинен бути кінцевим в усіх точках середовища де немає джерел, а в нескінченно віддалених точках наближатися до нуля.

При розрахунках ЗП ґрунт розглядається як провідний півпростір, у загальному випадку має межі розділу зі стрибкоподібною зміною значень питомого опору, причому в більшості випадків враховується залежність цього опору від глибини z . На межах розділу повинна зберігатися безперервність потенціалу і нормальної до межі розділу компоненти щільності

струму; на поверхні ґрунту вертикальна компонента щільності струму повинна дорівнювати нулю [7].

Згідно з [10], при довільній вертикальній неоднорідності розглянутої моделі ґрунту через аксіальну симетрію задачі потенціал точкового джерела, а також потенціал вертикального електрода задовольняють двовимірним рівнянням:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{r}{\rho(z)} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{r}{\rho(z)} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = 0. \quad (5)$$

Використання методів кінцевих різниць і кінцевих елементів не набуло широкого поширення при розрахунках ЗП. Це пов'язано з необхідністю дискретизації розрахункового об'єму та наявністю величезної кількості вузлів, оскільки лінійні розміри ЗПдесь на 3–5 порядків перевищують переріз заземлювачів, які визначають крок сітки. Але може бути рекомендоване застосування цих методів як еталонних, тому що дозволяє безпосередньо використовувати умову сталості потенціалу на поверхні електрода.

Відповідно до [7], потенціал, що створюється струмом, який стікає з еквіпотенційного ЗП з поверхнею S , повинен задовольняти рівнянню (4), а також граничній умові виду:

$$\varphi \Big|_S = \varphi_{zy} = \text{const}. \quad (6)$$

Аналітичне вирішення цієї крайової задачі не уявляється можливим через те, що реальні конструкції ЗП мають складну форму поверхні. Вирішення задачі в цьому випадку можливе чисельними методами.

Підстановка до граничної умови (6) потенціалу в формі (1) дозволяє [7] отримати інтегральне рівняння першого роду, що зв'яже щільність струму, який стікає із заземлювача в ґрунт, з утвореним на заземлювачі потенціалом. Наближене вирішення цього рівняння пов'язане із розбивкою поверхні складного ЗП на прості елементи. При цьому подвійний інтеграл (1) можна виразити сумою інтегралів по поверхнях окремих елементів складного ЗП. Щільність струму, який стікає з кожного елемента, приймається постійною [7] або кусково-постійною для елементів, які перетинають кордон розділу шарів. Потенціал в довільній точці, таким чином, є суперпозицією потенціалів, які створюються окремими елементами ЗП.

Згідно з [7], для розрахунку потенціалу елемента для ЗП складної форми використовуються припущення, які полегшують розрахунки:

1) при розрахунку потенціалу, який створюється елементом i , при заданій щільності струму j_{0i} вплив інших елементів не враховується;

2) реальні елементи ЗП замінюються джерелами струму простої форми такими як точкове джерело, прямолінійний відрізок, окружність, дуга окружності, квадратний майданчик.

При заміні елемента на одномірні джерела струму потенціал в деякій точці η [7] розраховується шляхом

одноразового інтегрування наступного співвідношення:

$$\varphi(\eta) = \int_{L_i} j_{0i} \psi(l, \eta) dl. \quad (7)$$

де L_i – довжина i -го елемента ЗП; j_{0i} – лінійна щільність струму, який стікає з i -го елемента в ґрунт.

Потенціал, який створюється в довільній точці η , згідно з [7], дорівнює:

$$\begin{aligned} \varphi(\eta) &= \sum_{i=1}^N \int_{L_i} j_{0i} \psi(l, \eta) dl = \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{L_i} \int_{L_i} \psi(l, \eta) dl = \sum_{i=1}^N I_i \alpha_{i\eta}. \end{aligned} \quad (8)$$

де N – число елементів, на які розбитий заземлювач; I_i – невідомий струм, який стікає з i -го елемента заземлювача; $\alpha_{i\eta}$ – величина, яка називається взаємним опором i -го елемента і точки η .

Вираз (8) можна надати у наступному вигляді. Якщо записати його для N точок, розташованих на поверхні заземлювача, дотримуючись відповідності кожного елемента одній точці, отримуємо систему лінійних агебраїчних рівнянь (СЛАР) виду:

$$\sum_{j=1}^N \alpha_{ij} I_j = \varphi_{zy}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (9)$$

де α_{ij} визначається як потенціал, який виникає в точці, розташованій на поверхні i -го елемента, одиничним джерелом струму, відповідним j -му елементу ЗП.

При відомому рішенні ключового завдання значення α_{ij} легко знаходяться на підставі виразу (7); після обчислення α_{ij} рішення СЛАР (9) дає значення струмів I_i , що стікають з елементів ЗП в ґрунт. Такий спосіб знаходження струморозподілу за елементами складного ЗП прийнято називати [7] методом потенціалу в характерній точці (метод вторинних джерел).

У полі струму, що стікає з елемента i , елемент j набуває потенціал, який може бути знайдений усередненням значень потенціалів в точках на поверхні j -го елемента. Усереднений потенціал знаходиться інтегруванням (7) по довжині джерела струму, що заміщує j -й елемент [7]. Прирівнюючи сумарний потенціал, який створено струмами, що стікають з усіх елементів ЗП, значенню $\varphi_{зп} = \text{const}$ знову приходимо до СЛАР (9). Тепер величини α_{ij} визначаються як потенціал j -го елемента в полі одиничного струму, що стікає з i -го елемента. Їх прийнято називати власними (за наявності $i = j$) та взаємними ($i \neq j$) опорами [1].

Значення власних і взаємних опорів визначаються з виразу [1, 7]:

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{L_i L_j} \int_{L_i} dl_i \int_{L_j} dl_j \psi(l_i, l_j). \quad (10)$$

Розрахунок власних і взаємних опорів становить основний обсяг обчислень при розрахунку еквіпотенціального ЗП.

Можливості прийнятих алгоритмів розрахунку складних ЗП такі, що об'ємні заземлювачі заміщуються сукупністю вертикальних і горизонтальних електродів, діаметри яких приймаються такими ж, як у відповідних штучних електродів ЗП. У цьому випадку досягається однаковість розрахункових форм всіх електродів ЗП.

З огляду на те, що питомий опір дрібнодисперсного технічного вуглецю у стисненому вигляді становить 0,05 Ом·м, тобто на кілька порядків менше питомого опору добре провідного ґрунту (5,0 Ом·м), в зазначеному розрахунку ЗП вертикальний електрод, розташований в обмеженому об'ємі дрібнодисперсного технічного вуглецю, може бути представлений у вигляді об'ємного заземлювача [11]. Використання методу наведеного потенціалу при вирішенні цього завдання [1], тобто за алгоритмом, який реалізує вираз (9), вимагає заміщення вертикальних електродів, розташованих в обмеженому об'ємі дрібнодисперсного технічного вуглецю, сукупністю лінійних вертикальних електродів. Розрахункова сукупність еквівалентних електродів обґрунтовується по рівнозначним електричним характеристикам стосовно двошарової моделі електричної структури землі і вибирається відповідно до методики, опублікованої в [11]. Відповідно до цього способу, приймається два критерії еквівалентності заміщення вертикального електрода заземлення підвищеної провідності розтіканню сукупністю прямолінійних елементів: наближення по опорі і наближення по потенціалу точок на поверхні землі.

З достатньою для практичних розрахунків точністю вертикальний електрод заземлення підвищеної провідності розтіканню може бути заміщений сукупністю із 12 вертикальних електродів різної довжини, розташованих таким чином, щоб глибина їх занурення приблизно відповідала обрису напівеліпсоїда обертаня з поверхнею рівною поверхні циліндра, обмеженого розмірами свердловини в ґрунті [11].

Результати чисельного моделювання. Для визначення впливу електродів підвищеної провідності розтіканню на розподіл потенціалів на території підстанції зроблено розрахунок ЗП електроустановки. Для отримання характеристик складного нееквіпотенціального ЗП застосовується алгоритм, який реалізує математичну модель, засновану на спільному розгляді ЗП як складного електричного кола з розподіленими параметрами горизонтальних електродів, що мають нелінійну залежність від струму в них, і зосередженими параметрами вертикальних електродів; з іншого боку у вигляді квазістационарного електричного поля в землі [7].

Заміщення вертикальних електродів підвищеної провідності розтіканню сукупністю вертикальних електродів, діаметри яких такі ж як у відповідних горизонтальних заземлювачів, дозволяє використовувати можливості зазначеного алгоритму розрахунку складних ЗП.

Для електродів підвищеної провідності розтіканню, виконаних у вигляді провідника, розташованого в центрі свердловини зі струмопровідним заповненням, в [11] запропоновано спосіб заміщення при розрахунках складних ЗП електроустановок.

Визначення розрахункових значень напруги дотику і розподілу потенціалу при КЗ на території підстанції проводилося з використанням програми «Ground», розробленої для чисельного моделювання аварійних режимів роботи ЗП [12].

Напруга дотику визначається як максимальна (мінімальна) різниця потенціалів між величиною потенціалу на обладнанні і величиною потенціалу на поверхні землі на відстані 0,8 м від обладнання.

У розрахунках по визначенню значень напруги дотику на території підстанції в режимах протікання по ЗП струмів КЗ приймаємо, що питомий опір ґрунту для першого шару глибиною до 0,6 м становить 28 Ом·м і для другого шару глибиною від 0,6 м – 35,5 Ом·м. Розрахункові значення опору ґрунту отримані приведенням багатшарової структури землі до двошарової розрахункової моделі за результатами вертикального електричного зондування згідно з протоколом дослідних випробувань з діагностики стану ЗП підстанції 110/10 кВ. Струм однофазного КЗ на відкритому розподільному пристрої 110 кВ дорівнює 12,02 кА. Розрахунок проведено для однофазного КЗ на території відкритого розподільного пристрою 110 кВ.

Розподіл потенціалів розраховано по всій території підстанції при різних аварійних ситуаціях – у всіх можливих точках виникнення КЗ на обладнанні підстанції.

У табл. 1 наведено напругу дотику на обладнанні підстанції при КЗ з урахуванням і без урахування електродів підвищеної провідності розтіканню.

Розрахунок опору розтікання ЗП підстанції «Орджонікідзе – 110 кВ» відповідно до електричних характеристик ґрунту на території електроустановки, згідно з до розробленою в [11] методикою, дає значення 3,1 Ом і 2,9 Ом до і після установки електродів підвищеної провідності розтіканню відповідно.

Аналіз результатів розрахованих значень показав, що відмінність становить 6%. Можна також відзначити, що обґрунтована розрахункова сукупність заміщених електродів [10] забезпечує достатній для практичних розрахунків результат.

Висновки. Отримані результати підтверджують доцільність застосування електродів підвищеної провідності розтіканню в умовах діючих електроустановок з точки зору забезпечення нормативних вимог і технологічності виконання. Розроблене технічне рішення вертикального електрода

заземлення підвищеної провідності розтіканню засновано на вимогах довговічності, економічності і технологічності виконання в умовах діючих електроустановок.

Таблиця 1 – Порівняння розрахункових значень напруги дотику на обладнанні підстанції при КЗ на лінійному роз'єднувачі повітряної лінії №1

Найменування обладнання	Напруга дотику U_d , В	
	без урахування електродів	з урахуванням електродів
Трансформатор №1	169,75	160,9
Трансформатор №2	208,7	196,85
Р 21 Т	112	106,95
Р 22 Т	96,3	91,95
Р 23 Т	106,85	102,1
Р 24 Т	98,45	93,95
МВ 2Т	180,35	171,1
ШР 1Т	160,25	151,65
ШР 2Т	174,3	164,85
СР-1	131,05	124,55
СР-2	95,45	89,5
ЛР ПЛ-1	138,2	129,1
ЛР ПЛ-2	169,75	160,9

Було обґрунтовано критерії еквівалентності заміщення природних об'ємних заземлювачів розрахунковою сукупністю прямолінійних електродів, діаметр яких прийнято таким же, як у відповідних штучних електродів ЗП.

Реалізовано моделювання вертикального електрода заземлення підвищеної провідності розтіканню еквівалентною сукупністю прямолінійних електродів на підставі рівнозначних критеріїв (по опору та розподілу потенціалів)

Розрахунки однофазного КЗ на території відкритого розподільного пристрою 110 кВ підстанції показали, що величина напруги дотику на обладнанні при врахуванні електродів підвищеної провідності розтіканню відрізняється від відповідних значень напруги дотику, визначених без урахування зазначених електродів. При цьому різниця між даними величинами варіюється до 6%

Виконаний аналіз результатів розрахунку характеристик складного ЗУ дав можливість обґрунтувати практичну необхідність розробки технічного рішення штучного електрода заземлення, який володіє досить великою поверхнею, що контактує з ґрунтом, тобто електрода заземлення підвищеної провідності розтікання, який задовольняє вимогам технологічності виконання, в тому числі, в умовах діючих електроустановок.

Список літератури

1. Бургдорф В. В., Якобс А. И. *Заземляющие устройства электроустановок*. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 480 с.
2. Korovkin N. V., Frolov O. V., Shishigin S. L., Shishigin D. S. Grounding and shielding in EMC problems of electric power substations. *2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Brugge, 2-9 September 2013*. Brugge: IEEE, 2013. P. 863–866.

3. Матвеев М. В. Электромагнитная обстановка на объектах определяет ЭМС цифровой аппаратуры. *Новости электротехники*. 2002. № 2 (14). С. 32–36.
4. Евдокимова О. Г. Анализ развития конструкций заземляющих устройств. *Бюллетень результатов научных исследований*. 2012. Вып. 1 (2). С.50-58.
5. Sanchez V., Rosendo A. *Diseno de la malla de puesta a tierra en la subestacion terminal terrestre*. URL: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/31266> (дата звернення 25 квітня 2021).
6. *СОУ 31.2-21677681-19:2009 Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція*. Київ: ОЕП “ГРІФРЕ”, 2010.
7. Кац Е. Л., Меньшов Б. Г., Целебровский Ю. В. *Заземляющие устройства электроустановок высокого и низкого напряжений*. Москва: ВИНТИ, 1989. 160 с.
8. Мінченко А. А., Федосенко О. М., Мінченко А. А., Яровий В. М. Пат. №23105, Україна. *Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій*. 2007.
9. Федосенко О. М. Спосіб підвищення провідності розтіканню вертикальних заземлювачів електроустановок. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. 2017. Вип. 186. С. 44–46.
10. Старков К. А., Федосенко Е. Н. Совершенствование алгоритма расчета сложных неэквипотенциальных заземляющих устройств электроустановок с учетом проводимости естественных заземлителей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 4. С. 66–71. doi: 10.20998/2074-272X.2017.4.11
11. Федосенко Е. Н., Мінченко А. А. Вертикальные электроды заземления повышенной проводимости растеканию и их замещение при расчетах электрических характеристик сложных комбинированных заземлителей. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2007. Т. 6, № 5 (30). С. 56–59.
12. Линк И. Ю., Колиушко Д. Г., Колиушко Г. М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте. *Электронное моделирование*. 2003. Т. 25, № 2. С. 99–111.
- environment at facilities determines the EMC of digital equipment]. *Electric engineering news*. 2002, no. 2 (14), pp. 32–36.
4. Evdokimova O. G. Analiz razvitiya konstruktсий zazemlyayushchikh ustroystv. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Analysis of the development of earthing arrangements]. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2012, iss. 1 (2), pp. 50–58.
5. Sanchez V., Rosendo A. *Diseno de la malla de puesta a tierra en la subestacion terminal terrestre*. Available at: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/31266> (accessed 25 квітня 2021).
6. *SOU 31.2-21677681-19:2009 Vyprobuvannya ta kontrol' prystroyiv zazemlennya elektroustanovok. Typova instruktciya* [Company Standard 31.2-21677681-19:2009 Testing and inspection of earthing arrangements for electrical installations. Model guidelines]. Kyiv, OEP “HRIFRE” Publ., 2010.
7. Kats E. L., Men'shov B. G., Tselebrovskiy Yu. V. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok vysokogo i nizkogo napryazheniy* [Earthing arrangements for high and low voltage electrical installations]. Moscow, VINITI Publ., 1989. 160 p.
8. Minchenko A. A., Fedoseenko O. M., Minchenko A. A., Yarovy V. M. *Sposib vykonannya zazemlyuval'nykh prystroyiv elektrichnykh stantsiy ta pidstantsiy* [Method of carrying out the earthing arrangements for electric power stations and substations]. Patent UA, no. 23105, 2007.
9. Fedoseenko O. M. *Sposib pidvyshchennya providnosti roztikannyu vertikal'nykh zazemlyuvachiv elektroustanovok* [Method for increasing the spread conductivity of vertical earth electrodes for electrical installations]. *Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture*. 2017, vol. 186, pp. 44–46.
10. Starkov K. A., Fedoseenko E. N. Improved algorithm for calculating complex non-equipotential grounding devices of electrical installations taking into account conductivity of natural groundings. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2017, no. 4, pp. 66–71. doi: 10.20998/2074-272X.2017.4.11
11. Fedoseenko E. N., Minchenko A. A. *Vertikal'nye elektrody zazemleniya povyshennoy providnosti rastekaniyu i ikh zameshchenie pri raschetakh elektricheskikh kharakteristik slozhnykh kombinirovannykh zazemlitley* [Vertical earth electrodes with increased spread conductivity and their substitution in calculating the electrical characteristics of complex combined earthing arrangements]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2007, vol. 6, no. 5 (30), pp. 56–59.
12. Link I. Yu., Koliushko D. G., Koliushko G. M. *Matematicheskaya model' neekvipotentsial'nogo zazemlyayushchego ustroystva podstantsii, razmeshchennogo v dvukhsloynom grunte* [Mathematical model of a non-equipotential substation earthing arrangement placed in a bilayer ground]. *Electronic modelling*. 2003, vol. 25, no. 2, pp. 99–111.

References (transliterated)

1. Burgsdorf V. V., Yakobs A. I. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Earthing arrangements for electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 480 p.
2. Korovkin N. V., Frolov O. V., Shishigin S. L., Shishigin D. S. Grounding and shielding in EMC problems of electric power substations. *2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Brugge, 2-9 September 2013*. Brugge, IEEE, 2013. pp. 863–866.
3. Matveev M. V. *Elektromagnitnaya obstanovka na ob'ektakh opredelyaet EMS tsifrovoy apparatury* [The electromagnetic

Надійшла (received) 28.04.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Балалаєв Вячеслав Олександрович (Балалаев Вячеслав Александрович, Balalaiev Vyacheslav) – магістрант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: vyacheslav.blv@gmail.com.

Федосенко Олена Миколаївна (Федосенко Елена Николаевна, Fedoseenko Olena) – кандидат технічних наук, доцент кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3701-381X>; e-mail: fedosejenko@gmail.com.