

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

ФЕДОСЕЄНКО ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА



УДК 621.316

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК НА
ОСНОВІ ПОВНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄМНИХ
ЗАЗЕМЛЮВАЧІВ**

Спеціальність 05.14.02 - електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано 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
Тугай Юрій Іванович,
Інститут електродинаміки Національної академії наук
України,
завідувач відділу оптимізації систем електропостачання;

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

Захист відбудеться 20 грудня 2018 р. о 12.00 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 15 листопада 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Шевченко С.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Якість виконання поліфункціональних заземлюючих пристроїв (ЗП) в значній мірі визначає безпечну експлуатацію і нормальне функціонування електроустановок. Ускладнення електроустановок супроводжується посиленням ролі в формуванні параметрів ЗП природних заземлювачів і комунікацій, які крім цього повинні, перш за все, надійно виконувати свої основні функції.

В останні роки в Україні істотно збільшилося впровадження цифрової апаратури автоматики, управління, сигналізації та зв'язку як іноземного, так і вітчизняного виробництва, в тому числі на об'єктах електроенергетики. Цим досягається посилення функціональних характеристик та підвищення надійності, простоти і гнучкості устаткування. Але, поряд з цим, виникає і ряд проблем. По-перше, високо- та низькочастотні сигнали цифрових пристроїв спричиняють їх надзвичайну вразливість до електромагнітних полів (особливо, високочастотних). По-друге, більшість з енергетичних об'єктів проектувалося задовго до масового впровадження електронної техніки.

Таким чином на енергетичних об'єктах склалася ситуація, коли стан системи електроживлення, заземлення та блискавкозахисту цих об'єктів такий, що рівні електромагнітних завад (ЕМЗ) у багато разів перевищують гранично припустимі рівні стійкості цифрових пристроїв.

У зв'язку з цим виникає необхідність забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) пристроїв з жорсткою і вкрай жорсткою електромагнітною обстановкою (ЕМО) на електроенергетичних об'єктах, тобто здатності пристроїв функціонувати із заданою якістю в визначеній ЕМО. Характеристики ЗП електроустановок з відкритими розподільними пристроями безпосередньо визначають електромагнітну обстановку на цих об'єктах.

Природні зосереджені заземлювачі в силу великої поверхні контакту з ґрунтом вирівнюють потенціал в вузлах ЗП і, тим самим, розвантажують по струму горизонтальні штучні і природні заземлювачі. Тому їх докладне врахування у вирішенні задачі розрахунку електричних характеристик складних нееквіпотенціальних ЗП є обов'язковим у зв'язку з його впливом на рівень ЕМЗ.

Актуальність теми дослідження обумовлена також тим, що рішення задачі розподілу струмів коротких замикань (КЗ) по магістралях ЗП електроустановки і потенціалів у вузлах заземлення доцільно і з позиції виявлення найбільш безпечних (з точки зору ЕМС) ділянок території електроустановки для прокладки на них інформаційних і керуючих комунікацій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. У роботі представлені результати досліджень, які проводились на кафедрі «Передача електричної енергії» НТУ «ХПІ» при виконанні наступних госпдоговірних науково-дослідницьких робіт: «Розробка алгоритму та програми розрахунку нееквіпотенціальних заземлюючих пристроїв електроустановок з урахуванням провідності природних заземлювачів» (договір № 37434-2005 НТУ «ХПІ» з ГПНДІ «Укренергомережпроект»); «Розробка електродів підвищеної провідності розтіканню і їх впровадження з метою досягнення припустимих значень нормованих параметрів заземлювача підстанції 110/10 кВ «Орджонікідзе» (договір № 37806-2008 НТУ «ХПІ» з АК «Харківобленерго»), де здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є вдосконалення заземлюючих пристроїв 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, а також докладного врахування природних зосереджених заземлювачів.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтування критеріїв еквівалентності заміщення природних зосереджених заземлювачів розрахунковою сукупністю прямолінійних електродів, діаметр яких прийнято таким же, як у відповідних штучних електродів ЗП;

- рішення задачі заміщення розрахунковою сукупністю прямолінійних електродів природних зосереджених заземлювачів, якими є арматурні каркаси залізобетонних фундаментів, зокрема, підножників опор повітряних ліній електропередачі та порталів розподільчих устроїв (РУ), а також підставок (стійок) під обладнання;

- визначення взаємних та власних опорів для довільного розташування елементів, що дозволить удосконалити існуючий алгоритм розрахунку нееквіпотенційних ЗП електроустановок, який реалізує модель, засновану на спільному розгляді ЗП як складного електричного кола і квазістаціонарного електричного поля струму в землі;

- розробка технічного рішення вертикального електрода заземлення підвищеної провідності розтіканню, заснованого на вимогах довговічності, економічності, технологічності виконання в умовах діючих електроустановок;

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

- удосконалення алгоритму розрахунку складних нееквіпотенційних ЗУ електроустановок з урахуванням об'ємних зосереджених заземлювачів, а також вертикального електрода заземлення підвищеної провідності розтіканню.

Об'єкт дослідження – електрофізичні процеси в заземлюючих пристроях електроустановок.

Предмет дослідження – параметри складних заземлюючих пристроїв електроустановок та методи їх розрахунку.

Методи дослідження. В основу роботи покладено системний підхід при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, що базуються на фундаментальних положеннях електротехніки: метод кінцевих елементів для розв'язання крайової задачі щодо поля об'ємного заземлювача; методи інтегрального числення, математичного моделювання, наведеного потенціалу, теорії електричних ланцюгів з урахуванням нелінійної залежності напруженості магнітного поля провідника від струму через нього при розробці математичної моделі; методи фізичного експерименту при перевірці теоретичних висновків на діючих енергооб'єктах.

Достовірність одержаних теоретичних результатів підтверджується експериментальними дослідженнями.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

- удосконалено метод заміщення об'ємних заземлювачів, який відрізняється від існуючих обранням еквівалентної сукупності лінійних електродів по еквівалентним електричним характеристикам з використанням двошарової моделі електронної

структури землі, що дозволяє врахувати зазначені заземлювачі в розрахунку складного заземлюючого пристрою;

- вперше запропоновано метод оптимізації конструктивних параметрів складних заземлюючих пристроїв електроустановок, який відрізняється від існуючих встановленням штучного електрода заземлення в центр свердловини діаметром не більшим ніж 50 діаметрів електроду, яку заповнюють дрібнодисперсним технічним вуглецем, що дозволяє привести величини нормованих параметрів заземлюючих пристроїв до допустимих значень;

- отримала подальший розвиток математична модель складних заземлюючих пристроїв електроустановок, яка відрізняється від існуючих урахуванням об'ємних заземлювачів, а також електродів підвищеної провідності розтіканню як сукупності прямолінійних електродів, що дає можливість отримати уточнені параметри заземлюючих пристроїв електроустановок.

- отримала подальший розвиток математична модель розрахунку наведеного потенціалу, яка відрізняється від існуючих розташуванням горизонтального електроду в нижньому шарі двошарової розрахункової моделі землі, а також на довільній відстані від поверхні землі, що дає можливість підвищити точність розрахунку електричних характеристик нееквіпотенціальних заземлюючих пристроїв.

Практичне значення одержаних результатів для електроенергетичної галузі полягає в наступному:

- розв'язана задача заміщення природних зосереджених заземлювачів і вертикальних електродів підвищеної провідності розтіканню, що дозволило удосконалити існуючий алгоритм розрахунку нееквіпотенціальних ЗП електроустановок, який реалізує модель, засновану на спільному розгляді ЗП як складного електричного кола і квазістационарного електричного поля струму в землі, що враховує падіння напруги по ЗП при КЗ;

- уточнене рішення задачі розподілу струмів КЗ по магістралях ЗП електроустановки і потенціалів у вузлах заземлення дає можливість виявити найбільш безпечні (з точки зору ЕМС) ділянки території електроустановки для прокладки на них інформаційних і керуючих кіл;

- використання розроблених електродів підвищеної провідності розтіканню направлено на оптимізацію конструктивних характеристик складних ЗУ електроустановок. В умовах діючих електроустановок електроди підвищеної провідності розтіканню є одним з технічних рішень по досягненню припустимих значень нормативних параметрів заземлювача, якщо зазначені параметри перевищують припустимі;

- розроблені електроди підвищеної провідності розтіканню змонтовані як дослідно-промислові зразки на ПС «Орджонікідзе-110 кВ» АК «Харківобленерго». Їх застосування забезпечило зниження розрахункових значень напруги дотику в тих місцях на ВРУ-110 кВ підстанції, де вони перевищували припустимі, до значень які суттєво менше припустимих.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. Серед них:

- запропоновано принцип заміщення природних зосереджених заземлювачів сукупністю прямолінійних;

- реалізовано принцип автоматизації розрахунку електричного поля та опору розтікання при вирішенні крайової задачі для рівняння Лапласа стосовно моделі природного зосередженого заземлювача в обмеженому обсязі двошарової землі;

- отримано формули взаємних і власних опорів для створення математичної моделі нееквіпотенційного ЗП;

- отримано і проаналізовано значення потенціалів точок на поверхні землі і значення опору розтікання моделей залізобетонних стійок і фундаментів (підножників), які можливо використовувати як вихідні дані для оцінки достатності наближення при заміщенні сукупністю прямолінійних електродів;

- отримано сукупність прямолінійних електродів, що заміщує природні зосереджені заземлювачі по рівнозначним електричним характеристикам;

- запропоновано спосіб виконання вертикальних електродів заземлення підвищеної провідності розтіканню, який полягає в тому, що при поглибленні вертикальних електродів заземлення заповнювати свердловину з електродом заземлення технічним вуглецем, а перед поглибленням поверхню сталевих вертикальних електродів покривати рідкою композицією, яку необхідно висушувати до утворення твердої токопровідної плівки;

- обґрунтовано еквівалентну модель у вигляді сукупності кінцевого числа прямолінійних електродів по рівнозначним електричним характеристикам зазначених електродів і власне вертикального електрода заземлення підвищеної провідності розтікання;

- проведено вимірювання і проаналізовано опори розтікання експериментальних зразків електродів підвищеної провідності розтіканню на ВРП-110 кВ ПС «Орджонікідзе - 110 кВ».

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися на: Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2006, 2007, 2016 – 2018); «Сучасні методи розробки і дослідження систем автоматизації, енергозбереження в промисловості та сільському господарстві» (Кіровоград, 2007); «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях.» (Славське, 2008); «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (Харків, 2016, 2017); «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харків, 2016, 2017); «Повышение энергоэффективности и надежности энергосистем и электросетей Украины» (Харків, 2016).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 20 наукових публікаціях, з яких 12 статей – у наукових фахових виданнях України (1 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 3 – патенти України, 5 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації складає 243 сторінки, з них: 22 рисунка по тексту; 5 рисунків на окремих сторінках; 8 таблиць по тексту; 7 таблиць на окремих сторінках; списку використаних джерел з 92 найменувань на 13 сторінках; 3 додатка на 75 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Сформульовано мету, за-

дачі, об'єкт та предмет досліджень, зазначено методи виконання досліджень, показано наукову новизну та практичну значущість роботи, наведені відомості про апробацію та публікацію наукових результатів, а також про їх впровадження.

У **першому розділі** проаналізовано функціональне призначення складних ЗП сучасних великих високовольтних електроустановок і відповідні нормативно-технічні параметри.

За результатами аналізу відомих публікацій визначено, що природні зосереджені заземлювачі в силу великої поверхні контакту з ґрунтом вирівнюють потенціал в вузлах ЗП і, тим самим, розвантажують по струму горизонтальні штучні і природні заземлювачі. Отримано висновок щодо впливу складних нееквіпотенційних ЗП на рівень електромагнітних завад.

Проведено аналіз методів розрахунку електричних характеристик складних ЗП електроустановок відповідно до їх функціонального призначення. Отримано висновок, що використання методів кінцевих різниць і кінцевих елементів не набуло широкого поширення при розрахунках ЗП в зв'язку з великим обсягом обчислень, але може бути рекомендовано застосування цих методів як еталонних, тому що вони дозволяють безпосередньо використовувати умову сталості потенціалу на поверхні електрода.

Зроблено огляд методів розрахунку еквіпотенційних і нееквіпотенційних ЗП. Аналіз застосовуваних в них розрахункових виразів показав, що вони не охоплюють всі можливі варіанти розташування елементів складних ЗП стосовно двошарової моделі ґрунту. Отримано висновок, що складові цих виразів відображають лише ті обмеження в частині геометрії розрахункової моделі ЗП, які прийняті в існуючих алгоритмах розрахунку еквіпотенційних і нееквіпотенційних ЗП.

Відзначено, що вирішення питань ЕМС вимагає розрахунку нееквіпотенційних ЗП, тобто врахування поздовжнього опору горизонтальних елементів складного заземлювача. У висновку прийнято найбільш оптимальний метод розрахунку нееквіпотенційного ЗП, що полягає в спільному розгляді ЗП як складного електричного кола з розподіленими параметрами горизонтальних електродів, які нелінійно залежать від струму, що по ним проходить, і квазістаціонарного електричного поля в землі.

Виконана оцінка існуючих математичних моделей розподілу потенціалів по території об'єктів електроенергетики. Показано, що програми, які реалізують математичні моделі, мають обмеження у вигляді умови однорідності електронної структури землі та лінійної залежності розподілених параметрів горизонтальних електродів від струму, що протікає по ним.

Розглянуто моделі природних зосереджених заземлювачів у вигляді розрахункової сукупності еквівалентних електродів. Отримано висновок, що розрахункові еквіваленти в існуючих дослідженнях мають обмежені сфери використання, зокрема, в умовах однорідної електричної структури землі. Крім того, отримані розрахункові сукупності еквівалентних електродів в існуючих публікаціях не обґрунтовані по еквівалентним електричним характеристикам.

Отримано висновок, що для більш ефективного вирішення питань ЕМС доцільна розробка штучного електрода заземлення, який має таку ж саму площу контакту з ґрунтом як і природний зосереджений заземлювач, за умови технологічності такого рішення в умовах діючих електроустановок.

На підставі проведеного аналізу існуючих технічних та наукових підходів к питанню підвищення ефективності використання ЗП, шляхів вирівнювання потенціалів у вузлах ЗП та розвантаження по струму горизонтальних штучних та природних заземлювачів була сформульована мета дисертаційних роботи і поставлені завдання дослідження.

Другий розділ присвячений створенню математичної моделі складних ЗП електроустановок. За основу прийнято метод розрахунку нееквіпотенційного ЗП, що полягає в спільному розгляді ЗП як складного електричного кола горизонтальних електродів з розподіленими параметрами, які нелінійно залежать від струму, що проходить через них, і квазістаціонарного електричного поля в землі.

При промисловій частоті електричне поле струму, що виходить з заземлювача в землю, можна розглядати як стаціонарне. В цьому випадку струморозподіл між елементами нееквіпотенційного ЗП визначає система лінійних алгебраїчних рівнянь

$$AI_0 = U, \quad (1)$$

де A – матриця взаємних і власних опорів елементів; I_0 – матриця-стовпець комплексних значень струмів, що виходять з елементів складного заземлювача в землю; U – матриця-стовпець комплексних значень напруг елементів (для горизонтальних елементів беруть середнє із значень напруги на початку і кінці елемента, а для вертикальних елементів – напруга вузлової точки, з якою вони з'єднані).

Комплексні значення напруг елементів ЗУ пов'язані з величиною заданих струмів і з параметрами складного нелінійного електричного кола, що імітує вихідне ЗП. Визначаємо цей зв'язок за методом вузлових напруг в матричній формі (всі вузли, починаючи з опорного, в якості якого приймаємо «землю» - зону нульового потенціалу, пронумеровані від нуля до q)

$$YU_{yz} = I_{zd}, \quad (2)$$

де Y - квадратна матриця повної провідності ланцюгів; U_{yz} - матриця-стовпець вузлових напруг; I_{zd} - матриця стовпець заданих струмів.

Розрахунок складного електричного кола, що заміщує багатоелементний ЗП, зводиться до спільного вирішення двох матричних рівнянь (1) і (2), причому (2) - нелінійно.

Отримані вирази для визначення взаємних опорів елементів заземлювача які розташовані довільним чином при закладенні горизонтальних електродів як у верхньому, так і в нижньому шарі двошарової моделі землі. Обчислення виконані на підставі загальної для взаємного опору формули

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{L_i L_j} \int_{L_i} \int_{L_j} f_{0i} f_{0j} \Psi_{ij} dl_i dl_j, \quad (3)$$

де f_{0i} , f_{0j} – функції неоднорідності лінійної щільності струмів, які виходять в ґрунт, який моделюється струмопровідним напівпростором, відповідно з елементів з індексами i, j .

Вказані вирази отримані з використанням рішення задачі електричного поля точкового джерела струму в землі з двошаровою електричною структурою, коли точкове джерело розташоване в першому чи в другому шарі, а потенціал від нього визначається і в першому і в другому шарах. При цьому враховано, що зазначені вище рішення отримані за умови, що точкове джерело струму розташоване на осі циліндричної системи координат, а також враховано зв'язок між циліндричними і декартовими системами координат. Після відповідних підстановок в формулу (1) і перетворень маємо наведені нижче вирази. Питомий електричний опір шарів землі з двошаровою електричною структурою дорівнює ρ_1 і ρ_2 .

Так взаємний опір двох горизонтальних електродів, розташованих в нижньому шарі і паралельних один одному і осі OX (рис. 1)

$$\alpha_{12} = \frac{\rho_2}{4\pi \cdot l_1 l_2} \left[A_1 - k_{21} A_2 + (1 - k_{21}^2) \sum_{n=0}^{\infty} k_{21}^n A_3 \right], \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{де } A_i = & -a \ln \left| a + \sqrt{a^2 + E_i^2} \right| + \sqrt{a^2 + E_i^2} + b \ln \left| b + \sqrt{b^2 + E_i^2} \right| - \sqrt{b^2 + E_i^2} + \\ & + c \ln \left| c + \sqrt{c^2 + E_i^2} \right| - \sqrt{c^2 + E_i^2} - d \ln \left| d + \sqrt{d^2 + E_i^2} \right| + \sqrt{d^2 + E_i^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_i = & \sqrt{\alpha^2 + B_i^2} \quad i = \overline{1, 3}; \quad B_1 = z_2 - z_1; \quad B_2 = z_2 + z_1 - 2h; \quad B_3 = 2nh + z_2 + z_1; \\ \alpha = & y_1 - y_2; \quad a = x_{1К} - x_{2К}; \quad b = x_{1Н} - x_{2Н}; \quad c = x_{1Н} - x_{2К}; \quad d = x_{1Н} - x_{2Н}. \end{aligned}$$

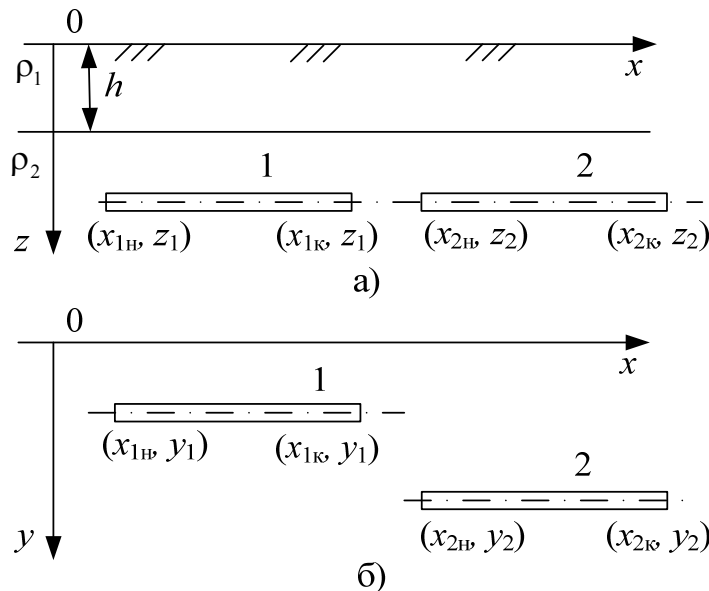


Рисунок 1 - Розташовані в нижньому шарі і паралельні один одному горизонтальні електроди: а - вид спереду; б - вид зверху

Аналогічно отримані вирази для взаємних опорів довільним чином розташованих елементів заземлювача при наступній геометрії взаємного розташування електродів:

- два горизонтальних електроди, які розташовані у верхньому шарі і паралельних осі OX ;

- два горизонтальних електрода, які розташовані у верхньому шарі і перехресних під прямим кутом, при цьому перший паралельний осі OX , а другий паралельний осі OY ;

- горизонтальний електрод, розташований у верхньому шарі і паралельний осі OX , і вертикальний електрод, що не перетинає межу розділу шарів;

- горизонтальний електрод, розташований у верхньому шарі і паралельний осі OX , і вертикальний електрод, що перетинає межу розділу шарів;

- два вертикальних електрода, що не перетинають межу розділу шарів;

- два вертикальних електрода, перший електрод розташований у верхньому шарі і не перетинає межу розділу шарів, другий електрод перетинає межу розділу шарів;

- два вертикальних електрода, які перетинають межу розділу шарів;

- два горизонтальних електрода, які розташовані в нижньому шарі і паралельні один одному і осі OX ;

- два горизонтальних електрода, які розташовані в нижньому шарі і перпендикулярні один одному, при цьому перший паралельний осі OX , а другий паралельний осі OY ;

- два горизонтальних електрода паралельних осі OX , при цьому перший електрод розташований в верхньому шарі, а другий - в нижньому шарі;

- два горизонтальних перехресних під прямим кутом електрода, при цьому перший електрод розташований у верхньому шарі і паралельний осі OX , а другий розташований в нижньому шарі і паралельний осі OY ;

- горизонтальний електрод, розташований в нижньому шарі і паралельний осі OX , і вертикальний електрод, що перетинає межу розділу шарів;

- горизонтальний електрод, розташований в нижньому шарі і паралельний осі OX , і вертикального електрода, що не перетинає межу розділу шарів.

Таким чином, отримані формули для взаємних і власних опорів електродів охоплюють всі можливі комбінації розташування електродів при розрахунках складних ЗУ в разі детального врахування природних зосереджених заземлювачів.

У **третьому розділі** запропоновано та реалізовано принцип заміщення природних зосереджених заземлювачів - арматурних каркасів фундаментів (підножників) і стійок - сукупністю прямолінійних електродів (що дозволить детально врахувати їх) при розрахунках електричних характеристик складних ЗП електроустановок.

Можливості прийнятого за основу алгоритму розрахунку складних нееквіпотенційних ЗП такі, що природні зосереджені заземлювачі (залізобетонні основи і фундаменти) заміщуються сукупністю вертикальних і горизонтальних електродів, діаметри яких приймаються такими ж, як у відповідних штучних електродів ЗП. У цьому випадку досягається ідентичність розрахункових форм всіх електродів ЗП.

Еквівалентна модель природних зосереджених заземлювачів у вигляді сукупності лінійних електродів вибирається відповідно до двох рівнозначних критеріїв: опору розтіканню й потенціалів на поверхні землі. Це обумовлено необхідністю нормування декількох параметрів ЗП - напруги дотику або опору ЗП, як однієї обов'язкової нормованої електричної характеристики, і напруги на ЗП - як другої.

При цьому в якості вихідних даних для оцінки еквівалентності обраної моделі приймаємо результати рішення крайової задачі для рівняння Лапласа стосовно аналога природного зосередженого заземлювача у вигляді суцільного провідного тіла обертання в обмеженому об'ємі землі. З огляду на те, що у зазначеного аналога рі-

шення крайової задачі виконано методом кінцевих різниць, рекомендованим в якості еталонного, а результати розрахунку електричного поля і провідності розтіканню підтверджені методами фізичного моделювання та натурних досліджень і встановлені значення похибок для такої моделі, розглядаємо її як апробовану модель.

Електричні характеристики апробованої моделі заземлювача, а саме провідність розтіканню й потенціали на поверхні землі залізобетонних стійок і фундаментів (підножників), встановлюємо методом кінцевих різниць як для суцільного провідного тіла, розміри якого визначені за відповідними геометричними характеристиками підножників або стійок (рис. 2).

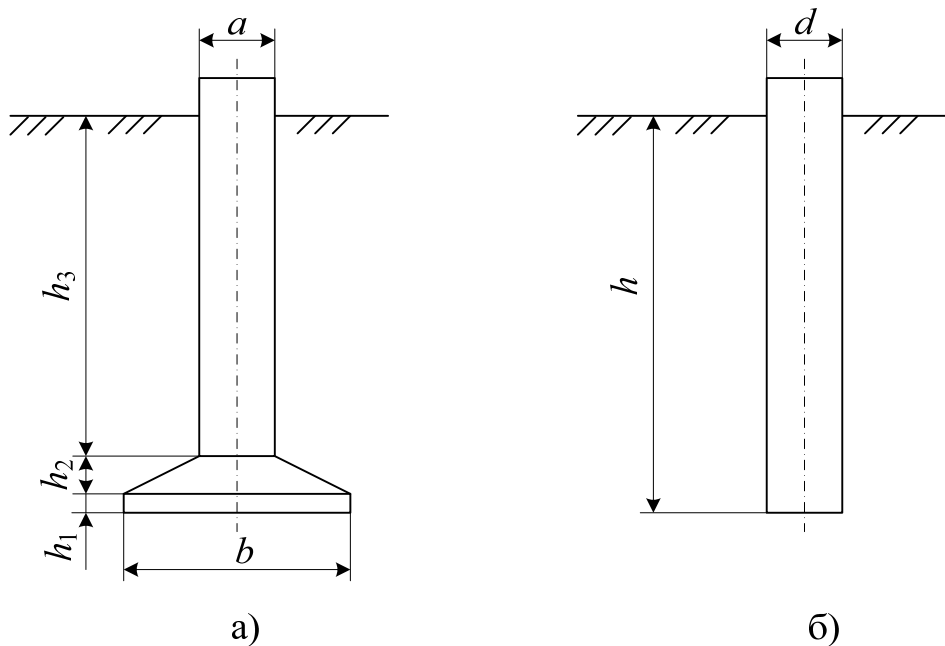


Рисунок 2 - Природні зосереджені заземлювачі: а – залізобетонний підножник; б – залізобетонна стійка

Для зазначених зосереджених заземлювачів електричні характеристики були визначені з використанням апробованої моделі аналога арматурного каркаса підножників і стійок. До того ж під час розрахунків було максимально охоплено номенклатуру конструктивних рішень заземлювачів, прийнято двошарову модель землі, а товщина верхнього шару моделі землі змінювалася дискретно так, щоб була можливість проаналізувати характеристики заземлювача в залежності від розташування границі між шарами ґрунту. При цьому був прийнятий широкий діапазон зміни співвідношень питомих опорів першого і другого шару ρ_1 / ρ_2 , а потужність (товщина) верхнього шару h змінювалася дискретно так, щоб можна було відстежити перехід розташування моделі заземлювача в двох шарах до розташування цілком у верхньому шарі. Зазначені розрахункові умови наведені в табл. 1.

З іншого боку, природний зосереджений заземлювач заміщується сукупністю прямолінійних електродів, таким чином, щоб ці електроди були розташовані по абрису природного заземлювача. Зокрема, арматурний каркас підножників заміщується сукупністю вертикальних електродів, розміри і розташування яких визначаються за відповідними геометричними характеристиками стійки підножників, і сукупністю горизонтальних електродів - відповідно до геометричних характеристик його плити.

Таблиця 1 – Характеристика електричної структури землі

Співвідношення ρ_1/ρ_2	Питомий опір верхнього шару ρ_1 , Ом·м	Товщина верхнього шару h (м), приймається для кожного з співвідношень ρ_1/ρ_2		
		Підножник Ф1-А	Підножник Ф5-2	Стілка
0,1	20	1,5; 2,75; 4,0	1,5; 2,75; 4,0	1,5; 2,75; 3,25; 4,0
1,0	20; 200			
10,0	200			

Сукупність заміщуючих електродів розташована в землі з двошаровою електричною структурою, як і відповідний їй природний зосереджений заземлювач. Число еквівалентних електродів варіюємо. Далі для зазначеної сукупності електродів розраховуємо електричні характеристики (опір розтіканню й потенціали на поверхні землі) як еквіпотенційного ЗП на підставі аналітичного визначення взаємних і власних опорів елементів заземлювача методом наведеного потенціалу та знаходження струморозподілу за елементами методом потенціалу в характерній точці, тобто шляхом вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\sum_{j=1}^N \alpha_{ij} I_j = \varphi_{3Y}, \quad i = \overline{1, N} \quad (5)$$

де α_{ij} – потенціал, який створений в точці, розташованій на поверхні i -го елемента, одиничним джерелом струму, що відповідає j -му елементу; N – число прямолінійних електродів, що заміщають арматурний каркас природного зосередженого заземлювача.

Для цього складається матриця власних і взаємних опорів сукупності еквівалентних електродів за виразами, отриманими в другому розділі також для випадку розташування горизонтальних електродів в нижньому шарі двошарової електронної структури землі.

Число прямолінійних електродів, що заміщають арматурний каркас природного зосередженого заземлювача, визначається в процесі зіставлення рівнозначних електричних характеристик (опір розтіканню й потенціали на поверхні землі) апробованої моделі заземлювача і сукупності прямолінійних електродів відповідно до прийнятих критеріїв за виразами:

- оцінка наближення по опору розтіканню,

$$\xi_R = \left| \frac{R_{c,\varepsilon} - R_{a,m}}{R_{a,m}} \right| \leq \xi_{R,\text{дон}} ; \quad (6)$$

- оцінка наближення по потенціалам точок,

$$\xi_\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\varphi_{i,c,\varepsilon} - \varphi_{i,a,m}}{\varphi_{i,a,m}} \right| \leq \xi_{\varphi,\text{дон}} . \quad (7)$$

До того ж задане наближення до характеристик апробованої моделі досягається шляхом нарощування числа електродів, що розташовуються по абрису заземлювача.

На підставі зазначеного моделювання отримано варіант заміщення конструктивного вирішення природних зосереджених заземлювачів - арматурних каркасів залізобетонних стійок, що задовольняє обґрунтованому раніше принципу заміщення за двома рівнозначними критеріями, у вигляді сукупності з чотирьох вертикальних електродів діаметром $d_{ек} = 0,02$ м. При цьому максимальна похибка визначення електричних характеристик природних заземлювачів даного конструктивного виконання становить приблизно 30%, що задовольняє умовам прийнятого наближення.

Отримано варіант заміщення природних зосереджених заземлювачів - арматурних каркасів підножників розрахунковою сукупністю з 12 електродів, розташованих по абрису підножників в тих його місцях, де проходять ребра двох призм - стійки (сукупність 4 вертикальних електродів) і бічної поверхні плити (сукупність 8 горизонтальних електродів). При цьому максимальна похибка визначення електричних характеристик розглянутих природних заземлювачів приблизно дорівнює припустимій (аналогічно попередньому зміщенню стійок).

В четвертому розділі підтверджено доцільність розробки технічного рішення у вигляді штучного електрода заземлення, що контактує з ґрунтом досить великою поверхнею, тобто електрода заземлення підвищеної провідності розтіканню, що задовольняє вимогам технологічності виконання, в тому числі, в умовах діючих електроустановок.

Запропоноване технічне рішення являє собою заглиблення вертикальних електродів заземлення 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. 3).

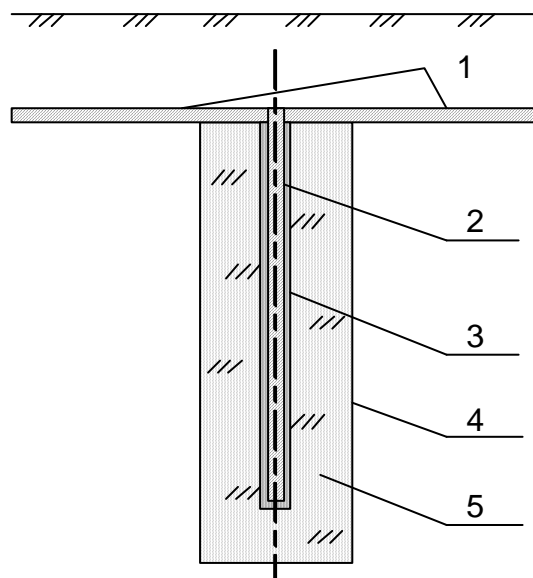


Рисунок 3 – Вертикальний електрод в обмеженому обсязі технічного вуглецю:

1 - горизонтальні електроди; 2 - вертикальний електрод; 3 - тверда струмопровідна плівка, що покриває поверхню вертикального електрода; 4 - свердловина; 5 - дрібнодисперсний технічний вуглець, що заповнює вільний об'єм свердловини

З метою визначення впливу технічного вуглецю на інтенсивність корозії сталевих елементів ЗУ, а також зміни швидкості корозії сталевих електродів ЗУ, розміщених в середовищі технічного вуглецю, при нанесенні на них струмопровідних антикорозійної плівки, були проведені дослідні випробування. В ході досліджень проведені роботи по установці експериментальних горизонтальних елементів ЗУ на підстанції «Барабашова - 110 кВ» АК «Харківобленерго». За час випробувань встановлено, що швидкість корозії сталевих електродів ЗУ, поміщеного в шарі дрібнодисперсного технічного вуглецю, більше, ніж електродів, що містяться в ґрунті. За умовами корозії рекомендовано два підходи по виконанню штучних електродів заземлення в обмеженому обсязі технічного вуглецю. Згідно з першим підходом за умовами корозії штучних електродів заземлення приймається їх мінімально припустимий переріз. Інший підхід полягає в наступному, не збільшуючи перетину електродів для підвищення корозійної стійкості на їх поверхні формується струмопровідна антикорозійна плівка.

Використання електродів заземлення підвищеної провідності розтіканню рекомендовано як варіант доведення до нормованих значень параметрів ЗУ діючих електроустановок. Розглянуті технічні рішення також вирішують задачу зниження рівнів поздовжніх струмів, що протікають по заземлювачу, тим самим, знижуючи рівень електромагнітних впливів на вторинне обладнання.

При цьому рекомендується виконувати з периферійного боку ЗУ кілька вертикальних електродів в обмеженому обсязі технічного вуглецю (рис. 4); 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 ЗУ підстанції.

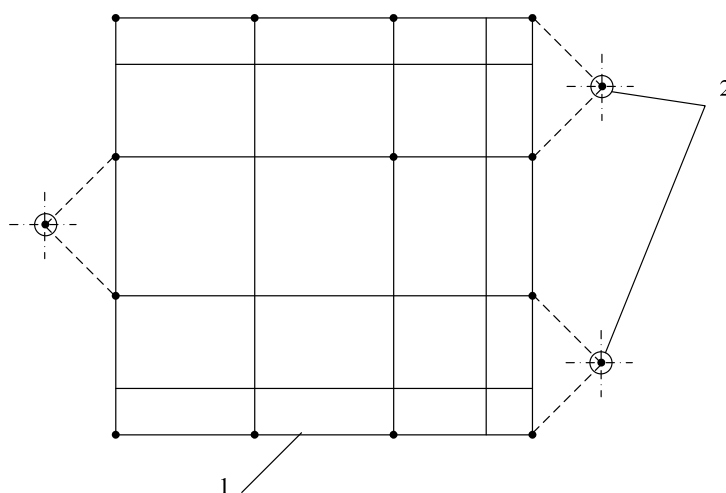


Рисунок 4 – Складний заземлювач електроустановки: 1 - вертикальні і горизонтальні електроди ЗУ електроустановки; 2 - вертикальний електрод в обмеженому обсязі технічного вуглецю

Для врахування штучних електродів підвищеної провідності розтіканню в розрахунках складних ЗП методом наведеного потенціалу запропоновані вертикальні електроди, заміщені сукупністю лінійних вертикальних електродів.

Свердловину, заповнену технічним вуглецем, з вертикальним електродом в її центрі розглядаємо як ідеальний зосереджений заземлювач з розмірами рівними ро-

змірам свердловини. Це твердження коректно, оскільки питомий опір дрібнодисперсного технічного вуглецю в стислому стані після заповнення свердловини і засипки заземлювача електроустановки зворотним ґрунтом свідомо на кілька порядків менше однойменної характеристики добре провідного ґрунту.

Приймається два критерії еквівалентності заміщення вертикального електрода заземлення підвищеної провідності розтіканню сукупністю прямолінійних елементів: наближення по опорі і наближення по потенціалам точок на поверхні землі, тобто по ξ_R - і ξ_ϕ - критеріям, визначеними за виразами відповідно (6) і (7).

Для оцінки достатності наближення в якості вихідних даних приймаються результати рішення крайової задачі для рівняння Лапласа $\nabla^2\phi = 0$ в площині rz циліндричної системи координат стосовно моделі ідеального зосередженого заземлювача в обмеженому обсязі землі. Така розрахункова модель апробована, стосовно арматурних каркасів залізобетонних фундаментів при використанні їх в якості природних зосереджених заземлювачів, і забезпечує визначення електричних характеристик з похибкою 10-13%.

Прийнято, що свердловина для вертикального електрода підвищеної провідності має розміри: глибина - 3,0 м, діаметр - 0,5 м, тобто такі розміри має ідеальний зосереджений заземлювач. Приймаємо широкий діапазон зміни співвідношення ρ_1/ρ_2 , а товщина верхнього шару h змінюється дискретно так, щоб була можливість проаналізувати параметри заземлювача в залежності від розташування межі між шарами ґрунту.

Електричні характеристики сукупності заміщаючих прямолінійних електродів визначалися за допомогою наближеного методу наведеного потенціалу.

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

Удосконалено алгоритм розрахунку складних ЗП електроустановок; від існуючих він відрізняється врахуванням електродів підвищеної провідності розтіканню як сукупності прямолінійних електродів.

Використання електродів підвищеної провідності розтіканню направлено на оптимізацію конструктивних характеристик складних ЗП електроустановок. В умовах діючих електроустановок електроди підвищеної провідності розтіканню є одним з технічних рішень по досягненню припустимих значень нормативних параметрів заземлювача, якщо зазначені параметри перевищують припустимі.

Розроблені електроди підвищеної провідності розтіканню змонтовані як експериментальні зразки на ПС «Орджонікідзе-110 кВ» АК «Харківобленерго»; спосіб виконання зазначених електродів захищений патентами України №№9874, 23105 і 27928 «Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій».

В п'ятому розділі удосконалено алгоритм розрахунку складних ЗП. В алгоритмі розрахунку складних нееквіпотенційних ЗП електроустановок нові положення, в порівнянні з відомими рішеннями, складаються в урахуванні провідності природних зосереджених заземлювачів, а також електродів заземлення підвищеної провідності

розтіканню. Для цього вказані об'ємні заземлювачі замінюються сукупністю вертикальних і горизонтальних електродів.

В алгоритмі розрахунку складних нееквіпотенційних ЗП електроустановок також забезпечено врахування величин взаємних і власних опорів горизонтальних електродів, що необхідно в разі їх розташування в нижньому шарі двошарової структури землі.

При аналізі нееквіпотенційного заземлювача система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), яка визначає струморозподіл між елементами ЗП в матричній формі має вигляд (1). Для горизонтальних елементів беруть середнє із значень напруг на початку та наприкінці елемента, а для вертикальних елементів – напругу вузлової точки, з якою він з'єднаний. Отримані в розділах 3 і 4 моделі об'ємних заземлювачів у вигляді сукупності лінійних вертикальних і горизонтальних електродів вводяться в алгоритм розрахунку складного нееквіпотенційного ЗП. Ці елементи поряд з штучними лінійними заземлювачами беруть участь в струморозподілі ЗП. При цьому позовжній опір горизонтальних електродів, які заміщають природні заземлювачі, не враховується.

З іншого боку рівняння (2) визначає зв'язок значень напруг елементів ЗП з величинами задаючих струмів і з параметрами складного нелінійного електричного кола. Розрахунок такого електричного кола, яке представляє багатоелементний ЗП, зводиться до спільного вирішення двох матричних рівнянь (1) і (2). З огляду на те, що параметри горизонтальних елементів мають нелінійну залежність від струму, що протікає по ним, рівняння (2) – нелінійно. Вертикальні елементи ЗП заміщають зосередженою провідністю на землю; також заміщають ті горизонтальні елементи, позовжній опір яких не враховується.

На наступному етапі алгоритму розрахунку горизонтальні елементи, позовжній опір яких враховується, заміщають еквівалентними П-образними схемами з зосередженими параметрами (див. рис. 5).

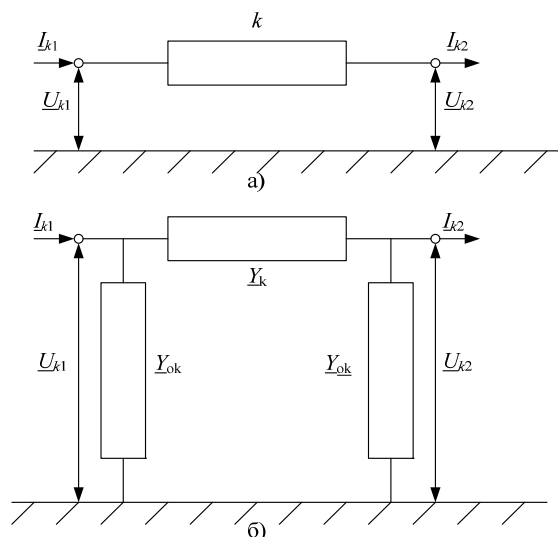


Рисунок 5 – Горизонтальний k -й елемент з розподіленими параметрами r , L , g (а) і його еквівалентна П-образна схема заміщення (б)

Зв'язок зосереджених параметрів П-подібної схеми заміщення k -го горизонтального елемента (Y_k і Y_{0k}) з його розподіленими параметрами відомий

$$\underline{Y}_k = 1/\underline{Z}_{ek} \operatorname{sh} \underline{\gamma}_k l_k ; \quad \underline{Y}_{0k} = (ch \underline{\gamma}_k l_k - 1) / \underline{Z}_{ek} \operatorname{sh} \underline{\gamma}_k l_k , \quad (8)$$

де \underline{Z}_{ek} – хвильовий опір; $\underline{\gamma}_k$ – коефіцієнт поширення.

Для першого наближення або першої ітерації заземлювач приймають еквіпотенційним і знаходять чисельні значення вектора рішення матричного рівняння (5). Далі визначають поперечні провідності G всіх горизонтальних і вертикальних елементів заземлювача; на першій ітерації вважаємо, що всі розглянуті провідності мають активний характер.

Далі, задавшись деяким початковим значенням магнітної проникності сталі електрода μ , визначають розподілені поздовжні параметри горизонтальних елементів заземлюючої сітки і параметри їх еквівалентних П-образних схем заміщення. Рішення матричного рівняння (2) при певних задаючих струмах дозволяє отримати чисельні значення вузлових напруг і розрахувати струми у всіх гілках схеми заміщення складного ЗП.

При другому наближенні напруг в вузлах і струмів в гілках схеми заміщення заземлювача, обчислені в першому наближенні, використовуються в якості додаткових вихідних даних, а саме, заземлювач представляється як нееквіпотенційний - СЛАР має вигляд (1), а зазначені вище значення струмів дозволяють уточнити магнітну проникність сталі електрода μ . Для цього уточнення величини μ використовують середнє між значеннями струму на початку і в кінці кожного горизонтального елемента з розподіленими поздовжніми параметрами. Рішення системи (2) щодо струмів в комплексній формі дозволяє далі визначити значення повних поперечних провідностей всіх елементів. Зазначені провідності мають реактивні складові, що формально пов'язане з наявністю у вузлових напруг на першій ітерації зсуву по фазі відносно один до одного. Далі по μ і визначаються розподілені поздовжні параметри тих горизонтальних елементів заземлювача, поздовжній опір яких враховується, і тощо.

Далі здійснюється визначення напруги дотику в заданих точках на поверхні землі і вхідного опору ЗП. Отримане рішення струмів у всіх гілках схеми заміщення складного ЗП дає значення струмів, які проходять по горизонтальних елементах ЗП, ці струми визначаються як середнє між значеннями струму на початку і в кінці кожного горизонтального елемента з розподіленими поздовжніми параметрами. Як результат цього – додавання в алгоритм розрахунку складних нееквіпотенційних ЗП електроустановок рішення задачі визначення рівня електромагнітної сумісності.

Достатність досягнутого наближення оцінюють за ξ -критерієм

$$\xi = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \left| \frac{U_{jo}^{(n-1)} - U_{jo}^{(n)}}{U_{jo}^{(n)}} \right| \leq \xi_{don} , \quad (9)$$

де (n) – верхній індекс, що показує номер останньої ітерації; q - число вузлів схеми заміщення заземлювача; U_{jo} – модуль напруги j -го вузла щодо опорного.

Використання запропонованого алгоритму розрахунку в електричних мережах АК «Харківобленерго» дозволяє визначити значення розподілу потенціалів при КЗ

на підстанції з урахуванням впливу провідностей природних зосереджених заземлювачів.

Визначення розрахункових значень напруги дотику і розподілу потенціалів при КЗ на території підстанції 110 кВ АК «Харківобленерго» «Світло Шахтаря» проводилося з використанням програми «Ground», яка реалізує запропонований алгоритм та містить блок врахування впливу об'ємних заземлювачів. Завдяки цьому скориговані таким чином напруги дотику дали більш точну інформацію про величини нормованих параметрів по ЗП діючих електроустановок.

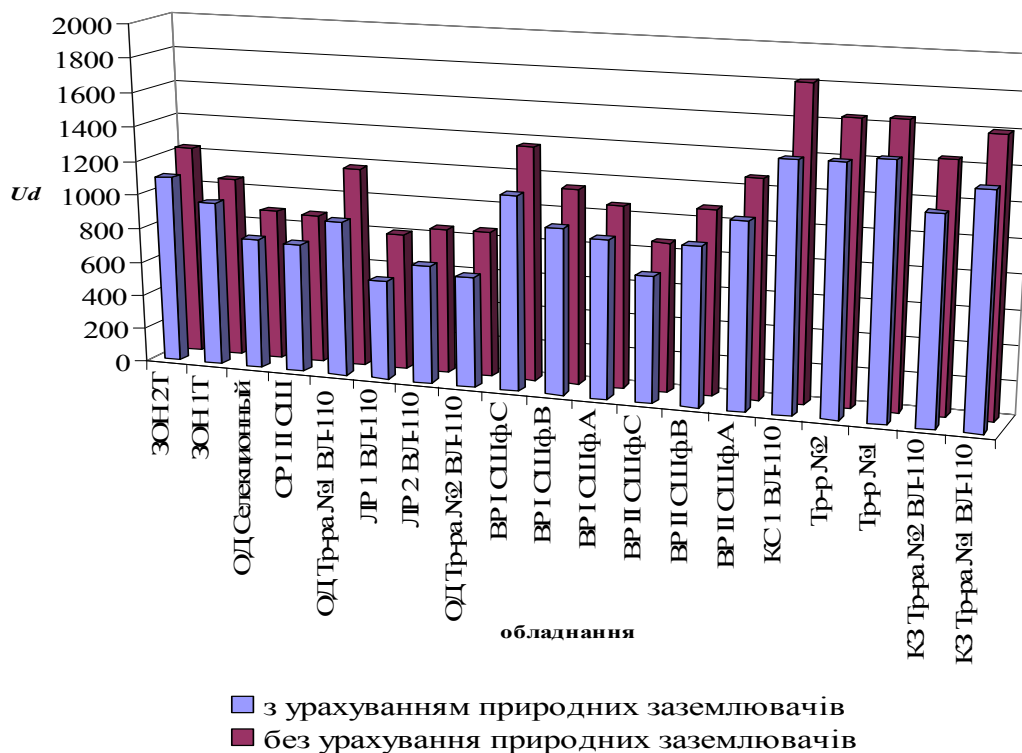


Рисунок 6 – Напруга дотику на обладнанні підстанції при КЗ

Доведено доцільність використання електродів підвищеної провідності розтіканню. Розраховано розподіл потенціалів по всій території підстанції 110 кВ «Орджонікідзе» АК «Харківобленерго» при різних аварійних ситуаціях з врахуванням встановлених на ВРУ-110 кВ електродів підвищеної провідності розтіканню. У таблиці 2 наведена напруга дотику на обладнанні підстанції при КЗ на вимикачі трансформатора №1 з урахуванням і без урахування електродів підвищеної провідності розтіканню.

Як показав аналіз результатів дослідних випробувань заземлювача ПС «Орджонікідзе - 110 кВ» [48] і вимірювання опору розтікання експериментальних зразків електродів підвищеної провідності розтіканню значення напруги в тих місцях ВРУ–110 кВ, де воно перевищувало допустимі значення, знизилося до значень менших допустимих.

Розрахунковий опір ЗП, що враховує тільки штучні заземлювачі, дорівнював 0,31 Ом [48]; розрахунковий опір експериментальних електродів підвищеної провідності розтіканню – 3,4 Ом і розрахунковий опір системи «трос-опора» двох приєднаних до ПС повітряних ліній 110 кВ – $|z_{ex}| = 1,6$ Ом (при $Re z_{ex} > Im z_{ex}$) [49]. Враховуючи вищесказане, розрахунковий опір ЗП становить 0,24 Ом. Найбільше розраху-

нкове значення падіння напруги на обладнанні при протіканні імітаційного струму 4,9 А в ЗП склало відповідно [48] 31,95 мВ; в перерахунку на струм однофазного КЗ на ВРУ-110 кВ, який дорівнює 12,02 кА, при зниженні розрахункового значення опору з 0,31 Ом до 0,24 Ом маємо найбільше значення напруги дотику 61 В, що менше гранично припустимого значення 65 В при розрахунковому часі впливу більше 1,0 с.

Таблиця 2 – Порівняння розрахункових значень напруги дотику при КЗ на вимикачі трансформатора №1

Найменування обладнання	Напруга дотику U_d , В	
	без урахування електродів	з урахуванням електродів
Тр-р №2	166,45	162,4
Тр-р №1	205,9	199,95
Р 21 Т	109,6	107,7
Р 22 Т	94,25	92,6
Р 23 Т	104	102,2
Р 24 Т	94,65	93,0
МВ 2Т	180,2	173,1
ШР 1Т	175,15	171,2
ШР 2Т	155,05	151,5
СР-1	168,35	164,3
СР-2	124,85	122,6
ЛР ВЛ-1	89,5	86,55
ЛР ВЛ-2	111,65	106,9

За допомогою запропонованого алгоритму можуть бути отримані уточнені значення падіння напруги по ЗП при КЗ, а, отже, розраховані напруги, що впливають на ізоляцію кабелів вторинних кіл, – параметри, нормовані за умовами електромагнітної сумісності.

Аналіз отриманих даних показав, що детальне врахування провідності об'ємних заземлювачів у вирішенні задачі розрахунку електричних характеристик складних нееквіпотенційних ЗУ електроустановок представляється обов'язковим, в тому числі і через необхідність зниження електромагнітних завад.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу 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, а також детального врахування природних зосереджених заземлювачів.

Виконані розробки дозволяють зробити наступні висновки:

1. Виконаний аналіз математичних моделей ЗП електроустановок дозволив обґрунтувати необхідність розгляду їх як складного електричного кола з розподіленими параметрами горизонтальних електродів, які нелінійно залежать від струму через них, і зосередженими параметрами вертикальних електродів з урахуванням квазіс-

таціонарного електричного поля зазначеного струму. Обґрунтовано необхідність еквівалентування природних зосереджених заземлювачів сукупністю прямолінійних електродів при їх розташуванні довільним чином в двошаровій моделі землі. Визначено напрямки оптимізації конструктивних параметрів ЗП при використанні вертикальних електродів підвищеної провідності розтіканню з урахуванням природних зосереджених заземлювачів.

2. Вирішена задача заміщення природних зосереджених заземлювачів у вигляді залізобетонних стійок і фундаментів (підножників) сукупністю лінійних електродів, обґрунтованої по еквівалентним електричним характеристикам, що дозволило врахувати зазначені заземлювачі в розрахунку складного ЗП.

3. Отримано розрахункові вирази для взаємних і власних опорів для потенціалів, наведеного горизонтально розташованим електродом в нижньому шарі двошарової розрахункової моделі землі, які дозволили доповнити та удосконалити існуючий алгоритм розрахунку електричних характеристик нееквіпотенційних ЗП.

4. Розроблено конструкцію штучного електрода заземлення, який відрізняється від існуючих збільшеною площею контакту його поверхні з ґрунтом, за рахунок чого електрод заземлення дістав спроможність підвищеної провідності розтіканню, що дозволило оптимізувати конструктивні характеристики складних ЗУ, в тому числі, в умовах діючих електроустановок.

5. Отримав подальший розвиток метод моделювання електрода ЗП підвищеної провідності розтіканню як розрахункової сукупності прямолінійних електродів, шляхом досягнення заданого наближення електричних характеристик в процесі нарощування сукупності прямолінійних електродів до рівнозначних характеристик еталонної моделі, що дозволило врахувати зазначені заземлювачі в розрахунку складного ЗП.

6. Удосконалено алгоритм розрахунку складних ЗП електроустановок, який відрізняється від існуючих урахуванням природних зосереджених заземлювачів, таких як залізобетонні стійки і фундаменти (підножники), та електродів підвищеної провідності розтіканню як сукупності прямолінійних електродів, що дало можливість отримати уточнені параметри ЗП електроустановок.

7. Результати наукових досліджень, захищені патентами України №№9874, 23105 і 27928 «Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій», а також практичних розробок, які виконані у дисертаційній роботі, впроваджені як дослідно-промислові зразки на ПС «Орджонікідзе-110 кВ» АК «Харківобленерго» та використовуються в навчальному процесі кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХПІ» для підготовки студентів за спеціальністю 05070102 – «Електричні системи і мережі».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Федосеенко Е. Н. Замещение естественных сосредоточенных заземлителей совокупностью электродов при расчетах электрических характеристик сложных заземляющих устройств электроустановок / А.А. Минченко, Е. Н. Федосеенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тем. випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – №7. – С. 121-124.

Здобувачем запропоновано принцип заміщення природних зосереджених заземлювачів сукупністю прямолінійних.

2. Федосеенко Е. Н. Учет естественной проводимости растеканию тока с арматуры железобетонных стоек при расчетах сложных заземляющих устройств электроустановок с помощью совокупности вертикальных электродов / А. А. Минченко, Е. Н. Федосеенко // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Тем. випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – №28 – С. 97-100.

Здобувачем отримано і проаналізовано величини потенціалів точок на поверхні землі і значення опору розтікання моделей залізобетонних стійок, які було використано як вихідні дані для оцінки достатності наближення при заміщенні сукупністю прямолінійних електродів.

3. Федосеенко Е. Н. Определение взаимных и собственных сопротивлений вертикальных и горизонтальных электродов сложных заземлителей в двухслойной земле / Е.Н. Федосеенко // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Тем. випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – №34 – С. 84-91.

4. Федосеенко Е. Н. Вариант замещения естественных сосредоточенных заземлителей – арматурных каркасов железобетонных фундаментов (подножников) в виде расчетной совокупности электродов / Е. Н. Федосеенко, А. А. Минченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний центр. - 2006. – №6/3(24). – С. 81-83.

Здобувачем отримано і проаналізовано значення потенціалів точок на поверхні землі і значення опору розтікання моделей залізобетонних фундаментів (підножників), які можливо використовувати як вихідні дані для оцінки достатності наближення при заміщенні сукупністю прямолінійних електродів.

5. Федосеенко Е. Н. Поправка на конечные размеры объема земли при решении краевой задачи для уравнения Лапласа с целью определения электрических характеристик идеальных сосредоточенных заземлителей / Е. Н. Федосеенко // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Автоматика и приборостроение. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2007. – № 37. – С. 98-101.

6. Федосеенко Е. Н. Вертикальные электроды заземления повышенной проводимости растеканию и их замещение при расчетах электрических характеристик сложных комбинированных заземлителей / Е. Н. Федосеенко, А. А. Минченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: «Технол. центр». – 2007. – №6/5(30) – С. 56-59

Здобувачем обґрунтовано еквівалентну модель у вигляді сукупності кінцевого числа прямолінійних електродів по рівнозначним електричним характеристикам зазначених електродів і власне вертикального заземлювача підвищеної провідності розтікання.

7. Федосеенко Е. Н. Возможный вариант достижения нормируемых значений применительно к заземляющим устройствам действующих электроустановок / Е. Н. Федосеенко, А. А. Минченко, Андр. А. Минченко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. пр. / Кіровоград. нац. техн. ун-т; відп. ред. М. І. Черновол. – Кіровоград: КНТУ, 2007. –

Вип. 19. – С 255-259.

Здобувачем отримано технічні рішення, які можуть бути використані для досягнення припустимих значень нормованих параметрів стосовно заземлюючих пристроїв електричних станцій і підстанцій з відкритими розподільними пристроями.

8. Федосеєнко Е. Н. Экспериментальное подтверждение варианта замещения вертикального электрода повышенной проводимости / Е. Н. Федосеєнко // Вестник НТУ «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Энергетика: надёжность и энергоэффективность. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2013. – № 59 (1032). – С. 131-136.

9. Федосеєнко О. М. Вплив природних заземлювачів на розподіл потенціалів на території підстанції «Світло шахтаря» АК «Харківобленерго» / О. М. Федосеєнко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 175 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»: зб. наук. пр. – Харків: ХНТУСГ. – 2016. – Вип. 175. – С. 36-37.

10. Федосеєнко Е. Н. Совершенствование алгоритма расчета сложных неэкви-потенциальных заземляющих устройств электроустановок с учетом проводимости естественных заземлителей / Е. Н. Федосеєнко, К. А. Старков // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків, 2017. – №4. – С. 66-71.

Здобувачем удосконалено алгоритм розрахунку електричних характеристик нееквіпотенційних ЗП електроустановок з огляду на велику кількість природних зосереджених заземлювачів, а також з урахуванням власних активних і реактивних опорів горизонтальних електродів.

11. Федосеєнко О. М. Спосіб підвищення провідності розтіканню вертикальних заземлювачів електроустановок / О. М. Федосеєнко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 186 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»: зб. наук. пр. – Харків: ХНТУСГ. – 2017. – Вип. 186. – С.44-46.

12. Федосеєнко Е. Н. Использование моделей естественных сосредоточенных заземлителей при определении распределения потенциала на территории высоковольтной подстанции / Е. Н. Федосеєнко, В. Е. Бондаренко, А. И. Ганус, К. А. Старков // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Энергетика, надійність та енергоефективність : зб. наук. пр. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 10 (1286). – С. 82-86.

Здобувачем запропоновано технічне рішення реконструкції заземлюючих пристроїв діючих електроустановок з метою приведення величин нормованих параметрів до припустимих значень.

13. Пат. 9874 Україна, МПК⁷ Н 02 В 1/16. Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій / Федосеєнко О. М., Кисельов Є. Т., Мінченко А. А., Яровий В. М., Калінін Є. М. Заявник і власник патенту НТУ «ХПИ». – №u200503473 ; заявл. 13.04.2005 ; опубл. 17.10.2005, Бюл. №10. – 7с. : іл.

Здобувачем запропоновано спосіб виконання вертикальних електродів заземлення підвищеної провідності розтіканню, який полягає в тому, що при заглибленні електродів слід заповнювати свердловину технічним вуглецем.

14. Пат. 23105 Україна, МПК⁷ Н 02 В 1/16. Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій / Мінченко А. А., Федосеєн-

ко О. М., Мінченко Андр. А., Яровий В. М. Заявник і власник патенту НТУ «ХП». – №u200612746 ; заявл. 04.12.2006 ; опубл. 10.05.2007, Бюл. №6. – 7с. : іл.

Здобувачем запропоновано спосіб виконання вертикальних електродів заземлення підвищеної провідності розтіканню, який полягає в тому, що при поглибленні вертикальних електродів заземлення слід заповнювати свердловину з електродом заземлення технічним вуглецем, а перед поглибленням поверхню сталевих вертикальних електродів покривати рідкою композицією, яку необхідно висушувати до утворення твердої струмопровідної плівки.

15. Пат. 27928 Україна, МПК⁷ Н 02 В 1/16. Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій / Мінченко А. А., Мінченко Андр. А., Федосеєнко О. М., Яровий В. М. Заявник і власник патенту НТУ «ХП». – №u200704865 ; заявл. 03.05.2007 ; опубл. 26.11.2007, Бюл. №19. – 7с. : іл.

Здобувачем запропоновано метод вдосконалення конструктивних параметрів складних заземлюючих пристроїв електроустановок, який полягає в тому, що при поглибленні вертикальних і горизонтальних електродів заземлення слід заповнювати свердловину і траншею з електродами заземлення технічним вуглецем.

16. Федосеєнко О. М. Удосконалювання заземлювальних пристроїв електроустановок за допомогою електродів підвищеної провідності розтіканню й урахування природних зосереджених заземлювачів / О. М. Федосеєнко, А. А. Мінченко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: материалы Восьмой ежегодной международной промышленной конференции, Славское, 11-15 февраля 2008г. – Киев : УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2007 – С. 432-434.

Здобувачем запропоновано метод вдосконалення конструктивних параметрів складних заземлюючих пристроїв електроустановок, який полягає в тому, що при поглибленні вертикальних і горизонтальних електродів заземлення слід заповнювати свердловину і траншею з електродами заземлення технічним вуглецем.

17. Федосеєнко О. М. Підвищення точності визначення електричних характеристик заземлювальних пристроїв електроустановок шляхом повного моделювання об'ємних зосереджених заземлювачів / О. М. Федосеєнко, А. А. Мінченко, К. Г. Губська // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : наук. вид. : тези доп. XX міжнар. наук.-практ. конф., 15-17 травня 2012 р. : у 4 ч. Ч. 2 / ред. Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ. – Харків : НТУ "ХП", 2012. – С. 235.

Здубувачем розроблена математична модель складних заземлюючих пристроїв електроустановок, яка враховує об'ємні заземлювачі, а також електроди підвищеної провідності розтіканню у вигляді сукупності прямолінійних електродів, що дає можливість отримати уточнені параметри заземлюючих пристроїв електроустановок

18. Федосеєнко Е. Н. Способ обеспечения нормальных значений электрических характеристик заземлителя подстанции «Орджоникидзевская – 110 кВ» АК «Харьковоблэнерго» / Е. Н. Федосеєнко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD–2013) : наук. вид. : тези доп. 21-ї міжнар. наук.-практ. конф., 29-31 травня 2013 р. : у 4 ч. Ч. 2 / ред. Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ. – Харків : НТУ «ХП», 2013. – С. 231.

19. Федосеєнко Е. Н. Учет моделей естественных заземлителей в алгоритме расчета заземляющих устройств электроустановок / Е. Н. Федосеєнко // Інформацій-

ні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ (18-20 травня 2016 р., Харків) / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків, НТУ «ХПІ», 2016. – С. 185.

20. Федосеєнко Е. Н. Расчет сложных заземляющих устройств электроустановок с учетом проводимости естественных заземлителей / Е. Н. Федосеєнко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ (17-19 травня 2017 р., Харків) / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків, НТУ «ХПІ», 2017. – С. 246.

АНОТАЦІЇ

Федосеєнко О.М. Визначення електричних характеристик заземлювальних пристроїв електроустановок на основі повного моделювання об'ємних заземлювачів. 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, 2018 р.

Дисертацію присвячено вдосконаленню заземлюючих пристроїв електроустановок шляхом оптимізації конструктивних параметрів складних комбінованих заземлювачів за допомогою використання штучних електродів заземлення підвищеної провідності розтіканню, а також детального врахування природних зосереджених заземлювачів.

В роботі виконано аналіз математичних моделей заземлюючих пристроїв електроустановок.

Вирішено задачу заміщення природних зосереджених заземлювачів сукупністю лінійних електродів. Удосконалено існуючий алгоритм розрахунку їх електричних характеристик.

Розроблено конструкцію штучного електрода заземлення підвищеної провідності розтіканню зі збільшеною площею контакту його поверхні з ґрунтом.

Запропоновано метод моделювання електродів заземлюючих пристроїв підвищеної провідності розтіканню як розрахункової сукупності прямолінійних електродів. Виконано оптимізацію їх конструктивних характеристик. Створено математичну модель нееквіпотенційних заземлюючих пристроїв.

Ключові слова: заземлюючий пристрій, провідність розтіканню, взаємний і власний опір, магнітна проникність, розподілені параметри, електроустановка, наведений потенціал, математична модель, нелінійна залежність.

Федосеєнко А.М. Определение электрических характеристик заземляющих устройств электроустановок на основе полного моделирования объемных заземлителей. 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, 2018 г.

Диссертация посвящена совершенствованию заземляющих устройств электроустановок путем оптимизации конструктивных параметров при проектировании или при доведении до нормативных значений параметров сложных комбинированных

заземлителей действующих электроустановок за счет использования искусственных электродов заземления повышенной проводимости растекания с учётом естественных сосредоточенных заземлителей.

В работе выполнен анализ математических моделей заземляющих устройств электроустановок. Обоснована необходимость рассмотрения заземляющих устройств как сложной электрической цепи с распределенными параметрами, включающей горизонтальные электроды, сопротивление которых нелинейно зависит от тока через них, и сосредоточенных параметров вертикальных электродов. Обоснована необходимость эквивалентирования естественных сосредоточенных заземлителей совокупностью прямолинейных электродов, расположенных произвольным образом в двухслойной модели земли. Определены направления оптимизации конструктивных параметров заземляющих устройств, использующих вертикальные электроды повышенной проводимости растекания, которые учитывают параметры естественных сосредоточенных заземлителей.

Впервые решена задача замещения естественных сосредоточенных заземлителей в виде железобетонных стоек и фундаментов (подножников) совокупностью линейных электродов, обоснованной по эквивалентным электрическим характеристикам, включающим такие критерии эквивалентности как приближение по сопротивлению и приближение по потенциалам точек на поверхности земли, применительно к двухслойной модели электрической структуры земли.

Впервые получены расчетные выражения взаимных и собственных сопротивлений для потенциала, наведенного горизонтально расположенным электродом в нижнем слое двухслойной расчетной модели земли.

Получены аналитические выражения, с помощью которых усовершенствован существующий алгоритм расчета электрических характеристик неэквипотенциальных заземляющих устройств.

Усовершенствована конструкция искусственного электрода заземления, который отличается от существующих размещением его в центре скважины, которая заполняется мелкодисперсным техническим углеродом, за счет чего электрод заземления получил возможность повышенной проводимости растеканию, удовлетворяющего требованиям технологичности выполнения, в том числе, в условиях действующих электроустановок.

Предложен метод моделирования электрода заземляющего устройства повышенной проводимости растеканию как расчетная совокупность прямолинейных электродов.

Усовершенствована конструкция сложных заземляющих устройств, оптимизация конструктивных характеристик которых обеспечена за счет использования электродов повышенной проводимости растеканию.

Усовершенствован алгоритм расчета сложных заземляющих устройств электроустановок, который отличается от существующих учетом электродов повышенной проводимости растеканию и естественных сосредоточенных заземлителей, таких как железобетонные стойки и фундаменты (подножники), совокупностью линейных электродов, получены расчетные выражения взаимных и собственных сопротивлений при расположении горизонтальных электродов в нижнем слое двухслойной расчетной модели земли.

Результаты научных исследований, защищены патентами Украины №№ 9874, 23105 и 27928 «Способ выполнения заземляющих устройств электрических станций

и подстанций», а также практических разработок, выполненных в диссертационной работе, внедрены как опытно-промышленные образцы на ПС 110 кВ АК «Харьково-блэнерго» и используются в учебном процессе кафедры передачи электрической энергии НТУ «ХПИ» при подготовке студентов по специальности 05070102 - «Электрические системы и сети».

Ключевые слова: заземляющее устройство, проводимость растеканию, взаимные и собственные сопротивления, магнитная проницаемость, распределённые параметры, электроустановка, наведенный потенциал, математическая модель, нелинейная зависимость.

Fedoseyenko O.M. The Determination of electrical characteristics of grounding connections of electrical installations on the basis of volumetric grounds full modeling. Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.02 - Electric stations, networks and systems. - National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to the important scientific and applied problem solution in improving the electrical installations grounding devices by optimizing the design parameters of complex combined grounding systems of projected or existing electrical installations by using manufactured high conductivity ground electrodes, as well as by taking into account natural concentrated grounds.

The thesis research analyzes mathematical models of non-equipotential arbitrary-shaped grounding device for getting grounding grid normalized parameters.

The new engineering solution is got is the grounding electrode of increased current spreading conductivity, which will be realized as a vertical electrode with current installing antirust coating, placed in the limited volume of fine-dyspersated technical carbon.

The mathematical model of non-potential grounding device of electrical installations has been built, which differs from the existing taking into account of volumetric grounding, located in a conducting two-layer semi-space. The developed model allows the introduction of natural grounding, as well as a vertical electrode of high conductivity, in grounding device normalized parameters computation, by the set of rectilinear electrodes.

Key words: high conductivity ground electrode, reciprocal and its own resistance, permeability, distributed parameters, electrical installation, given the potential mathematical model, nonlinear dependence.

