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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ФЕДОСЕЄНКО ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА

УДК 621.316

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.14.02 – «Електричні станції, мережі і системи»
14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Федосеєнко О.М.

Науковий керівник
Бондаренко Володимир Омелянович,
д.т.н., професор.

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Федосеєнко О.М. Визначення електричних характеристик заземлювальних пристроїв електроустановок на основі повного моделювання об'ємних заземлювачів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи (141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України, Харків, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню важливої науково-прикладної проблеми з вдосконалення заземлювальних пристроїв електроустановок шляхом оптимізації конструктивних параметрів при проектуванні або при доведенні до нормативних значень параметрів складних комбінованих заземлювачів діючих електроустановок шляхом використання штучних електродів заземлення підвищеної провідності розтіканню, а також шляхом урахуванням природних зосереджених заземлювачів.

У дисертаційній роботі проведено аналіз математичних моделей заземлювальних пристроїв, результатом розрахунку яких є напруга дотику, напруга на заземлювальному пристрої та його опір. Показана актуальність науково-технічного обґрунтування вибору напрямку оптимізації конструктивних параметрів заземлювальних пристроїв діючих високовольтних енергооб'єктів.

На основі аналізу сучасного стану проблеми було сформульовано задачі для вдосконалення математичних моделей заземлювальних пристроїв. Поставлені завдання були вирішені на основі розрахункових, теоретичних та експериментальних досліджень на діючих високовольтних енергооб'єктах України. При цьому були використані дослідження з послідовним

застосуванням методу наведеного потенціалу і методів розрахунку розгалужених електричних кіл з розподіленими параметрами, методи теорії електромагнітного поля, методика вирішення задачі про потенціал електричного поля точкового джерела електричного струму для створення математичної моделі нееквіпотенційного заземлювального пристрою; методи теорії матриць, вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь та програмування при реалізації математичних моделей; методи фізичного експерименту при перевірці теоретичних висновків.

Вперше запропоновано метод заміщення природного зосередженого заземлювача сукупністю електродів для урахування природної провідності розтіканню струму з арматури залізобетонних стійок і підножників при розрахунках складних заземлювальних пристроїв електроустановок. Еквівалентна модель у вигляді сукупності лінійних електродів вибирається відповідно до двох рівнозначних критеріїв, враховуючи такі електричні характеристики у двошаровій землі, як наближення по опору і наближення по потенціалу точок на поверхні землі.

Вперше запропоновано метод вдосконалення (оптимізації) конструктивних параметрів заземлювальних пристроїв із використанням електродів підвищеної провідності розтіканню. Отримано нове технічне рішення – електрод заземлення підвищеної провідності розтіканню, який реалізується як вертикальний електрод з струмопровідних антикорозійним покриттям, розміщений в обмеженому обсязі дрібнодисперсного технічного вуглецю. Розв'язана задача заміщення зазначеного електрода.

Побудована математична модель нееквіпотенційного заземлювального пристрою електроустановок, яка відрізняється від існуючих урахуванням об’ємних заземлювачів, розташованих у провідному двошаровому напівпросторі. Вказана модель дозволяє ввести природні заземлювачі, а саме стійки та підножники, а також вертикальний електрод підвищеної провідності розтіканню в розрахунок нормованих параметрів заземлювального пристрою у вигляді сукупності прямолінійних електродів.

Для досить повного врахування всіх істотних сторін, що впливають на формування електричних характеристик складного комбінованого заземлювача, запропонована математична модель, що базується на спільному розгляді ЗП як складного електричного кола з розподіленими параметрами горизонтальних електродів, що нелінійно залежать від струму в них, і зосередженими параметрами вертикальних електродів і квазістаціонарного електричного поля струму в землі. Розроблена модель дає можливість отримати уточнені параметри заземлювального пристрою електроустановок.

Розроблена математична модель розрахунку наведеного потенціалу електроду, розташованого в нижньому шарі двошарової розрахункової моделі землі, а також на довільній відстані від поверхні землі у двошаровому ґрунті, на основі рішення задачі про потенціал електричного поля точкового джерела струму. Отримано аналітичні вирази взаємних і власних опорів вертикальних і горизонтальних електродів для розрахунків складних заземлювальних пристроїв стосовно вказаного випадку розташування горизонтальних електродів.

Розроблено метод моделювання електрода заземлювального пристрою підвищеної провідності розтікання як розрахункової сукупності прямолінійних електродів, який відрізняється від існуючих обґрунтуванням на основі досягнення заданого наближення електричних характеристик в процесі нарощування сукупності прямолінійних електродів до рівнозначних характеристик еталонної моделі, що дозволяє врахувати зазначені заземлювачі в розрахунку складного заземлювального пристрою.

На основі створених математичних моделей розроблено програмні засоби, які було використано при розрахунку електричного поля:

- для рішення крайової задачі для рівняння Лапласа стосовно моделі природного зосередженого заземлювача в обмеженому обсязі двошарової землі: для визначення значення потенціалів точок на поверхні землі і значення опору розтікання – вихідні дані для оцінки достатності наближення

при заміщенні природних зосереджених заземлювачів сукупністю прямолінійних електродів.

- для розрахунку числа еквівалентних електродів, що заміщають арматурний каркас природного зосередженого заземлювача: для знаходження опору розтікання прийнятої сукупності, а також на визначенні потенціалів, створюваних кожним із сукупності прямолінійних електродів в контрольних точках на поверхні землі – для знаходження значення потенціалів в зазначених вище точках.

Розроблено методику визначення розподілу струмів короткого замикання по магістралях заземлювального пристрою електроустановки і потенціалів у вузлах заземлення. Показано, що використання удосконаленого рішення вказаної задачі дає можливість виявити найбільш безпечні з точки зору електромагнітної сумісності ділянки території електроустановки для прокладки на них інформаційних і керуючих кіл.

Удосконалено алгоритм розрахунку складних нееквіпотенційних заземлювальних пристроїв, що дозволяє отримати уточнені значення розподілу потенціалу на території електроустановки. Нові положення, в порівнянні з відомими рішеннями, складаються в обліку провідності об’ємних заземлювачів сукупністю вертикальних і горизонтальних електродів, що обґрунтована по рівно-значним електричним характеристикам стосовно двошарової моделі електронної структури землі. Використання запропонованого алгоритму розрахунку в електричних мережах АК «Харківобленерго» дозволили визначити значення розподілу потенціалів при короткому замиканні (КЗ) на електричній підстанції з урахуванням впливу провідності природних зосереджених заземлювачів. Скориговані таким результати розрахунку дадуть більш точну інформацію про величини нормованих параметрів заземлювальних пристроїв діючих електроустановок. За допомогою запропонованого алгоритму можуть бути отримані уточнені значення падіння напруги по заземлювальним пристроям при КЗ, а, отже,

розраховані напруги, що впливають на ізоляцію кабелів вторинних кіл, - параметри, нормовані за умовами електромагнітної сумісності.

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 ВРП-110 кВ підстанції, де вони перевищували припустимі, до значень які суттєво менше припустимих;

Удосконалений алгоритм розрахунку складних нееквіпотенціальних заземлювальних пристроїв та окремі задачі моделювання об'ємних заземлювачів були оформлені як дипломні роботи.

Ключові слова: заземлювальний пристрій, електричні характеристики, нормовані параметри, провідність розтіканню, взаємний і власний опір, електрод заземлення, електроустановка, наведений потенціал, математична модель.

Список публікацій здобувача 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.

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.

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.

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.

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. / Кіровогр. нац. техн. ун-т; відп. ред. М. І. Черновол. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – Вип. 19. – С 255-259.

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

9. Федосеенко Е. Н. Совершенствование алгоритма расчета сложных неэквипотенциальных заземляющих устройств электроустановок с учетом проводимости естественных заземлителей / Е. Н. Федосеенко, К. А. Старков // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків, 2017. – №4. – С. 66-71. doi: 10.20998/2074-272X.2017.4.11.

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

11. Федосеенко Е. Н. Влияние естественных заземлителей на распределение потенциалов на территории подстанции «Свет Шахтера» АК «Харьковоблэнерго» / Е. Н. Федосеенко // Вісних 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.

12. Федосеєнко О. М. Спосіб підвищення провідності розтіканню вертикальних заземлювачів електроустановок / О. М. Федосеєнко // Вісних 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.

13. Пат. 9874 Україна, МПК^7 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 «ХПІ». – №u200503473 ; заявл. 13.04.2005 ; опубл. 17.10.2005, Бюл. №10. – 7с. : іл.

14. Пат. 23105 Україна, МПК^7 Н 02 В 1/16. Спосіб виконання заземлювальних пристроїв електричних станцій та підстанцій / Мінченко А. А., Федосеєнко О. М., Мінченко Андр. А., Яровий В. М. Заявник і власник патенту НТУ «ХПІ». – №u200612746 ; заявл. 04.12.2006 ; опубл. 10.05.2007, Бюл. №6. – 7с. : іл.

15. Пат. 27928 Україна, МПК^7 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 «ХПІ». – №u200704865 ; заявл. 03.05.2007 ; опубл. 26.11.2007, Бюл. №19. – 7с. : іл.

16. Федосеєнко О. М. Удосконалювання заземлювальних пристроїв електроустановок за допомогою електродів підвищенної 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.

17. Федосеєнко О. М. Підвищення точності визначення електричних характеристик заземлювальних пристроїв електроустановок шляхом повного моделювання об’ємних зосереджених заземлювачів / О. М. Федосеєнко, Мінченко А. А., Губська К. Г. // 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 "ХПІ", 2012. – С. 235.

18. Федосеенко Е. Н. Способ обеспечения нормальных значений электрических характеристик заземлителя подстанции «Орджоникидзевская – 110 кВ» АК «Харьковоблэнерго» / Е. Н. Федосеенко // 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 "ХПІ", 2013. – С. 231.

19. Федосеенко Е. Н. Учет моделей естественных заземлителей в алгоритме расчета заземляющих устройств электроустановок / Е. Н. Федосеенко // Інформаційні 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. Федосеенко Е. Н. Расчет сложных заземляющих устройств электроустановок с учетом проводимости естественных заземлителей / Е. Н. Федосеенко // 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.

ABSTRACT

Fedoseyenko O.M. The Determination of electrical characteristics of grounding connections of electrical installations on the basis of volumetric grounds full modeling. On the 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», Kharkov, 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 arbitraryshaped grounding device for getting grounding grid normalized parameters, namely, touch voltage, grounding device voltage and its resistance. Scientific and technological justification of option selection for the optimization high-voltage power facilities grounding grids is shown urgent.

On the basis of the problem actual state analysis, problems of grounding grid mathematical modeling were formulated. The problems posed have been solved by means of calculations, theoretical and experimental research at the active high-voltage power facilities of Ukraine.

Have been applied induced potential method and methods for computing branched electrical circuits with distributed parameters, a technique of solving a point electrical current source electric potential problem, so as to create a mathematical model for a non-equipotential. In addition, methods of matrix theory, linear system solving, and programming for mathematical model realization have been employed along with physical testing methods for theoretical conclusions verification.

The method of natural concentrated grounds substitution by the set of electrodes taking natural current spreading conductivity of concrete pole armature into account for complicated grounding connections calculation is offered. An equivalent model as a set of linear electrodes in accordance with equivalent electric characteristics such as the resistance approximation and the approach of the points potential on the earth surface in two-layer ground is chosen.

The optimization method of ground grid structural parameters with the use of grounding electrodes of increased current spreading conductivity has been invented. 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 task of its substitution by the set of electrodes for calculation of complicated unequipotential grounding connections has been solved.

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, namely racks and soles, as well as a vertical electrode of high conductivity, in grounding device normalized parameters computation, by the set of rectilinear electrodes. The introduced model makes it possible to get the grounding device specified parameters.

Based on the solution to the electric potential problem for a point electrical current source, a mathematical model of the induced potential calculation for electrode, located in the lower layer of a two-layered model of land, as well as at an arbitrary distance from the surface of the earth in a two-layered soil, has been built. Expressions of mutual and own resistances of vertical and horizontal electrodes for calculation of complicated grounding connections as it applies to the location of horizontal electrodes in the understratum of two-layer electric structure of earth are got.

On the basis of the created mathematical models, the software tools that were used in calculating the electric field were developed.

- solving the boundary value problem for the Laplace equation with respect to the model of a natural concentrated grounds in a limited volume of two-layered earth: to determine the points potential on the earth surface and the spreading resistance value - the initial data for the natural lumped grounding modeling by a set of rectilinear electrodes.

- computation the equivalent electrodes sets that model the natural concentrated grounds reinforcing frame: to find the spreading resistance of the adopted set, as well as to determine the potentials created by each of the rectilinear electrodes sets at control earth surface points - to find the points potentials at the indicated above.

The technique for determining the short-circuit currents distribution along the electrodes and potentials in the nodes of the electrical installation grounding device has been developed. It is shown that the developed solution use of the given problem makes it possible to reveal the most safe in terms of electromagnetic compatibility of the electrical installation area for laying information and control circles on them.

The algorithm for calculating complex nonequipotential grounding grids in view of volumetric grounders electrical conductivity has been Improved. The method of natural concentrated grounders substitution by the set of electrodes taking them into account in the algorithm of electric characteristics calculation for complicated grounding connections of electric installation is offered. An equivalent model as a set of linear electrodes are chosen in accordance with two criteria: leakage resistance and potentials on the ground surface. We have obtained the algorithm for calculating complex nonequipotential grounding connections, which makes it possible to obtain refined values of the potential distribution in the electric stations and substations with outdoor switchgear. For the first time, we have taking into account the conductivity of natural concentrated grounds by a set of vertical and horizontal electrodes based on equivalent electrical characteristics

applied to a two-layer ground. The using of the proposed calculation algorithm in the electric grids of JSC "Kharkivoblenergo" made it possible to determine the values of the potential distribution at short circuit in an electrical substation taking into account the influence of the conductivity of natural concentrated grounds.

Developed electrodes of increased current spreading conductivity are mounted as experimental and industrial samples at Substation Ordzhonikidze-110 kV, JSC "Kharkivoblenergo". Their application ensured reduction of the design values of the contact voltage in those places on the GRP-110 kV substation, where they exceeded the permissible ones, to values significantly lower than the permissible ones;

List of publications of the aspirant by the dissertation theme:

1. Fedoseenko E. N. Minchenko A.A. Zameshchenie estestvennykh sosredotochennykh zazemlitelei sovokupnost'iu elektrodov pri raschetakh elektricheskikh kharakteristik slozhnykh zazemliaiushchikh ustroistv elektroustanovok [Natural concentrated groundings modeling by the set of electrodes in electrical characteristics calculations of electrical installations grounding devices] Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2006, no. 7. pp. 121-124.

2. Fedoseenko E. N. Minchenko A. A. Uchet estestvennoi provodimosti rastekaniiu toka s armatury zhelezobetonnykh stoek pri raschetakh slozhnykh zazemliaiushchikh ustroistv elektroustanovok s pomoshch'iu sovokupnosti vertikal'nykh elektrodov [Accounting of natural conductivity to current spreading from post concrete reinforcement in the calculation of electrical installations grounding devices by the set of vertical electrodes.] Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2006. no.28 pp. 97-100.

3. Fedoseenko E. N. Opredelenie vzaimnykh i sobstvennykh soprotivlenii vertikal'nykh i gorizontal'nykh elektrodov slozhnykh zazemlitelei v dvukhsloinoi

zemle [Determination transfer and self-resistance of vertical and horizontal electrodes for grounding devices in two-layer earth] // Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2006. no. 34 pp. 84-91.

4. Fedoseenko E. N. Minchenko A. A. Variant zameshcheniia estestvennykh sosredotochennykh zazemlitelei – armaturnykh karkasov zhelezobetonnykh fundamentov (podnozhnikov) v vide raschetnoi sovokupnosti elektrodov [The substitution variant of natural concentrated grounding devices - concrete foundations reinforcement (transmission line support foot) by the calculated set of electrodes] / Eastern European journal of enterprise technologies. – Kharkiv, Technology center, 2006. no.6/3(24). pp. 81-83.

5. Fedoseenko E. N. Popravka na konechnye razmery ob"ema zemli pri reshenii kraevoi zadachi dlia uravneniia Laplasa s tsel'iu opredeleniia elektricheskikh kharakteristik ideal'nykh sosredotochennykh zazemlitelei [The correction for finite size of ground volume for the boundary-value problem solution for Laplace's equation with the object of calculation of electric descriptions of perfect concentrated groundings] Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2007. no. 37. pp. 98-101.

6. Fedoseenko E. N., Minchenko A. A. Vertikal'nye elektrody zazemleniia povyshennoi provodimosti rastekaniiu i ikh zameshchenie pri raschetakh elektricheskikh kharakteristik slozhnykh kombinirovannykh zazemlitelei [Vertical ground electrodes of increased current spreading conductivity and their substitution for calculation of complicated non-equipotential grounding devices] Eastern European journal of enterprise technologies. – Kharkiv, Technology center, 2007. no.6/5(30) pp. 56-59.

7. Fedoseenko E. N., Minchenko A. A., Minchenko Andr. A. Vozmozhnyi variant dostizheniia normiruemykh znachenii primenitel'no k zazemliaiushchim ustroistvam deistvuiushchikh elektroustanovok [Possible variant of critical values progress as applied to operating electrical installation grounding

connections] Zbirnik naukovikh prats' Kirovograds'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu [Collection of scientific works of the Kirovohrad National Technical University] Kirovograd, KNTU, 2007. no. 19. pp. 255-259.

8. Fedoseenko E. N. Eksperimental'noe podtverzhdenie varianta zameshcheniia vertikal'nogo elektroda povyshennoi provodimosti [Experimental confirmation of the substitution variant of the grounding electrode of increased current spreading conductivity] Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2013, no. 59 (1032). pp. 131-136.

9. 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.

10. Bondarenko V. O., Fedoseenko O. M., Starkov K. O., Ganus O. I. The use of vertical ground conductors of high conductivity spreading in the operating electrical installations. Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2018. no. 10 (1286). pp. 82-86.

11. Fedoseenko E. N. Vliianie estestvennykh zazemlitelei na raspredelenie potentsialov na territorii podstantsii «Svet Shakhtera» AK «Khar'kovoblenergo» [The effect of natural groundings on the potential distribution on the territory of the substation «Svet Shakhtar» AK «Kharkovoblenergo»] Visnyk KhNTUA [Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture] Kharkiv: KhNTUA, 2016. no. 175. pp. 36-37.

12. Fedoseєnko O. M. Sposib pidvishchennia providnosti roztikanniu vertikal'nikh zazemliuvachiv elektroustanovok [A method of increasing the conductivity of the electrical installations vertical grounding] Visnyk KhNTUA [Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture] Kharkiv: KhNTUA, 2017. no. 186. pp.44-46.

13. Pat. 9874 Ukraine, MPK7 N 02 V 1/16. Method for designing grounding circuit at power stations and substations. Fedoseєnko O. M., Kisel'ov Є. T., Minchenko A. A., Iarovii V. M., Kalinin Є. M. Applicant and patent holder NTU «KhPI». – №u200503473 ; appl. 13.04.2005 ; published 17.10.2005, Bul. no.10. 7 p.

14. Pat. 23105 Ukraine, MPK7 N 02 V 1/16. Method for designing grounding circuit at power stations and substations. Minchenko A. A., Fedoseєnko O. M., Minchenko Andr. A., Iarovii V. M. Applicant and patent holder NTU «KhPI». – №u200612746 ; appl. 04.12.2006 ; published 10.05.2007, Bul. no. 6. 7 p.

15. Pat. 27928 Ukraine, MPK7 N 02 V 1/16. Method for designing grounding circuit at power stations and substations. Minchenko A. A., Minchenko Andr. A., Fedoseєnko O. M., Iarovii V. M. Applicant and patent holder NTU «KhPI». – №u200704865 ; appl. 03.05.2007 ; published 26.11.2007, Bul. no.19. 7 p.

16. Fedoseєnko O. M., Minchenko A. A. Udoskonaliuvannia zazemliuval'nikh pristroïv elektroustanovok za dopomogoiu elektrodiv pidvishchennoï providnosti roztikanniu i urakhuvannia prirodnikh zoseredzhenikh zazemliuvachiv [The electrical installations grounding devices improvement by the electrodes of high spreading conductivity and taking into account natural concentrated groundings] Materials of the International conference «Efficiency of realization of scientific, resource and industrial potential under the present conditions», Slavskoe, 11-15 fevralia 2008g. – Kiev : UITs « Science. Technics. Technology», 2007. pp. 432-434.

17. Fedoseєnko O. M., Minchenko A. A., Gubs'ka K. G. Pidvishchennia tochnosti viznachennia elektrichnikh kharakteristik zazemliuval'nikh pristroïv elektroustanovok shliakhom povnogo modeliuvannia ob’єmnikh zoseredzhenikh zazemliuvachiv [Accuracy increase of electrical characteristics calculation in electrical installations grounding devices by complete modeling of volumetric groundings] Information technologies: science, engineering, technology,

education, health : scientific publication of the XX international scientific and practical conference. Kharkiv : NTU "KhPI", 2012. pp. 235.

18. Fedoseenko E. N. Sposob obespecheniia normal'nykh znachenii elektricheskikh kharakteristik zazemlitelia podstantsii «Ordzhonikidzevskaia – 110 kV» AK «Khar'kovoblenergo» [Method for providing normal values of electrical characteristics of the grounding device in the substation "Ordzhonikidze - 110 kV" JSC "Kharkivoblenergo"] Information technologies: science, engineering, technology, education, health : scientific publication. abstracts of reports of The XX international scientific and practical conference. Kharkiv : NTU "KhPI", 2013. pp. 231.

19. Fedoseenko E. N. Uchet modelei estestvennykh zazemlitelei v algoritme rascheta zazemliaiushchikh ustroistv elektroustanovok [Accounting the models of natural groundings in the algorithm for calculating the electrical installations grounding devices] Information technologies: science, engineering, technology, education, health : scientific publication. abstracts of reports of The XX international scientific and practical conference. Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. pp. 185.

20. Fedoseenko E. N. Raschet slozhnykh zazemliaiushchikh ustroistv elektroustanovok s uchetom provodimosti estestvennykh zazemlitelei [Calculation of electrical installations grounding device of taking into account the conductivity of natural groundings] Information technologies: science, engineering, technology, education, health : scientific publication. abstracts of reports of The XX international scientific and practical conference. Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. pp. 246.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ..... 5
ВСТУП 6
РОЗДІЛ 1. Аналіз нормативно-технічних вимог до складних ЗП електроустановок і методів математичного модулювання їх характеристик 13
1.1. Функціональне призначення складних ЗП електроустановок та нормативно-технічні вимоги до їх виконання 13
1.2. Аналіз методів розрахунку електричних характеристик складних ЗП електроустановок відповідно до їх функціонального призначення 18
1.2.1. Основні положення розрахунку ЗП 18
1.2.2. Методи розрахунку еквіпотенційних ЗП..... 25
1.2.3. Методи розрахунку нееквіпотенціальних ЗП 32
1.3. Вибір напрямку і основні завдання дисертаційної роботи..... 39
1.4. Висновки 42
РОЗДІЛ 2. Математична модель складного заземлювального пристрою електроусстановки 44
2.1. Математична модель складного еквіпотенційного ЗП 44
2.2. Математична модель складного нееквіпотенціального ЗП..... 58
2.3. Розробка математичних моделей для заміщення природних зосереджених заземлювачів при розрахунках електричних характеристик складних ЗП електроустановок..... 60
2.3.1 Математична модель об'ємних зосереджених заземлювачів у вигляді суцільного провідного тіла обертання 60
2.4. Математична модель розрахунку наведеного потенціалу, що включає взаємні опори довільним чином розташованих елементів заземлювача в двошарової землі 66
2.4.1. Закладення горизонтальних електродів в верхньому шарі. 68
2.4.2. Закладення горизонтальних електродів в нижньому шарі. 74
2.5. Висновки 83

РОЗДІЛ 3. Метод заміщення природних зосереджених заземлювачів сукупністю прямолінійних електродів..... 85

3.1. Принцип заміщення природних зосереджених заземлювачів сукупністю електродів при розрахунках електричних характеристик складних ЗП електроустановок 85

3.2. Заміщення природних зосереджених заземлювачів – арматурних каркасів фундаментів (підножників) і стійок сукупністю прямолінійних електродів..... 88

3.2.1. Реалізація принципу заміщення природних зосереджених заземлювачів сукупністю прямолінійних електродів. 88

3.2.2 Електричні характеристики природних зосереджених заземлювачів, отримані з використанням апробованої моделі 97

3.3. Розрахункова сукупність прямолінійних електродів для заміщення природних зосереджених заземлювачів 106

3.4. Висновки 114

РОЗДІЛ 4. Розробка електродів підвищеної провідності розтіканню і І моделювання їх у вигляді розрахункової сукупності еквівалентних електродів в моделях складних ЗП 115

4.1. Варіант технічного рішення щодо виконання вертикальних електродів..... 115

4.2. Поправка на кінцеві розміри об’єму землі при вирішенні крайової задачі для рівняння Лапласа з метою визначення електричних характеристик ідеальних зосереджених заземлювачів. 120

4.3. Розрахункова сукупність еквівалентних електродів для введення вертикальних заземлювачів підвищеної провідності розтіканню в моделі складних ЗП 123

4.4. Використання вертикальних електродів підвищеної провідності розтіканню для забезпечення нормальних значень електричних характеристик заземлювача ПС «Орджонікідзе – 110 кВ» 130

4.5. Висновки 133

РОЗДІЛ 5. Вдосконалення методу розрахунку складних ЗП електроустановок шляхом врахування природних зосереджених заземлювачів та вертикальних заземлювачів з підвищеною провідності розтіканню..... 135

5.1. Визначення аварійної різниці потенціалів при КЗ на землю, що виникає між різними елементами складного ЗУ. 135

5.2. Вдосконалений метод розрахунку електричних характеристик складних ЗУ електроустановок..... 137

5.2.1. Метод розрахунку складних ЗУ з урахуванням розподілених поздовжніх електричних параметрів горизонтальних елементів 137

5.2.2. Алгоритм розрахунку електричних характеристик складних заземлювачів в двошаровій землі з урахуванням провідності об'ємних заземлювачів. 139

5.3. Оцінка достовірності визначення електричних характеристик складного ЗУ електроустановки вдосконаленого методу розрахунку. 144

5.3.1. Визначення електричних характеристик складного ЗУ підстанції з урахуванням впливу природних зосереджених заземлювачів. 144

5.3.2. Вплив електродів підвищеної провідності розтіканню на розподіл потенціалів на території підстанції «Орджонікідзе» АК «Харківобленерго»149

5.4. Висновки 152

Висновки..... 154

Список використаних джерел..... 156

Додаток А 169

Додаток Б..... 235

Додаток В..... 240