

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Руденко Сергій Сергійович

УДК 621.316.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ
ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ДЮЧИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ
ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ УКРАЇНИ**

05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів
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



*Ідентичність за змістом
іншими примірниками
дисертації засвідчую.*
*Генеральний секретар
вченої ради Д 64.050.08*
Юрєва О.Ю.

С.С. Руденко

Науковий керівник
Коліушко Георгій Михайлович,
канд. техн. наук, ст. наук. спів.

Харків – 2017

АНОТАЦІЯ

Руденко С.С. «Вдосконалення методів контролю та діагностики заземлювальних пристроїв діючих високовольтних енергооб'єктів України». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.13 – «техніка сильних електричних та магнітних полів». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2017.

У дисертаційній роботі проведено аналіз факторів, які впливають на точність визначення нормованих параметрів заземлювальних пристроїв: напруги дотику, напруги на заземлювальному пристрої та його опору. Показана актуальність науково-технічного обґрунтування вибору напрямку реконструкції заземлювальних пристроїв діючих високовольтних енергооб'єктів та розробки методики прогнозування витрат на ремонтно-відновлювальні роботи.

На основі аналізу сучасного стану проблему було сформульовано задачі для вдосконалення методів контролю та діагностики заземлювальних пристроїв. Поставлені завдання були вирішені на основі розрахункових, теоретичних та експериментальних досліджень на діючих високовольтних енергооб'єктах України. При цьому були використані: методи прикладної статистики й теорії ймовірності для аналізу електрофізичних характеристик ґрунту з метою побудови вимог до приладів проведення вертикального електричного зондування, математичних моделей заземлювального пристрою та інтерпретації результатів зондування ґрунту, а також для аналізу нормованих параметрів в аварійних режимах роботи та побудови стохастичної моделі прогнозування об'єму ремонтних робіт при реконструкції; методи теорії електромагнітного поля, зокрема аналогія електростатичного поля та поля постійного струму, принцип суперпозиції полів, метод розділу змінних (метод Фур'є), методика вирішення задачі про потенціал електричного поля точкового джерела електричного струму для створення

математичної моделі нееквіпотенційного заземлювального пристрою довільної конфігурації та моделі для інтерпретації результатів зондування ґрунту; методи теорії матриць, вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь та програмування при реалізації математичних моделей; методи фізичного експерименту при перевірці теоретичних висновків та методика електромагнітної діагностики діючих заземлювальних пристроїв.

У роботі вперше було розроблено вимоги до математичних моделей нееквіпотенційного заземлювального пристрою довільної конфігурації та засобів інтерпретації результатів вертикального електричного зондування ґрунту на підставі експериментальних даних, отриманих на 612 діючих енергооб'єктах України. Встановлено, що найбільш поширеними геоелектричними структурами в місцях розташування енергооб'єктів України, як в окремих регіонах, так і в цілому по Україні є тришарові ґрунти (72,7 % в середньому по Україні), а використовувана до цього часу математична модель заземлювального пристрою, розміщеного у двошаровому ґрунті, дозволяє безпосередньо без еквівалентування проводити розрахунки лише для 8,3 %, що призводить до збільшення похибки обчислення нормованих параметрів заземлювального пристрою.

Вперше було встановлено ймовірнісний взаємозв'язок між технічними характеристиками приладу, фактичною глибиною зондування установкою Веннера (міжелектродною відстанню) і класом напруги об'єкту. Це дозволяє оптимально обрати прилад у залежності від конкретних параметрів об'єкту, оскільки некоректний вибір приладу призводить або до неможливості проведення повноцінних вимірювань, або до значного збільшення вартості та масогабаритних характеристик приладу. Встановлено, що для охоплення всіх діючих енергооб'єктів України прилад повинен мати межі вимірювання від 0,1 мОм до 7,2 кОм та припустимий опір вимірювального кола від 66 кОм.

Було отримано рішення задачі про потенціал електричного поля точкового джерела струму, розташованого у провідному тришаровому напівпросторі з плоско-паралельними границями поділу. Вперше застосовано метод найменших квадратів для отримання рішення у явному вигляді при використанні перетворення Вебера-

Ліпшиця. Проведені дослідження показали, що використання даного методу за припустимої похибки апроксимації в 1 %, дозволяє напряду охопити 51 % ґрунтів в Україні, а з урахуванням методу часткового еквівалентування – 81 % ґрунтів. При цьому використання методу часткового еквівалентування зберігає тришарову геоелектричну структуру ґрунту.

Побудована математична модель довільно орієнтованого нееквіпотенційного одиничного електроду, розташованого у тришаровому ґрунті, на основі рішення задачі про потенціал електричного поля точкового джерела струму.

Вперше розроблено математичну модель нееквіпотенційного заземлювального пристрою з довільною орієнтацією його елементів на основі рішення задачі про потенціал електричного поля точкового джерела струму, розташованого у провідному тришаровому напівпросторі. Вказана модель дозволяє зберегти час розрахунку нормованих параметрів заземлювального пристрою на рівні з двошаровою моделлю й за цим показником перевершує існуючі аналоги. При вирішенні задачі про потенціал електричного точкового джерела струму для апроксимації функції, що характеризує багат шаровий простір, був застосований метод найменших квадратів. Розроблена модель дозволила позбутися методичної похибки, обумовленої еквівалентуванням тришарового ґрунту у двошаровий. Встановлено, що розроблена математична модель дозволяє безпосередньо проводити розрахунок нормованих параметрів заземлювального пристрою для 51 % енергооб'єктів України, а з використанням методу еквівалентування – для 98 %.

Удосконалено математичну модель для інтерпретації результатів зондування чотиришарових структур у розрахункові моделі на основі вирішення задачі про потенціал електричного поля точкового джерела струму, розташованого на поверхні чотиришарового провідного напівпростору з плоско-паралельними границями поділу.

На основі створених математичних моделей розроблено програмні засоби, які було використано при електромагнітній діагностиці стану заземлювального пристрою: новітній програмний комплекс «LiGro» для визначення нормованих параметрів заземлювального пристрою довільної конфігурації, розташованого у

тришаровому ґрунті; комп'ютерні програми для інтерпретації результатів вертикального електричного зондування ґрунту «VEZ-3EQ» та «VEZ-4A», які охоплюють 81 % та 98 % енергооб'єктів України відповідно; комп'ютерну програму «EQ_MultiLayer», яка дозволяє проводити еквівалентування багат шарових геоелектричних структур і приводити їх до вигляду розрахункових моделей.

Доведена адекватність створеного програмного комплексу на основі порівняння результатів експериментальних досліджень для понад 70 діючих високовольтних енергооб'єктів України класом напруги 35 кВ–150 кВ з результатами розрахунку. Показано, що середня похибка визначення опору заземлювального пристрою не перевищує 10 %, а при визначенні напруги дотику фіксується потрапляння у розрахунковий діапазон для понад 94 % експериментальних точок.

Показано, що за своїми параметрами комплекс «LiGro» відповідає світовим аналогам, а за рядом функцій та властивостей перевищує їх, що дозволяє використовувати його як інструмент при контролі стану заземлювального пристрою діючих та проєктованих енергетичних об'єктів.

Встановлена кореляція між типом ґрунту, глибиною залягання заземлювача і завищенням (заниженням) величини потенціалу, отриманої в результаті застосування способів еквівалентування. Розроблено рекомендації щодо застосування способу еквівалентування в залежності від типу розрахунку (напруги дотику або опору заземлювального пристрою), типу вихідного тришарового ґрунту та порядкового номеру шару, в якому розташований заземлювальний пристрій. Показано, що застосування методу еквівалентування є коректним для ґрунтів типу Q та A, при цьому результати розрахунку можуть бути завищені не більше ніж на 12,1 %. Встановлено, що математична модель заземлювального пристрою, розташованого у двошаровому ґрунті, не дозволяє коректно проводити розрахунок для ґрунтів типу K та H, які становлять майже 55 % від усіх ґрунтів України.

На основі сформованої бази даних було проведено статистичний аналіз нормованих електричних параметрів заземлювальних пристроїв для 1004 діючих підстанцій класами напруги від 35 кВ до 750 кВ, що були обстежені у період з 2001 р. по 2016 р. Аналіз показав, що:

– опір заземлювальних пристроїв більшості підстанцій не перевищує регламентоване у нормативних документах припустиме значення;

– у абсолютної більшості підстанцій до проведення реконструкції та модернізації заземлювального пристрою при однофазному замиканні на землю спостерігається перевищення напруги дотику на обладнанні, що обслуговується (від 76,2 % до 97,2 % для відповідних класів напруги), навіть якщо опір заземлювального пристрою знаходиться у межах норми (від 75,6 % до 96,2 % випадків перевищення);

– перевищення припустимого значення напруги дотику при однофазному замиканні на землю за межами електроустановки спостерігається на значній частині підстанцій (від 23,1 % до 41,9 % для відповідних класів напруги).

Таким чином, статистично доведено, що припустиме значення опору заземлювального пристрою 0,5 Ом не гарантує електробезпеку обслуговуючого персоналу електроустановки у випадку виникнення аварійної ситуації й не дозволяє однозначно встановити придатність заземлювального пристрою до подальшої експлуатації.

Було розроблено методику визначення найбільш ефективного напрямку реконструкції заземлювальних пристроїв діючих високовольтних енергооб'єктів на основі порівняння значень нормованих параметрів та матеріально-трудова витрат на реконструкцію для трьох можливих випадків. Доведено, що реконструкцію заземлювального пристрою доцільно виконувати за напрямком забезпечення припустимого значення напруги дотику, що гарантує електробезпеку обслуговуючого персоналу та надійність експлуатації обладнання, а також має високу економічну ефективність: середня економія для енергооб'єктів класом напруги 110 кВ та 150 кВ складає близько 33 тис. грн. або 84 % на кожен об'єкт. За період виконання роботи (2015–2017 рр.) були розроблені рекомендації для модернізації та реконструкції заземлювальних пристроїв згідно з вимогами до напруги дотику для 14 підстанцій класом напруги 150 кВ та 56 підстанцій класом напруги 110 кВ. Тобто впровадження вказаного напрямку реконструкції дозволило заощадити понад 2,3 млн. грн. для енергетичного сектору України.

Вперше розроблено стохастичну параметричну модель для оцінки довжини ремонтних заземлювачів, необхідних для реконструкції та модернізації заземлювального пристрою, у залежності від площі підстанцій та з урахуванням коефіцієнтів для відповідного класу напруги. Це дозволяє, у свою чергу, енергетичним компаніям оцінити та запланувати вартість реконструкції своїх заземлювальних пристроїв ще до проведення електромагнітної діагностики їх стану. Проведений аналіз результатів прогнозування з використанням розробленої моделі показав її переваги у порівнянні з існуючими раніше.

При виконанні дисертаційного дослідження було розроблено методики:

- формування вимог до технічних характеристик приладів для проведення вертикального електричного зондування в рамках електромагнітної діагностики стану заземлювального пристрою в залежності від класу напруги енергооб'єкту;
- використання методу еквівалентування залежно від типу ґрунту, розташування заземлювального пристрою та параметру, який розраховується;
- побудови стохастичної моделі для оцінки довжини ремонтних заземлювачів.

Розроблені в дисертаційній роботі програми та методики були застосовані в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті «Молнія» при електромагнітній діагностиці стану заземлювальних пристроїв понад 80 енергооб'єктів України (у тому числі двох атомних електростанцій) класами напруги від 35 кВ до 750 кВ при виконанні госпдоговірних робіт протягом 2015–2017 рр, а також при виконанні трьох прикладних науково-дослідних робіт за бюджетною тематикою Міністерства освіти і науки України.

На основі результатів дослідження направлено пропозицію авторам нормативного документу СОУ 31.2-21677681-19 «Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція» щодо включення в його наступну редакцію: вимог до технічних характеристик приладів для проведення вертикального електричного зондування та рекомендації з виконання реконструкції заземлювальних пристроїв діючих електроустановок напругою понад 1 кВ, що працюють у мережі з заземленою нейтраллю, за вимогами до напруги дотику.

Ключові слова: заземлювальний пристрій, високовольтний енергооб'єкт,

нормовані параметри, вертикальне електричне зондування ґрунту, електрофізичні характеристики ґрунту, математична модель, методика еквівалентування, електробезпека.

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

1. Руденко С. С. Аппроксимация функции, характеризующей трехслойную модель грунта, методом наименьших квадратов / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2011. – № 16. – С. 126–132.

2. Руденко С. С. Использование стохастической модели для прогнозирования длины рекомендуемых горизонтальных шин при восстановлении заземляющего устройства / С. С. Руденко, Д. Г. Колиушко, Г. М. Колиушко, А. А. Петков // Енергетика та електрифікація. – 2011. – № 7. – С. 36–41.

3. Руденко С. С. Электрическое поле точечного источника тока в земле с трехслойной структурой / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко // Електронне моделювання. – 2011. – Т. 33. – № 6. – С. 101–111.

4. Руденко С. С. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок / Г. М. Колиушко, Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – № 4. – С. 65–70. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.

5. Руденко С. С. Математическая модель заземляющего устройства энергообъекта при наличии подстилающего слоя / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко // Електронне моделювання. – 2014. – Т. 36. – № 2. – С. 89–97.

6. Руденко С. С. Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко, Г. М. Колиушко // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 3. – С. 67–72. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10.

7. Руденко С. С. Технические требования к приборам для проведения

вертикального электрического зондирования грунта при диагностике состояния заземляющих устройств / С. С. Руденко // *Электротехника і електромеханіка*. – 2016. – № 5. – С. 68–73. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.12.

8. Руденко С. С. Визначення напрямку реконструкції заземлювального пристрою / С. С. Руденко, Д. Г. Колиушко, О. В. Кашеев // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2017. – № 2. – С. 57–61. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.09.

9. Руденко С. С. Анализ состояния заземляющих устройств действующих энергообъектов Украины / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко, Г. М. Колиушко // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2017. – № 15 – С. 44–48.

10. Руденко С. С. Интерпретация результатов вертикального электрического зондирования в виде четырехслойного геоэлектрического полупространства / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Серія: «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – 2015. – № 12. – С. 324–329.

11. Руденко С. С. Програма для інтерпретації результатів вертикального електричного зондування «VEZ-4A» / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2017. – № 3. – С. 45–48. doi: 10.20998/2074-272X.2017.3.09.

12. Руденко С. С. Анализ точности аппроксимации функции, яка характеризує тришарову модель ґрунту / Д. Г. Колиушко, С. С. Руденко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MICROCAD-2011): Матеріали ХІХ міжнародної науково-практичної конференції, Ч.IV (01-03 червня 2011 р., Харків)*. – Х. : НТУ «ХП», 2011. – С. 112.

13. Руденко С. С. Математическая модель произвольно ориентированного электрода, размещенного в проводящем трехслойном полупространстве / С. С. Руденко, Д. Г. Колиушко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MICROCAD-2012): Тези доповідей ХХ міжнародної науково-практичної конференції, Ч.IV (15-17 травня 2012 р., Харків)* – Х. : НТУ «ХП», 2012. – С. 98.

14. Руденко С. С. Анализ результатов вертикального электрического

зондирования грунтов в местах расположения энергообъектов Украины / Д. Г. Колюшко, С. С. Руденко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MICROCAD-2013): Матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції (29-31 травня 2013 р., Харків). – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – С. 66.

15. Руденко С. С. Математическая модель заземляющего устройства произвольной конфигурации при наличии подстилающего слоя / С. С. Руденко, Д. Г. Колюшко // Актуальные проблемы автоматизации и приборостроения Украины: материалы Науч.-техн. конфер. студентов, аспирантов и молодых ученых, 12-13 дек. 2013 г. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – С. 93–94.

16. Руденко С. С. К вопросу определения нормируемых параметров заземляющих устройств энергообъектов, находящихся в эксплуатации / Д. Г. Колюшко, С. С. Руденко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MICROCAD-2014): Тези доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції Ч. IV. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – С. 96.

17. Руденко С. С. К вопросу реконструкции заземляющего устройства действующих подстанций Украины / С. С. Руденко, Д. Г. Колюшко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MICROCAD-2015): Матеріали XXIII міжнародної науково-практичної конференції (20-22 травня 2015 р., Харків). – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – С. 134.

18. Руденко С. С. Розробка засобів інтерпретації результатів зондування ґрунту / С. С. Руденко // Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування : матеріали 3-ї Всеукр. наук.-техн. конф., 8–9 грудня 2016 р. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – С. 186–187.

19. Руденко С. С. Определение требуемой глубины зондирования грунта в процессе диагностики состояния заземляющих устройств энергообъектов / Г. М. Колюшко, Д. Г. Колюшко, С. С. Руденко // Тези доповідей XXIV Міжнародної науково-практичної конференції. Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MICROCAD-2016), Ч. IV (18–20 травня 2016 р., Харків). – Х. :, НТУ «ХПІ», 2016.– С. 201.

20. Руденко С. С. Анализ применимости существующих приборов для вертикального электрического зондирования грунта / С. С. Руденко // Тези доповідей XXIV Міжнародної науково-практичної конференції. Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MICROCAD-2016), Ч. IV (18–20 травня 2016 р., Харків). – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – С. 227.

21. Руденко С. С. Оптимізація реконструкції заземлювальних пристроїв діючих енергооб'єктів / Д. Г. Колюшко, О. В. Кащеев, С. С. Руденко // Тези доповідей XXV Міжнародної науково-практичної конференції. Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MICROCAD-2017), Ч. IV (17–19 травня 2017р., Харків). – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – С. 137.

22. Руденко С. С. Состояние электробезопасности действующих энергообъектов Украины / Г. М. Колюшко, Д. Г. Колюшко, С. С. Руденко // Тези доповідей XXV Міжнародної науково-практичної конференції. Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MICROCAD-2017), Ч. IV (17–19 травня 2017 р., Харків). – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – С. 138.

23. А. с., Україна. Компьютерная программа интерпретации результатов вертикального электрического зондирования «ВЭЗ – 3» / С. С. Руденко, Д. Г. Колюшко. – № 47198 від 14.01.2013.

24. А. с., Україна. Компьютерная программа автоматической интерпретации результатов вертикального электрического зондирования «ВЭЗ-2-Авто» / С. С. Руденко, Д. Г. Колюшко. – № 47469 від 28.01.2013.

25. А. с., Україна. Комп'ютерна програма інтерпретації результатів вертикального електричного зондування та еквівалентування «VEZ-3EQ» / Д. Г. Колюшко, С. С. Руденко. – № 63000 від 17.12.2015.

26. А. с., Україна. Комп'ютерна програма інтерпретації результатів вертикального електричного зондування чотирьохшарового ґрунту «VEZ-4A» / Д. Г. Колюшко, С. С. Руденко. – № 69086 від 12.12.2016.

27. Нормы витрат труда з діагностики стану заземлювального пристрою електричних станцій та підстанцій: СОУ Д.1.2-36259073-001:2017. – К. : ТОВ «ЕФ ЕР ТІ – ГРУП», 2017. – 11 с.

ABSTRACT

S.S. Rudenko «Monitoring and Diagnostics Methods improvement for Grounding Grids in Active High-Voltage Power Facilities in Ukraine». – Manuscript.

Thesis for granting Candidate of Technical Sciences Degree in specialty 05.09.13 – Technics of Strong Electric and Magnetic Fields. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2017.

The thesis research analyzes factors affecting the accuracy of specifying grounding grid normalized parameters, namely, touch voltage, grounding device voltage and its resistance. Scientific and technological justification of upgrade option selection and repair-and-renewal operations cost forecast technique development for the existing high-voltage power facilities grounding grids is shown urgent.

On the basis of the problem actual state analysis, problems of grounding grid monitoring and diagnostic techniques improvement 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 with application of practical statistics methods and probabilistic calculus. These tools have been used for soil electro-physical characteristics analysis in order to elaborate requirements for vertical electrical sounding equipment, to build grounding device mathematical models, and to interpret soil sounding results, as well as to analyze normalized parameters in emergency operation conditions and make a stochastic model of repair-and-renewal scope forecast. Also, such electromagnetic field theory methods have been applied as the electrostatic field and DC field analogy, the field superposition principle, the variable separation method (Fourier method), a technique of solving a point electrical current source electric potential problem, so as to create a mathematical model for a non-equipotential arbitrary-shaped grounding device and a model for soil sounding interpretation. 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 and an electromagnetic technique for active grounding grids diagnostics .

In the research, requirements for mathematical models of non-equipotential arbitrary-shaped grounding device and methods of soil vertical electrical sounding interpretation have first been elaborated on the basis of experimental data obtained in 612 operating power facilities of Ukraine. The three-layer soil is revealed to be the prevailing geoelectric structure in Ukrainian power facilities locations, both in different regions and throughout Ukraine, totaling 72.7 % on the average. The current mathematical model of a grounding device located in a two-layer soil allows only making calculations for 8.3 % without equivalenting techniques application, which results in decreasing accuracy of the grounding device normalized parameters computations.

Probabilistic correlation between the device technical parameters, actual Wenner sounding depth (electrode spacing), and the facility voltage level has first been determined. It allows optimally selecting a grounding device versus specific parameters of the facility as incorrect device selection either results in impossibility to conduct adequate measurements or causes significant growth in cost and weight-size characteristics of the grounding device. It has been found that the measurement scale of the device must range from 0.1 m Ω through 7.2 k Ω , the permissible resistance of the measuring loop being 66 k Ω and higher, so as to cover all available power facilities in Ukraine.

The electric potential problem for a point electrical current source located in a conductive three-layer half-space with plane-parallel interfaces has been solved. The least square technique has first been applied to obtain an explicit solution with Weber-Lipschitz transformation utilization. The conducted studies have revealed that this technique application with permissible approximation error of 1 % allows directly covering 51 % of Ukrainian soils, the percentage growing up to 81 % provided that a partial equivalenting technique is added. The partial equivalenting technique utilization also preserves the soil three-layer geoelectrical structure.

Based on the solution to the electric potential problem for a point electrical current source, a mathematical model of a non-equipotential arbitrary-oriented single electrode located in a three-layer soil has been built. The model developed allows reducing time of grounding device normalized parameters computation, as compared with the two-layer model, and surpasses the available counterparts over this parameter. To solve the electric

potential problem for a point electrical current source, the least square method was chosen to approximate the function that describes a multi-layer medium. The introduced model has made it possible to overcome the approximation error resulted from equivalenting of a three-layer soil structure to a two-layer one. The developed mathematical model enables direct computation of the grounding device normalized parameters for 51 % of Ukrainian power facilities. With application of the equivalenting technique, the percentage grows up to 98 %.

A mathematical model for four-layer structure sounding results interpretation in a computational model has been advanced on the basis of the solution to the electric potential problem for a point electrical current source located on the surface of a four-layer conductive half-space with plane-parallel interfaces.

Based on the mathematical models developed, software products have been devised and utilized for electromagnetic diagnostics of grounding conditions. They are up-to-date software complex “LiGro” for specifying normalized parameters of an arbitrary-shaped grounding device located in a three-layer soil; computer programs «VEZ-3EQ» and «VEZ-4A» for interpreting vertical electrical sounding results which cover, correspondingly, 81 % and 98 % of Ukrainian power facilities. Among them is also computer program «EQ_MultiLayer» which allows conducting multi-layer geoelectrical structures equivalenting and reducing them to computational models.

The developed software complex validity has been proved via comparison of computations with experimental results for over 70 operating high-voltage power facilities of 35 kV through 150 kV in Ukraine. The average error of grounding device resistance is shown not to exceed 10 %, over 94 % of experimental data points hitting the design band when specifying the tough voltage.

The software complex “LiGro”, in terms of its parameters, is shown to meet the world’s analogues and even to surpass them in a number of functions and attributes, which allows utilizing it as a tool for grounding grid condition monitoring at both operating and designed power facilities.

Correlation between the soil type, the grounding device length, and increase or decrease in the potential obtained with equivalenting techniques application has been

derived. Recommendations have been elaborated on equivalenting technique application versus a computed parameter, either touch voltage or grounding device resistance, type of the initial three-layer soil, and the number of the layer where the grounding device is placed.

Equivalenting technique application is shown to be adequate for soil types of Q and A, computational results increase not exceeding 12.1 %. The mathematical model for grounding devices in two-layer soil is found not to allow correct calculations for soil types of K and H which make up almost 55 % of all the soil types in Ukraine.

On the basis of the collected database, statistical analysis of grounding grids normalized electrical parameters has been carried out for 1004 active substations of 35 kV through 750 kV which were tested in the period from 2001 to 2016. The analysis shows that:

- in the most substations, grounding grid resistance does not exceed the permissible value stated in normative documents;

- before grounding grids retrofit and upgrade, in the most substations there occurs touch overvoltage of 76.2 % through 96.2 % for corresponding voltage levels on the equipment under service in single-line fault situations even in case the grounding device resistance lies within the standard limits, from 75.6 % through 96.2 % of touch overvoltage events observed;

- permissible touch overvoltage under single line to ground fault beyond the power equipment is observed at the significant number of substations, from 23.1 % through 41,9 % for corresponding voltage levels.

Thus, grounding device permissible resistance of 0.5Ω is statistically proved not to ensure electrical safety for the service personnel in a fault situation and not to allow definitely ascertaining the grounding grid serviceability.

A technique for selecting the most efficient upgrade option for the operating high-voltage power facilities grounding grids has been developed via comparison of normalized parameters and reconstruction material and labor costs for three possible cases. It is proved that grounding grids upgrade is worthwhile when fulfilled with permissible touch voltage assurance, which guarantees electrical safety to the service personnel, allows reliable operation of the equipment, and provides high economic efficiency: average savings for

power facilities of 110 kV and 150 kV sum up to some 33 thousand UAH or 84 % per each facility. During the period of the work execution (2015 – 2017), recommendations on grounding grids retrofit and upgrade in accordance with touch voltage requirements were elaborated for 14 substations of 150 kV and 56 substations of 110 kV. Implementation of the recommended upgrade approach resulted in saving over 2.3 million UAH for the power industry of Ukraine.

A stochastic parametric model has first been introduced to estimate substation area dependence of repair grounding electrodes length required for the grounding device repair and retrofit, taking into account coefficients for corresponding voltage levels. In its turns, it allows electric power companies to assess and plan their grounding grids upgrade costs before electromagnetic diagnostics of their current conditions. Results of repair-and-renewal scope forecast with the developed model application have been analyzed to demonstrate the model advantages as compared with the pre-existing ones.

In the research, the following techniques have been developed.

- requirements formulation for vertical electrical sounding devices technical characteristics in the course of electromagnetic diagnostics of the grounding device condition versus power facility voltage level;

- equivalenting technique application depending on the soil type, the grounding device arrangement, and the parameter to specify;

- a stochastic model development for repair grounding electrode length estimation.

The software products and techniques developed in the Ph.D. research have been implemented in Research and Design Institute «Molniya» (NDPKI Molniya) of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» during electromagnetic diagnostics of grounding conditions at over 80 Ukrainian power facilities of 35 kV through 750 kV, including two nuclear plants, as part of commercial contracts in the period from 2015 to 2017, and also during conducting three applied research projects financially supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine .

Based on the conducted research, a proposal has been sent to the authors of normative document of Standard of Ukrainian Companies (SOU) 31.2-21677681-19 «Testing and Monitoring of Electrical Installation Grounding. Standard Instructions» to include into the

next edition requirements for vertical electrical sounding devices specifications and recommendations on grounding upgrade in operating power facilities over 1 kV a.c. connected to grounded neutral grids according to the touch voltage requirements.

Key words: grounding device, high-voltage power facility, normalized parameters, vertical electrical sounding, soil electrical properties, mathematical model, equivalenting technique, electrical safety.

List of publications of the aspirant by the dissertation theme:

1. Rudenko S. S. *Approxymacyja funkcyi, harakteryzujushhej trehslojnuju model' grunta, metodom naymen'shyh kvadratov* / D. G. Koliushko, S. S. Rudenko // *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «Harkivs'kyj politehničnyj instytut»*. – Serija: «Tehnika ta elektrofizyka vysokyh naprug». – 2011. – № 16. – S. 126–132.

2. Rudenko S. S. *Ispol'zovanie stokhasticheskoj modeli dlia prognozirovaniia dliny rekomenduemykh gorizontaľnykh shin pri vosstanovlenii zazemliaiushchego ustroistva* / S. S. Rudenko, D. G. Koliushko, G. M. Koliushko, A. A. Petkov // *Energetyka ta elektryfikatsiia*. – 2011. – № 7. – S. 36–41.

3. Rudenko S. S. *Electric field of a point source of current in the ground with a three-layer structure* / Koliushko D.G., Rudenko S.S. // *Electronic modeling*. – 2011. – vol.33. – № 6. – pp. 101-111.

4. Rudenko S. S. *On the problem of increasing computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids* / Koliushko G. M., Koliushko D. G., Rudenko S. S. // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2014. – no.4. – pp. 65–70. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.

5. Rudenko S. S. *Mathematical model of grounding connection of a power plant with under layer* / Koliushko D.G., Rudenko S.S. // *Electronic modeling*. – 2014. – vol.36. – no.2, – pp. 89–97. (Rus).

6. Rudenko S. S. *Analysis of electrophysical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine* / Koliushko D. G., Rudenko S. S., Koliushko G. M. // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2015. – no.3. – pp. 67–72. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10.

7. Rudenko S. S. Requirements for devices for vertical electrical sounding of soil at diagnostics of grounding devices / S. S. Rudenko // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2016. – no.5. – pp. 68–73. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.12.

8. Rudenko S. S. Determination of direction to reconstruction of grounding system./ Rudenko S. S., Koliushko D. G., Kashcheyev O. V. // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2017. – no.2. – pp. 57–61. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.

9. Rudenko S. S. Analiz sostojanija zazemljajushhijh ustrojstv dejstvujushhijh jenergoob#ektov Ukrainy / D. G. Kolyushko, S. S. Rudenko, G. M. Kolyushko // *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «Harkivs'kyj politehničnyj instytut»*. – Serija: «Tehnika ta elektrofizyka vysokyh naprug». – 2017. – № 15 – S. 44–48.

10. Rudenko S. S. Interpretatsiia rezul'tatov vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniia v vide chetyrekhslainogo geoelektricheskogo poluprostranstva / D. G. Koliushko, S. S. Rudenko // *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «Harkivs'kyj politehničnyj instytut»*. – Serija: «Problemy avtomatyzovanogo elektropryvodu. Teorija i praktyka». – 2015. – № 12. – S. 324–329.

11. Rudenko S. S. Program VEZ-4A for interpretation the data of vertical electrical sounding./ D.G. Koliushko, S.S. Rudenko // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2017. – no.3. – pp. 63–66. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2017.3.09.

12. Rudenko S. S. Analiz tochnosti aproksymacii' funkcii', jaka harakteryzuje trysharovu model' g'runtu / D. G. Koliushko, S. S. Rudenko // *Informacijni tehnologii': nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja (MICROCAD-2011): Materialy XIX mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii'*, Ch.IV (01-03 chervnja 2011 r., Harkiv). – H. : NTU «HPI», 2011. – S. 112.

13. Rudenko S. S. Matematicheskaia model' proizvol'no orientirovannogo elektroda, razmeshchennogo v provodiashchem trekhslainom poluprostranstve / S. S. Rudenko, D. G. Koliushko // *Informacijni tehnologii': nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja (MICROCAD-2012): Tezy dopovidej XX mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii'*, Ch.IV (15–17 travnja 2012 r., Harkiv) – H. : NTU «HPI», 2012. – S. 98.

14. Rudenko S. S. Analiz rezul'tatov vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniia

gruntov v mestakh raspolozheniia energoob"ektov Ukrainy / D. G. Koliushko, S. S. Rudenko // Informacijni tehnologii': nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja (MICROCAD-2013): Materialy XXI mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii' (29–31 travnja 2013 r., Harkiv). – H. : NTU «HPI», 2013. – S. 66.

15. Rudenko S. S. Matematicheskaia model' zazemliaiushchego ustroistva proizvol'noi konfiguratsii pri nalichii podstilaiushchego sloia / S. S. Rudenko, D. G. Koliushko // Aktual'nye problemy avtomatiki i priborostroeniia Ukrainy: materialy Nauch.-tekhn. konfer. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, 12 13 dek. 2013 g. – H. : NTU «HPI», 2013. – S. 93–94.

16. Rudenko S. S. K voprosu opredeleniia normiruemykh parametrov zazemliaiushchikh ustroistv energoob"ektov, nakhodiashchikhsia v ekspluatatsii / D. G. Koliushko, S. S. Rudenko // Informacijni tehnologii': nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja (MICROCAD-2014): Tezy dopovidej XXII mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii' Ch. IV. – H. : NTU «HPI», 2014. – S. 96.

17. Rudenko S. S. K voprosu rekonstruktsii zazemliaiushchego ustroistva deistvuiushchikh podstantsii Ukrainy / S. S. Rudenko, D. G. Koliushko // Informacijni tehnologii': nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja (MICROCAD-2015): Materialy XXIII mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii' (20–22 travnja 2015 r., Harkiv). – H. : NTU «HPI», 2015. – S. 134.

18. Rudenko S. S. Rozrobka zasobiv interpretacii' rezul'tativ zonduvannja g'runtu / S. S. Rudenko // Aktual'ni problemy avtomatyky ta prykladobuduvannja : materialy 3-i' Vseukr. nauk.-tehn. konf., 8–9 grudnja 2016 r. – H. : NTU "HPI", 2016. – S. 186–187.

19. Rudenko S. S. Opredelenie trebuemoi glubiny zondirovaniia grunta v protsesse diagnostiki sostoianiia zazemliaiushchikh ustroistv energoob"ektov / G. M. Koliushko, D. G. Koliushko, S. S. Rudenko // Tezy dopovidej XXIV Mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii'. Informacijni tehnologii': Nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja (MICROCAD-2016), Ch. IV (18–20 travnja 2016 r., Harkiv). – H. :, NTU «HPI», 2016.– S. 201.

20. Rudenko S. S. Analiz primenimosti sushchestvuiushchikh priborov dlia vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniia grunta / S. S. Rudenko // Tezy dopovidej

XXIV Mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii'. Informacijni tehnologii': Nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja (MICROCAD-2016), Ch. IV (18–20 travnja 2016 r., Harkiv). – H. : NTU «HPI», 2016. – S. 227.

21. Rudenko S. S. Optyimizacija rekonstrukcii' zazemljuval'nyh prystroi'v dijuchyh energoob'jektiv / D. G. Koliushko, O. V. Kashhejev, S. S. Rudenko // Tezy dopovidej XXV Mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii'. Informacijni tehnologii': Nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja (MICROCAD-2017), Ch. IV (17–19 travnja 2017r., Harkiv). – H. : NTU «HPI», 2017. – S. 137.

22. Rudenko S. S. Sostoianie elektrobezopasnosti deistvuiushchikh energoob"ektov Ukrainy / G. M. Koliushko, D. G. Koliushko, S. S. Rudenko // Tezy dopovidej XXV Mizhnarodnoi' naukovo-praktychnoi' konferencii'. Informacijni tehnologii': Nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja (MICROCAD-2017), Ch. IV (17–19 travnja 2017r., Harkiv). – H. : NTU «HPI», 2017. – S. 138.

23. A. s., Ukrai'na. Komp'iuternaia programma interpretatsii rezul'tatov vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniia «VEZ – 3» / S. S. Rudenko, D. G. Koliushko. – № 47198 vid 14.01.2013.

24. A. s., Ukrai'na. Komp'iuternaia programma avtomaticheskoi interpretatsii rezul'tatov vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniia «VEZ-2-Avto» / S. S. Rudenko, D. G. Koliushko. – № 47469 vid 28.01.2013.

25. A. s., Ukrai'na. Komp'juterna programa interpretacii' rezul'tativ vertykal'nogo elektrychnogo zonduvannja ta ekvivalentuvannja «VEZ-3EQ» / D. G. Koliushko, S. S. Rudenko. – № 63000 vid 17.12.2015.

26. A. s., Ukrai'na. Komp'juterna programa interpretacii' rezul'tativ vertykal'nogo elektrychnogo zonduvannja chotyrohsharovogo g'runtu «VEZ-4A» / / D. G. Koliushko, S. S. Rudenko. – № 69086 vid 12.12.2016.

27. Normy vytrat truda z diagnostyky stanu zazemljuval'nogo prystroju elektrychnyh stancij ta pidstancij: SOU D.1.2-36259073-001:2017. – K. : TOV «EF ER TI – GRUP», 2017. – 11 s.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	15
1.1 Загальний аналіз.....	15
1.2 Методика електромагнітної діагностики стану заземлювального пристрою	25
1.2.1 Експериментальний етап електромагнітної діагностики.....	25
1.2.2 Розрахунковий етап електромагнітної діагностики	34
1.2.3 Етап розробки рекомендацій з реконструкції заземлювального пристрою	43
1.3 Висновки до розділу 1	45
2 РОЗРОБКА ВИМОГ ДО ПРИЛАДІВ ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ.....	47
2.1 Аналіз електрофізичних характеристик ґрунту в місцях розташування діючих енергооб'єктів України	47
2.2 Вимоги до приладів для проведення вертикального електричного зондування при діагностиці стану заземлювальних пристроїв.....	55
2.3 Висновки до розділу 2	70
3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НЕЕКВІПОТЕНЦІЙНОГО ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ, РОЗТАШОВАНОГО В ТРИШАРОВОМУ ҐРУНТІ	72
3.1 Апроксимації функції, що характеризує багатошарове середовище	72
3.2 Електричне поле точкового джерела струму, розташованого в тришаровому провідному напівпросторі.....	80
3.3 Розробка математичної моделі нееквіпотенційного заземлювального пристрою довільної конфігурації	89

3.4 Висновки до розділу 3	96
4 ВИЗНАЧЕННЯ НОРМОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА ДОПОМОГОЮ СТВОРЕНИХ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ	97
4.1 Програмний комплекс для визначення нормованих параметрів заземлювальних пристроїв.....	97
4.2 Програмні засоби для інтерпретації та еквівалентування результатів вертикального електричного зондування ґрунту.....	112
4.2.1 Інтерпретація результатів вертикального електричного зондування у вигляді багат шарового геоелектричного напівпростору	112
4.2.2 Приведення багат шарових ґрунтів до розрахункових моделей.....	122
4.3 Розробка практичних рекомендацій щодо застосування методу еквівалентування при розрахунку нормованих параметрів.....	125
4.4 Висновки до розділу 4	132
5 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКУ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДІЮЧИХ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ УКРАЇНИ	134
5.1 Статистичний аналіз значень нормованих параметрів	134
5.2 Аналіз способів реконструкції заземлювального пристрою	141
5.3 Параметрична модель для прогнозування матеріальних витрат на реконструкцію заземлювального пристрою	155
5.4 Висновки до розділу 5	167
ВИСНОВКИ.....	169
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	172
Додаток А. Результати порівняння експериментального та розрахункового значення опору заземлювального пристрою	183
Додаток Б. Акти впровадження	185
Додаток В. Список публікацій за темою дисертації	191