

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

НІЖЕВСЬКИЙ ІЛЛЯ ВІКТОРОВИЧ

УДК 621.316.99

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

Спеціальність 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.

І.В. Ніжевський

Науковий керівник Бондаренко Володимир Омел'янович доктор технічних наук, професор

Харків – 2017

АНОТАЦІЇ

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

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

Дисертація присвячена актуальній науково-практичній проблемі пошуку і розробки нових способів для вимірювання опору заземлювальних пристроїв (ЗП), розробки нових конструкцій ЗП, що дозволяють спростити реконструкцію підстанцій, а також створення і вдосконалення математичних моделей і програм для розрахунку електричних характеристик ЗП довільних конструкцій. Аналіз результатів обстеження існуючих ЗП підстанцій, виявив серйозні порушення, які призводять до відхилення параметрів від норми і до необхідності модернізації ЗП підстанцій. Показано, що модернізація ЗП призводить до відновлення його нормованих параметрів.

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

Виявлено основні тенденції удосконалення використовуваних конструкцій ЗП існуючих підстанцій.

Проведено аналіз існуючих вимог до періодичного контролю електричних параметрів ЗП, а також способів і методів їх вимірювання і тенденції їх розвитку.

На підставі цього аналізу сформульовані мета і наукова задача розробки і дослідження нових конструкцій ЗП і нових способів контролю їх електричних параметрів з урахуванням вимог, які впливають з умов роботи ЗП в електричних мережах.

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

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

Вперше розроблено математичну модель для аналізу електричних характеристик ЗП підстанцій в двошаровому ґрунті, що відрізняється тим, що дозволяє визначити електричні характеристики ЗП, яке складається з двох рівнів з довільним розташуванням їх щодо кордону розділу шарів.

На підставі існуючої математичної моделі шляхом її удосконалення розроблена математична модель складного дворівневого ЗП підстанції. Розроблено метод розрахунку електричних характеристик ЗП, який реалізований у вигляді програми «ВЕКТОР» в пакеті Mathcad. Точність розрахунку оцінюється шляхом порівняння результатів розрахунків з експериментальними значеннями модельних і натурних заземлювачів, а також з результатами розрахунків інших авторів.

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

Отримано аналітичні вирази для розрахунку електричного поля і опору розтікання традиційно елементарних (горизонтальний, кільцевої) електродів ЗП, розташованих на різних рівнях по глибині в однорідному і двошаровому ґрунті.

Досліджено електричні характеристики дворівневого ЗП підстанцій як в однорідній, так і в двошаровій структурі ґрунту. Вирішення цього завдання виконувалося методом обчислення потенційних коефіцієнтів на основі векторних операцій.

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

Запропоновано і досліджено два можливих варіанти модернізації існуючого ЗП підстанцій. Перший варіант передбачає укладання додаткових горизонтальних електродів сітки в землі на другому (верхньому) рівні, тобто на глибині 0,3 ... 0,35 м, а не на глибині 0,7 м, як це передбачено реконструкцією. Другий варіант передбачає укладання на другому рівні повної сітки.

Аналіз результатів виконаних досліджень показав, що з погіршенням стану вихідного ЗП внаслідок корозії або помилок проектувальників і монтажників застосування дворівневого заземлювача на підстанції дозволяє не тільки відновити його електричні характеристики, але і поліпшити їх. Встановлено, що глибина закладання сітки верхнього рівня повинна бути не менше 0,3 м, так як подальше зменшення глибини призводить до збільшення напруги дотику.

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

Вперше запропоновано метод вибору конструкції ЗП підстанцій, що відрізняється тим, що в ньому враховується вплив товщини шару зволоження, промерзання або висихання ґрунту на електричні характеристики ЗП, що дозволяє істотно підвищити його експлуатаційні характеристики.

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

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

Удосконалено метод вирівнювання електричних потенціалів по поверхні землі над вічками ЗП підстанцій і за межами контуру ЗП, що відрізняється тим, що встановлено зв'язок розмірів вічка сітки з глибиною її укладання, що дозволило рівномірно розподілити потенціали і забезпечити мінімальну напругу дотику.

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

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

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

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

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

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

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

Розроблено моделі та методи, які можуть бути використані при дослідженні електричних параметрів ЗП в діючих електричних мережах високої напруги. В рамках договору з АК «Харківобленерго» був виконаний аналіз, розроблено та запропоновано рекомендації щодо модернізації (виконання) дворівневого ЗП.

Використання дворівневого ЗП дозволяє запобігти пошкодженню основного обладнання підстанцій, а також відмови систем релейного захисту і автоматики, які могли б бути викликані дефектами ЗП до його модернізації.

Запропоновано також практичне застосування результатів нового методу вимірювання опору розтікання складного ЗП, що полягає в тому, що за результатами вимірювань виконується розрахунок розподілу потенціалів в системі взаємовпливаючих ЗП при коротких замиканнях. Теоретичні положення і практичні висновки використовуються в науково-дослідних роботах та навчальному процесі кафедри ПЕЕ НТУ «ХП» для підготовки студентів за спеціальністю 05070102 - «Електричні системи і мережі».

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

Список публикацій здобувача

1. Нижегородский И.В. Электрические характеристики двухуровневого эквипотенциального заземлителя из одиночных горизонтальных электродов / В.И.Гуль, В.И.Нижевский, И.В.Нижевский // Электротехніка і Електромеханіка. – 2006. – № 5. – С. 33-35.
2. Нижегородский И.В. Определение на территории заземляющего устройства месторасположения измерительного электрода с близким к нулю потенциалом и оценка сопротивления заземления такого заземляющего устройства / В.И.Гуль, В.И.Нижевский, И.В.Нижевский, А.А.Маковецкий // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. пр. Тем. вип.: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 28. – С. 43-46.
3. Нижегородский И.В. Исследование электрического поля в грунте в окрестностях кольцевого заземлителя / В.И.Нижевский, И.В.Нижевский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 3/4 (33). – С. 54-57.
4. Нижегородский И.В. Электрические характеристики двухуровневого эквипотенциального заземлителя из одиночных кольцевых электродов / В.И.Нижевский, И.В.Нижевский // Электротехніка і Електромеханіка. – 2008. – № 4. – С. 44-47.
5. Nizhevskiy I.V. Die Erarbeitung des neuen Herangehens nach der Versorgung der normierten Parameter die Erdungsanlagen auf den existierenden Unterstationen (Umspannungswerken) / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2009. – №4/11 (40). – pp. 53-54.
6. Нижегородский И.В. Экспериментальное исследование двухуровневого заземляющего устройства подстанции на физических моделях / И.В.Нижевский, В.И.Нижевский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 5/6 (41). – С. 61-65.
7. Нижегородский И.В. Исследование влияния глубины укладки заземляющей сетки верхнего уровня двухуровневого заземлителя подстанции на распределение потенциалов по поверхности земли /

И.В.Нижевский, В.И.Нижевский, С.Л.Шишигин// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 6/6 (42). – С. 41-45.

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

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

10. Нижевский И.В. К вопросу измерения с приемлемой погрешностью сопротивления заземления объекта в условиях ограничения разности потенциалов / И.В.Нижевский, В.И.Нижевский, В.И.Гуль // Електротехніка і Електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 62-65.

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

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

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

14. Нижевский И.В. Исследование распределения потенциалов на поверхности грунта у вьездов (входов) и углов заземляющего контура подстанции / И.В.Нижевский, В.И.Нижевский, А.А.Крупенко//Вестник НТУ

«ХПИ».Зб. наук. пр. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2013. – № 59 (1032). –С. 112-116.

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

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

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

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

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

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

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

Nizhevskiy I.V. Improvement of methods of modernization and control of parameters of grounding device of city substations. - Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.14.02 - electrical stations, networks and systems. –National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». – Kharkov, 2017.

The Dissertation is devoted to the actual scientific and practical problem of searching for and developing new methods for measuring the resistance of grounding devices (GD), developing new designs of GD that allow simplifying the reconstruction of substations, as well as creating and improving mathematical models and programs for calculating the electrical characteristics of arbitrary structures.

The analysis of the results of the survey of existing substation storage facilities revealed serious violations that lead to deviation of parameters from the norm and to the need to upgrade the substation GD. It is shown that the modernization of the GD leads to the restoration of its normalized parameters.

The main functions of the substation GD are analyzed, the main parameters are identified, which determine its technical state and operability during operation, i.e. Readiness to perform its functions with a given reliability at any time. The main parameters include: resistance, GD potential and touch voltage.

The main tendencies of improvement of the used substation structures of existing substations are revealed.

The analysis of the existing requirements for the periodic monitoring of the electrical parameters of the GD, as well as the methods for measuring them and the trends in their development.

On the basis of this analysis, the goal and scientific task of developing and researching new designs of GD and new methods for monitoring their electrical parameters are formulated, taking into account the requirements that arise from the conditions of work of GD in electrical networks.

It is shown that in conditions of dense development of the territory at the location of the substation, it is often impossible to perform the necessary

measurements in connection with the impossibility of spacing the electrodes in the measurement circuit for large distances, as required by the existing technique (3D, where D is the large diagonal of the GD).

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

For the first time, a mathematical model has been developed for analyzing the electrical characteristics of substation storage in two-layer soils, which is distinguished by the fact that it allows to determine the electrical characteristics of GD that consists of two levels with an arbitrary arrangement of them relative to the interface of the layers.

Based on the existing mathematical model, by improving it, a mathematical model of a complex two-level substation has been developed. A method for calculating the electrical characteristics of GD is developed, which is implemented as a "VECTOR" program in the Mathcad package. The accuracy of the calculation is estimated by comparing the results of calculations with the experimental values of the model and natural grounding switches, as well as with the results of calculations by other authors. The shortcomings of the existing recommendations for the reconstruction of the GD are analyzed and their modernization is suggested. The methods used in Ukraine for measuring the resistance of simple and complex GD devices are given.

Analytical expressions are obtained for calculating the electric field and resisting the spreading of traditionally elementary (horizontal, ring) GD electrodes located at different depth levels in a homogeneous and two-layer soil.

The electrical characteristics of a two-level substation GD in substations as well as in a homogeneous and in a two-layer soil structure are investigated. The solution of this problem was carried out by the method of calculating potential coefficients on the basis of vector operations.

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

Two possible options for upgrading the existing substation GD are proposed and investigated. The first option involves laying additional horizontal grid electrodes in the ground at the second (upper) level, i. e. at a depth of 0.3 ... 0.35 m, and not at a depth of 0.7 m, as provided for in the reconstruction. The second option involves laying the complete grid on the second level.

Analysis of the results of the performed studies showed that with deterioration of the state of the GD due to corrosion or errors of designers and installers, the use of a two-level grounding switch at the substation allows not only to restore its electrical characteristics, but also to improve them. It has been established that the depth of the upper level mesh shall not be less than 0.3 m, since a further decrease in depth leads to an increase in the contact voltage.

It is established that the application of the upper-level grid of a two-level GD in comparison with the existing GD for all cases gives the lowest value of the storage resistance, and also the largest value of the relative potential at any point on the surface of the earth, including in the corner cell.

For the first time, a method for selecting the design of substation storage is proposed, which is characterized by the fact that it takes into account the effect of the thickness of the humidifying layer, the freezing or drying of the soil on the electrical characteristics of the storage device, which allows to significantly increase its operational characteristics.

It is established that the maximum permissible size a of the grid cell is larger than for a square grounding electrode with equal equalization of electrical potentials over the earth's surface, and can be determined from the ratio $a = t / 0.2$. Thus, the maximum permissible cell size of a complex earth electrode depends both on the depth of its laying and on the number of cells with a constant area occupied by it.

It was found that the heterogeneity of the soil does not influence the results obtained, which allow to optimally optimize the metal consumption and the volume of excavation during the modernization of the storage facility, and significantly improve the reliability of the electrical safety requirements.

The method of equalizing the electrical potentials over the ground surface above the substation storage cells and outside the GD circuit is improved, which is characterized by the connection of the grid cell size with the depth of its packing, which allowed to distribute the potentials evenly and ensure a minimum contact voltage.

A method is proposed for determining the location of a measuring electrode in the substation location with a potential close to zero and estimating the earth resistance of such a storage device, which makes it possible to estimate the potential in the design mode of the substation operation of a substation of a separate earth electrode at the substation, provided that the galvanic connection of this grounding switch to the GD circuit is excluded.

The method of measuring the resistance of substation GD with the help of a three-electrode installation is improved, characterized in that the functions of the measuring electrodes change in turn, allowing measurements without finding a zero potential point.

The theoretical substantiation of the method is fulfilled and a method for measuring the resistance of substation storage in the conditions of dense development of the territory is developed. The method is applicable for any character of ground heterogeneity, any size and configuration of GD, and arbitrary placement of measuring electrodes without finding a zero potential point.

The electrical characteristics of a two-level substation GD have been experimentally investigated by physical modeling in an electrolytic bath. The results obtained showed good agreement with the results of calculations.

An algorithm and a program for calculating the electrical parameters of the GD in the form of a two-level design are developed. The program allows you to automate the calculation work when selecting GD.

The main scientific results of the work have found their application in the creation of a two-level GD structure, which allowed them to be modernized. Proposed and patented GD (patent of Ukraine no. 18292), which was realized in the AK "Kharkivoblenergo" in the modernization of the substation "Pavlovskaya."

Two new methods for measuring the resistance of the GD are proposed and patented (patents of Ukraine no. 19760 and no. 58994), which are applicable for any facility without its disconnection and in the conditions of industrial and urban development.

Models and methods have been developed that can be used to study the electrical parameters of GD in existing high-voltage electrical networks. Within the framework of the agreement with AK "Kharkivoblenergo", an analysis was carried out, recommendations were developed and proposed for the modernization (implementation) of a two-level storage device.

The use of a two-level GD allows to prevent damage to the main equipment of substations, as well as failures of relay protection and automation systems that could be caused by GD defects before its modernization.

A practical application of the results of a new method for measuring the resistance to spreading a complex GD is also proposed, which consists in the fact that, based on the measurement results, the potential distribution is calculated in a system of mutually interfering storage devices in case of short circuits. Theoretical propositions and practical conclusions are used in the research work and educational process of the Department of PEE NTU «KhPI» for the preparation of students in specialty 05070102 –«Electrical systems and networks».

Keywords: urban substation, grounding device, modernization, two-level design, electrical characteristics, mathematical model, resistance measurement method, theoretical justification, physical modeling, experimental studies, standardized parameters.

List of publications of aspirant

1. Nizhevskiy I.V. Elektricheskie karakteristiki dvuhurovnevoogo ekvipotsialnogo zazemlitelya iz odinochnih gorizontalnyih elektrodov / V.I.Gul, V.I.Nizhevskiy, I.V.Nizhevskiy // Elektrotehnika i Elektromehnika. – 2006. – no. 5. – pp. 33-35.
2. Nizhevskiy I.V. Opredelenie na territorii zazemlyayuschego ustroystva mestoraspolzheniya izmeritelnogo elektroda s blizkim k nulyu potentsialom i otsenka soprotivleniya zazemleniya takogo zazemlyayuschego ustroystva / V.I.Gul, V.I.Nizhevskiy, I.V.Nizhevskiy, A.A.Makovetskiy // Visnik NTU «HPI». Zb. nauk. pr. Tem. vip.: Elektroenergetika i peretvoryuyucha tehnika. – Harkiv: NTU «HPI». – 2006. – no. 28. – pp. 43-46.
3. Nizhevskiy I.V. Issledovanie elektricheskogo polya v grunte v okrestnostyah koltsevogo zazemlitelya / V.I.Nizhevskiy, I.V.Nizhevskiy // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy. – 2008. – no. 3/4 (33). – pp. 54-57.
4. Nizhevskiy I.V. Elektricheskie karakteristiki dvuhurovnevoogo ekvipotsialnogo zazemlitelya iz odinochnyih koltsevyyih elektrodov / V.I.Nizhevskiy, I.V.Nizhevskiy // Elektrotehnika i Elektromehnika. – 2008. – no. 4. – pp. 44-47.
5. Nizhevskiy I.V. Die Erarbeitung des neuen Herangehens nach der Versorgung der normierten Parameter die Erdungsanlagen auf den existierenden Unterstationen (Umspannungswerken) / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2009. – №4/11 (40). – pp. 53-54.
6. Nizhevskiy I.V. Eksperimentalnoe issledovanie dvuhurovnevoogo zazemlyayuschego ustroystva podstantsii na fizicheskikh modelyakh / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy. – 2009. – no. 5/6 (41). – pp. 61-65.
7. Nizhevskiy I.V. Issledovanie vliyaniya glubiny ukladki zazemlyayuschey setki verhnego urovnya dvuhurovnevoogo zazemlitelya podstantsii na raspredelenie potentsialov po poverhnosti zemli / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy, S.L.Shishigin //

Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tekhnologiy. – 2009. – no. 6/6 (42). – pp. 41-45.

8. Nizhevskiy I.V. Issledovanie vliyaniya konstruktсии zazemlyayushego ustroystva podstantsii na ego soprotivlenie rastekaniyu / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy, V.E.Serdyuk // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tekhnologiy. – 2010. – no. 4/7 (46). – pp. 21-23.

9. Nizhevskiy I.V. Vosstanovlenie normiruemyih parametrov zazemlyayuschih ustroystv na deystvuyuschih podstantsiyah // Vestnik NTU «HPI». Zb. nauk. pr. Tem. vyip. : Problemi udoskonalennya elektrichnih mashin i aparativ. – Harkiv: NTU «HPI». – 2010. – no. 16. – pp. 83-88.

10. Nizhevskiy I.V. K voprosu izmereniya s priemlemoy pogreshnostyu soprotivleniya zazemleniya ob'ekta v usloviyah ogranicheniya raznosa elektrodov shemy izmereniya / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy, V.I.Gul // Elektrotehnika i Elektromekhanika. – 2010. – no. 5. – pp. 62-65.

11. Nizhevskiy I.V. Raschet potentsialov na kazhdom iz otdelnyih vzaimovliyayuschih zazemlyayuschih ustroystv / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy, V.I.Gul // Vestnik NTU «HPI». Zb. nauk. pr. Tem. vyip.: Energetika: nadiynist ta energoefektivnist. – Harkiv: NTU «HPI». – 2010. – no. 1. – pp. 141-144.

12. Nizhevskiy I.V. Issledovanie vliyaniya promerzaniya (prosyihaniya) verhnego sloya zemli na soprotivlenie zazemlyayushego ustroystva podstantsii // Vestnik NTU «HPI». Zb. nauk. pr. Tem. vyip.: Problemi udoskonalennya elektrichnih mashin i aparativ. – Harkiv: NTU «HPI». – 2011. – no. 60. – pp. 135-140.

13. Nizhevskiy I.V. K voprosu rascheta sobstvennyih i vzaimnyih soprotivleniy treh vzaimovliyayuschih zazemliteley / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy // Vestnik NTU «HPI». Zb. nauk. pr. Tem. vyip.: Energetika: nadiynist ta energoefektivnist. – Harkiv: NTU «HPI». – 2012. – no. 23. – pp. 124-134.

14. Nizhevskiy I.V. Issledovanie raspredeleniya potentsialov na poverhnosti grunta u v'ezdov (vhodov) i uglov zazemlyayushego kontura podstantsii / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy, A.A.Krupenko // Vestnik NTU «HPI». Zb. nauk. pr.

Seriya: Energetika: nadiynist ta energoefektivnist. – H.: NTU «HPI». – 2013. – no. 59 (1032). – pp. 112-116.

15. Nizhevskiy I.V. Issledovanie vliyaniya uvlazhneniya, prosyihaniya ili promerzaniya verhnego sloya zemli na elektricheskie karakteristiki zazemlyayushego ustroystva / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy // Elektrotehnika i Elektromehanika. – 2014. – no.1. – pp. 62-65.

16. Nizhevskiy I.V. Issledovanie vyiravnivaniya elektricheskikh potentsialov po poverhnosti zemli na zanyatoy zazemlitelem territorii / I.V. Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy, S.L. Shishigin // Elektrotehnika i Elektromehanika. – 2014. – no.4. – pp. 71-77.

17. Nizhevskiy I.V. Metodika izmereniya soprotivleniya zazemlyayushego ustroystva / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy // Elektrotehnika i Elektromehanika. – 2016. – no.3. – pp. 50-57.

18. Nizhevskiy I.V. Eksperimentalnoe obosnovanie metoda izmereniya soprotivleniya zazemlyayushego ustroystva / I.V.Nizhevskiy, V.I.Nizhevskiy, V.E.Bondarenko // Elektrotehnika i Elektromehanika. – 2016. – no.6. – pp. 60-64.

19. Pat. 18292 Ukrayina, MPK⁷ NO2V 1/00. Pristriy zazemlennya / Gul V.I., Nizhevskiy V.I., Nizhevskiy I.V.; zayavnik ta patentovlasnik Nizhevskiy V.I. – no. u200603019; zayavl. 21.03.2006; opubl. 15.11.2006, byul. no. 11.–4pp.

20. Pat. 19760 Ukrayina, MPK⁷ G01R 27/20. Sposib vimiryuvannya oporu roztikannyu okremih vzaemozvyazanih zazemlyuvachiv / Gul V.I., Nizhevskiy V.I., Nizhevskiy I.V., Ganus O.I.; zayavnik ta patentovlasnik Nizhevskiy V.I. – no. u200608963; zayavl. 11.08.2006; opubl. 15.12.2006, byul. no. 12.– 8 pp.

21. Pat. 58994 Ukrayina, MPK⁷ G01R 27/20. Sposib vimiryuvannya oporu roztikannyu okremih vzaemozv'yazanih zazemlyuvachiv / Gul V.I., Nizhevskiy V.I., Nizhevskiy I.V.; zayavnik ta patentovlasnik Nizhevskiy V.I. - no. u201014231; zayavl. 29.11.2010; opubl. 26.04.2011, byul. no. 8.– 6 pp.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. СТАН ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ПІДСТАНЦІЙ, ЩО ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ	12
1.1. Заземлювальні пристрої підстанцій в сучасних умовах, їх функції, нормування, проектування і контроль параметрів, що характеризують його працездатність	12
1.2. Огляд і аналіз результатів обстеження стану заземлювальних пристроїв об'єктів електроенергетики	18
1.3. Аналіз методів вимірювання опору заземлювачів	30
Висновки по розділу 1	42
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ОПОРУ ЗАЗЕМЛЮВАЧІВ ПРОСТИХ І СКЛАДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ЇХ ВДОСКОНАЛЕННЯ	45
2.1. Математична модель для розрахунку електричних характеристик складного заземлювального пристрою	45
2.2. Застосовувані методи вимірювання опору заземлювачів	54
2.3. Недоліки існуючих рекомендацій з реконструкції заземлювальних пристроїв підстанцій	56
2.4. Електричні характеристики дворівневого екіпотенційного заземлювача з одиночних горизонтальних електродів	57
2.5. Дослідження електричного поля в ґрунті навколо кільцевого заземлювача	66
2.6. Електричні характеристики дворівневого екіпотенційної заземлювача з одиночних кільцевих електродів	74
2.7. Математичне моделювання дворівневої конструкції ЗП	81
Висновки по розділу 2	82
РОЗДІЛ 3. ВАРІАНТИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ПІДСТАНЦІЙ, ЩО ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ	84
3.1. Варіанти виконання ЗП після обстеження і розробка нового	

підходу по відновленню нормованих параметрів ЗП на існуючих підстанціях.....	84
3.2. Дослідження впливу глибини укладання заземлювальної сітки верхнього рівня дворівневого заземлювача підстанції на розподіл потенціалів по поверхні землі.....	87
3.3. Дослідження впливу зволоження, просихання або промерзання верхнього шару землі на електричні характеристики заземлювального пристрою.....	96
3.4. Дослідження вирівнювання електричних потенціалів по поверхні землі на зайнятій заземлювачем території.....	107
3.5. Дослідження розподілу потенціалів на поверхні ґрунту біля в'їздів (входів) і кутів заземлюючого контуру підстанції.....	120
Висновки по розділу 3.....	125
РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ЗАЗЕМЛЕННЯ ЗА ДАНИМИ ВИМІРЮВАНЬ В ТРЬОХЕЛЕМЕНТНОЇ СИСТЕМІ ЗАЗЕМЛЮВАЧІВ.....	127
4.1. Вимірювання опору заземлення при використанні методу потенційного електрода в умовах обмеження розносу електродів схеми вимірювання.....	127
4.2. Варіанти отримання власних і взаємних опорів заземлювачів, що входять в систему трьох взаємовпливаючих заземлювачів, за допомогою фізичної та математичної моделей.....	134
4.3. Універсальний метод вимірювання опору заземлювального пристрою.....	142
4.4. Дослідження в електролітичній ванні моделі системи з групи взаємовпливаючих заземлювачів.....	154
4.5. Порівняльний аналіз результатів фізичного моделювання трьохелементної групи заземлювачів і результатів визначення за універсальним методом вимірювання власних і взаємних опорів заземлювачів.....	160
4.6. Рекомендована методика натурних вимірювань в групі	

заземлювачів і обробки результатів вимірювань для отримання величин власних і взаємних опорів в трьохелементної системі.....	164
Висновки по розділу 4.....	169
РОЗДІЛ 5. ЗАСТОСУВАННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ НА ДІЮЧИХ ПІДСТАНЦІЯХ.....	172
5.1. Розрахунок потенціалів на кожному з окремих взаємовпливаючих заземлювальних пристроїв.....	172
5.2. Визначення на території заземлювального пристрою розташування вимірювального електрода з близьким до нуля потенціалом і оцінка опору заземлення такого заземлювального пристрою.....	176
5.3. Експериментальне дослідження дворівневого заземлювального пристрою підстанції на фізичних моделях.....	180
5.4. Оцінка ефективності розробленого рішення.....	185
Висновки по розділу 5.....	185
ВИСНОВКИ.....	189
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	191
ДОДАТОК А. Розрахунок заземлювальних пристроїв з кільцевих заземлювачів.....	208
ДОДАТОК Б. Обґрунтування коректності розрахунків за програмою «ВЕКТОР».....	213
ДОДАТОК В. Деякі особливості та обмеження вимірювань опору ЗП.....	216
ДОДАТОК Г. Експериментальне дослідження заземлювальних пристроїв підстанцій на фізичних моделях.....	219
ДОДАТОК Д. Список опублікованих праць за темою дисертації.....	224
ДОДАТОК Е. Акти впровадження результатів дисертації.....	229