

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

Глебов Олег Юрійович

УДК 621.316.9

ДИСЕРТАЦІЯ

ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
БЕЗАВАРІЙНОЇ РОБОТИ ВТОРИННИХ КІЛ

05.14.02 – електричні станції, мережі та 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

О. Ю. Глебов

*Текст дисертації  
оформлено за зразком  
всипати  
Автори: Глебов Олег Юрійович  
КВУ.050.06  
28.01.19*

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

*Коліушко Г.М.*

Харків – 2019

## АНОТАЦІЯ

*Глебов О.Ю.* «Вдосконалення заземлювальних пристроїв електричних підстанцій для забезпечення безаварійної роботи вторинних кіл». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.14.02 – «Електричні станції, мережі та системи». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2019.

У дисертаційній роботі наведено основні функції та нормативні вимоги з діагностики заземлювальних пристроїв, проведено аналіз результатів діагностики та наведено основні недоліки заземлювальних пристроїв. Встановлено, що переважна більшість обстежених заземлювальних пристроїв на момент проведення діагностики не відповідає вимогам нормативних документів як за конструктивним виконанням, так і зазначеннями нормованих параметрів. Обґрунтована актуальність вдосконалення заземлювальних пристроїв електроустановок напругою понад 1 кВ у електричних мережах із глухозаземленою або ефективно заземленою нейтраллю, яке спрямовано на забезпечення електромагнітної сумісності первинних та вторинних кіл, а саме на запобігання пошкодження ізоляції кабелів вторинних кіл вимірювальних трансформаторів струму та на запобігання хибних спрацювань струмових захистів.

На основі аналізу сучасного стану проблеми було сформульовано задачі для вдосконалення заземлювальних пристроїв підстанцій напругою 330(220)/150(110) кВ за критерієм запобігання пошкодження ізоляції кабелів струмових захистів при короткому замиканні на шинах розподільного пристрою вказаних класів напруги. Поставлені завдання були вирішені на основі розрахункових, теоретичних та експериментальних досліджень на діючих високовольтних енергооб'єктах України. При цьому були використані: методи теорії планування експерименту для аналізу факторів, які впливають на параметри

заземлювальних пристроїв, з метою визначення реального діапазону їх значень для розглянутих підстанцій, для побудови математичних моделей заземлювального пристрою, а також для аналізу нормованих параметрів заземлювального пристрою в аварійних режимах роботи; методи теорії електричних кіл для аналізу механізмів виникнення електромагнітних завад у вторинних колах трансформаторів струму, трансформаторів напруги та фільтрів приєднання високо-частотного зв'язку; методи фізичного експерименту при перевірці теоретичних висновків та методика електромагнітної діагностики діючих заземлювальних пристроїв.

У роботі використовується відома математична модель заземлювального пристрою, яка основана на методі заміни заземлювача множиною точкових джерел струму та таким підбором струму, при якому еквіпотенціальна поверхня результуючого електричного поля в ґрунті має таку ж форму, що і поверхня заземлювача. Вказана модель використовується для проведення повних багатofакторних дворівневих експериментів. У дисертаційній роботі наведено огляд нормованих критеріїв виконання заземлювальних пристроїв, які спрямовано на забезпечення електробезпеки персоналу та на запобігання пошкодження ізоляції високовольтних кабелів, що виходять за межі заземлювального пристрою.

У роботі вперше сформульовано три додаткових критерії виконання заземлювальних пристроїв підстанцій напругою 330(220)/150(110) кВ, які спрямовано на попередження пошкодження ізоляції кабелів струмових захистів при ударі блискавки та при короткому замиканні на шинах розподільного пристрою, а також на попередження хибного спрацювання струмових захистів у випадку пошкодження ізоляції вказаних кабелів.

У роботі проведено аналіз експериментальних даних, отриманих на 80 діючих підстанціях України напругою 330(220)/150(110) кВ, для визначення незалежних факторів з точки зору теорії планування експерименту, а також незначимих факторів із ряду незалежних. В результаті проведення однофакторних експериментів встановлено, що для визначення опору заземлювального пристрою незалежними факторами є площа заземлювального пристрою, еквівалентний пи-

томий опір ґрунту, розмір чарунки сітки заземлювального пристрою, периметр перерізу горизонтальних заземлювачів, глибина закладання горизонтальних заземлювачів, струм однофазного короткого замикання. Для визначення напруги на ізоляції кабелів вторинних кіл трансформатору струму, який є найвіддаленішим від зали релейних панелей, незалежним фактором, на додаток до наведених вище, є конструктивний коефіцієнт, який є відношенням відстані між трансформатором струму та залом релейних панелей до діагоналі заземлювального пристрою. Встановлено реальні діапазони значень незалежних факторів: площа заземлювального пристрою змінюється від  $1 \times 10^4 \text{ м}^2$  до  $9 \times 10^4 \text{ м}^2$ ; розмір чарунки сітки змінюється від 5 м до 25 м; периметр перерізу горизонтальних заземлювачів змінюється від 32 мм до 152 мм; еквівалентний питомий опір ґрунту змінюється від 5 Ом $\times$ м до 250 Ом $\times$ м; струм короткого замикання змінюється від 1 кА до 43 кА; конструктивний коефіцієнт змінюється від 0,3 до 0,9. В результаті проведення однофакторних експериментів встановлено, що глибина закладання горизонтальних заземлювачів є незначимим фактором в діапазоні значень від 0,4 м до 1,4 м для визначення опору заземлювального пристрою та напруги на ізоляції кабелів.

У роботі сформульовано умови та проведено експерименти для визначення опору заземлювального пристрою при короткому замиканні на шинах відкритого розподільного пристрою: повний дворівневий чотирьохфакторний експеримент (ПФЕ-2<sup>4</sup>); повний дворівневий п'ятифакторний експеримент (ПФЕ-2<sup>5</sup>). Отримана модель забезпечує адекватність та представляє собою сукупність шести поліномів першого порядку, які в залежності від кількості факторів та умов використання мають від 10 до 13 значимих коефіцієнтів регресії. У роботі наведено результати розрахунку опору заземлювального пристрою для реальних значень факторів 80 підстанцій за отриманими формулами та за формулами, які відомі з нормативної та технічної літератури. Встановлено, що відношення значень опору, визначених в куті та в центрі сітки заземлювального пристрою, для різних підстанцій сягає від 1,06 до 2,59. Значення опору, визначене за формулою нормативного документу, для більшості підстанцій менше, ніж визначене за рівняннями

регресії факторних експериментів, тому є оцінкою знизу. Значення опору, визначені за формулами Лорана та Олендорфа-Лорана, відрізняються від значення опору, визначеного за формулою нормативного документу, не більше, ніж на 10 % в реальному діапазоні значень факторів.

У роботі вперше сформульовано умови та проведено повний дворівневий шестифакторний експеримент (ПФЕ-2<sup>6</sup>) для визначення напруги на ізоляції кабелю вторинних кіл трансформатору струму, який є найвіддаленішим від зали релейних панелей, при короткому замиканні на шинах розподільного пристрою. Отримана модель забезпечує адекватність та представляє собою сукупність чотирьох поліномів першого порядку, які в залежності від кількості факторів та умов використання мають від 24 до 42 значимих коефіцієнтів регресії. У роботі наведено результати розрахунку вказаної напруги для реальних значень факторів 80 підстанцій за отриманими формулами. Встановлено, що значення напруги для однієї з підстанцій зі струмом короткого замикання 27,8 кА може збільшуватися з 855,93 В до 2186,12 В при збільшенні розміру чарунки сітки з 5 м до 25 м.

У роботі сформульовано процедуру експериментального визначення напруги на ізоляції кабелю вторинних кіл трансформатору струму, який є найвіддаленішим від зали релейних панелей, при імітації короткого замикання на шинах цього трансформатору струму. Для проведення вказаної процедури методом амперметра-вольтметра запропоновано використовувати чотирьохпровідну схему вимірювання із застосуванням вимірювального комплексу КДЗ-1У або вимірювача опору С.А 6470N. Для зменшення впливу електромагнітних завад запропоновано виконувати вимірювання на трьох різних частотах, не рівних промисловій частоті. Після цього слід виконати апроксимацію отриманих результатів з подальшою екстраполяцією до частоти 50 Гц.

У роботі вперше було розроблено методику та наведено приклади визначення конструктивних параметрів та матеріальних витрат на виконання заземлювальних пристроїв підстанцій 330(220)/150(110) кВ з використанням отриманих в роботі математичних моделей за критерієм запобігання пошкодження ізоляції кабелів струмових захистів при короткому замиканні на шинах розподіль-

ного пристрою, а також за критерієм запобігання хибного спрацювання струмових захистів у випадку замикання на землю фазного або нульового провідників кабелю вторинних кіл.

При виконанні дисертаційного дослідження було розроблено методики:

– експериментального визначення напруги на ізоляції кабелю вторинних кіл трансформатору струму, який є найвіддаленішим від зали релейних панелей, при імітації короткого замикання на шинах цього трансформатору струму;

– визначення конструктивних параметрів та матеріальних витрат на виконання заземлювальних пристроїв підстанцій 330(220)/150(110) кВ за критерієм запобігання пошкодження ізоляції кабелів струмових захистів при короткому замиканні на шинах розподільного пристрою;

– визначення конструктивних параметрів та матеріальних витрат на виконання заземлювальних пристроїв підстанцій 330(220)/150(110) кВ за критерієм запобігання хибного спрацювання струмових захистів у випадку замикання на землю фазного або нульового провідників кабелю вторинних кіл.

Розроблені в дисертаційній роботі методики були застосовані в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті «Молнія» під час проведення електромагнітної діагностики стану заземлювальних пристроїв магістральних підстанцій України при виконанні госпдоговірних робіт протягом 2017–2018 рр., а також при виконанні двох прикладних науково-дослідних робіт за бюджетною тематикою Міністерства освіти і науки України.

На основі результатів дослідження сформульовано пропозицію щодо внесення змін до нормативного документу СОУ 31.2-21677681-19 «Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція», що полягає у включенні в його наступну редакцію вимірювальної процедури для експериментального визначення напруги на ізоляції кабелю вторинних кіл трансформатору струму, який є найвіддаленішим від зали релейних панелей, при імітації короткого замикання на шинах цього трансформатору струму, а також рекомендацій з виконання реконструкції заземлювальних пристроїв діючих електроустановок напругою 330(220)/150(110)

кВ за критерієм запобігання пошкодження ізоляції кабелів струмових захистів при короткому замиканні на шинах розподільного пристрою.

*Ключові слова:* заземлювальний пристрій, високовольтна підстанція, опір заземлювального пристрою, напруга на ізоляції, струмовий захист, пошкодження ізоляції, кабель вторинних кіл, математична модель, електробезпека, електромагнітна сумісність.

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

1. Вытришко В. В. Влияние электромагнитных помех промышленной частоты при измерении напряжения прикосновения на электрооборудовании подстанций с использованием комплекса КДЗ-1 / В. В. Вытришко [та ін.] // Вторая Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, – 2005. – С. 189 – 197.

2. Глебов О. Ю. Определение напряжения прикосновения методом суперпозиции составляющих тока однофазного замыкания на землю / О. Ю. Глебов, Д. Г. Колишко, И. Ю. Линк // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2005. – № 49. – С. 85 – 88.

3. Воронина З. А. Влияние частоты измерительного тока при измерении напряжения прикосновения на электрооборудовании энергообъектов с использованием измерительного комплекса "КДЗ-1У" / З. А. Воронина [та ін.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2006. – № 37. – С. 164 – 170.

4. Глебов О. Ю. Исследование уровней электромагнитных помех в антенных фидерах при имитации удара молнии в зависимости от конструктивного выполнения заземляющего устройства / О. Ю. Глебов [та ін.] // Технічна електродинаміка. – 2008. – Ч. 6. – С. 110 – 112.

5. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 / Вороніна З., Глебов О., Єгоров

А. [та ін.] – [Чинний від 2010–03–29] – Київ: Міністерство палива та енергетики України. Об'єднання енергетичних підприємств "Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики". – 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).

6. Воронина З. А. Определение уровней электромагнитных помех в кабелях высокочастотной связи при коротком замыкании на шинах подстанции с целью обеспечения электромагнитной совместимости / З. А. Воронина, О. Ю. Глебов, В. О. Еремеев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2010. – № 18, С. 68 – 75.

7. Воронина З. А. Определение уровней электромагнитных помех в кабелях трансформаторов тока при коротком замыкании на шинах подстанции с целью обеспечения электромагнитной совместимости. / З. А. Воронина, О. Ю. Глебов, Г. М. Колиушко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2011. – № 16, С. 44 – 59.

8. Глебов О. Ю. Определение уровней электромагнитных помех в кабелях трансформаторов напряжения при коротком замыкании на шинах подстанции с целью обеспечения электромагнитной совместимости // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2012. – № 21, С. 43 – 56.

9. Воронина З. А. Методика и результаты проведения диагностики заземляющих устройств / З. А. Воронина [та ін.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2012. – № 52 (958). – С. 49 – 58.

10. Глебов О. Ю. Влияние конструктивного исполнения заземляющего устройства на работоспособность цепей РЗА / О. Ю. Глебов, Д. Г. Колиушко, Г. М. Колиушко, А. В. Пличко // Электрические сети и системы. – 2012. – № 4, С. 86 – 92.

11. Глебов О. Ю. Определение степени влияния электромагнитных эф-



фффектов молнии на оборудование объектов энергетики / О. Ю. Глебов, В. В. Князев, Г. М. Колиушко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2013. – № 60, С. 43 – 51.

12. Глебов О. Ю. Заземление устройств защиты от перенапряжений на подстанциях 330/110 кВ / О. Ю. Глебов, Д. Г. Колиушко, Г. М. Колиушко, А. В. Пличко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2013. – №60, С. 51 – 57.

13. Глебов О. Ю. Определение уровней электромагнитных помех, обусловленных индуктивной связью первичных и вторичных цепей на подстанциях // Тезиси доповіді. Практичні аспекти сумісності електромагнітної та блискавкозахисту "ПАСЕБ-2014". Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції (1 – 3 жовтня 2014 року). – Харків: НТУ "ХПІ" – 2014. С. 32.

14. Глебов О. Ю. Концепция обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала и электромагнитной совместимости электрооборудования энергетических и промышленных объектов. / О. Ю. Глебов [та ін.] // Вісник Житомирського національного аграрно-екологічного університету. – 2014. – № 2 (45), т. 4, ч. II, – С. 235 – 245.

15. Глебов О. Ю. Диагностика заземляющих устройств и систем молниезащиты объектов электроэнергетики на современном этапе / О. Ю. Глебов [та ін.] // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2015. – № 51 (1160). – С. 17 – 24.

16. Глебов О. Ю. Проверка состояния системы уравнивания потенциалов энергообъектов / О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Г. М. Колиушко, А. В. Пличко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2016. – № 14 (1186). – С. 23 – 29.

17. Глебов О. Ю. Анализ нарушений выполнения заземляющих устройств подстанций классом напряжения 35 кВ. / О. Ю. Глебов [та ін.] // Электрические

сети и системы. – 2016. – № 4-5, С. 94 – 97.

18. Глебов О. Ю. К вопросу проектирования заземляющих устройств подстанций 330(220) кВ для обеспечения электромагнитной совместимости вторичных цепей / О. Ю. Глебов, Г. М. Колиушко, Д. Г. Колиушко, Е. П. Еремеева // Електротехніка і електромеханіка. – 2018. – № 5. – С. 72–79. doi: 10.20998/2074-272X.2018.5.11.

19. Глебов О. Ю. К вопросу определения сопротивления заземляющего устройства по его конструктивным параметрам / О. Ю. Глебов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2018. – № 36. – С. 14 – 20.

## ABSTRACT

*Glebov O. JU. "Improvement of grounding systems of electric substations to ensure trouble-free operation of secondary circuits". – Manuscript.*

Thesis for granting Candidate of Technical Sciences Degree in specialty 05.14.02 – "Electric power stations, networks and systems". – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2019.

In the dissertation the basic functions and normative requirements for grounding system diagnostics are given, the analysis of the diagnostics results is carried out and the main disadvantages of grounding system are given. It was established that the overwhelming majority of surveyed grounding system at the time of diagnostics did not meet the requirements of normative documents as for constructive parameters, as well as values of normalized parameters. The urgency of improvement of the grounding systems of electrical installations with the voltage of more than 1 kV in electric networks with a grounded or effectively grounded neutral is substantiated. The improvement is aimed at ensuring the electromagnetic compatibility of primary and secondary circuits, namely, at ensuring the prevention of damage to the insulation of cables of secondary circuits of measuring current transformers and at ensuring the prevention the false triggers of current protections.

Based on the analysis of the present day state of the problem, the tasks for the grounding systems improving of substations 330 (220) / 150 (110) kV were formulated by the criterion for preventing damage to the insulation of current protection cables with short-circuit on the bus bars of the switchgear. The tasks were solved on the basis of design, theoretical and experimental research on existing high-voltage power facilities of Ukraine. In this case, the methods of the theory of planning the experiment were used to analyze the factors that affect the grounding systems parameters, in order to determine the real range of their values for the substations under consideration, to construct mathematical models of the grounding systems, as well as to analyze the normalized parameters of the grounding systems in emergency modes of

operation; methods of the theory of electric circuits for analysis of the mechanisms of electromagnetic interference in secondary circuits of current transformers, voltage transformers and high-frequency attachment filters; methods of physical experiment in checking theoretical conclusions and the method of electromagnetic diagnostics of existing grounding systems.

A well-known mathematical model of a grounding system is used in this work. The model is based on the method of replacing the grounding electrode with a plurality of point current sources and with such a current selection, in which the equipotential surface of the resulting electric field in the soil has the same shape as the surface of the soil. This model is used for executing full multi-factor two-level experiments. In dissertation work the review of standardized criteria of the grounding systems implementation, which is aimed at providing the electrical safety of personnel and to prevent damage to insulation of high voltage cables beyond the boundaries of the grounding systems.

In the work, for the first time, three additional criteria for the implementation of grounding systems of 330 (220) / 150 (110) kV substations are formulated, which are aimed at preventing damage to the insulation of current protection cables with lightning strike and with short circuit on the bus bar of the switchgear, as well as to prevent current protection false triggering in the event of damage to the insulation of the specified cables.

The paper analyzes the experimental data obtained at 80 operating substations 330 (220) / 150 (110) kV of Ukraine, to determine the independent factors from the standpoint of the theory of experiment planning, as well as insignificant factors from a number of independent ones. As a result of single-factor experiments, it was established that for determination of the grounding systems resistance the independent factors are follows: the area of the grounding systems, the equivalent specific soil resistance, the size of the grounding systems mesh cell, the perimeter of the horizontal electrodes section, the depth of the horizontal electrodes, the current of the single-phase short circuit. In order to determine the insulation voltage of the secondary circuits cables of the current transformer, which is the most remote from the relay pan-

els hall, the independent factor, in addition to the above, is a constructive coefficient which is the ratio of the distance between the current transformer and the relay panels hall to the diagonal of the grounding system. Real ranges of independent factors values are established: the area of the grounding systems varies from  $1 \times 10^4 \text{ m}^2$  to  $9 \times 10^4 \text{ m}^2$ ; the size of the grounding systems mesh cell varies from 5 m to 25 m; the perimeter of the horizontal electrodes section varies from 32 mm to 152 mm; the equivalent soil specific resistance varies from 5 ohm×m to 250 ohm×m; short circuit current varies from 1 kA to 43 kA; the constructive coefficient varies from 0,3 to 0,9. As a result of single-factor experiments, the depth of the horizontal electrodes was found to be insignificant in the range of values from 0.4 m to 1.4 m to determine the grounding systems resistance and the voltage on cable insulation.

In the paper the conditions were formulated and experiments were carried out to determine the grounding system resistance with short-circuiting on the bus bars of the open switchgear: a complete two-level four-factor experiment (CFE-2<sup>4</sup>); complete two-level five-factor experiment (CFE-2<sup>5</sup>). The resulting model ensures the adequacy and represents a set of six first-order polynomials, which, depending on the number of factors and conditions of use, have from 10 to 13 significant regression coefficients. The results of calculation of the grounding system resistance for the real values of the factors of 80 substations based on the formulas obtained and the formulas known from normative and technical literature are presented in the work. It was established that the ratio of resistance values determined in the corner and in the center of the grid of the grounding device for various substations ranges from 1.06 to 2.59. The value of the resistance, determined by the formula of the normative document, for the majority of substations is less than determined by the regression equations of factor experiments, therefore, is a lower estimate. The values of the resistance, determined by the Laurent and Olendorf-Laurent formulas, differ from the resistance value determined by the formula of the normative document by no more than 10% in the real range of the values of the factors.

In the paper, for the first time, the conditions were formulated and a complete two-level six-factor experiment (CFE-2<sup>6</sup>) was carried out to determine the voltage on

the cable insulation of the secondary circuits of the current transformer, which is the most distant from the relay panel hall, with a short circuit on the bus bar of the switchgear. The resulting model ensures the adequacy and represents a set of four first-order polynomials that, depending on the number of factors and conditions of use, have from 24 to 42 significant regression coefficients. The paper presents the results of calculation of the given voltage for real values of the factors of 80 substations based on the obtained formulas. It was established that the voltage value for one of the substations with a short circuit of 27.8 kA can increase from 855.93 V to 2186.12 V at an enlarged size of the grounding systems mesh cell of 5 to 25 meters.

In the paper the procedure for the experimental determination of the voltage on the insulation of the secondary circuits cable of the current transformer, which is the most distant from the relay panel hall, when simulating a short circuit on the bus of this current transformer, was formulated. For carrying out of the specified procedure by an ammeter-voltmeter method it is suggested to use a four-wire measuring scheme with the use of the measuring complex KDZ-1U or the resistance meter C.A 6470N. To reduce the influence of electromagnetic interference, it is proposed to perform measurements at three different frequencies not equal to the industrial frequency. After that, the approximation of the obtained results with subsequent extrapolation to the frequency of 50 Hz should be performed.

In the paper, for the first time, a technique was developed and examples of design parameters and material costs for the implementation of grounding system of substations 330 (220) / 150 (110) kV using the mathematical models obtained in the work on the criterion of prevention of insulation damage of current protection cables with short-circuit on the bus bar of the switchgear, as well as the criterion for preventing the false triggering of current protection in the event of a grounding of the phase or zero conductors of the secondary circuits cable.

In the course of the dissertation research, techniques were developed:

- the experimental determination of the voltage on the insulation of the secondary circuits cable of the current transformer, which is the most distant from the relay panel hall, when simulating a short circuit on the bus of this transformer;

– determination of design parameters and material costs for the implementation of grounding system of substations 330 (220) / 150 (110) kV on the criterion of preventing damage to the insulation of current protection cables with short-circuiting on the bus bar of the switchgear;

– determination of design parameters and material costs for the implementation of grounding system of substations 330 (220) / 150 (110) kV on the criterion of preventing the false triggering of current protection in the event of a grounding of phase or zero conductors of secondary circuits cable.

The methods developed in the dissertation work were applied at the Research and Design Institute "Molniya" (NDPKI Molniya) of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» during the electromagnetic diagnostics of the grounding systems state of three main substations of Ukraine as part of commercial contract during 2017-2018, as well as during of two applied research projects financially supported by of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

On the basis of the research results, 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 the measurement procedure for the experimental determination of the voltage on the insulation of the secondary circuits cable of the current transformer, which is the most distant from the relay panel hall, when simulating a short circuit on the bus of this current transformer, as well as recommendations for the reconstruction of the grounding systems operating electrical installations with voltage 330 (220) / 150 (110) kV according to the criterion of prevention of damage of isolation of current protection cables at short-circuiting on the bus bars of the switchgear.

*Key words:* grounding systems, high-voltage substation, grounding system resistance, isolation voltage, current protection, insulation damage, control cable, mathematical model, electrical safety, electromagnetic compatibility.

List of publications of the aspirant by the dissertation theme:

1. Vytrishko V. V. Vlijanie jelektromagnitnyh pomeh promyshlennoj chastoty pri izmerenii naprjazhenija prikosnovenija na jelektrooborudovanii podstancij s ispol'zovaniem kompleksa KDZ-1 / V. V. Vytrishko [ta in.] // Vtoraja Rossijskaja konferencija po zazemljajushhim ustrojstvam: Sbornik dokladov. – Novosibirsk: Sibirskaja jenergeticheskaja akademija, – 2005. – S. 189 – 197.

2. Glebov O. Ju. Opredelenie naprjazhenija prikosnovenija metodom superpozicii sostavljajushhijh toka odnofaznogo zamykanija na zemlju / O. Ju. Glebov, D. G. Koliushko, I. Ju. Link // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – 2005. – № 49. – S. 85 – 88.

3. Voronina Z. A. Vlijanie chastoty izmeritel'nogo toka pri izmerenii naprjazhenija prikosnovenija na jelektrooborudovanii jenergoob#jektov s ispol'zovaniem izmeritel'nogo kompleksa "KDZ-1U" / Z. A. Voronina [ta in.] // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – 2006. – № 37. – S. 164 – 170.

4. Glebov O. Ju. Issledovanie urovnej jelektromagnitnyh pomeh v antennyh fiderah pri imitacii udara molnii v zavisimosti ot konstruktivnogo vypolnenija zazemljajushhego ustrojstva / O. Ju. Glebov [ta in.] // Tehnichna elektrodinamika. – 2008. – Ch. 6. – S. 110 – 112.

5. Viprobuвання ta kontrol' pristroїв zazemlennja elektroustanovok. Tipova instrukcija. SOU 31.2-21677681-19:2009 / Voronina Z., Glebov O., Egorov A. [ta in.] – [Chinnij vid 2010–03–29] – Kiïv: Ministerstvo paliva ta energetiki Ukraïni. Ob'ednannja energetichnih pidpriemstv "Galuzevij rezervno-investicijnij fond rozvitku energetiki". – 2010. – 54 s. – (Nacional'nij standart Ukraïni).

6. Voronina Z. A. Opredelenie urovnej jelektromagnitnyh pomeh v kabeljah vysokochastotnoj svjazi pri korotkom zamykanii na shinah podstancii s cel'ju obezpečenija jelektromagnitnoj sovместimosti / Z. A. Voronina, O. Ju. Glebov, V. O. Eremeev // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – 2010. –



№ 18, S. 68 – 75.

7. Voronina Z. A. Opredelenie urovnej jelektromagnitnyh pomeh v kabeljah transformatorov toka pri korotkom zamykanii na shinah podstancii s cel'ju obespechenija jelektromagnitnoj sovmestivosti. / Z. A. Voronina, O. Ju. Glebov, G. M. Koliushko // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – 2011. – № 16, S. 44 – 59.

8. Glebov O. Ju. Opredelenie urovnej jelektromagnitnyh pomeh v kabeljah transformatorov naprjazhenija pri korotkom zamykanii na shinah podstancii s cel'ju obespechenija jelektromagnitnoj sovmestivosti // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – 2012. – № 21, S. 43 – 56.

9. Voronina Z. A. Metodika i rezul'taty provedenija diagnostiki zazemljajushhijh ustrojstv / Z. A. Voronina [ta in.] // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – 2012. – № 52 (958). – S. 49 – 58.

10. Glebov O. Ju. Vlijanie konstruktivnogo ispolnenija zazemljajushhego ustrojstva na rabotosposobnost' cepej RZA / O. Ju. Glebov, D. G. Koliushko, G. M. Koliushko, A. V. Plichko // Jelektricheskie seti i sistemy. – 2012. – № 4, S. 86 – 92.

11. Glebov O. Ju. Opredelenie stepeni vlijanija jelektromagnitnyh jeffektov molnii na oborudovanie ob#ektov jenergetiki / O. Ju. Glebov, V. V. Knjazev, G. M. Koliushko // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – 2013. – № 60, S. 43 – 51.

12. Glebov O. Ju. Zazemlenie ustrojstv zashhity ot perenaprjazhenij na podstancijah 330/110 kV / O. Ju. Glebov, D. G. Koliushko, G. M. Koliushko, A. V. Plichko // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – 2013. – №60, S. 51 – 57.

13. Glebov O. Ju. Opredelenie urovnej jelektromagnitnyh pomeh, obuslovljen-

nyh induktivnoj svjaz'ju pervichnyh i vtorichnyh cepej na podstancijah // Tezisi dokladu. Praktichni aspekti sumisnosti elektromagnitnoï ta bliskavkozahistu "PASEB-2014". Materiali III Vseukraïns'koï naukovo-tehnicnoï konferencii (1 – 3 zhovtnja 2014 roku). – Harkiv: NTU "HPI" – 2014. S. 32.

14. Glebov O. Ju. koncepcija obespechenija jelektrobezopasnosti obsluzhivajushhego personala i jelektromagnitnoj sovmestivosti jelektrooborudovanija jenergeticheskikh i promyshlennyh ob#ektov. / O. Ju. Glebov [ta in.] // Visnik Zhitomir's'kogo nacional'nogo agrarnoekologichnogo universitetu. – 2014. – № 2 (45), t. 4, ch. II, – S. 235 – 245.

15. Glebov O. Ju. Diagnostika zazemljajushhih ustrojstv i sistem molniezashchity ob#ektov jelektrojenergetiki na sovremennom jetape / O. Ju. Glebov [ta in.] // Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivs'kij politehnicnij institut». – Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – 2015. – № 51 (1160). – S. 17 – 24.

16. Glebov O. Ju. Proverka sostojanija sistemy uravnivanija potencialov jenergoob'ektov / O. Ju. Glebov, S. V. Kiprich, G. M. Koliushko, A. V. Plichko // Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «HPI». – Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – 2016. – № 14 (1186). – S. 23 – 29.

17. Glebov O. Ju. Analiz narushenij vypolnenija zazemljajushhih ustrojstv podstancij klassom naprjazhenija 35 kV. / O. Ju. Glebov [ta in.] // Jelektricheskie seti i sistemy. – 2016. – № 4-5, S. 94 – 97.

18. Glebov O. Ju. K voprosu proektirovanija zazemljajushhih ustrojstv podstancij 330(220) kV dlja obespechenija jelektromagnitnoj sovmestivosti vtorichnyh cepej / O. Ju. Glebov, G. M. Koliushko, D. G. Koliushko, E. P. Eremeeva // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2018. – № 5. – S. 72–79. doi: 10.20998/2074-272X.2018.5.11.

19. Glebov O. Ju. K voprosu opredelenija soprotivlenija zazemljajushhego ustrojstva po ego konstruktivnym parametram / O. Ju. Glebov // Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivs'kij politehnicnij institut». – Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». – 2018. – № 36. – S. 14 – 20.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА	
ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	12
1.1 Визначення реального стану заземлювального пристрою.....	12
1.2 Існуючі критерії визначення параметрів заземлювального пристрою.....	15
1.3 Забезпечення блискавкозахисту та електромагнітної сумісності.....	17
1.4 Моделювання заземлювальних пристроїв .....	24
1.5 Висновки до розділу 1 та постановка задач дослідження.....	28
2 ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	30
2.1 Критерії виконання ЗП для забезпечення ЕМС.....	30
2.1.1 Формулювання критеріїв .....	30
2.1.2 Перший критерій .....	30
2.1.3 Другий критерій .....	31
2.1.4 Третій критерій.....	32
2.2 Вивчення об'єкту та формулювання мети експерименту.....	33
2.2.1 Аналіз підстанцій 330(220)/110(150) кВ .....	33
2.2.2 Класифікація за схемою первинних кіл .....	34
2.2.3 Класифікація за геометричними параметрами .....	37
2.2.4 Класифікація за параметрами ЗП .....	41
2.3 Вибір відкликів та факторів.....	49
2.3.1 Вибір відкликів .....	49
2.3.2 Визначення незалежних факторів .....	19
2.3.3 Визначення незначимих факторів .....	53
2.3.3.1 Залежність відкликів від площі ЗП підстанції.....	53
2.3.3.2 Залежність відкликів від розміру чарунки сітки ЗП.....	57
2.3.3.3 Залежність відкликів від периметру поперечного перетину ГЗ .....	57
2.3.3.4 Залежність відкликів від еквівалентного питомого опору ґрунту.....	59

	3
2.3.3.5 Залежність відкликів від струму КЗ на шинах ВРУ .....	59
2.3.3.6 Залежність відкликів від конструктивного коефіцієнту співвідношення довжин .....	61
2.3.3.7 Залежність відкликів від глибини ГЗ .....	62
2.3.3.8 Значимі фактори при визначенні опору ЗП .....	62
2.3.3.9 Значимі фактори при визначенні напруги на ізоляції кабелю .....	63
2.4 Висновки до розділу 2.....	63
<b>3 ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ТА НАПРУГИ НА ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛЮ .....</b>	<b>66</b>
3.1 Повний чотирьохфакторний експеримент ПФЕ-2 <sup>4</sup> для визначення опору ЗП .....	66
3.2 Повний п'ятифакторний експеримент ПФЭ-2 <sup>5</sup> для визначення опору ЗП.....	71
3.3 Порівняльний аналіз формул для визначення R <sub>зу</sub> .....	75
3.3.1 Визначення опору ЗП за формулою ГОСТ 12.1.30-81 .....	75
3.3.2 Визначення опору ЗП за формулою Оллендорфа-Лорана .....	76
3.3.3 Визначення опору ЗП за формулою Лорана .....	78
3.3.4 Визначення опору ЗП за рівняннями регресії.....	81
3.4 Повний шестифакторний експеримент ПФЭ-2 <sup>6</sup> для визначення напруги на ізоляції кабелю вторинних кіл ТС .....	81
3.5 Експериментальне визначення напруги на ізоляції кабелю .....	89
3.6 Висновки до розділу 3.....	98
<b>4 ВИЗНАЧЕННЯ ПРАМЕТРІВ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ПІДСТАНЦІЙ 330(220) кВ .....</b>	<b>100</b>
4.1 Вихідні данні .....	100
4.1.1 Визначення площі ЗП та діагоналі ЗП .....	100
4.1.2 Визначення відстані від ТС до ЗРП та довжини кабелю .....	101
4.1.3 Визначення конструктивного коефіцієнту співвідношення довжин.....	102
4.1.4 Визначення струму КЗ на шинах розподільних установок.....	102
4.1.5 Визначення еквівалентного питомого опору ґрунту.....	103
4.1.6 Визначення допустимої напруги на ізоляції кабелю.....	105
4.2 Визначення параметрів ЗП .....	106

4.2.1	Визначення розміру чарунки сітки ЗП та периметра поперечного перерізу ГЗ.....	106
4.2.2	Визначення опору ЗП та напруги на ЗП.....	110
4.2.3	Визначення витрат на виконання рівномірної сітки ЗП.....	111
4.3	Визначення параметрів ЗП підстанції з струмом КЗ менше 5 кА .....	114
4.3.1	Визначення площі ЗП та діагоналі ЗП .....	114
4.3.2	Визначення відстані від ТС до ЗРП та довжини кабелю .....	115
4.3.3	Визначення конструктивного коефіцієнту співвідношення довжин.....	115
4.3.4	Визначення струму КЗ на шинах розподільних установок.....	116
4.3.5	Визначення еквівалентного питомого опору ґрунту.....	116
4.3.6	Визначення допустимої напруги на ізоляції кабелю.....	117
4.3.7	Визначення розміру чарунки сітки ЗП та периметра поперечного перерізу ГЗ.....	118
4.3.8	Визначення опору ЗП та напруги на ЗП.....	122
4.3.9	Визначення витрат на виконання рівномірної сітки ЗП.....	123
4.4	Висновки до розділу 4.....	124
	ВИСНОВКИ .....	127
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	130
	Додаток А. Експериментальні данні по підстанціям .....	148
	Додаток Б. Результати факторних експериментів.....	158
	Додаток В. Таблиці значень критеріїв Стьюдента та Фішера.....	179
	Додаток Г. Результати розрахунку опору ЗП .....	180
	Додаток Д. Результати розрахунку напруги на ізоляції кабелю .....	194
	Додаток Е. Акти впровадження.....	199
	Додаток Ж. Список публікацій за темою дисертації .....	207