

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Чернухін Олександр Юрійович

УДК 621.319.7; 551.594

ДИСЕРТАЦІЯ

**КОРОННИЙ РОЗРЯД ЗІ СТРИЖНЕВИХ БЛИСКАВКОПРИЙМАЧІВ
В УМОВАХ ДІЇ СИЛЬНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ
ВІД ГРОЗОВОЇ ХМАРИ**

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 згідно з першою дисертацією засвідчено.
Учений секретар спеціалізованої вченої ради
Фізико-технічний факультет
Харківський національний університет імені Г.С.Сквиринського
27.08.20



О.Ю. Чернухін

Науковий керівник:
Князев Володимир Володимирович,
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

АНОТАЦІЯ

Чернухін О.Ю. «Коронний розряд зі стрижневих блискавкоприймачів в умовах дії сильного електричного поля від грозової хмари». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.13 – Техніка сильних електричних та магнітних полів – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), Харків, 2020.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі стосовно надання дозволу на застосування нових типів блискавкоприймачів, які реалізують механізм ранньої стримерної емісії (Early streamer emission – ESE). Для застосування новітніх пристроїв у практиці блискавкозахисту потрібно мати впевненість у тому, що властивості, які анонсує виробник, відповідають дійсності. Контроль якості здійснюється за методикою, яку регламентує стандарт Франції NF 17-102:2011. Але, цей стандарт є таким, що визнаний лише в деяких країнах крім Франції, у тому числі в Іспанії, Казахстані, Литві та інших. Світова наукова спільнота вважає положення цього стандарту недостатньо обґрунтованими, тому що достовірність запропонованого методу ще не доведено відповідними науковими дослідженнями. Серед основних недоліків методу вказано на такі:

- відсутнє обґрунтування екстраполяції результатів лабораторних випробувань на реальні умови;
- відсутнє обґрунтування заданого значення швидкості зустрічного лідера;
- відсутні дані щодо визначення параметрів стрижневого блискавкоприймача, який слід визнати референтним, що не дає змогу здійснювати порівняння результатів, які отримані у різних випробувальних лабораторіях.

Дуже наполегливі зусилля іноземних компаній щодо оснащення об'єктів в Україні ESE-терміналами спонукали необхідність здійснення вхідного контролю таких пристроїв. Виходячи з назви блискавкоприймачів, основою їх функціонування є стримерно-лідерний процес зі стрижневих елементів. Початковою фазою цього процесу є коронний розряд, що виникає з гострих кромek при знаходженні у сильному електричному полі. Дослідження цих процесів є необхідним для надання об'єктивних доказів щодо властивостей ESE-терміналів.

В дисертації доведено необхідність змінити вимогу стандарту до величини дисперсії функції розподілу часу випередження, що забезпечує перехоплення блискавки з прогнозованою ймовірністю, за урахування часу за якого розподіл має максимальне значення. Розроблено метод вимірювання швидкості просування лідера в між електродному просторі, який заснований на порівняльному аналізі осцилограм напруги між електродами і струму з електрода, що формує розряд. Показано, що швидкість лідера зростає у міру просування його головки. Доведено, що швидкість просування лідера у

міжелектродному просторі довжиною 1,2 м не перевищує $1,14 \cdot 10^6$ м/с, а середня за час просування дорівнює $1,3 \cdot 10^5$ м/с. Визначено закономірність між значенням напруженості постійного електричного поля, при якій починається коронний розряд, та висотою стрижнів різноманітної форми перерізу (квадрат, коло, шестигранник) з плоскою вершиною, та круглого перерізу із загостреною вершиною.

Для повітряних проміжків більш ніж 1 м, експериментально доведено, що в діапазоні напруженості електричного поля від 4 кВ/м до 120 кВ/м коронний розряд формується імпульсами окремих електронних лавин, які мають тривалість фронту одиниці наносекунд і тривалість напівспаду десятки наносекунд. Причому, часові параметри практично не залежать від значення напруженості електричного поля. Встановлено, що частота появи імпульсів струму однозначно залежить від рівня напруженості електричного поля. Цей аспект доповнює результати отримані Тричелом и Кіпом (1938 р.) для коротких проміжків (до 10 см).

Крім того, значні людські жертви, що спостерігаються у світі в наслідок влучення блискавки, наприклад, у Німеччині під час рок фестивалю у червні 2016 року, обумовили актуальність створення систем попередження про грозову небезпеку. Одним з аспектів цього напрямку є розробка елементів системи, які реагують на підвищення напруженості електричного поля в навколишньому середовищі до критичних значень, що є передумовою розвитку розряду блискавки. Функціональну залежність частоти стримерів корони від напруженості електричного поля покладено в основу створення низки індикаторів для застосування в якості пристрою попередження про грозову небезпеку. Таким чином, обидва напрями поєднано дослідженням коронного розряду у сильному електричному полі, що обумовило актуальність роботи. Вирішення вказаних задач визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Метою роботи є підвищення ефективності блискавкозахисту шляхом дослідження фізичних процесів коронного розряду зі стрижневих блискавкоприймачів в умовах дії сильного електричного поля від грозової хмари.

Об'єктом дослідження є процеси, пов'язані з взаємодією стрижньових блискавкоприймачів з електричним полем грозової хмари.

Предметом дослідження є коронний розряд зі стрижньових блискавкоприймачів в умовах дії сильного електричного поля грозової хмари.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі застосовано методи комп'ютерного та фізичного моделювання. Теоретичною базою виконаних досліджень є фундаментальні положення теорії електромагнітного поля в частині вирішення задач розподілу електричного поля у системі електродів з урахуванням гострих кутів. Моделювання здійснено за використанням модулю AC/DC COMSOL 5.3. Для узагальнення результатів експериментальних досліджень застосовано метод багатофакторного експерименту та регресивного аналізу. Дані про закономірності розвитку

коронного розряду, формування стримеру та лідеру досягнуто шляхом фізичного моделювання з використанням високовольтного обладнання та відповідних засобів вимірювальної техніки.

Наукова новизна результатів:

1. Доведено що пробій повітряного проміжку стрижень-площина при застосуванні стрижня квадратного перерізу (розмірами 12x12 мм²) має найбільш стабільні характеристики серед розглянутих варіантів. Цей факт свідчить про доцільність використання у практиці блискавкозахисту саме таких стрижнів. Крім того, пропонується у якості референтного блискавкоприймача при тестуванні ESE-терміналів відповідно до методики стандарту NF C 102-17:2011 застосовувати стрижень квадратного перерізу.

2. Вперше визначено закономірність між значенням напруженості постійного електричного поля, при якій починається коронний розряд, та висотою стрижнів різноманітної форми перерізу (квадрат, коло, шестигранник) з плоскою вершиною.

3. Вперше розроблено метод вимірювання швидкості просування лідеру в міжелектродному просторі, який базується на порівняльному аналізі осцилограм напруги між електродами і струму з електрода, що формує розряд. Показано, що швидкість лідера зростає за квадратичним законом у міру просування його головки. Отримано задовільний (в межах 15 %) збіг з результатами вимірювань, за використанням надшвидкісної відеореєстрації. Доведено, що швидкість просування лідеру у міжелектродному просторі довжиною 1,2 м не перевищує $1,14 \cdot 10^6$ м/с, а середня за час просування дорівнює $1,3 \cdot 10^5$ м/с.

4. Уточнено вимогу стандарту NF C 102-17:2011 до величини дисперсії функції розподілу часу випередження, що зв'язує значення середньоквадратичного відхилення (σ) і часу випередження (Δt), для перехвату блискавки ESE-терміналом з імовірністю не менш ніж 95 %: $\sigma_{ESE} < (0,5 \Delta t - \sigma_F)$, де нижній індекс при σ відноситься відповідно до ESE-терміналу та референтного блискавкоприймача (F).

5. Вперше експериментально встановлено, що струм корони зі стрижня квадратного перерізу з плоскою вершиною починається при значеннях напруженості електричного поля більших, ніж зі стрижня круглого перерізу з загостреною вершиною (при довжині стрижня 2 м, відповідно, 10 кВ/м та 4 кВ/м), але, сила струму корони зі стрижня з загостреною вершиною на порядок менша, що обумовлює можливе зупинення протікання струму при деяких значеннях напруженості електричного поля в залежності від гостроти конусу.

6. Вперше для повітряних проміжків більш ніж 1 м, експериментально доведено, що в діапазоні напруженості електричного поля від 4 кВ/м до 120 кВ/м коронний розряд зі стрижня формується імпульсами окремих електронних лавин, схожих на імпульси зафіксовані для коротких (<10 см) повітряних проміжків Тричелом та Кіпом (1938 р.). Встановлено, що частота появи імпульсів струму однозначно залежність від рівня напруженості

електричного поля, а амплітудно-часові параметри кожного окремого імпульсу при цьому змінюються у межах 30%.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

– розроблено та створено універсальний високовольтний випробувальний стенд ВВС-1.2, який забезпечує можливість тестування блискавкоприймачів ESE типу на відповідність вимогам стандарту Франції NF C 102-17. За використанням стенду здійснено випробування зразків ESE-терміналів практично всіх відомих компаній, які представлені на світовому ринку. В наслідок чого захищено ринок України від застосування ESE-терміналів, які не відповідають заявленим характеристикам. Крім того, за використанням ВВС-1.2 проведено низку інших видів випробувань;

– сформульовані уточнення та додаткові вимоги до стандарту Франції NF C 102-17:2011 (Додаток С), який стосується методики тестування ESE-терміналів та визначення їх захисних властивостей, що підвищить достовірність отриманих результатів;

– розроблено основи створення нового типу індикатора рівня напруженості електричного поля атмосфери за використанням встановленої функціональної залежності частоти появи імпульсів струму коронного розряду з металевого стрижня від рівня напруженості у діапазоні від 4 кВ/м до 120 кВ/м. Такий індикатор має суттєві переваги перед існуючими роторними («млин») та заснованими на MEMS технології, головним чином за відсутності рухомих частин, в наслідок чого, потребує значно меншої енергії живлення.

– створено низку опитних зразків індикаторів для застосування в якості пристрою попередження про грозову небезпеку, які проходять перевірку в реальних умовах довкілля.

Результати, які отримані в ході виконання дисертаційної роботи, надали докази, які використані Технічним комітетом України «Електромагнітна сумісність та стійкість радіоелектронних, електронних та електротехнічних засобів» (ТК 22) та Технічним комітетом України «Засоби техногенної безпеки будівель і споруд» (ТК 315) під час вирішення питання щодо впровадження в Україні стандарту Франції NF C 102-17, та під час голосування за проектом відповідного міждержавного стандарту (2019-2020 роки). Обґрунтована критична оцінка достовірності положень стандарту Франції NF C 102-17 забезпечила захист ринку України від продукції сумнівних захисних властивостей. Також, результати впроваджено у навчальний процес в Харківському філіалі ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», та використано ДП «Конструкторське бюро «Південне» при виконанні міжнародного контракту.

Ключові слова: сильне електричне поле, електророзрядний процес, техніка високих напруг, експериментальний метод, коронний розряд, блискавкоприймач, ESE-термінал, стандарт, грозова небезпека, пристрій попередження.

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Чернухин А.Ю. Устройство для формирования коммутационных импульсов напряжения амплитудой до 1,2 МВ / А.А. Гученко, В.В. Князев, П.Н. Мельников, А.Ю. Чернухин // Вестник НТУ „ХПИ” „Техника и электрофизика высоких напряжений”. – 2011. – Вып. 16. – С. 69-74.
2. Чернухин А.Ю. Характеристики стримерной короны при постоянном напряжении на молниеприемниках с различными формами вершин и поперечных сечений / А.Ю. Чернухин, В.В. Князев, П.Н. Мельников // Вестник НТУ „ХПИ” „Техника и электрофизика высоких напряжений”. – 2012. – Вып. 21. – С. 111-117.
3. Чернухин А.Ю. Сравнение характеристик эталонных образцов стержневых молниеприемников / А.Ю. Чернухин, В.В. Князев, П.Н. Мельников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 52 (958). – С. 84-89.
4. Чернухин А.Ю. Корреляция силы тока коронного разряда стержневого молниеприемника и напряженности изменяющегося электрического поля / А.Ю. Чернухин, В.В. Князев, П.Н. Мельников // Вестник НТУ „ХПИ” „Техника и электрофизика высоких напряжений”. – 2013. – Вып. 27 (1000). – С. 155-162.
5. Чернухин А.Ю. Квазистатическое развитие коронного разряда с молниеприемников / А.Ю. Чернухин, В.В. Князев, П.Н. Мельников // Вестник НТУ „ХПИ” „Техника и электрофизика высоких напряжений”. – 2013. – Вып. 60 (1033). – С. 122-126.
6. Чернухин А.Ю. Параметры импульсной короны на металлических стержнях в сильном электрическом поле / А.Ю. Чернухин // Вестник НТУ „ХПИ” „Техника и электрофизика высоких напряжений”. – 2014. – Вып. 50. – С. 155-160.
7. Чернухин А.Ю. Составляющие неопределенности вольт-секундной характеристики электрического пробоя длинного воздушного промежутка / В.В. Князев, А.Ю. Чернухин // Системи обробки інформації. – 2014. – Вип. 3 (119). – С. 86-89.
8. Чернухин А.Ю. Особенности стримерной короны со стержневых молниеприемников / А.Ю. Чернухин, В.В. Князев // Вестник НТУ “ХПИ” «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Вып. 20. – 2015. – С. 149-155.
9. Чернухин О.Ю. Стримерная корона со стержневых молниеприемников / О.Ю. Чернухин, В.В. Князев // Eastern European Scientific Journal, №6, 2016, Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – Poland. – P. 39-46.
10. Чернухин А.Ю. Влияние параметров коронного разряда на эффективность элементов систем молниезащиты / А.Ю. Чернухин // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – Вып.3. – С. 47-56.
11. Чернухин А.Ю. Створення експериментального зразка установки для реалізації випробувань імпульсним електричним полем що супроводжує

блискавку / В.В. Князев, П.М. Мельников, О.Ю. Чернухін // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. Харків: НТУ «ХП», 2019. – № 27 (1352). – С. 33-39.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

12. Чернухін А.Ю. Образцовый молниеприемник Франклина для оценки защитных свойств новых видов молниеприемников / А.Ю. Чернухін, В.В. Князев, В.И. Кравченко, П.Н. Мельников // Труды X Міжнародної науково-практичної конференції «Пожежна безпека». – 2011. – С. 99-100.

13. Чернухін А.Ю. Метод измерения параметров стримеров с элементов систем молниезащиты / А.Ю. Чернухін, В.В. Князев, П.Н. Мельников // Proceeding of the 22th National scientific Symposium with international participation “Metrology and Metrology Assurance 2012”, September 10-14, 2012. Sozopol, Bulgaria. – P. 116-121.

14. Чернухін А.Ю. Атестація защитных свойств ESE-молниеприемников / А.Ю. Чернухін, В.В. Князев, В.И. Кравченко, П.Н. Мельников // Тези науково практичної конференції “Наглядова діяльність у сфері пожежної та техногенної безпеки”. – НУЦЗУ, 2012. – С. 9-11.

15. Чернухін А.Ю. Определение вольт-секундной характеристики длинного воздушного промежутка стрижень – плоскость / А.Ю. Чернухін, В.В. Князев, П.Н. Мельников / Тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". Харків, 1-3 червня 2012. – С. 72.

16. Чернухін А.Ю. Эффекты коронирования в условиях предразрядной обстановки / А.Ю. Чернухін, В.В. Князев // Доклады IV Международной конференции по молниезащите, С-Пб, Росія, 2014. – С. 62-70.

17. Чернухін А.Ю. Измерение скорости критического стримера / А.Ю. Чернухін, В.В. Князев // Proceeding of the 24th National scientific Symposium with international participation “Metrology and Metrology Assurance 2014”, September 7-11, 2014. Sozopol, Bulgaria. – P. 398-402.

18. Чернухін А.Ю. Ток короны молниеприемников различной формы, находящихся в постоянном электрическом поле / А.Ю. Чернухін // Тези доповідей III Всеукраїнської науково-технічної конференції “Практичні аспекти сумісності електромагнітної та блискавкозахисту” (ПАСЕБ-2014). 1-3 жовтня 2014. – Харків: НТУ "ХП". – С.63.

19. Чернухін О.Ю. Залежність параметрів стримерних спалахів для стрижнів, що знаходяться в сильному постійному електричному полі / О.Ю. Чернухін//Тези доповідей XXIV Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”, Ч. IV (18-20 травня 2016 р.) – Харків: НТУ «ХП». – С. 229.

20. Чернухін А.Ю. Использование импульсной короны со стрижневых молниеприемников для создания сенсора напряженности электростатического поля / А.Ю. Чернухін, И.А. Постельник // Тези доповідей IV Всеукраїнської науково-технічної конференції “Практичні

аспекти сумісності електромагнітної та блискавкозахисту" (ПАСЕБ-2016). 18-20 жовтня 2016. – Харків: НТУ "ХПІ". – С. 48.

21. Чернухин А.Ю. Проблемы оценки неопределенности результатов калибровки измерительных шунтов / В.В. Князев, А.Ю. Чернухин, С.П. Шаламов // Тезисы докладов XIV Международного научно-технического семинара "Неопределенность измерений: научные, нормативные, прикладные и методические аспекты". 8 сентября 2017, Созополь, Болгария. – С. 54.

22. Чернухин А.Ю. Система предупреждения о молниевой опасности на основе коронного разряда со стержневого молниеприемника / А.Ю. Чернухин // Матеріали XXVII міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (MicroCAD-2019), 15-17 травня 2019 р.: Ч. IV. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 244.

23. Chernukhin O.Yu. Electrical shunt for measurement of parameters of current of the model lightning / O.Yu. Chernukhin, S.P. Shalamov// Тези доповідей V Всеукраїнської науково-технічної конференції «ПАСЕБ-2019», 16-18 жовтня 2019 р. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 84-86.

ABSTRACT

Chernukhin O.Yu. Corona Discharge from Lightning Rods in Conditions of Action of Strong Electric Field of Thundercloud. – Printed as manuscript.

Dissertation on achieving the scientific degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy), specialty 05.09.13 – Engineering of Strong Electric and Magnetic Fields – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” (NTU “KhPI”), Kharkiv, 2020.

The dissertation deals with solution of the topical scientific-practical problem of granting permission to use new types of lightning rods that realize mechanism of Early Streamer Emission (ESE). To use the newest devices in practice of lightning protection, it is necessary to have confidence that properties announced by a manufacturer correspond to the facts. Quality control is proposed to be carried out according to the procedure regulated by France standard NF17-102:2011. But this standard is recognized only in some countries besides France including Spain, Kazakhstan, Lithuania, and some others. In the dissertation it is proved that it is necessary to change the requirement of the standard to the value of dispersion of function of distribution of lead time which ensures lightning interception with predicted probability taking into account the time at which the distribution has the maximal value. Method of measuring the velocity of propagation of leader in interelectrode space, which is based on comparative analysis of oscillograms of voltage between the electrodes and current from the electrode that forms discharge has been developed. It is shown that leader velocity increases by square law as his head propagates. It is proved that velocity of streamer propagation in the interelectrode space with length 1.2 m is no more than $1,14 \cdot 10^6$ m/s, and the average value over the time of propagation is equal to $1,3 \cdot 10^5$ m/s. The relationship between the value of constant electric field strength at which corona discharge begins, and height of rods of different forms of cross-section (square, circle, hexagon) with flat top, and round cross-section with pointed top, was determined.

For air gaps that are more than 1 m it is experimentally proved that in the range of electric field strength from 4 kV/m to 120 kV/m, corona discharge is formed by pulses of individual electron avalanches that have front duration of units of nanoseconds and half-decay duration of tens of nanoseconds. And the time parameters practically do not depend on the value of electric field strength. It was determined that frequency of occurrence of current pulses depends uniquely on the level of electric field strength. This aspect supplements results obtained by Trichel and Kipp (1938) for short gaps (up to 10 cm). Functional dependence of frequency of corona streamers on electric field strength was used as a basis for creating a number of indicators used as a device for warning against thunderstorm hazard.

The investigation was performed by experimental methods with the use of created specialized high-voltage complex BBC-1.2 and the corresponding mathematical models. According to the results of the performed investigations, a number of important conclusions concerning the possibility of introduction of France standard NF C 102-17:2011 in Ukraine. It is proved that breakdown of air gap rod-plane with the use of rod of square section (dimensions 12×12 mm²) has the most stable characteristics among the considered variants, including the

traditional pointed rod. This fact indicates appropriateness of the use of rod with square section in lightning protection practice. The requirement, which deals with assessment of results of certification of lightning rods by the procedure of France standard NF C 102-17:2011, to the value of dispersion of function of distribution of lead time was improved, which provides increase of reliability of advantages in relation to interception of lightning with predicted probability. Relationship between the value of constant electric field strength, at which corona discharge begins, and height of rods of different form of cross-section (square, circle, hexahedron) with flat top was determined.

Besides, considerable human casualties in the world that occurred as a result of lightning strike, for example, in Germany during the rock festival in June 2016, caused relevance of creation of systems of warning about lightning hazard. One of the aspects of this trend is development of elements of the system that react to increase of electric field strength in environment to critical values, which is a precondition of development of lightning discharge. Therefore, the two trends are united by investigation of corona discharge in strong electric field, which made this work relevant. The obtained functional dependence of streamer frequency on electric field strength was used as the basis for creation of a number of indicators to use as the device of warning against lightning hazard.

Keywords: strong electric field, electric discharge process, high voltage technique, experimental method, corona discharge, lightning receiver, ESE-terminal, standard, lightning hazard, warning device.

List of publications of the aspirant by the dissertation theme:

List of publications in which the main dissertation scientific results are published

1. Chernukhin A.Yu. Ustroystvo dlya formirovaniya kommutatsionnyih impulsov napryazheniya amplitudoy do 1,2 MV / A.A. Guchenko, V.V. Knyazev, P.N. Melnikov, A.Yu. Chernukhin // Vestnik NTU „KHPI” „Tehnika i elektrofizika vyisokih napryazheniy”. – 2011. – Vyip. 16. – S. 69-74.

2. Chernukhin A.Yu. Harakteristiki strimernoy koronyi pri postoyannom napryazhenii na molniepriemnikah s razlichnyimi formami vershin i poperechnyih secheniy / A.Yu. Chernukhin, V.V. Knyazev, P.N. Melnikov // Vestnik NTU „KhPI” „Tehnika i elektrofizika vyisokih napryazheniy”. – 2012. – Vyip. 21. – S. 111-117.

3. Chernukhin A.Yu. Sravnenie harakteristik etalonnyih obraztsov sterzhnevyyih molniepriemnikov / A.Yu. Chernukhin, V.V. Knyazev, P.N. Melnikov // Vestnik NTU «KhPI». Seriya: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. – Kh.: NTU «KhPI», 2012. – № 52 (958). – S. 84-89.

4. Chernukhin A.Yu. Korrelyatsiya silyi toka koronnogo razryada sterzhneвого molniepriemnika i napryazhennosti izmenyayushegosya elektricheskogo polya / A.Yu. Chernukhin, V.V. Knyazev, P.N. Melnikov // Vestnik NTU „KhPI” „Tehnika i elektrofizika vyisokih napryazheniy”. – 2013. – Vyip. 27 (1000). – S. 155-162.

5. Chernukhin A.Yu. Kvizistaticheskoe razvitie koronnogo razryada s molniepriemnikov / A.Yu. Chernukhin, V.V. Knyazev, P.N. Melnikov // Vestnik NTU „KhPI” „Tehnika i elektrofizika vyisokih napryazheniy”. – 2013. – Vyip. 60 (1033). – S. 122-126.

6. Chernukhin A.Yu. Parametryi impulsnoy koronyi na metallicheskih sterzhnyah v silnom elektricheskom pole / A.Yu. Chernukhin // Vestnik NTU „KhPI” „Tehnika i elektrofizika vyisokih napryazheniy”. – 2014. – Vyip. 50. – S. 155-160.

7. Chernukhin A.Yu. Sostavlyayuschie neopredelennosti volt-sekundnoy karakteristiki elektricheskogo proboya dlinnogo vozdušnogo promezhutka / V.V. Knyazev, A.Yu. Chernukhin // Sistemi obrobki Informatsiyi. – 2014. – Vyip. 3 (119). – S. 86-89.

8. Chernukhin A.Yu. Osobennosti strimernoy koronyi so sterzhnevyyih molniepriemnikov / A.Yu. Chernukhin, V.V. Knyazev // Vestnik NTU “KHPI” «Tehnika i elektrofizika vyisokih napryazheniy». – Vyip. 20. – 2015. – S. 149-155.

9. Chernukhin O.Yu. Strimernaya korona so sterzhnevyyih molnieprimnikov / O.Yu. Chernukhin, V.V. KnyazEv // Eastern European Scientific Journal, #6, 2016, Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – Poland. – P. 39-46.

10. Chernukhin A.Yu. Vliyanie parametrov koronnogo razryada na effektivnost elementov sistem molniezaschityi / A.Yu. Chernukhin // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2017. – Vyip. 3. – S. 47-56.

11. Chernukhin A.Yu. Stvorenniya eksperimentalnogo zrazka ustanovki dlya realizatsiyi viprobuvan impulsnim elektrichnim polem scho suprovodzhue bliskavku / V.V. Knyazev, P.M. Melnikov, O.Yu. Chernukhin // Visnik NTU «KhPI». Seriya: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. Kharkiv: NTU «KhPI», 2019. – № 27 (1352). – S. 33-39.

List of publications certifying the dissertation materials approbation

12. Chernukhin A.Yu. Obratsovyiy molniepriemnik Franklina dlya otsenki zaschitnyih svoystv novyyih vidov molnieprimnikov / A.Yu. Chernukhin, V.V. Knyazev, V.I. Kravchenko, P.N. Melnikov // Trudi X Mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi «Pozhezhna bezpeka». – 2011. – S. 99-100.

13. Chernukhin A.Yu. Metod izmereniya parametrov strimerov s elementov sistem molniezaschityi / A.Yu. Chernukhin, V.V. Knyazev, P.N. Melnikov // Proceeding of the 22th National scientific Symposium with international participation “Metrology and Metrology Assurance 2012”, September 10-14, 2012. Sozopol, Bulgaria. – P. 116-121.

14. Chernukhin A.Yu. AtestatsIya zaschitnyih svoystv ESE-molniepriemnikov / A.Yu. Chernukhin, V.V. Knyazev, V.I. Kravchenko, P.N. Melnikov // Tezi naukovo praktichnoyi konferentsiyi “Naglyadova diyalnist u sferi pozhezhnoyi ta tehnogennoyi bezpeki”. – NUTSZU, 2012. – S. 9-11.

15. Chernukhin A.Yu. Opredelenie volt-sekundnoy karakteristiki dlinnogo vozdušnogo promezhutka strizhen – ploskost / A.Yu. Chernukhin, V.V. Knyazev, P.N. Melnikov / Tezi dopovidey XX mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi

konferentsiyi "Informatsiyi tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya". Kharkiv, 1-3 chervnya 2012. – S. 72.

16. Chernukhin A.Yu. Efekty koronirovaniya v usloviyah predazryadnoy obstanovki / A.Yu. Chernukhin, V.V. Knyazev // Doklady IV Mezhdunarodnoy konferentsii po molniezaschite, S-Pb, Rossiya, 2014. – S. 62-70.

17. Chernukhin A.Yu. Izmerenie skorosti kriticheskogo strimera / A.Yu. Chernukhin, V.V. Knyazev // Proceeding of the 24th National scientific Symposium with international participation "Metrology and Metrology Assurance 2014", September 7-11, 2014. Sozopol, Bulgaria. – P. 398-402.

18. Chernukhin A.Yu. Tok korony molniepriemnikov razlichnoy formy, nahodyaschihsya v postoyannom elektricheskom pole / A.Yu. Chernukhin // Tezi dopovIdey III Vseukrayinskoyi naukovno-tehnichnoy konferentsiyi "Praktichni aspekti sumisnosti elektromagnitnoy ta bliskavkozahistu" (PASEB-2014). 1-3 zhovtnya 2014. – Kharkiv: NTU "KhPI". – S. 63.

19. Chernukhin O.Yu. ZalezhnIst parametrIv strimernih spalahiv dlya strizhniv, scho znahodyatsya v silnomu postiyonomu elektrichnomu poli / O.Yu. Chernukhin // Tezi dopovidey XXIV Mizhnarodnoy naukovno-praktichnoy konferentsiyi "Informatsiyi tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya", Ch. IV (18-20 travnya 2016 r.) – Kharkiv: NTU "KhPI". – S. 229.

20. Chernukhin A.Yu. Ispolzovanie impulsnoy korony so strizhnevih molniepriemnikov dlya sozdaniya sensora napryazhennosti elektrostatischekogo polya / A.Yu. Chernukhin, I.A. Postelnik // Tezi dopovidey IV Vseukrayinskoyi naukovno-tehnichnoy konferentsiyi "Praktichni aspekti sumisnosti elektromagnitnoy ta bliskavkozahistu" (PASEB-2016). 18-20 zhovtnya 2016. – Kharkiv: NTU "KhPI". – S. 48.

21. Chernukhin A.Yu. Problemy otsenki neopredelennosti rezultatov kalibrovki izmeritelnyih shuntov / V.V. Knyazev, A.Yu. Chernukhin, S.P. Shalamov // Tezisy dokladov XIV Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminar "Neopredelennost izmereniy: nauchnyie, normativnyie, prikladnyie i metodicheskie aspektiy". 8 sentyabrya 2017, Sozopol, Bolgariya. – S. 54.

22. Chernukhin A.Yu. Sistema preduprezhdeniya o molnievoy opasnosti na osnove koronnogo razryada so sterzhnevogo molniepriemnika / A.Yu. Chernukhin // Materiali XXVII mizhnarodnoy naukovno-praktichnoy konferentsiyi "Informatsiyi tehnologiyi: Nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya" (MicroCAD-2019), 15-17 travnya 2019 r.: Ch. IV. – Kharkiv: NTU "KhPI". – S. 244.

23. Chernukhin O.Yu. Electrical shunt for measurement of parameters of current of the model lightning / O.Yu. Chernukhin, S.P. Shalamov // Tezi dopovIdey V Vseukrayinskoyi naukovno-tehnichnoy konferentsiyi «PASEB-2019», 16-18 zhovtnya 2019 r. – Kharkiv: NTU "KhPI". – S. 84-86.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів	4
ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ НАЯВНИХ ДАНИХ ПРО ВПЛИВ КОРОННОГО РОЗРЯДУ НА ПРОЦЕСИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРОБОЮ ДОВГИХ ПОВІТРЯНИХ ПРОМІЖКІВ	13
1.1 Фізичні процеси, що відбуваються при електричному пробитті довгого повітряного проміжку	13
1.1.1 Постійна і імпульсна корона.....	13
1.1.2 Стример та стримерна зона.....	18
1.1.3 Утворення лідера та визначення швидкості його просування	20
1.2 Параметри, що впливають на величину пробивної напруги повітряного проміжку в різко неоднорідних електричних полях.....	27
1.2.1 Полярність напруги	27
1.2.2 Вплив часових параметрів імпульсу напруги. Вольт-секундна характеристика.....	32
1.2.3 Вплив параметрів зовнішнього середовища	37
1.2.4 Методика сертифікації активних блискавкоприймачів за стандартом Франції NF C 17-102:2011	38
1.3 Вибір напрямків та методів дослідження	43
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ БЛИСКАВКОПРИЙМАЧ-ПРОВІДНА ПЛОЩИНА НА ПЕРЕДРОЗРЯДНУ ОБСТАНОВКУ	48
2.1 Математична модель задачі	48
2.2 Визначення залежності рівня напруженості електричного поля на поверхні стрижневого блискавкоприймача від параметрів системи	50
2.2.1 Вплив відстані (H) між полеутворюючими пластинами й висоти (h) стрижневого блискавкоприймача	50
2.2.2 Вплив форми поперечного перерізу стрижневого блискавкоприймача.....	60
2.2.3 Результати моделювання та розрахунків напруженого об'єму у повітряному просторі біля верхівки блискавкоприймача	64
2.2.4 Вплив значення потенціалу стрижневого блискавкоприймача.....	66
2.3 Висновки	69

3 РЕЗУЛЬТАТИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОРОННОГО РОЗРЯДУ ЗІ СТРИЖНЕВИХ БЛИСКАВКОПРИЙМАЧІВ	70
3.1 Високовольтний випробувальний стенд ВВС-1.2	70
3.2 Закономірності стримерної корони в умовах стаціонарного електричного поля.....	73
3.3 Обґрунтування характеристик референтного стрижня.....	83
3.4 Експериментальне визначення вольт-секундних характеристик референтного стрижневого блискавкоприймача	91
3.5 Метод вимірювання швидкості стримера при тестуванні блискавкоприймачів	104
3.6 Висновки за розділом. Рекомендації щодо підвищення достовірності результатів тестування ESE-терміналів	112
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТІВ КОРОННОГО РОЗРЯДУ ЗІ СТРИЖНЯ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ІНДИКАТОРУ ГРОЗОВОЇ АКТИВНОСТІ НА НОВОМУ ПРИНЦИПІ	117
4.1 Залежність кількості імпульсів стримерної корони від напруженості електричного поля та характеристик коронуєчого електрода.....	117
4.2 Результати статистичної обробки для визначення узагальнених емпіричних формул	118
4.3 Результати спостережень імпульсної корони у реальній передгрозовій обстановці	123
4.4 Висновки. Перспективи подальших досліджень	131
ВИСНОВКИ.....	132
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	136
Додаток А. Свідоцтва про державну метрологічну атестацію застосованих засобів вимірювальної техніки.....	147
Додаток Б. Результати вимірювання параметрів стримерів	169
Додаток В. Пристрій для вимірювання параметрів струмів за умов знаходження блискавкоприймача під високою напругою.....	181
Додаток Г. Пристрій ІКС-1 для моніторингу рівня напруженості електричного поля.....	194