

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

ПЕТРОВА ВІТАЛІЯ ОЛЕГІВНА



УДК 621.3.015.52:621.3.022

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ З ДЕРЕВИНИ ДО ДІЇ
ВЕЛИКОГО ІМПУЛЬСНОГО СТРУМУ БЛИСКАВКИ

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі інженерної електрофізики Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” та у Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті “Молнія” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Баранов Михайло Іванович,
Науково-дослідний та проектно-конструкторський
інститут “Молнія”
Національного технічного університету
“Харківський політехнічний інститут”, м. Харків,
головний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бржезицький Володимир Олександрович,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”, м. Київ,
в.о. завідувача кафедри техніки та
електрофізики високих напруг

доктор технічних наук, професор
Юферов Володимир Борисович,
Національний науковий центр
“Харківський фізико-технічний інститут”
НАН України, м. Харків,
начальник відділу криогенної електрофізики

Захист відбудеться «13» лютого 2014 р. о 12 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 при Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, г. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий «24 » грудня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У високовольтній імпульсній техніці при розробці та створенні потужних випробувальних високовольтних електрофізичних установок в якості зовнішньої ізоляції застосовується деревина хвойних та інших порід. Крім цього, зростає потреба в деревині, яка використовується для виготовлення ізолюючих та опорно-підтримуючих високовольтних конструкцій повітряних ліній електропередачі. Застосування деревини як ізоляції в таких технічних галузях, перш за все, обумовлено багатством світових природних лісових ресурсів, її низкою вартістю, легкою оброблюваністю і досить високою механічною міцністю, а також малою тепло- та електропровідністю. Діелектричні властивості деревини мають велику практичну цінність. Дослідження цих властивостей потребує кращого розуміння складної структури деревини, яка базується на високомолекулярній целюлозі та її взаємодії з водою, соками-електролітами і природними електрофізичними явищами в земній атмосфері. Необхідно також відзначити, що електродинамічні механізми руйнування деревини залежать від її волого-температурного стану. Тому її доцільно розділити на два види: “живу”, трахеї якої заповнені рідкими соками і “мертву” деревину, пориста структура якої заповнена повітрям і частково вологою. Механізми електродинамічного і електротермічного впливу на внутрішню структуру деревини великих імпульсних струмів при прямому ударі блискавки в таку ізоляцію (наприклад, в дерев'яні клеєні конструкції потужних високовольтних електроустановок) в даний час залишаються слабо вивченими. Тому на сьогодні практично відсутні електродинамічні моделі поведінки та руйнування “живої” та “мертвої” деревини і дерев'яних клеєних конструкцій в умовах дії на них прямого удару блискавки. Однією з причин тому є складність математичного та фізичного моделювання відповідних процесів в деревині. У зв'язку з цим перспективна розробка рекомендацій щодо забезпечення стійкості деревини хвойних та інших порід до дії великого імпульсного струму лінійної блискавки.

Таким чином, теоретичні та експериментальні дослідження прямої дії природної і імітованої блискавки на деревину та отримання розрахункових співвідношень, що визначають її електродинамічну стійкість до прямого удару грозового розряду, є актуальними науково-технічними завданнями в галузі техніки і електрофізики високих напруг та великих імпульсних струмів та складають напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” на кафедрі інженерної електрофізики і у Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті “Молнія” в рамках досліджень прикладної держбюджетної теми МОН України “Розробка та дослідження можливості створення потужної високовольтної електрофізичної установки для генерування повного струму блискавки і випробування об'єктів електроенергетики на блискавкостійкість” (ДР № 0106U012302) та “Розробка експериментальних і теоретичних методів забезпечення блискавкозахисту об'єктів електроенергетики при змінних екологічних та технологічних факторах” (ДР № 0110U007358).

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є визначення електродинамічної стійкості деревини хвойних порід, яка використовується в ізоляційних конструкціях високовольтної техніки при дії великого імпульсного струму лінійної блискавки.

Для досягнення поставленої мети у роботі визначені наступні завдання:

1. Виконати аналіз основних відомих підходів щодо визначення теплофізичних та електрофізичних характеристик плазмового каналу сильнострумного іскрового розряду лінійної блискавки при її прямому ударі в деревину хвойних порід.
2. Розробити удосконалений розрахунково-експериментальний метод визначення основних теплофізичних та електрофізичних характеристик плазмових каналів сильнострумних іскрових розрядів, що протікають у деревині при прямому ударі блискавки.
3. Провести математичне та фізичне моделювання електрофізичних процесів, що супроводжують явище електричного вибуху металевго провідника, який використовується при введенні імпульсного струму блискавки у деревину.
4. Розробити наближені електродинамічні моделі руйнування деревини хвойних порід при протіканні уздовж її волоконної високомолекулярної целюлозної структури великого імпульсного

струму іскрового розряду лінійної блискавки, на основі яких отримати розрахунковий критерій електродинамічної стійкості “живої” та “мертвої” деревини хвойних порід до прямої дії на неї великого імпульсного струму блискавки.

5. Провести електрофізичні дослідження, що пов'язані з визначенням тиску і механічних напруг, що виникають у тонкостінних трахеїдах деревини сосни при прямому ударі блискавки в зазначену деревину і поздовжньому протіканні всередині її целюлозних трахеїдів імпульсної компоненти струму блискавки.

6. Експериментально визначити критичні амплітудні значення струму блискавки, при яких відбувається радіальне розколювання “живої” та “мертвої” деревини сосни, і порівняти отримані дослідні результати з розрахунковими даними, які базуються на розроблених електродинамічних моделях руйнування деревини.

Об'єкт дослідження – електрофізичні процеси, що виникають при взаємодії сильнострумного плазмового каналу великого імпульсного струму лінійної блискавки з деревиною хвойних порід.

Предмет дослідження – електродинамічна стійкість деревини хвойних порід до прямої дії на неї великого імпульсного струму лінійної блискавки.

Методи дослідження. Теоретичні аспекти дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії електрофізики та електромеханіки. Для визначення напруженості магнітного поля та густини струму використовувались методи обчислювальної математики (різницевий метод для чисельного рішення диференціальних рівнянь; метод прогонки для розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь). Експериментальні дослідження руйнування деревини проводилися за допомогою генератора струму лінійної блискавки, що знаходиться на дослідницько-випробувальному полігоні в НДПКи “Молнія” НТУ “ХПІ”. Для вимірювання амплітудно-часових параметрів розрядного струму використовувався коаксіальний шунт, а для вимірювань високої імпульсної напруги – ємнісний поділювач напруги.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення таких основних теплофізичних та електрофізичних характеристик плазмових каналів сильнострумних іскрових розрядів, що протікають у деревині хвойних порід, як їх радіус, активний опір, питома електропровідність плазми каналу розряду, максимальна напруженість поздовжнього електричного поля у сильнострумному плазмовому каналі, максимальний тиск у плазмовому каналі, максимальна електронна температура та значення енергії, що виділяється у плазмовому каналі.

2. Вперше отримано розрахунковий критерій електродинамічної стійкості “живої” та “мертвої” деревини хвойних порід до прямої дії великого імпульсного струму блискавки. Працездатність цього критерію підтверджена результатами експериментального визначення критичних амплітудних значень імпульсного струму штучної блискавки, при яких відбувається радіальне розколювання “живої” та “мертвої” деревини сосни.

3. Вперше отримані розрахункові співвідношення для визначення часу настання у сильнострумному розрядному колі високовольтного генератора імпульсних струмів штучної блискавки електричного вибуху металевого провідника, який використовується для ініціювання сильнострумного розряду при електродинамічних випробуваннях деревини хвойних порід, а також знаходження амплітудно-часових параметрів імпульсу перенапруги, який виникає у даному колі та критичних значень інтеграла струму блискавки.

4. Удосконалено метод визначення активних опорів, що вносяться “мертвою” і “живою” деревиною сосни у сильнострумне розрядне коло низькоомного генератора імпульсної компоненти струму штучної блискавки. Даний метод враховує вплив повітряних, рідких та твердих целюлозних включень деревини на характер протікання електромагнітних процесів у низькоомному колі генератора імпульсного струму імітованої блискавки.

5. Отримали подальший розвиток пародинамічна та плазмодинамічна моделі руйнування целюлозної структури деревини при прямому ударі в неї лінійної блискавки, які враховують фізичні особливості будови й механічні характеристики деревини хвойних порід.

Практичне значення отриманих результатів для електротехнічної галузі полягає в розробці розрахунково-експериментального методу визначення основних характеристик сильнострумних плазмових каналів, що виникають при протіканні великих імпульсних струмів лінійної блискавки в ізоляційних конструкціях, які складаються з деревини хвойних порід. Отримані розрахункові співвідношення для визначення часу настання електричного вибуху металевго провідника, значення критичного інтеграла струму блискавки та амплітудно-часових параметрів імпульсу перенапруги, що виникає при вибусі провідника. Ці співвідношення дають можливість при проведенні електродинамічних випробувань деревини робити попередню оцінку необхідних геометричних розмірів та виду матеріалу провідника, який використовується для утворення плазми та ініціювання розряду у структурі деревини. Отримані розрахункові та експериментальні дані для визначення критичного значення амплітуди струму лінійної блискавки, яка діє на деревину хвойних порід, дають можливість інженерно-технічному персоналу без проведення додаткових досліджень визначати та прогнозувати електродинамічну стійкість високовольтних ізоляційних конструкцій з деревини хвойних порід до великих імпульсних струмів блискавки. Отримані науково-технічні результати знайшли практичне використання в роботах НДПКІ “Молнія” НТУ “ХПІ” при розробці та створенні потужного високовольтного випробувального обладнання мегавольтного діапазону. Результати дисертаційної роботи використовуються на кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХПІ” у навчальному процесі у дисциплінах “Техніка високих напруг” і “Електричні апарати”, а також при виконанні лабораторних, курсових і дипломних робіт для підготовки бакалаврів і магістрів за напрямом “Електротехніка та електротехнології”.

Особовий вклад здобувача. Основні наукові результати отримані здобувачем особисто. На підставі розробленого розрахунково-експериментального підходу щодо визначення основних тепло-та електрофізичних характеристик плазмових каналів сильнострумних іскрових розрядів, що протікають у газових та рідких середовищах, показано, що ці характеристики можуть бути однозначно визначені з даних двох осцилограм імпульсного струму блискавки у розрядному колі ГІС, одну з яких отримують при шунтуванні масивним провідником розрядного проміжку, а іншу – при встановленні в цей розрядний проміжок тонкого провідника. Запропоновано нормуючий коефіцієнт у співвідношенні для розрахунку максимального радіуса плазмового каналу при підводному сильнострумному іскровому розряді. Отримано співвідношення для розрахункового визначення часу настання у повітряному середовищі електричного вибуху металевго провідника. Показано, що час вибуху електрично вибухаючого провідника залежить від геометричних розмірів даного провідника, зарядної напруги ємнісного накопичувача енергії генератора імпульсних струмів, значення критичного інтеграла струму та індуктивності розрядного контуру зазначеного генератора. Виконана практична перевірка отриманого розрахункового співвідношення для знаходження критичного значення амплітуди імпульсного струму лінійної блискавки, що приводить до руйнування (розколювання) деревини сосни.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації пройшли апробацію на: Міжнародних симпозіумах “Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика” – SIEMA’2009, SIEMA’2010, SIEMA’2011, SIEMA’2012 (м. Харків, 2009–2012 рр.); XVI-XIX Міжнародних науково-практичних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (м. Харків, 2009–2012 рр.); XV Міжнародній науковій конференції “Фізика імпульсних розрядів у конденсованих середовищах” (м. Миколаїв, 2011 р.); II Всеукраїнській науково-практичній конференції “Практичні аспекти електромагнітної сумісності та блискавкозахисту” – ПАСЕБ–2012 (м. Харків, 2012 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи викладені в 17 публікаціях, з них: 14 статей у фахових наукових виданнях України, 2 патенти України на корисну модель, 1 праця у матеріалах конференції.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 165

сторінок, з них: 41 рисунок по тексту, 4 рисунки на 2 окремих сторінках, 3 таблиці по тексту, список використаних джерел зі 144 найменувань на 15 сторінках та додаток на 2 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовані актуальність і тема дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні завдання дослідження, визначена наукова новизна одержаних результатів, а також їх наукова та практична цінність. Визначено особистий внесок здобувача, наведено відомості, пов'язані з апробацією результатів дисертаційної роботи.

У першому розділі проведено огляд наукових праць з тематики, що формує напрямок досліджень. Наведено основні відомості про таке природне явище як лінійна блискавка. Проведено аналіз характеристик основних компонент струму штучної блискавки. Проаналізовано доречність застосування деревини хвойних порід у якості ізоляційних конструкцій в галузі електротехніки та техніки високих напруг, а також її основні електричні властивості. Надано загальну характеристику методам підвищення стійкості ізоляційних та опорно-підтримуючих конструкцій на основі деревини хвойних порід при прямому ударі в них лінійної блискавки (ЛБ). Проведено аналіз відомих методів боротьби із загорянням ізоляції, виготовленої із деревини, які ґрунтуються на зміні її електричних властивостей. Розглянуто питання електричного пробоя рідин, оскільки волога, що міститься у трахеїдах деревини, істотно впливає на її електричні властивості. Наведено основні підходи щодо визначення характеристик плазмового каналу іскрового розряду в рідких та повітряних середовищах. Виконано аналіз основних підходів щодо визначення характеристик електричного вибуху металевих провідників, що застосовуються в високовольтній техніці для ініціювання плазмових каналів сильнот-

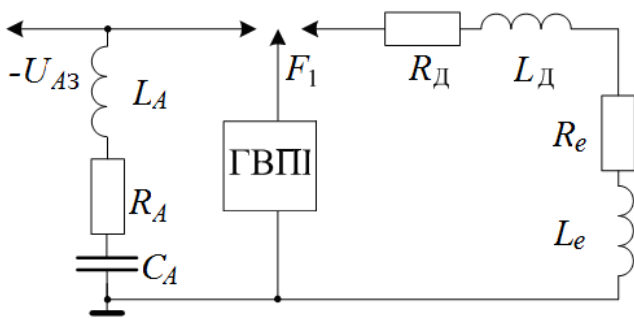


Рисунок 1 – Принципова електрична схема розрядного кола генератора ГС-А для формування імпульсної А-компоненти струму штучної блискавки. R_d , L_d – відповідно актив-

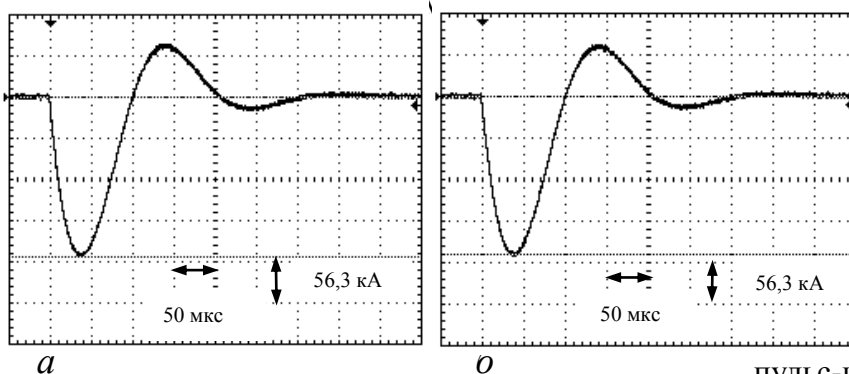


Рисунок 2 – Осцилограми струму штучної блискавки при розряді генератора ГС-А на еквівалент навантаження з повітряним зазором 0,5 мм (а) і 24,5 мм (б)

румних іскрових розрядів у газових та рідких середовищах, присутніх у деревині. Проведений аналіз відомих науково-технічних джерел показав, що на сьогодні виникає необхідність у розробці електродинамічних моделей руйнування деревини хвойних порід під дією прямого удару блискавки (ПУБ), а також методу визначення основних характеристик плазмового каналу іскрового розряду великого імпульсного струму (ВІС), що протікає у зазначеній деревині при ПУБ та розрахункового критерію електродинамічної стійкості деревини.

У другому розділі дисертації наведений

розрахунково-експериментальний метод визначення основних характеристик сильноточних плазмових каналів (СПК) повітряних і підводних іскрових розрядів, що виникають при протіканні великих імпульсних струмів ЛБ у зазначених діелектричних середовищах. Запропонований підхід базується на фізичному моделюванні великого ім-

пульсного струму ЛБ за допомогою потужного генератора імпульсних струмів (ГІС), формуючого на електричному навантаженні імпульсну А-компоненту струму блискавки. Остання характеризується максимальною струмовою амплітудою до 200 кА і

тривалістю до 500 мкс. Роль електричного навантаження відіграє повітряний іскровий проміжок. Для визначення основних характеристик СПК повітряного іскрового розряду необхідно скориста-

тися значеннями власних параметрів розрядного кола ГІС-А та амплітудно-часовими параметрами (АЧП) струмових осцилограм, отриманих у досліджуваному випадку при розряді генератора ГІС-А на повітряні проміжки довжиною 0,5 і 24,5 мм. При цьому слід зазначити, що при довжині повітряного проміжку 0,5 мм відбувається його самопробій, а для ініціювання розряду повітряного проміжку довжиною 24,5 мм використовувався тонкий прямо-лінійний електрично вибухаючий провідник (ЕВП) без ізоляції діаметром 0,2 мм і довжиною 50 мм. Електрична схема розрядного кола генератора ГІС-А наведена на рис. 1. Власні параметри генератора ГІС-А складають: індуктивність $L_A = 2,5$ мГн; активний опір $R_A = 0,057$ Ом; ємність $C_A = 333$ мкФ. Параметри струмопроводів під'єднання: активний опір $R_e = 0,03$ Ом; індуктивність $L_e = 0,3$ мкГн. Зарядна напруга ГІС-А мала негативну полярність і становила 27 кВ. Для визначення активного опору, що вноситься СПК повітряного іскрового розряду у розрядне коло ГІС, необхідно розшифрувати осцилограми (див. рис. 2 а, б), що отримані за допомогою вимірювального шунта ШК-300 та цифрового осцилографа *Tektronix TDS 1012*. Розшифровка отриманих осцилограм полягає у визначенні значень першої, другої і третьої амплітуд імпульсного струму ЛБ та періоду коливаний струму. Після їх знаходження визначається логарифмічний декремент коливаний і коефіцієнт загасання розрядного струму. Виходячи з цих даних, далі визначається повна індуктивність розрядного контуру, яка для цього випадку становила 3,16 мГн. Це дозволяє знайти повний активний опір розрядного контуру, який складає 0,087 Ом. Аналогічно, виходячи з даних рис. 2 б, визначається повний активний опір розрядного кола, який становить 0,091 Ом. Шляхом порівняння даних з обох осцилограм виявлено, що використання в якості електричного навантаження повітряного проміжку довжиною 24,0 мм з вибухаючим провідником вносить у розрядне коло зосереджений активний опір плазмового каналу, який складає $R_k = 0,004$ Ом, а погонний опір складає $R_{k0} = 0,167$ Ом/м.

Досліджено випадок імітування ВІС блискавки за допомогою генератора ГІС-Д, формуючого на електричному навантаженні повторну імпульсну D-компоненту струму блискавки. Ця компонента характеризується максимальною струмовою амплітудою до 100 кА і тривалістю до 500 мкс. В якості електричного навантаження також використовувалися повітряні проміжки довжиною 0,5 мм і 24,5 мм. Порядок визначення активного опору плазмового каналу повітряного іскрового розряду залишається незмінним. У результаті розшифровки осцилограм розрядного струму та проведення обчислень отримано, що вказаний активний опір дорівнював $R_k = 0,022$ Ом, а погонне значення – 0,92 Ом/м. З цих даних виходить, що погонні активні опори плазмових каналів повітряних іскрових розрядів у розрядних колах генераторів ГІС-А і ГІС-Д відрізняються у 5,5 разів.

Розроблений і описаний розрахунково-експериментальний метод пропонується застосовувати для визначення основних характеристик СПК не тільки повітряних, але і для підводних іскрових розрядів. У ході експериментів, порядок проведення яких не змінюється, отримані осцилограми імпульсної А-компоненти струму штучної блискавки при розряді ГІС-А на еквівалент навантаження, в якості якого застосовувалась робоча камера, яка заповнена технічною водою з встановленим у ній ЕВП різного діаметра (рис. 3 а, б). На підставі розрахунків показано, що активний опір плазмового каналу підводного іскрового розряду, що виникає при розряді ГІС-А на робочу

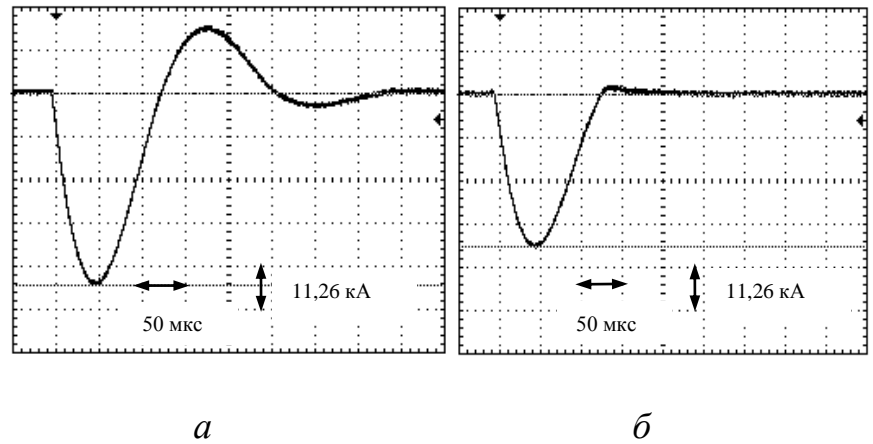


Рисунок 3 – Осцилограми струму штучної блискавки при підводному розряді генератора ГІС-А на масивний провідник (а) (діаметр 2 мм; довжина 100 мм) та тонкий (б) (діаметр 0,2 мм; довжина 100 мм) мідний ЕВП, що розміщені у технологічній камері з водою

камеру з технічною водою, становить $R_k = 0,049$ Ом, а погонне значення – $0,49$ Ом/м. З урахуванням отриманих даних для активного опору СПК іскрових розрядів зі струмом ЛБ, що виникають у повітряних і підводних середовищах була проведена розрахункова оцінка радіусів СПК, електропровідності та напруженості поздовжнього електричного поля у СПК. Виявлено, що максимальний радіус r_{mk} високоіонізованого СПК іскрового розряду в атмосферному повітрі у колі потужного генератора ГС–D становить $16,06$ мм, а питома електропровідність σ_k цього СПК становить 1346 (Ом·м)⁻¹, а напруженість поздовжнього електричного поля E_k дорівнює $81,2$ кВ/м. Показано, що електричні характеристики СПК, ініційованого в колі розряду низькоомного генератора ГС–A, складають: максимальний радіус r_{mk} приймає значення $34,28$ мм, значення питомої електропровідності σ_k плазми СПК імпульсної A-компоненти струму штучної блискавки – 1625 (Ом·м)⁻¹, а напруженість поздовжнього електричного поля E_k – $35,7$ кВ/м. Для розрахунку максимального радіуса r_{mk} СПК підводного іскрового розряду в роботі запропоновано наближене співвідношення

$$r_{mk} = B_k(I_m)^{1/3}(t_m)^{1/2}, \quad (1)$$

де I_m – перша амплітуда імпульсного струму в розрядному колі ГСБ; t_m – час досягнення імпульсом струму амплітуди I_m ; B_k – невідомий розмірний коефіцієнт, який підлягає розрахунковому або експериментальному визначенню.

Для визначення значення коефіцієнта B_k використані експериментальні результати, які були отримані при підводному електричному вибусі тонких провідників у технічній воді, що ініціюють плазмовий канал у розрядному колі високовольтного ГС–A. Встановлено, що коефіцієнт B_k приймає чисельне значення, наближено рівне $0,024$ м/(А^{1/3}·с^{1/2}). Визначений за формулою (1) з урахуванням чисельного значення для коефіцієнта B_k максимальний радіус СПК при підводному іскровому розряді у розрядному колі генератора ГС–A склав $5,425$ мм. Коефіцієнт B_k для повітря є приблизно в $3,9$ разів більше розрахованого згідно (1) коефіцієнта B_k , що характерен для технічної води. Встановлено, що величина питомої електропровідності плазми у разі підводного іскрового розряду приймає значення, приблизно рівне 22073 (Ом·м)⁻¹, а напруженість поздовжнього електричного поля E_k становить $19,4$ кВ/м. Для розрахунку максимальної електронної T_{me} температури в плазмовому каналі при підводному іскровому розряді запропоновано наступне співвідношення

$$T_{me} = 6,46 \left(\frac{I_m^{1/3} U_k}{\sigma_c t_m} \right)^{1/4}, \quad (2)$$

де U_k – приелектродне падіння напруги; σ_c – стала Стефана–Больцмана.

Показано, що при $I_m = 39,6$ кА, $t_m = 44$ мкс та $U_k = 6,1$ В у розрядному проміжку робочої камери з технічною водою максимальна електронна температура T_{me} в плазмі підводного СПК становить значення, рівне близько 19503 К. Це значення температури виявляється приблизно в 2 рази більшим, ніж значення максимальної електронної температури в СПК при повітряному іскровому розряді з аналогічними АЧП його струму. За зазначених АЧП струму визначена величина енерговиділення W_k у плазмовому каналі підводного іскрового розряду, яка складає $4,66$ кДж. При цьому розрахункове значення теплової енергії, що виділяється в каналі, становить близько 51 % від повної електричної енергії, що запасється у високовольтній конденсаторній батареї генератора ГС–A. Встановлено, що для розглянутого підводного розрядного каналу, ініційованого тонким металевим ЕВП у розрядному колі генератора ГС–A на ділянці першої напівхвилі тривалістю $T/2 = 2,77 \cdot t_m$ його затухаючого синусоїдального струму, величина енерговиділення розраховується за співвідношенням

$$W_k = 1,385 \cdot R_k \cdot I_m^2 \cdot t_m, \quad (3)$$

де R_k – активний опір плазмового каналу підводного іскрового розряду.

Максимальний тиск на поздовжній осі плазмового каналу підводного іскрового розряду розраховується за формулою

$$P_{mk} = \mu_0 \cdot I_m^2 / (4 \cdot \pi^2 \cdot r_{mk}^2), \quad (4)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

Отримано результати чисельного моделювання радіальних і часових розподілів напруженості азимутального магнітного поля та густини аксіального струму у плазмовому каналі сильнострумного іскрового розряду штучної ЛБ, що протікає у повітряній атмосфері і впливає на мікροструктуру деревини хвойних порід. Виявлено, що густина аксіального струму у сильнострумному плазмовому каналі такої ЛБ, що діє на зразок деревини та протікає уздовж її трахеїд, характеризується практично рівномірним радіальним розподілом, а радіальні розподіли азимутальної складової напруженості поля в зоні плазмового каналу ЛБ носять лінійний характер, при цьому мінімальні значення напруженості магнітного поля спостерігаються у центрі каналу, а її максимальні значення – на його периферії. Тимчасова залежність напруженості магнітного поля показує, що величина цієї напруженості, як і практично незмінної по радіусу густини імпульсної A -компоненти струму блискавки, змінюється за законом затухаючої синусоїди із зростанням при наближенні до зовнішньої межі каналу іскрового розряду ЛБ. Визначено основні характеристики електричного вибуху (ЕВ) металевго провідника при протіканні по ньому великого імпульсного струму, що генерується за допомогою ГІС-А. Для розрахунку часу настання t_B явища ЕВ тонкого металевго провідника, що знаходиться в атмосферному повітрі та сильнострумному розрядному колі генератора ГІС-А запропоновані наступні співвідношення

$$t_B \approx \frac{4}{3} \left(\frac{2J_k S_n^2}{\omega_A^2 I_{mA}^2} \right)^{1/3} \approx \frac{4}{3} \left(\frac{2J_k S_n^2 L_k^2 k_A^2}{U_{A3}^2} \right)^{1/3}, \quad (5)$$

де J_k – критичне значення інтеграла струму; S_n – поперечний переріз провідника; I_{mA} – перша амплітуда розрядного струму; L_k – повна індуктивність розрядного контуру ГІС-А; U_{A3} – зарядна напруга ГІС-А; ω_A – кругова частота імпульсу розрядного струму; δ_A – коефіцієнт загасання струму; k_A – нормуючий коефіцієнт, що дорівнює $k_A = \left[\exp\left(-\frac{\delta_A}{\omega_A} \operatorname{arctg} \frac{\delta_A}{\omega_A}\right) \cdot \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{\delta_A}{\omega_A}\right) \right]^{-1}$.

Критичне значення інтеграла струму запропоновано розраховувати за формулою

$$J_k \approx \gamma_{nk} \cdot W_B \cdot d_n \cdot (M_a \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27})^{-1}, \quad (6)$$

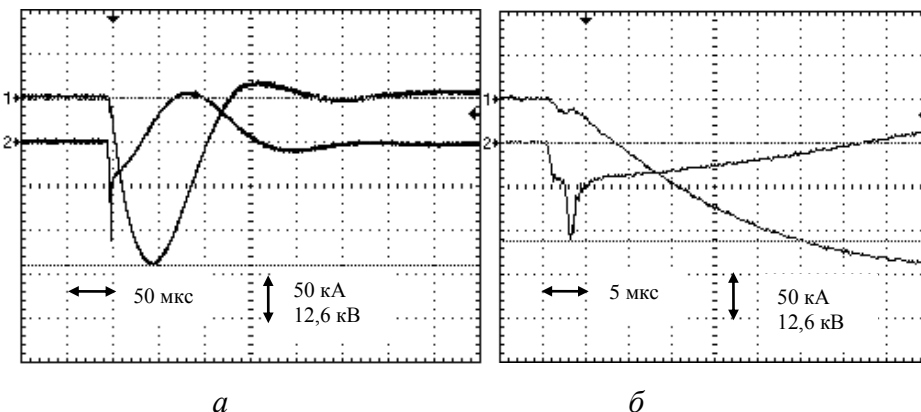


Рисунок 4 – Поєднані осцилограми наростаючих частин імпульсного струму (крива каналу 1) і напруги (крива каналу 2) у ДЕС сильнострумного розрядного кола високовольтного генератора ГІС-А при повітряному електричному вибусі у ньому провідника

де γ_{nk} – питома електропровідність матеріалу провідника при температурі його кипіння T_k ; W_B – робота виходу вільних електронів з матеріалу провідника; M_a – атомна маса матеріалу провідника, яка визначається в атомних одиницях; d_n – щільність матеріалу провідника до дії на нього струму блискавки.

Дослідним шляхом апробовані отримані розрахункові співвідношення за допомогою відповідних експериментальних даних, характерних для розрядного кола генератора ГІС-А з ЕВП. На рис. 4 представлені осцилограм

рами наростаючих частин імпульсного струму $i_A(t)$ (крива каналу 1) та напруги $u_A(t)$ (крива каналу 2). Зарядна напруга ГІС–А складала $U_{A3} \approx -27$ кВ, а в якості електричного навантаження використовувався ЕВП у вигляді тонкого мідного провідника довжиною $l_n = 110$ мм і радіусом $r_n = 0,1$ мм. Із даних осцилограм (див. рис. 4 б) визначено, що явище ЕВ у повітрі дослідного провідника у розрядному колі генератора ГІС–А настає при часі $t_B \approx 3,2$ мкс. У цьому випадку модуль амплітуди U_{mA} імпульсу перенапруги у розрядному колі з вказаним ЕВП досягає приблизно 15,6 кВ при його тривалості близько $\tau_{mu} \approx 2,7$ мкс. Розрахункове значення часу настання вибуху дослідного провідника згідно (4) склало $t_B \approx 3,3$ мкс. Отримана розрахункова величина модулю амплітуди U_{mA} імпульсу перенапруги у розрядному колі генератора ГІС–А, яка чисельно склала приблизно 13,6 кВ. Дослідне значення інтеграла струму згідно літературних даних становить $J_k = 1,95 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$, а розрахункове критичне значення інтеграла струму J_k , згідно (5), для міді буде рівним $1,71 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$.

У третьому розділі представлені результати дослідження електродинамічних процесів, що виникають у деревині сосни при дії імпульсного струму ЛБ. Наведено наближені розрахункові моделі електродинамічного руйнування зазначеної деревини при ПУБ. На рис. 5. представлена розрахункова конструкція круглої полої циліндричної трахеїди деревини сосни (а), що відчуває при ПУБ поздовжній вплив струму блискавки, і розрахунковий елемент цієї трахеїди деревини сосни (б) зі струмом блискавки для визначення при ПУБ напруженого стану її стінки. Досліджено дію ПУБ у зростаючу або “живу” деревину хвойної породи (сосни), що відбувається при нормальних атмосферних умовах. Прийнято, що при ПУБ у деревину сосни виникаючий у ній плазмовий канал має форму круглого циліндричного каналу з радіусом r_{om} і по ньому протікає імпульс грозового струму $i_L(t)$. Напружений стан при ПУБ круглої полої трахеїди деревини сосни зі струмом блискавки, що протікає вздовж її целюлозної стінки і вологи, зосередженої всередині її полої циліндричного об'єму, визначено з урахуванням наявності нормальних сил у її тонкій стінці з целюлози і за умови знехтування згинальними моментами в трахеїді деревини.

Розроблено дві електродинамічні моделі руйнування деревини: пародинамічна і плазгодинамічна. Пародинамічна модель ґрунтується на тому положенні, що руйнування деревини відбувається під дією тиску всередині циліндричного об'єму одиничної трахеїди деревини сосни, який створюється за рахунок інтенсивного нагріву і високошвидкісного випаровування вологи в зазначеному об'ємі трахеїди. На розрахунковий елемент циліндричної трахеїди (див. рис. 5 б) згідно безмоментної теорії циліндричних оболонок діють тільки головні нормальні механічні напруги: σ_m – меридіональна напруга (діє уздовж поздовжньої осі трахеїди) та σ_τ – тангенціальна напруга (діє вздовж окружності трахеїди). На підставі рівняння Лапласа з області гідродинаміки показано, що у досліджуваному випадку для нормальних напружень σ_m та σ_τ на серединній поверхні у виділеному елементі стінки трахеїди деревини при протіканні вздовж неї частини струму блискавки будуть справедливі співвідношення:

$$\sigma_m = p(R_1 + R_2) / 4(R_2 - R_1); \quad (7)$$

$$\sigma_\tau = p(R_1 + R_2) / 2(R_2 - R_1), \quad (8)$$

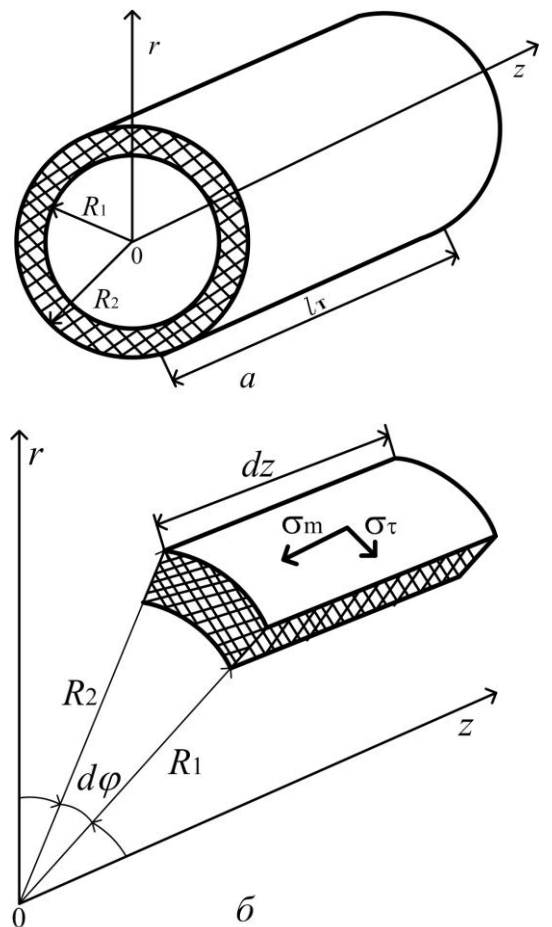


Рисунок 5 – Схематичне зображення циліндричної конструкції полої трахеїди сосни (а) і розрахункового елемента трахеїди деревини сосни (б)

де p – надмірний тиск, діючий зсередини на тонку целюлозну стінку циліндричної трахеїди деревини; R_1 і R_2 – відповідно внутрішній і зовнішній радіус циліндричної трахеїди деревини сосни.

Абсолютний тиск p_1 усередині полої трахеїди деревини згідно пародинамічної моделі її руйнування при ПУБ розраховується за формулою

$$p_1 = p_0 (1 + \alpha_p T), \quad (9)$$

де $\alpha_p = (273,15)^{-1}$ – термодинамічний коефіцієнт тиску, $(^\circ\text{C})^{-1}$; T – температура газу (водяної пари) всередині трахеїди деревини, $^\circ\text{C}$; p_0 – тиск оточуючого деревину атмосферного повітря, який дорівнює $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \cdot (1 + T_0/273,15)$; T_0 – температура атмосферного повітря.

Показано, що при $T = 100$ $^\circ\text{C}$ надмірний тиск $p = (p_1 - p_0)$ водяної пари, яка утворюється всередині циліндричної целюлозної трахеїди сосни приймає чисельне значення $0,37 \cdot 10^5$ Па, при $T = 1000$ $^\circ\text{C}$ – $3,71 \cdot 10^5$ Па, а при $T = 12000$ $^\circ\text{C}$ – $44,5 \cdot 10^5$ Па. У результаті цього згідно (8) тангенціальна напруга σ_τ у стінці досліджуваної трахеїди виявляється рівною 4,34 МПа. Напруга σ_τ має більше чисельне значення, ніж тимчасовий опір розколювання “живої” деревини сосни, що становить приблизно $\sigma_p = 4,11$ МПа.

Плазмодинамічна модель заснована на дії низькотемпературної плазми каналу ЛБ на циліндричну трахеїду деревини хвойної породи. Проходження імпульсу розрядного струму блискавки по розглянутій деревині пов'язано з безпосереднім поширенням уздовж її порожнистих трахеїд сильнострумного плазмового каналу блискавки. Усередині СПК каналу блискавки газодинамічний тиск p_2 описується формулою

$$p_2 = \frac{\mu_0 i_L^2(t)}{8\pi^2 r_{mk}^2} \left[2 - \left(\frac{r}{r_{mk}} \right)^2 \right], \quad (10)$$

де $0 \leq r \leq r_{mk}$ – поточний радіус плазмового каналу ЛБ; $i_L(t)$ – залежність імпульсу струму грозового розряду від часу.

Встановлено, що в каналі блискавки найбільше значення газодинамічного тиску p_2 згідно (10) буде спостерігатися на його осі ($r = 0$). У зв'язку з цим, при розгляді плазмодинамічної моделі руйнування блискавкою деревини сосни приймається, що відокремлена тонкостінна циліндрична трахеїда деревини знаходиться в центрі плазмового каналу струму блискавки ($r = 0$), який є найбільш електродинамічно і відповідно механічно напруженим місцем деревини при ПУБ. Для визначення у (10) величини r_{mk} використовується вираз, що витікає з формули Брагінського для максимального радіусу сильнострумного каналу електричного розряду в атмосферному повітрі: $r_{mk} = 0,093 \cdot (I_m)^{1/3} (t_m)^{1/2}$. При АЧП імпульсу струму грозового розряду і знайденого значення максимального радіуса СПК газодинамічний тиск p_2 всередині відокремленої порожнистої трахеїди сосни становить близько 4,61 МПа. При цьому надлишковий тиск ($p_2 - p_0$) всередині такої відокремленої трахеїди виявляється приблизно рівним 4,51 МПа. Відповідно до цього тиск всередині трахеїди буде перевищувати тимчасовий опір розколювання деревини сосни. На краю плазмового каналу блискавки ($r = r_{mk}$) згідно (10) надмірний тиск ($p_2 - p_0$) всередині відокремленої трахеїди деревини, яка досліджується, становить приблизно 2,21 МПа. Даний тиск по (8) викликає появу в целюлозній стінці цієї трахеїди сосни тангенціальну механічну напругу σ_τ , рівну приблизно 10,3 МПа, яка перевищує значення тимчасового опору розколювання σ_p . Таким чином, на підставі двох розроблених електродинамічних моделей руйнування при ПУБ деревини хвойних порід розрахунковим шляхом вперше показано, що розрядний струм блискавки може викликати радіальне розколювання деревини сосни.

У розділі отримано критерій електродинамічної стійкості деревини хвойних порід до ПУБ, який в узагальненому вигляді з урахуванням використання стандартного для статичного режиму навантаження будівельних конструкцій коефіцієнта запасу міцності записується таким чином

$$\left[\sigma_{\tau}^2 - \sigma_{\tau} \cdot \sigma_m + \sigma_m^2 \right]^{1/2} \leq 0,7 \sigma_p. \quad (11)$$

Розрахунковий критерій електродинамічної стійкості для “живої” і “мертвої” деревини хвойних порід до прямої дії на неї великого імпульсного струму лінійної блискавки, після підстановки виразів (7), (8) та (9) у (11) приймає наступний безрозмірний вигляд

$$I_{mk}^* \leq 2\pi \left[1 + \frac{1,616(R_2 - R_1)\sigma_p}{(R_1 + R_2)p_0} \right]^{1/2}, \quad (12)$$

де $I_{mk}^* = I_{mk}/I_{mb}$; $I_{mb} = r_{0m} p_0^{1/2} / \mu_0^{1/2}$ – базисне значення амплітуди струму блискавки; I_{mk} – критична амплітуда імпульсу струму блискавки.

У відповідності з отриманим критерієм (12) при ПУБ у розглянуту деревину з безрозмірною амплітудою імпульсного струму, що протікає у розрядному каналі лінійної блискавки $I_{mL}^* > I_{mk}^*$, де $I_{mL}^* = I_{mL}/I_{mb}$ (I_{mL} – амплітуда струму блискавки), дана деревина хвойних порід піддаватиметься руйнуванню шляхом розколювання своєї внутрішньої волоконної структури. Показано, що згідно (12), розрахункове критичне значення амплітуди I_{mk} імпульсного струму блискавки для “живої” деревини сосни становить приблизно 85,8 кА.

У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень дії імпульсного струму штучної лінійної блискавки на зразки деревини сосни. Експерименти обмежені оцінкою електродинамічної стійкості зразків деревини сосни в атмосферно-



а б

Рисунок 6 – Зовнішній вигляд дослідних зразків “живої” (а) і “мертвої” (б) деревини сосни з круглим наскрізним отвором на їх периферії під установку в нього ЕВП

дослідні зразки “живої” та “мертвої” деревини сосни діаметром 100 мм і висотою 50 мм. Для ініціювання плазмового каналу ЛБ всередині досліджуваної деревини у периферійному наскрізному отворі дослідних зразків встановлювався тонкий мідний ЕВП довжиною $l_k = 50$ мм і діаметром $d_k = 0,2$ мм, який розташовувався у периферійному наскрізному отворі дослідних зразків діаметром 3 мм і довжиною 50 мм. Зразки “живої” деревини (рис. 6) виготовлялися зі свіжозрізаної у вегетативний період (весна-осінь) безпосередньо перед випробуваннями сосни діаметром близько 104 мм (з вологістю до 100 %), а зразки “мертвої” деревини (з вологістю до

му повітрі до прямої дії на них імпульсної А-компоненти струму штучної блискавки. Генерування імпульсної компоненти струму блискавки проводилось за допомогою генератора ГС-А. В якості електричного навантаження у розряд-

ному колі ГС-А використовувалися



Рисунок 7 – Зовнішній вигляд елементів розрядного кола генератора ГС-А та локальної зони руйнування струмом штучної блискавки зразків “живої” (а) і “мертвої” (б) деревини сосни з утворенням дерев’яної тріски

10 %) – зі зрізаного стовбура сосни аналогічного діаметру, який пролежав не менше півроку у закритому приміщенні при кімнатній температурі. Електродинамічні випробування, проводилися згідно вимог чинного міждержавного ГОСТ 1516.2-97 ступеневим методом шляхом зміни у високовольтних імпульсних конденсаторах генератора ГС–А зарядної напруги на 1 кВ і відповідно зміни амплітуди струму в його розрядному колі в залежності від виду зразка деревини приблизно на 6 кА. Після знаходження дослідної величини критичної амплітуди I_{mk} струму блискавки в ході експериментів не менше трьох зразків деревини сосни в подальшому піддавалися дії струму з даною амплітудою I_{mk} для підвищення достовірності знайденого критичного амплітудного значення струму.

Проведені експерименти показали, що для значного руйнування зразків деревини сосни, що досліджуються, діапазон зміни негативної зарядної напруги ємнісного накопичувача енергії в генераторі ГС–А має становити від 7 до 10 кВ. На рис. 7 наведені результати руйнуючої дії імпульсної А-компоненти струму штучної блискавки на зразки “живої” (а) і “мертвої” (б) деревини сосни. Осцилограма протікання по вибухаючому тонкому провіднику розрядного струму генератора ГС–А отримана за допомогою вимірвального шунта типу ШК–300 і цифрового запам'ятовуючого осцилографа типу Tektronix TDS 1012 (рис. 8 а). Для визначення електричних характеристик плазмового каналу ЛБ, що протікає у зразку деревини сосни при розряді потужного ГС–А, використовувався розрахунково-експериментальний метод, описаний у розділі 2. Для порівняння АЧП розрядного струму генератора ГС–А при локальному руйнуванні зразка “живої” деревини сосни наведена осцилограма імпульсної А-компоненти

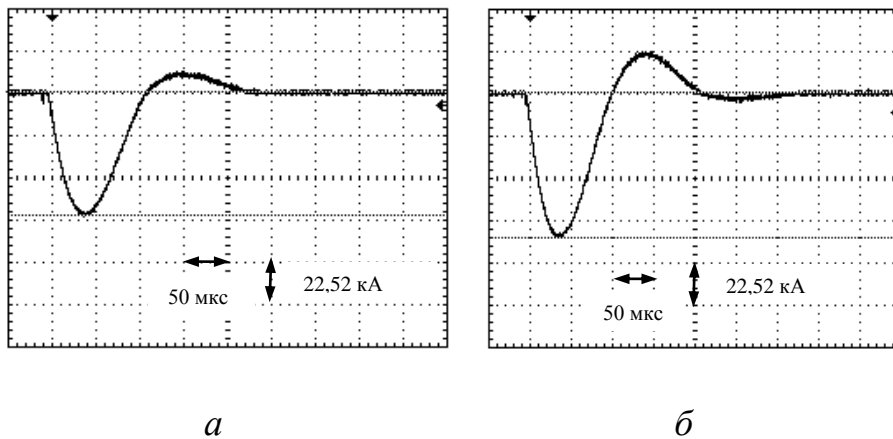


Рисунок 8. – Осцилограми імпульсної А-компоненти струму штучної блискавки при розряді генератора ГС–А на вертикально встановлений в отворі дослідного зразка “живої” деревини, що локально руйнується, тонкий провідник (а) і на провідник за відсутності зразка деревини (б)

Стягом розшифровки даних осцилограм визначені критичні амплітудні значення струму I_{mk} в каналі грозового розряду, що викликають локальне розколювання двох видів деревини сосни. Виконані експерименти показали, що амплітуда струму штучної блискавки величиною 41,4 кА є критичним амплітудним струмовим значенням для зразка “мертвої” деревини сосни, що призводить до її локального розколювання, а для “живої” деревини сосни ця величина становить 65,7 кА. Встановлено, що “жива” деревина сосни в порівнянні з “мертвою” деревиною сосни характеризується більш високими показниками своєї електродинамічної стійкості до прямої дії на неї великого імпульсного струму лінійної блискавки, що супроводжується протіканням імпульсної А-компоненти струму штучної блискавки.

Проведене порівняння розрахункових і експериментальних результатів для критичної амплітуди I_{mk} імпульсного струму блискавки у “живій” деревині сосни показує, що розбіжність між ними становить приблизно 23 %.

Експериментальна апробація в лабораторних умовах отриманого розрахункового безрозмірного критерію (12) для визначення електродинамічної стійкості деревини хвойних порід (на при-

пульсної А-компоненти струму штучної блискавки у розрядному колі високовольтного генератора ГС–А, що розряджається тільки на розміщений у повітрі тонкий мідний ЕВП без наявності зразка деревини сосни (рис. 8 б). Аналогічні експерименти проводилися на зразках “мертвої” деревини сосни. При цьому були отримані осцилограми розрядного струму генератора ГС–А при локальному руйнуванні дослідного зразка “мертвої” деревини сосни зі встановленим у ньому ЕВП і за відсутності зразка – на тонкий мідний ЕВП тієї ж довжини.

кладі “живої” деревини сосни) до ПУБ показала його працездатність. Це підтверджує можливість застосування даного критерію для наближених оцінок руйнуючої дії СПК лінійної блискавки на будівельні елементи висотних дерев'яних конструкцій ліній електропередачі та високовольтної імпульсної техніки зовнішньої установки.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримані науково обґрунтовані результати, які вирішують науково-технічне завдання визначення електродинамічної стійкості деревини хвойних порід, що входить до складу ізоляційних конструкцій високовольтної імпульсної техніки, до прямої дії імпульсного струму лінійної блискавки. Ці результати у своїй сукупності мають суттєве значення для техніки і електрофізики високих напруг і великих імпульсних струмів при розрахунку електродинамічних зусиль та механічних напружень в довгомірних дерев'яних конструкціях, що зазнають прямих ударів блискавки, а також при прогнозуванні властивостей міцності та поведінки таких конструкцій у зазначених екстремальних атмосферних умовах.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. На основі аналізу наукових публікацій, які стосуються відомих підходів щодо визначення електрофізичних характеристик плазмового каналу іскрового розряду лінійної блискавки при її прямому ударі у деревину хвойних порід, обґрунтовано необхідність розробки удосконаленого розрахунково-експериментального методу визначення основних характеристик плазмових каналів сильнострумних іскрових розрядів, що протікають у повітряних та рідких середовищах (включеннях) вказаної деревини та отримання електродинамічного критерію стійкості деревини хвойних порід до прямого удару блискавки.

2. Удосконалені підходи щодо розробки інженерного методу визначення основних тепло- та електрофізичних характеристик сильнострумних плазмових каналів іскрових розрядів, які характерні при дії блискавки на дослідну деревину. Запропоновано удосконалений розрахунково-експериментальний метод визначення таких основних характеристик для каналів повітряних і підводних розрядів як максимальної електронної температури T_{me} , максимального радіуса r_{mk} , активного опору R_k , питомої електропровідності σ_k , поздовжньої напруженості електричного поля E_k , теплової енергії W_k , що виділяється у каналі та максимального тиску p_{mk} . Розрахунковим шляхом показано, що температура T_{me} плазми каналу підводного іскрового розряду виявляється практично в 2 рази більшою температури плазми каналу повітряного іскрового розряду у деревині. За допомогою фізичного моделювання підтверджено достовірність основних положень розробленого методу для плазмових сильнострумних каналів іскрових розрядів у повітряних і рідких включеннях, що присутні у деревині хвойних порід.

3. Встановлено, що застосування електрично вибухаючого провідника дозволяє ефективно вводити енергію плазмових каналів повітряних і підводних сильнострумних іскрових розрядів всередину випробуваної деревини хвойних порід, яка розміщена у розрядному колі потужного генератора струму штучної блискавки. Отримані та експериментально підтверджені наближені розрахункові співвідношення для визначення кількісних значень основних характеристик (часу настання електричного вибуху провідника, амплітудно-часових параметрів імпульсу перенапруги, що виникає у сильнострумному колі ГІС, критичного значення інтеграла струму для ЕВП) явища електричного вибуху в газовому та рідкому включеннях деревини металевого провідника довільних геометричних розмірів з різних матеріалів, що ввімкнут до розрядного кола ГІС та який використовується при випробуваннях деревини хвойних порід на електродинамічну стійкість при дії великого імпульсного струму штучної блискавки.

4. Розроблено дві удосконалені електродинамічні моделі руйнування деревини під дією прямого удару лінійної блискавки, що включають пародинамічну і плазмодинамічну моделі. Експериментальним шляхом встановлено, що кращим наближенням для врахування впливу деревини хвойних порід на проходження і розвиток в ній плазмового каналу сильнострумного іскрового розряду з імпульсним струмом блискавки є модель повітряного розряду в порівнянні з моделлю підводного розряду.

5. Показано, що внесений у розрядне коло генератора імпульсної A -компоненти струму штучної блискавки погонний активний опір для “живої” деревини сосни становить близько 0,36 Ом/м, а для “мертвої” деревини сосни – 0,41 Ом/м.

6. На основі аналізу взаємодії СПК іскрового розряду блискавки з деревиною і розроблених електродинамічних моделей руйнування деревини отримано розрахунковий критерій (12) електродинамічної стійкості деревини хвойних порід до дії на неї імпульсного струму блискавки. На основі даного критерію показано, що при заданих геометричних характеристиках та міцності трахеїд деревини хвойних порід у разі прямого удару лінійної блискавки її електродинамічна стійкість може бути забезпечена тільки до певного (критичного) значення амплітуди I_{mk} імпульсного струму блискавки, що діє на деревиною. Встановлено, що рахункове критичне значення амплітуди I_{mk} імпульсного струму ЛБ для “живої” деревини сосни становить приблизно 85,8 кА.

7. Експерименти, які були проведені в НДПКІ “Молнія” НТУ “ХПІ” за допомогою високовольтного генератора імпульсної A -компоненти струму штучної блискавки, підтвердили достовірність отриманого розрахункового критерію (12) електродинамічної стійкості деревини хвойних порід на прикладі сосни до прямої дії на неї великого імпульсного струму блискавки. Експериментально встановлено, що для “живої” деревини сосни значення критичної амплітуди I_{mk} імпульсної A -компоненти струму штучної блискавки складає близько $I_{mk} \approx 65,7$ кА, а для “мертвої” деревини сосни – $I_{mk} \approx 41,4$ кА.

8. Обґрунтованість і достовірність представлених наукових результатів, висновків і рекомендацій ґрунтуються на використанні теоретичних положень техніки та електрофізики високих напруг і теорії електромагнітного поля, а також на відповідності отриманих розрахункових даних експериментальним результатам.

9. Матеріали дисертації використані у роботах НДПКІ “Молнія” НТУ “ХПІ” при розробці та створенні потужного високовольтного випробувального обладнання, що використовує в якості несучих ізоляційних конструкцій деревину хвойних порід, а також на кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХПІ” у навчальному процесі та при підготовці бакалаврів за напрямом “Електротехніка та електротехнології”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Приближенные модели электродинамического разрушения древесины в атмосферном воздухе под действием прямого удара в нее молнии / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №39. – С. 10 – 18.

Здобувачем запропоновані розрахункові моделі електродинамічного руйнування деревини хвойних порід під дією прямого удару блискавки.

2. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Явление высоковольтного электроосмоса в капиллярах «живой» древесины. Гипотеза возникновения и расчетная оценка / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), Петрова (В.О. Лисенко), М. И. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – №18. – С. 26 – 33.

Здобувачем проведені розрахунки електрофізичних та електрокінетичних процесів у капілярній структурі деревини при дії на неї напруженості електричного геостатичного поля.

3. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Расчетная оценка радиуса плазменного канала подводного искрового разряда в цепи высоковольтного генератора больших импульсных токов / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №16. – С. 9 – 13.

Здобувачем запропоновано коефіцієнт, який входить у склад розрахункового співвідношення для визначення радіусу плазмового каналу підводного іскрового розряду.

4. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Приближенный расчет напряженности магнитного поля и плотности тока в воздействующем на древесину сильноточном канале искрового разряда линейной молнии / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №19. – С. 69 – 78.

Здобувачем вирішена електрофізична задача по визначенню напруженості магнітного поля та густини струму у плазмовому каналі лінійної блискавки, що діє на деревиною.

5. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Разработка и создание передвижного емкостного делителя импульсного напряжения амплитудой до 100 кВ / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов, Ю. П. Зябко, В. М. Зиньковский та ін. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №49. – С. 3 –

10. *Здобувачем проведено дослідження метрологічних характеристик ємнісного подільника імпульсної напруги.*

6. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Экспериментальная оценка электрического сопротивления и электропроводности сильноточного плазменного канала в цепи разряда мощного генератора тока искусственной молнии / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов, Г. М. Колиушко, М. А. Носенко // *Електротехніка і Електромеханіка.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №1. – С. 61 – 64. *Здобувачем запропоновано метод визначення електричного опору та електропровідності сильнострумного плазмового каналу у колі розряду генератора імпульсних струмів штучної блискавки.*

7. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Экспериментальное определение активного сопротивления и электропроводности сильноточного плазменного канала в разрядной цепи генератора импульсной компоненты тока искусственной молнии / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов, Г. М. Колиушко // *Електротехніка і Електромеханіка.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №3. – С. 51 – 55. *Здобувачем запропоновано метод визначення електричного опору на електропровідності плазмового каналу у розрядному колі генератора імпульсної компоненти струму штучної блискавки.*

8. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Экспериментальная оценка основных электрических характеристик сильноточного плазменного канала подводного искрового разряда в цепи высоковольтного генератора импульсной компоненты тока искусственной молнии / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов, Г. М. Колиушко // *Електротехніка і Електромеханіка.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №6. – С. 59 – 63. *Здобувачем запропоновано розрахунково-експериментальний підхід по визначенню основних електричних характеристик плазмового каналу підводного іскрового розряду.*

9. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Некоторые новые электротехнологические возможности высоковольтной импульсной техники НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов, В. М. Зиньковский, Ю. П. Зябко, Н. Н. Игнатенко // *Вісник НТУ «ХПІ».* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №21. – С.3 – 10. *Здобувач прийняла участь у виконанні досліджень щодо визначення електродинамічної стійкості деревини хвойних порід до дії великого струму блискавки.*

10. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Экспериментальное исследование разрушения опытных образцов древесины сосны при прямом воздействии на них больших импульсных токов искусственной молнии / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов // *Електротехніка і Електромеханіка.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №2. – С. 63 – 68. *Здобувачем запропоновано експериментальний підхід щодо визначення електродинамічної стійкості діелектричних матеріалів при дії на них імпульсних струмів.*

11. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Расчетный критерий электродинамической стойкости древесины хвойных пород к прямому воздействию на нее импульсной компоненты тока линейной молнии / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов // *Електротехніка і Електромеханіка.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №3. – С. 46 – 49. *Здобувачем запропоновано розрахунковий критерій електродинамічної стійкості деревини хвойних порід до прямої дії на неї великого струму лінійної блискавки.*

12. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Основные характеристики сильноточного плазменного канала подводного электрического разряда / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов // *Электричество.* – Москва: МЭИ. – 2012. – № 4. – С. 2 – 8. *Здобувачем запропоновано підхід по визначенню основних електричних характеристик плазмового каналу підводного іскрового розряду.*

13. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Электродинамическая стойкость древесины хвойных пород к прямому воздействию на нее большого импульсного тока молнии / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов // *Электричество.* – Москва: МЭИ. – 2012. – № 8. – С. 30 – 36. *Здобувачем проведені розрахунки щодо визначення електродинамічної стійкості деревини хвойних порід до дії струму блискавки.*

14. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Основные характеристики электрического взрыва металлического проводника при больших импульсных токах / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов // *Электричество.* – Москва: МЭИ. – 2013. – № 4. – С. 24 – 30. *Здобувачем запропонована методика визначення основних характеристик електричного вибуху металевого провідника при великих імпульсних струмах.*

15. Пат. 73929 України, МПК⁷ H03K3/53. Спосіб отримання першої півхвилі великого імпульсного струму в розрядному колі високовольтної конденсаторної батареї / Лисенко В.О. (Петрова

В.О.), М. І. Баранов.; Заявитель и патентообладатель Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № u201204158, заявл. 04.04.12; опубл. 10.10.12, Бюл. № 19. – 4 с.: ил.

16. Пат. 73930 України, МПК⁷ H03K 3/53. Спосіб випробування твердої ізоляції на електродинамічну стійкість до дії великого імпульсного струму / Лисенко В.О. (Петрова В.О.), М. І. Баранов.; Заявитель и патентообладатель Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № u201204160, заявл. 04.04.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19. – 4 с.: ил.

17. Лисенко В.О. (Петрова В.О.) Новый расчетно-экспериментальный подход для определения основных характеристик сильноточного плазменного канала подводного искрового высоковольтного разряда / В.О. Лисенко (В.О. Петрова), М. И. Баранов // *Материалы XV международной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах»*. – Николаев. – 2011. – С. 44 – 48. *Здобувачем запропоновано розрахунковий підхід по визначенню основних електричних характеристик плазмового каналу підводного іскрового розряду.*

АНОТАЦІЇ

Петрова В.О. Електродинамічна стійкість високовольтної ізоляції з деревини до дії великого імпульсного струму блискавки. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2013.

Дисертація присвячена дослідженню електродинамічної стійкості деревини хвойних порід до прямої дії на неї великого імпульсного струму лінійної блискавки. Розроблено теоретично та дослідно обґрунтований розрахунково-експериментальний підхід щодо визначення основних тепло- та електрофізичних характеристик сильноточних плазмових каналів повітряних і підводних іскрових розрядів, що виникають при проходженні великих імпульсних струмів лінійної блискавки у зазначених середовищах деревини. Отримані розрахункові співвідношення для знаходження часу настання у розрядному колі високовольтного генератора струму блискавки повітряного електричного вибуху у деревині металевого провідника, амплітудно-часових параметрів імпульсу перенапруги і критичного значення інтеграла струму. Розроблено дві нові електродинамічні моделі руйнування деревини хвойних порід при проходженні вздовж неї великого імпульсного струму лінійної блискавки. Отримано та експериментально підтверджено розрахунковий критерій електродинамічної стійкості для “живої” і “мертвої” деревини хвойних порід до прямої дії на неї великого імпульсного струму блискавки природного та штучного походження.

Ключові слова: критерій електродинамічної стійкості деревини, електророзрядні процеси, генератор великих імпульсних струмів, сильноточний плазмовий канал, блискавкозахист, сильне електромагнітне поле.

Петрова В. О. Электродинамическая стойкость высоковольтной изоляции из древесины к воздействию большого импульсного тока молнии. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013.

Диссертация посвящена исследованию электродинамической стойкости древесины хвойных пород к прямому воздействию на нее большого импульсного тока молнии. Разработан теоретически и опытно обоснованный расчетно-экспериментальный подход по определению основных тепло- и электрофизических характеристик сильноточных плазменных каналов воздушных и подводных искровых разрядов, возникающих при протекании больших импульсных токов линейной молнии в указанных средах древесины. К этим характеристикам относятся: максимальный радиус сильноточного плазменного канала, активное сопротивление, вносимое им в разрядную цепь, электропроводность плазмы разрядного канала, напряженность продольного электрического поля и давления в канале искрового разряда, максимальная электронная температура канала и выделяемая в канале тепловая энергия. Получены расчетные соотношения для нахождения времени наступления в сильноточной разрядной це-

пи высоковольтного генератора тока искусственной молнии воздушного электрического взрыва тонкого металлического проводника, амплитудно-временных параметров импульса перенапряжения, возникающего в разрядной цепи, и критического значения интеграла тока при электрическом взрыве тонкого проводника, используемого при электродинамических испытаниях древесины хвойных пород. Исследованы электродинамические процессы, возникающие в древесине при воздействии на нее импульсного тока линейной молнии. Разработаны две новые электродинамические модели разрушения древесины хвойных пород при протекании вдоль нее большого импульсного тока молнии. Во-первых, пародинамическая модель, определяющая механизм разрушения древесины хвойных пород под действием давления внутри цилиндрического объема трахеиды древесины, создаваемого за счет интенсивного нагрева и высокоскоростного испарения влаги в указанном объеме трахеиды. Во-вторых, плазмодинамическая модель, основанная на воздействии низкотемпературной плазмы канала молнии на цилиндрическую трахеиду древесины. Получен и экспериментально подтвержден расчетный критерий электродинамической стойкости для “живой” и “мертвой” древесины хвойных пород к прямому действию на нее большого импульсного тока молнии. Данный критерий определяет критическое значение амплитуды I_{mk} воздействующего тока молнии, при котором наступает механическое разрушение внутренней структуры древесины хвойных пород путем ее раскалывания (щепления).


Ключевые слова: критерий электродинамической стойкости древесины, электроразрядные процессы, генератор больших импульсных токов, сильноточный плазменный канал, молниезащита, сильное электромагнитное поле.

Petrova V. O. Withstand High Voltage Insulation of Wood to the Effects of a Large Lightning Surge Current. – Manuscript.

Thesis for a Ph.D. degree in Technical sciences by specialty 05.09.13 – machinery strong electric and magnetic fields. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2013.

Dissertation is devoted same data about electrodynamic stability of softwood to direct action on her large pulse current linear lightning. Theoretical and experimental reasonable settlement and experimental approach to identify the major thermal and electrical characteristics synostrumnyh plasma channels air and underwater spark discharges occurring during the passage of large linear lightning impulse currents in these environments timber. The resulting design equations for finding the onset of the discharge range of high-current generator lightning air electric explosion in wood metal conductor, the amplitude-time parameters of the pulse voltage value of the integral and critical current. Developed two new models of electrodynamic destruction of softwood in passing along her large pulse current linear lightning. Received and verified experimentally estimated electrodynamic stability criterion for a "live" and "dead" softwood to a direct action on her big lightning surge current natural and artificial origin.

Keywords: the criterion of electrodynamic resistance of wood, electric-discharge processes, high-current plasma channel, high pulse current generator, high-current plasma channel, lightning protection, strong electric and magnetic field.



Підписано до друку 30.10.2013 р. Формат 60x84 1/16.
Папір офсетний. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0,9.
Гарнітура Time New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення. № 253

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ» (ФОП Миронов М.В.)
Свідоцтво ВО4 №022953 від 31.03.1994
61026, м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1