

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

**ДАНИЛЬЧЕНКО ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ**



УДК 621.316.9

**ЗАХИСТ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ З ЗАХИЩЕНИМИ  
ПРОВОДАМИ ВІД ПРЯМИХ УДАРІВ БЛИСКАВКИ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (НТУ “ХПІ”) Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** доктор технічних наук, доцент  
**Шевченко Сергій Юрійович**  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
професор кафедри передачі електричної енергії.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Лежнюк Петро Дем’янович**  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри електричних станцій та систем;

кандидат технічних наук, доцент  
**Чернюк Артем Михайлович**  
Українська інженерно – педагогічна академія, доцент  
кафедри фізики, електротехніки та  
електроенергетики.

Захист відбудеться “ 04 ” липня 2018 року о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Автореферат розісланий “ 01 ” червня 2018 року

В.о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради



С. В. Швець

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Якість забезпечення споживачів електроенергією безпосередньо залежить від надійності роботи розподільних електричних мереж, які є ключовою ланкою в системі електропостачання. Для підвищення ефективності, технічного рівня і безпеки розподільних мереж необхідно використання науково обґрунтованих технічних рішень і технологій у питаннях передачі електричної енергії повітряним лініями електропередавання. У промислово розвинених країнах на повітряних лініях середніх класів напруг 6 - 69 кВ широко застосовуються захищені проводи (ПЛЗ), які мають суттєві переваги перед лініями з неізолюваними проводами.

В останні роки спостерігається значне збільшення активності блискавки на планеті та на території України зокрема. Це призводить до більш частого ураження об'єктів електроенергетики, в тому числі повітряних ліній електропередавання всіх класів номінальної напруги. З початком масового застосування на розподільних ПЛ 6-35кВ захищених проводів виникла необхідність прийняття обов'язкових технічних заходів по їх блискавкозахисту.

Особливістю проблеми блискавкозахисту ПЛЗ є те, що для мережі 6-35 кВ однофазне замикання на землю не є аварійною ситуацією та не підлягає обов'язковому відключенню. В разі відсутності спеціальних заходів, при дуговому перекритті ізолятора лінії, супроводжуваному пробоем твердої ізоляції проводу, дуга промислової частоти, що утворюється з великою ймовірністю, не має можливості переміщатися по проводу (як при неізолюваних проводах) і горить в місці пробоем ізоляції до моменту відключення лінії або до погасання під дією інших чинників. Час горіння електричної дуги на ПЛ середніх класів напруги буває досить довгим, тому, що однофазне замикання для них не є аварійною ситуацією та не підлягає обов'язковому відключенню. Досить часто в місці пробоем може виникнути повторне загоряння дуги. Це може призвести до псування ізоляції проводу, пошкодження ізолятора лінії і до перегорання проводу, що підтверджується досвідом експлуатації ліній з захищеними проводами. Оскільки на лінії з неізолюваними проводами дуга під впливом електродинамічних сил здатна переміщатися одним зі своїх кінців уздовж проводу, фактор пошкодження проводу внаслідок теплового впливу дуги був малозначним і ніяк не впливав на формування концепції блискавкозахисту ПЛ. У разі ж ПЛЗ запобігання перегорянню проводу стає основним чинником, що визначає необхідність обов'язкового застосування тих чи інших блискавкозахисних заходів.

Отже, дослідження та розробка нових і вдосконалення відомих методів блискавкозахисту ліній з захищеними проводами є актуальною науково-прикладною задачею, що повинна вирішуватись шляхом проведення наукових досліджень та експериментів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана згідно планів наукових досліджень кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» у

відповідності до госдоговору «Розробка рекомендацій щодо захисту від перенапруг повітряних захищених електричних ліній 6-35 кВ» (ДР № 0114U003936).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження полягає у підвищенні надійності захисту повітряних ліній електропередавання середніх класів напруги з захищеними проводами на основі врахування уточнених значень кількості уражень прямими ударами блискавки.

Для досягнення поставленої мети визначені задачі дослідження:

- проаналізувати основні методи та засоби захисту ліній електропередавання від прямих ударів блискавки в Україні та світі;
- визначити основні параметри, що впливають на ураження блискавкою повітряних ліній середніх класів напруги та розробити принципи моделювання процесу ураження на великомасштабних моделях;
- розробити експериментальну модель для дослідження ураження прямими ударами блискавки повітряних ліній з захищеними та неізолюваними проводами;
- провести перевірку адекватності обраної експериментальної моделі для дослідження ураження прямими ударами блискавки повітряних ліній з захищеними та неізолюваними проводами;
- розробити план повнофакторного експерименту для дослідження ураження прямими ударами блискавки повітряних ліній з захищеними та неізолюваними проводами;
- провести експериментальні дослідження ураження прямими ударами блискавки повітряних ліній з захищеними та неізолюваними проводами;
- уточнити метод розрахунку кількості уражень повітряних ліній прямими ударами блискавки на базі отриманих результатів експериментальних досліджень;
- розробити нові та удосконалити існуючі методи та засоби підвищення блискавкостійкості повітряних ліній з захищеними проводами.

*Об'єктом досліджень* - процес ураження повітряних ліній електропередавання з захищеними та неізолюваними проводами прямими ударами блискавки.

*Предметом досліджень* – електричні та конструктивні параметри лінії електропередавання з захищеними проводами, що впливають на ураження блискавкою.

**Методи дослідження.** В основу дисертаційної роботи покладено системний підхід при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, що базується на використанні методів розрахунку електричних кіл змінного струму, техніки високих напруг та математичної статистики. Застосовані методи експериментального дослідження для визначення впливу конструктивних особливостей повітряних ліній на ураженість прямими ударами блискавки; методи математичного моделювання і математичної статистики із використанням програмних та математичних пакетів Microsoft Excel, MathCAD та MatLab для дослідження похибок отриманих результатів та створення апроксимаційних моделей; метод Боксу - Вілсона для того, щоб отримати статистичні математичні

моделі процесів використовуючи факторне планування і регресійний аналіз; метод порівняльного аналізу для вибору оптимальних параметрів конструкції повітряної лінії у питаннях наслідків прямого удару блискавки.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1) Удосконалено метод моделювання об'єктів для дослідження блискавкозахисту, який відрізняється від існуючих тим, що коефіцієнт моделювання розраховано за допомогою висоти орієнтування блискавки, це дозволило спростити побудову експериментальної моделі для досліджень ураження блискавкою об'єктів.

2) Отримав подальший розвиток метод розрахунку кількості прямих ударів блискавки для визначення блискавкостійкості повітряних ліній середніх класів напруги, який відрізняється від відомих врахуванням конструкції використаних проводів, що дозволяє підвищити точність виконання розрахунків.

3) Отримала подальший розвиток математична модель для розрахунку кількості прямих ударів блискавки, яка відрізняється від відомих тим, що її параметри визначаються на основі методу нечіткого виводу Мамдані, це дає можливість врахувати варіаційну складову вихідних даних.

4) Вперше запропоновано метод блискавкозахисту повітряних ліній з захищеними проводами, який використовує неізолюваний фазний провід для захисту від прямих уражень блискавкою, що дозволить практично виключити прямі удари блискавки у захищені проводи.

**Практичне значення одержаних результатів.** Для електроенергетичної галузі України полягає в тому, що на підставі виконаних досліджень визначені способи підвищення ефективності функціонування електричних мереж шляхом вдосконалення методики розрахунку зони захоплення блискавки повітряними лініями середніх класів напруги з урахуванням типу проводу. Такий підхід дозволить розраховувати кількість прямих ударів блискавки у повітряні лінії з неізолюваними та захищеними проводами на етапі проектування повітряних ліній. Окрім того, результати досліджень допоможуть більш коректно підійти до питання вибору захисного обладнання. Запропоноване конструктивне виконання ПЛ з використанням у якості засобу захисту від блискавки фазного неізолюваного проводу дозволить суттєво підвищити експлуатаційну надійність ПЛЗ при збереженні всіх її переваг.

Результати дисертаційної роботи були впроваджені:

- у АК «Харківобленерго» для розрахунку зони захоплення блискавки повітряними лініями середніх класів напруги з урахуванням типу проводу, що дозволило більш точно визначати кількість прямих ударів блискавки у повітряні лінії;

- у навчальному процесі кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» для студентів спеціальностей 141 спеціальності за спеціалізаціями: 141-02 «Електричні системи та мережі» під час викладання курсів лекцій з дисциплін «Техніка та електрофізика високих напруг», «Системоутворюючі мережі та їх режими», «Проектування електроенергетичних і електромеханічних систем та пристроїв», «Сучасні методи і

засоби блискавкозахисту», під час написання курсових та дипломних проектів, випускних кваліфікаційних робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Серед них – виконання основного об'єму теоретичних та експериментальних досліджень, викладених у дисертаційній роботі, включаючи вдосконалення математичної моделі, розробку методики експериментальних досліджень, аналіз, узагальнення та перевірку отриманих результатів, їх оформлення у вигляді наукових публікацій та тез доповідей за темою дослідження.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: International Young Scientists Forum on Applied Physics (Дніпро, 2015); IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (Київ, 2017); IEEE International young scientists forum on applied physics and engineering (Львів, 2017); II International Scientific Education and Research Network Congress (Харків, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2015, 2016, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України (Харків, 2015); Міжнародний симпозиум «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (Харків, 2016, 2017); Науково-технічна конференція «Воздушные и кабельные электрические сети предприятий Украины. Основные направления развития и повышения их эффективности» (Харків, 2016, 2017).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 13 робіт, з них: 4 статті у фахових наукових виданнях України, 3 статті у закордонних виданнях ( 2 - включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS), 1 стаття в інших виданнях України, 5 – у матеріалах конференцій.

**Структура і обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 169 сторінок; з них 33 рисунки по тексту та 8 рисунків на 5 окремих сторінках; 13 таблиць по тексту та 3 таблиці на 1 окремій сторінці; списку із 154 найменувань використаних джерел на 17 сторінках; 1 додаток на 4 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну і практичне значення роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз науково-технічної інформації про стан та проблеми блискавкозахисту ПЛЗ. Розглянуто переваги застосування захищених проводів в електричних мережах та досвід їх експлуатації в Україні та світі. Показано їх недоліки у блискавкозахисті та наслідки, до яких це може призвести. Розглянуто грозові перенапруги на повітряних лініях електропередавання і захист

від них. Проаналізовано завдання і критерії блискавкозахисту ПЛ. Наведено параметри грозових розрядів та статистика розподілу їх за величиною струму та напруги. Детально розглянуто виникнення блискавки, її види та зосереджено увагу на виникненні і розвитку лінійної блискавки.

Проаналізовано особливості блискавкозахисту ПЛ середніх класів напруги та наведено ряд особливостей, що створюють більш сприятливі умови для їх блискавкозахисту. Розглянуто умови, при яких захист ПЛ необхідний. Наведено захисні апарати, які використовуються для блискавкозахисту ПЛ середніх класів напруги та місця їх установки.

Зроблено висновок про основні переваги використання ПЛЗ, необхідність блискавкозахисту ПЛЗ, особливості блискавкоураженості ПЛ та засоби захисту від перенапруг.

У **другому розділі** розглянуто методи проведення експериментальних досліджень. Розглянуто можливість дослідження вірогідності ураження ПЛ на великомасштабній моделі з використанням довгих імпульсів. Цей метод використовується на великомасштабних моделях з пробивною відстанню понад 3 метри, коли є можливість змодельовати блискавку з лідерною формою розряду, для цього необхідно обладнання досить великої потужності.

Досліджено уражуваність ПЛ з урахування висоти орієнтування блискавки. Визначено, що процес орієнтування блискавки починається не з моменту виникнення низхідного лідера, а лише після того, як його канал просунеться на деяку відстань в глибину проміжку, а головка каналу досягне рівня, званого висотою орієнтування ( $H_0$ ). Тому в розрахунок ймовірності орієнтування необхідно ввести не відстані до високовольтного електрода, а відстані від заземленого електрода і площини до головки каналу низхідного лідера на рівні висоти орієнтування (рис. 1).

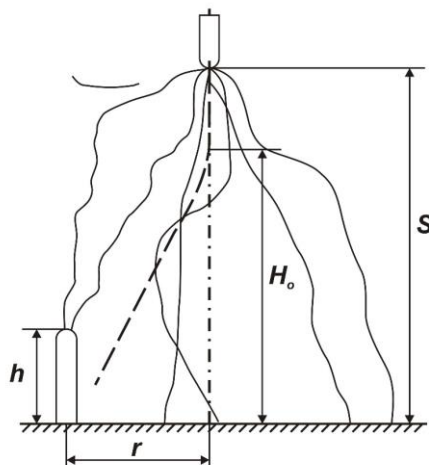


Рисунок - 1 Визначення висоти орієнтування іскрового розряду

У багатьох країнах для визначення захисних властивостей блискавковідводів використовується «електрогеометрична модель», метод був розроблений і запропонований дослідним комітетом № 33 СІГРЕ в 1975 р.

В основу методу покладено припущення, що при наближення лідерного каналу від наземного об'єкта починає розвиватися зустрічний канал розряду, що й

зумовлює удар блискавки в об'єкт. Найкоротша відстань між головкою лідера і точкою удару в момент початку розвитку зустрічного розряду тим більше, чим більше напруга між головкою лідера і заземленим об'єктом, а значить, більше заряд лідера і вище максимальне значення струму блискавки, що проходить через уражений об'єкт. Відстань орієнтування залежить від струму блискавки в першому компоненті удару і визначається за емпіричною формулою

$$H_0 = 2 I_6 + 30 (1 - e^{-I_6/6,8}), \quad (1)$$

де  $H_0$ - висотою орієнтування блискавки в м;  $I_6$  - струм блискавки в кА.

Користуючись заданим значенням  $H_0$ , можна побудувати зону захисту того чи іншого блискавковідводу. На рис. 2 показано побудову зони захисту стрижневого блискавковідводу ( $h < H_0$ ).

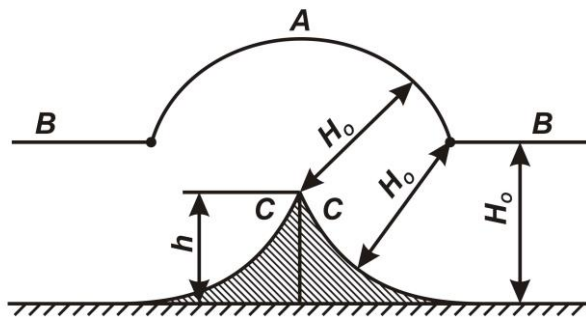


Рисунок 2 - Перетин зони захисту стрижневим громовідводи висотою  $h$  при  $H_0 > h$

Якщо лідер досягає поверхні  $A$  (рис. 2), то блискавка вражає вершину блискавковідводу. Якщо він досягає поверхні  $B$  (рис. 2), то удар приходить в землю. Об'єкт, розташований нижче поверхні  $C$  (рис. 2), знаходиться в зоні захисту блискавковідводу. Імовірність ураження об'єкта блискавкою (ймовірність  $P$  прориву блискавки в зону захисту) визначається за ймовірністю струму блискавки, якому по (1) відповідає певне значення  $H_0$ , прийняте при побудові зони захисту. Наприклад, якщо потрібно встановити розміри зони захисту з надійністю  $1 - P = 0.9$ , для перших компонентів, низхідних негативних блискавок ймовірності 0.9 відповідає  $I_6 = 10$  кА. По (1) отримуємо відстань орієнтування

$$H_0 = 2 * 10 + 30 (1 - e^{-10/6,8}) = 43 \text{ м.}$$

Для струму блискавки  $I_6 = 20$  кА, висота орієнтування буде дорівнює

$$H_0 = 2 * 20 + 30 (1 - e^{-20/6,8}) = 68 \text{ м.}$$

Була розглянута існуюча методика розрахунку ураженості ПЛ блискавкою. Вона визначає ймовірності перекриття елементарних проміжків, утворених головкою каналу блискавки на рівні висоти орієнтування  $H_0$ , об'єкта що захищається, висотою  $h$ , та поверхнею землі. При цьому враховується, що

внаслідок статистичного розкиду електричної міцності з певною ймовірністю може бути перекритий будь-який з проміжків, а не тільки найкоротший.

Для проведення експериментальних досліджень ураженості ПЛ та ПЛЗ прямими ударами блискавки, було обрано методику проведення повнофакторного експерименту, який дозволяє визначити залежність досліджуваного параметру від факторів, що впливають на процес ураження об'єкта прямим ударом блискавки, на основі регресійного аналізу.

Визначені фактори, та вимоги що до них пред'являються при плануванні експерименту. На основі методики було вирішено, що у загальному випадку експеримент, в якому реалізуються всі можливі поєднання рівнів факторів, називається повним факторним експериментом. Якщо число рівнів кожного фактора дорівнює двом, то маємо повний факторний експеримент типу  $2^k$ .

Для побудови експериментальної моделі було отримано критерії подібності на основі другої теореми подібності. Для отримання критеріїв подібності був використаний метод аналізу розмірностей на підставі опису фізичного процесу.

Розглянуто фактори, що впливають на ураженість ПЛ, до яких можна віднести чинники блискавки і конструктивні особливості ПЛ, а саме: струм блискавки ( $I_6$ ), крутизну фронту блискавки ( $\alpha$ ), висоту орієнтування блискавки ( $H_{op}$ ), відстань між крайніми проводами на ПЛ ( $D$ ), висоту підвісу проводів ( $H_{під}$ ), заряд на лінії ( $q$ ) та висоти підвищення проводів один над одним ( $h$ ).

Функціональна залежність, що підлягає дослідженню має вигляд

$$f(I_6, \alpha, H_{op}, D, H_{під}, q, h) = 0.$$

При виборі системи одиниць необхідно врахувати те, що в описуваному процесі беруть участь електричні і механічні параметри. Найбільш оптимальною є система одиниць  $LMTI$  де  $L$  -лінійний розмір (довжина),  $M$ -маса,  $T$ -час,  $I$ -струм.

Процес ураження повітряних ліній прямими ударами блискавки описується - 7 параметрами.

Визначені критерії подібності для параметрів які впливають на ураженість повітряних ліній.

Отримані критерії мають такий вигляд:

$$\pi_1 = \frac{H_{op}}{H_{під}}; \quad (2)$$

$$\pi_2 = \frac{H_{op}}{D}; \quad (3)$$

$$\pi_3 = \frac{H_{op}}{h}. \quad (4)$$

Для експериментальних досліджень було побудовано експериментальну модель для дослідження ураження блискавкою ПЛ з захищеними і неізолюваними проводами.

Загальний вигляд моделі наведено на рис. 3.

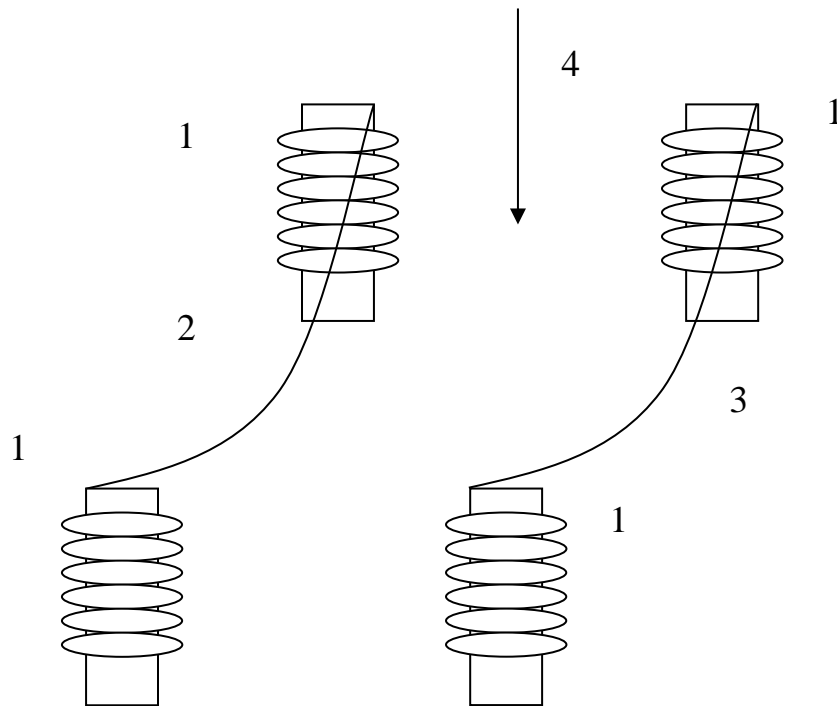


Рисунок 3 - Загальний вигляд моделі: 1 - опорний ізолятор, 2 - неізольований провід, 3 - захищений провід, 4 - електрод що імітує блискавку

Таким чином, відповідно до (2), (3) та (4) висота підвісу проводу буде дорівнює 0,2 м, для лінії напругою 6 кВ і струму блискавки 10 кА. Висота підвісу електрода, що імітує блискавку становить 1 м.

У **третьому розділі** проведені експериментальні дослідження блискавкоураженості ПЛ та ПЛЗ. Для підтвердження адекватності побудованої моделі було експериментально перевірено блискавкоураженість ПЛ на моделі лінії 110 кВ. Результати експериментальних досліджень співпадають з результатами розрахунків, що свідчить про адекватність створеної моделі, рис. 4.

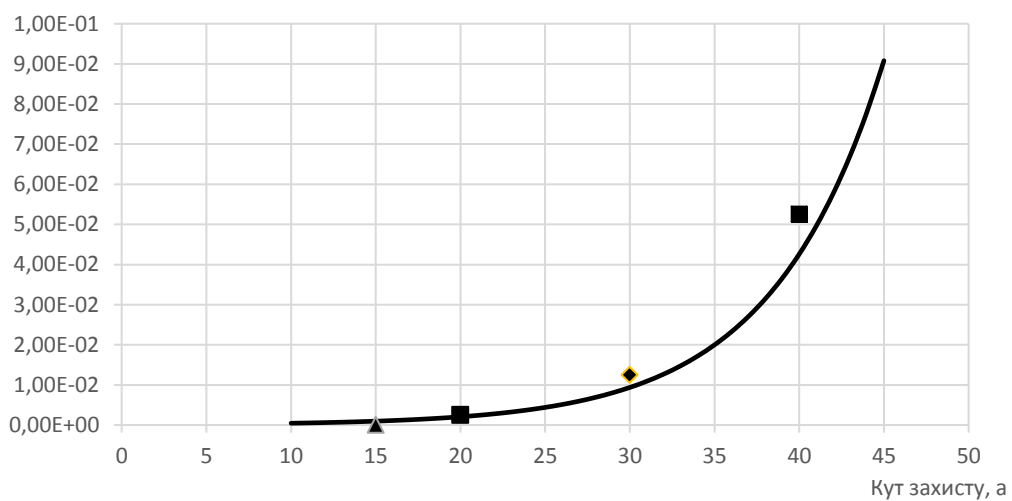


Рисунок 4 – залежність вірогідності прориву блискавки крізь тросовий захист від захисного кута

Проведені експериментальні дослідження по ураженості ПЛ і ПЛЗ середніх класів напруги. На першому етапі досліджень було проведено 5 серій експериментів.

У першій серії експериментів було виконано порівняння ймовірності прямого удару блискавки в провід, для ліній на яких одночасно розташовані захищені та неізольовані проводи. Параметри моделі визначені виходячи з висоти орієнтування блискавки та мали такі значення: електрод знаходився на висоті 1 метра від поверхні «землі», на висоті 20 см від поверхні «землі» були розташовані захищений і неізольований провід, на відстань 90 см один від одного, електрод що імітує блискавку встановлювався посередині між проводами, по 45 см від кожного.

За результатом 100 дослідів всі розряди потрапили в неізольований провід, що дозволяє зробити висновок про різну вірогідність враження неізольованих та захищених проводів. Отримані результати підтверджують гіпотезу про різні механізми ураження неізольованих та захищених проводів блискавкою та дозволяють виказати припущення про підвищену блискавкостійкість ліній із захищеними проводами за рахунок ускладнення розвитку зустрічного лідеру від проводу.

Друга серія експериментів була виконана на аналогічній моделі ліній на яких одночасно розташовані і захищені і неізольовані проводи. Основною відмінністю цієї серії експериментів є те, що електрод який імітує блискавку встановлювався на відстані 30 см від захищеного і 60 см від неізольованого проводу. Таке розташування електрода, що імітує блискавку, дозволяє досліджувати ймовірність прямого удару в провід ліній при виникненні каналу блискавки в довільному місці простору. Параметри моделі мали ті ж значення, що і в першій серії експериментів.

Виконано чотири серії експериментів по 100 дослідів у кожній, отримані результати мають такий вигляд: в двох серіях експериментів, 70 ударів довелось в неізольований провід і 30 ударів в захищений, в одній 68 ударів в неізольований провід і 32 в захищений і в останній 73 в неізольований провід і 27 в захищений. З отриманих результатів видно що ймовірність прямого удару в захищений провід існує та становить 30% від загальної кількості ударів. Зроблено висновок, що ймовірність ураження проводу з ізоляційним покриттям залежить від розташування електрода, який імітує блискавку.

У третій серії експериментів було виконано порівняння ймовірності прямого удару блискавки для ліній на яких одночасно підвішені і захищені і неізольовані проводи. Параметри моделі були аналогічні першим двом експериментів. А електрод що імітує блискавку встановлювався над захищеним проводом.

Виконано 5 серій по 100 дослідів кожна. У двох з них ймовірність прямого удару в захищений провід склала 50% від загальної кількості ударів, в наступних серіях ймовірність коливалася в межах 47 - 51%. Отримані результати підтвердили висновок, що ймовірність враження блискавкою захищеного проводу за наявності на лінії також неізольованого проводу залежить від розташування електрода, що імітує блискавку.

У четвертій серії експериментів визначалася ймовірність удару блискавки в захищений провід за однакових величинах відстаней від проводу до електрода, що

імітує блискавку і від зазначеного електрода до «землі». Висота підвісу електрода й проводу були тими ж, що і в попередніх експериментах.

Проведено чотири серії по 100 дослідів кожна. Імовірність удару в захищений провід змінювалася в межах від 26% до 32% від загальної кількості ударів. Отримані результати добре ілюструють наявність ударів модельної іскри в поверхню землі, що може бути підтвердженням правильності обраної схеми та методики експериментальних досліджень.

При виконанні п'ятої серії експериментів визначалася ймовірність удару блискавки в неізолюваний провід при однакових відстанях від проводу до електрода що імітує блискавку і від зазначеного електрода до «землі». Проведення подібних серій експериментів пов'язано з порівнянням імовірностей враження неізолюваних та захищених проводів. Подібне порівняння необхідне для підтвердження наявності відмінностей у механізмах ураження захищених та неізолюваних проводів та врахування таких відмінностей при розрахунках блискавкостійкості ПЛ на етапі прийняття проектних рішень.

Висота підвісу електрода й проводу були тими ж, що і в попередніх експериментах. Було проведено 3 серії по 100 дослідів кожна. Імовірність удару в неізолюваний провід змінювалася в межах від 70% до 72% від загальної кількості ударів. Інші удари були в «землю». Отримані результати дозволяють зробити висновок про суттєві відмінності значень вірогідності ураження захищених та неізолюваних проводів. Така відмінність дозволяє виказати припущення, що ПЛ із захищеними проводами має набагато ліпші показники блискавкостійкості ніж ПЛ з неізолюваними проводами.

На другому етапі було проведено експериментальні дослідження по визначенню зони захоплення прямого удару блискавки в ПЛ та ПЛЗ.

Для проведення експериментальних досліджень, згідно з теорією планування експерименту побудуємо матрицю експерименту, з урахуванням факторів, що впливають на процес ураження повітряної лінії прямим ударом блискавки. До основних факторів відносяться струм блискавки ( $I_6$ ), напруга на лінії ( $U$ ), та тип проводу (захищений чи неізолюваний).

Таблиця 1 - Матриця експерименту для дослідження зони захоплення прямого удару блискавки

	$I_6$	$U$	Тип проводу
1	-	-	-
2	-	+	-
3	+	-	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	-	+	+
7	+	-	+
8	+	+	+

В табл. 1 прийняти наступні позначення:

- «-» – мінімальне значення:                      «+» - максимальне значення:  
 - 10 кА для струму блискавки;                      - 20 кА для струму блискавки;  
 - 6 кВ для напруги лінії;                              - 35 кВ для напруги лінії;  
 - неізолюваний провід.                              - захищений провід.

На геометричні параметри експериментальної моделі тип проводу впливу не має.

Для проведення експериментів було обрано вихідні параметри які відповідають основним принципам моделювання та не ускладнюють проведення експериментів.

Для зручності представлення отримані результати внесені в табл. 2.

Таблиця 2 - Модельні результати експериментальних досліджень

Висота підвісу проводу, $H_{\text{під}}$ , м	Відстань, з якої провід приймає прямі удари блискавки, $X$ , м	
	СП 3 1*50-20	АС – 50/8
0,2	0,25	0,37
0,35	0,425	0,62
0,13	0,17	0,245
0,22	0,27	0,4

Результати експериментів показали, що для ліній з захищеними проводами зона захоплення в півтора рази менше ніж зона захоплення неізолюваного проводу.

З отриманих результатів видно що, для неізолюваного проводу зона захоплення становить не 3  $H_{\text{під}}$ , а 2  $H_{\text{під}}$ . Це свідчить про те, що методи розрахунку згідно нормативних документів не відповідають дійсності, для ліній середнього класу напруги.

З табл. 3, видно, що зона захоплення проводом СП - 3 1 \* 50-20 майже в 2 рази менше зони захоплення неізолюваного проводу і не багато перевищує висоту підвісу лінії, таким чином можна говорити, що зона захоплення захищеного проводу дорівнює  $H_{\text{під}}$ . Даний факт показує, що  $N_{\text{пуб}}$  для ПЛЗ значно менше, ніж для ПЛ.

У **четвертому розділі** проведений регресійний аналіз отриманих результатів для отримання математичної моделі результатів експерименту. Під час регресійного аналізу підтверджена гіпотеза про однорідність дисперсії, та отримані результати розрахунку коефіцієнтів на основі експериментальних даних, рівняння регресії матиме наступний вигляд

$$y = 0,31484 + 0,07727x_1 - 0,06739x_2 - 0,06055x_3 - 0,02027x_1x_2 + 0,01552x_1x_3 - 0,01200x_2x_3 - 0,00170x_1x_2x_3$$

де,  $y$  – вірогідність ураження лінії прямим ударом блискавки;  $x_1$  – висота підвісу проводу;  $x_2$  – тип проводу;  $x_3$  – відстань від осі блискавки до проводу.

Виконана перевірка адекватності моделі та перевірка значимості коефіцієнтів. Таким чином, рівняння регресії має наступний вигляд

$$y = 0,31484 + 0,07727x_1 - 0,06739x_2 - 0,06055x_3.$$

Отриманий вираз дозволяє розрахувати вірогідність ураження ПЛ та ПЛЗ прямим ударом блискавки при різних конструктивних виконаннях ліній та властивостей блискавки. Використання такого виразу дозволить уточнити метод визначення блискавкостійкості ПЛЗ та ПЛ на етапі проектування.

У розділі проведено аналіз результатів експериментальних досліджень за допомогою методів нечіткого виводу Мамдані. За результатами аналізу було отримано 4 поверхні відгуку, де були задані тип проводу та клас напруги лінії, а струм блискавки та зона захоплення варіювалися.

Моделювання за допомогою нечіткого виводу Мамдані дозволило врахувати варіаційну складову струму блискавки, що дозволило побудувати поверхні відгуку нечіткої системи і побачити вірогідності ураження ПЛ, з урахуванням типу проводу, та класу напруги лінії електропередавання.

Розглянута методика розрахунку кількості прямих ударів блискавки у повітряні лінії електропередавання. Згідно нормативних документів кількість прямих ударів блискавки в повітряні лінії з неізолюваними і захищеними проводами розраховується однаково, за формулою

$$N_{\text{пуб}} = 0,067 * n * 6 * H_{\text{під}} * L, \quad (5)$$

де  $n$  – кількість грозових годин на рік;  $L$  - довжина лінії, км;  $H_{\text{під}}$  - висота підвісу проводів, м.

Як видно з формули (5) використовується вираз ( $6 * H_{\text{під}}$ ), який означає, що захоплення відбувається з двох сторін від лінії, з зоною захоплення в  $3 * H_{\text{під}}$ . В даному випадку не враховується клас напруги лінії. Проте в літературі наведені графіки з яких видно, що зона захоплення становить від  $2 * H_{\text{під}}$  до  $5 * H_{\text{під}}$  для ПЛ з неізолюваними проводами, в залежності від висоти опор, тобто класу напруги ПЛ.

Відповідно до результатів експериментів, кількість прямих ударів блискавки суттєво залежить від значення зони захоплення блискавки.

Згідно з експериментальними даними, отриманими на великогабаритних моделях, зона захоплення для неізолюваних та захищених проводів суттєво відрізняється. Відповідно, буде відрізнятися і кількість прямих ударів блискавки в ПЛ.

Проведені розрахунки кількості прямих ударів блискавки в ПЛ показали відмінність, в залежності від методики розрахунку.

У **п'ятому розділі** приведено класифікацію засобів захисту від перенапруг. Проаналізовані основні засоби захисту, їх переваги та недоліки, особливу увагу приділено обмежувачам перенапруг нелінійним (ОПН).

Досліджено особливості блискавкозахисту ліній з захищеними проводами. Розглянуто конструкцію захищених проводів та вплив перенапруги на ці проводи.

Проаналізовано світовий досвід у питаннях блискавкозахисту ПЛЗ, а саме за допомогою масивних затискачів (американську систему), за допомогою «рогів» (фінська система) та за допомогою ОПН (японська система). Розглянута можливість блискавкозахисту за допомогою довго-іскрових розрядників.

Створено комбіновану лінію електропередавання. Оскільки всі методи захисту ПЛ від грозових перенапруг передбачають встановлення додаткового обладнання, наявність якого призводить до зниження експлуатаційної надійності ПЛ за рахунок збільшення кількості елементів, які можуть вийти з ладу. Також встановлення захисних пристроїв вимагає додаткових фінансових витрат та експлуатаційних затрат. Окрім того слід зазначити, що, як правило, блискавка вражає одну фазу ПЛ. Режим роботи ПЛ середніх класів напруги передбачає ізолювану чи компенсовану нейтраль. В такому випадку однофазне замикання на землю не визначається нормативними документами як аварійна ситуація. Цей факт, а також суттєве зменшення відстаней між фазами ПЛЗ, нормоване ПУЕ, дає можливість розглядати інший спосіб захисту від блискавки чим встановлення захисних апаратів.

Для більш ефективної та економічної експлуатації ПЛ з захищеними проводами пропонуємо використовувати особливість ліній середніх класів напруги, а саме наявність на цих лініях ізолюваної нейтралі. На ПЛ середніх класів напруги прямий удар блискавки призведе до перекриття ізоляції лінії та однофазного замикання на землю зі 100% вірогідністю, через малу імпульсну міцність ізоляції ПЛ. Дуга, що виникає між проводом і землею для таких класів напруги має властивість гаснути за рахунок зовнішніх факторів.

Проведені експериментальні дослідження ураженості ПЛ та ПЛЗ на великогабаритних моделях показали відмінності в ураженні неізолюваного та захищеного проводів. За результатами експериментів було визначено, що неізолюваний провід уражується з більшою вірогідністю, ніж захищений.

Подібні результати призводять до створення лінії, що має в своїй конструкції як захищені, так і неізолюваний провід. Це обумовлено тим, що зона захоплення неізолюваного проводу більше зони захоплення захищеного проводу, що призведе до суттєвого перерозподілу ударів блискавки в неізолюваний провід. Цей факт було підтверджено експериментальними дослідженнями, що дає можливість розробити систему блискавкозахисту ПЛЗ за допомогою використання одного неізолюваного проводу в якості фазного провідника. При такій конструкції ПЛЗ можливо передбачити, що удари блискавки, переважно, будуть в неізолюваний провід. Оскільки, в основному, дроти на опорі розташовуються в трикутнику, середня фаза вище крайніх, то неізолюваним проводом рекомендуємо виконати саме її, а крайні фази виконати захищеними проводами, що дозволить запобігти ураженню захищених проводів прямими ударами блискавки та перегорання їх за рахунок наявності електричної дуги. Ця обставина дає можливість суттєво підвищити експлуатаційні характеристики та безпеку такої лінії. Запропонований варіант розташування проводів на опорі показаний на рис. 4.

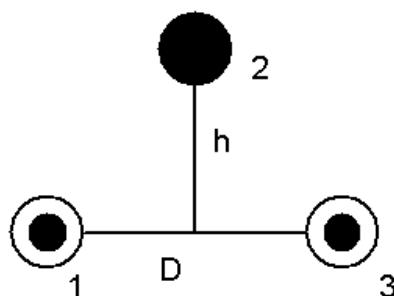


Рисунок 5 - Схема розташування проводів комбінованої лінії електропередавання: 1 - захищений провід, 2 - неізольований провід, 3 - захищений провід,  $h$  - перевищення середнього проводу над крайніми,  $D$  - відстань між крайніми проводами.

Для підтвердження можливості використання фазного неізольованого проводу в якості блискавозахисного пристрою у великому високовольтному залі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» була створена експериментальна модель комбінованої лінії електропередавання з урахуванням критеріїв подібності, отриманих у 2 розділі.

Для побудови моделі було обрано такі параметри:

- струм блискавки дорівнює 10 кА;
- напруга лінії - 6 кВ.

Було проведено дослідження блискавкоураженості комбінованої лінії з урахуванням зміни  $h$  і  $D$ .

Для проведення експериментальних досліджень була створена матриця експерименту, табл. 3.

Таблиця 3 - Матриця експерименту

	$h$	$D$	$X$
1	-	-	-
2	-	+	-
3	+	-	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	-	+	+
7	+	-	+
8	+	+	+

В табл. 3 прийняті наступні позначення:

«-» – мінімальне значення:

- 0 м для перевищення середньої фази над крайніми;
- 0,1 м для відстані між крайніми фазами;
- 0 м для зміщення електрода імітує блискавку від осі лінії.

«+» - максимальне значення:

- 0,2 м для перевищення середньої фази над крайніми;
- 0,3 м для відстані між крайніми фазами;
- 0,4 м для зміщення електрода імітує блискавку від осі лінії (зона захоплення неізолюваного проводу).

Експериментальна модель мала наступні параметри: висота підвісу електрода, що імітує блискавку дорівнювала 1 м, висота підвісу проводів 0,2 м, перевищення середньої фази над крайніми змінювалося в межах від 0 до 0,2 м, відстань між крайніми фазами змінювалося від 0,1 до 0,3 м, зміщення електрода, що імітує блискавку щодо осі лінії змінювалося від 0 до 0,4 м, середня фаза була виконана проводом АС - 50/8, крайні фази виконані проводом СПП-3 1\*50 - 20.

Виконано 8 серій експериментів, по серії на кожну конфігурацію, по 100 дослідів у кожній серії. За умови знаходження електрода над лінією, всі удари були в неізолюваний провід, за умови знаходження електрода на відстані 0,4 м (зона захоплення неізолюваного проводу) від осі лінії, половина ударів була в неізолюваний провід, половина в «землю». Отримані результати дають можливість стверджувати, що ступінь захисту ПЛЗ неізолюваним фазним проводом є досить високим, як показано вище, при проведенні 800 експериментів не було отримано жодного розряду в захищений провід, що, на наш погляд, пов'язано з різними механізмами ураження захищеного та неізолюваного проводів прямим ударом блискавки. При наближенні лідерного каналу блискавки до неізолюваного проводу на його поверхні збирається заряд протилежного знаку ніж у блискавки, що сприяє іонізації повітря в напрямку каналу лідера та полегшення умов розвитку зустрічного розряду від проводу до лідера, у випадку ж захищеного проводу, за наявності заряду наведеного блискавкою такої ж величини процес іонізації та розвиток зустрічного лідера практично неможливий, що обумовлено наявністю захисного покриття та ускладнення процесів іонізації.

Виконані експериментальні дослідження комбінованої лінії довели високу ефективність захисту захищених проводів від перегорання за допомогою використання неізолюваного фазного проводу в якості блискавкоприймача. Таким чином вдалося виправити основний недолік ПЛЗ з точки зору блискавкозахисту, а саме можливе перегорання захищених проводів внаслідок прямого удару блискавки в них. Цей факт дає можливість стверджувати, що комбінована лінія, при збереженні усіх переваг ПЛЗ буде мати таку ж блискавкостійкість, як і ПЛ.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науковою працею, у якій на підставі отриманих результатів проведених досліджень було вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення надійності блискавкозахисту повітряних ліній електропередавання із захищеними проводами середніх класів напруги, на основі врахування уточнених значень кількості уражень прямими ударами блискавки ПЛ в результаті чого отримано наступні науково-практичні результати і висновки:

- на основі дослідження літературних джерел виконано аналіз методів та засобів захисту ліній електропередавання від прямих ударів блискавки в Україні та світі;

- визначено основні параметри, що впливають на ураження блискавкою повітряних ліній середніх класів напруги та розроблено принципи моделювання процесу уражуваності ПЛ прямими ударами блискавки на великомасштабних моделях;
- розроблена експериментальна модель для дослідження уражуваності прямими ударами блискавки повітряних ліній з захищеними та неізолюваними проводами;
- проведена перевірка адекватності обраної експериментальної моделі для дослідження уражуваності прямими ударами блискавки повітряних ліній з захищеними та неізолюваними проводами
- розроблено план повнофакторного експерименту для дослідження уражуваності прямими ударами блискавки повітряних ліній з захищеними та неізолюваними проводами;
- проведено експериментальні дослідження уражуваності прямими ударами блискавки повітряних ліній з захищеними та неізолюваними проводами;
- на базі отриманих результатів експериментальних досліджень, уточнено метод розрахунку кількості уражень повітряних ліній прямими ударами блискавки, що враховує тип використаних проводів;
- розроблено новий метод захисту захищених проводів від прямих ударів блискавки, комбіновану лінію електропередавання, який базується на особливостях ліній з ізолюваною нейтраллю;
- результати дисертаційної роботи було впроваджено у АК «Харківобленерго» та у навчальний процес в НТУ «ХП».

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Dmitriy Danilchenko Defeat of overhead lines transmission networks with protected wires from lightning strike. / Sergey Shevchenko, Dmitriy Danilchenko // 2015 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), p. 1 - 4.

*Здобувачем приведена методика проведення експериментальних досліджень вражаємості прямими ударами блискавки неізолюваних та захищених проводів та надані результати експериментальних досліджень.*

2. Danylchenko D. Development of the method for determining the number of direct lightning strikes in overhead lines with protected wires. / S. Shevchenko, D. Danylchenko // IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), p. 479 - 482.

*Здобувачем приведена методика проведення експериментальних досліджень для визначення зони захоплення блискавки лініями з неізолюваними та захищеними проводами та запропонована комбінована повітряна лінія.*

3. Danylchenko D. Lightning damage of air lines with protected wires. / S. Shevchenko, D. Danylchenko, S. Dryvetskyi // Sciences of Europe. - Praha, Czech Republic. – VOL 1, No 19 (19) (2017). – p. 52 -57.

*Здобувачем приведена методика проведення експериментальних досліджень для визначення зони захоплення блискавки лініями з неізолюваними та захищеними проводами та надані результати експериментальних досліджень.*

4. Данильченко Д. А. Поражаемость воздушных линий распределительных сетей с защищенными проводами грозowymi разрядами. / С. Ю. Шевченко, Б. Ф. Ермоленко, Д. А. Данильченко, С. И. Дривецкий // Вісник Національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП», 2016, 3(1175), с. 101 – 107.

*Здобувачем приведена методика проведення експериментальних досліджень вражаємості прямими ударами блискавки неізолюваних та захищених проводів.*

5. Данильченко Д. О. Дослідження вражаємості грозowymi розрядами повітряних ліній із захищеними та неізолюваними проводами. / С. Ю. Шевченко, О. Є. Піроті, О. М. Довгалюк, Д. О. Данильченко, Б. Ф. Ермоленко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, 2015, 164, с. 31-33.

*Здобувачем розглянуті фактори, що впливають на блискавковражаємість повітряних ліній та підтверджено їх вплив експериментальними дослідженнями.*

6. Danylchenko D. Study of the effect of atmospheric overvoltages on overhead lines of medium voltage classes. / D. Danylchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, 32(1254), 19 - 24.

7. Данильченко Д. А. Анализ возможности создания физической модели поражаемости линии электропередачи прямыми ударами молнии. / С. Ю. Шевченко, Д. А. Данильченко, А. М. Равлик // Вісник Національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ«ХП», 2017, 31(1253), с. 78 - 82.

*Здобувачем розглянуті фактори, що впливають на блискавковражаємість повітряних ліній та розраховані коефіцієнти моделювання для побудови експериментального поля.*

8. D. Danylchenko Protection of Overhead Lines of Middle Classes of Voltage From Atmospheric Exposure. / D. Danylchenko, S. Shevchenko, O. Ganus // abstract 2017 IEEE International young scientists forum on applied physics and engineering YSF-2017. - Lviv: Ivan Franko National University, 2017, p. 26 - 29.

*Здобувачем приведена методика проведення експериментальних досліджень вражаємості прямими ударами блискавки неізолюваних та захищених проводів та запропонована комбінована повітряна лінія.*

9. Данильченко, Д. А. Вероятности поражения линий с защищенными проводами. / Д. А. Данильченко, С. Ю. Шевченко // Тези доповідей ХХІІІ міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". – Харків: НТУ «ХП», 2015, Ч. 2, с. 192.

*Здобувачем приведена методика проведення експериментальних досліджень вражаємості прямими ударами блискавки неізолюваних та захищених проводів.*

10. Данильченко Д. А. Вероятности поражения грозowymi разрядами линий с защищенными и голыми проводами / Д. А. Данильченко, С. Ю. Шевченко // Тези доповідей ХХІV міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". – Харків: НТУ «ХП», 2016, Ч. 2, с. 154.

*Здобувачем приведена методика проведення експериментальних досліджень вражаємості блискавкою неізолюваних та захищених проводів та наведені експериментальні дані щодо вражаємості блискавкою повітряних ліній.*

11. Данильченко Д. А. Определения количества прямых ударов молнии в воздушные линии с защищенными проводами. / Д. А. Данильченко, С. Ю. Шевченко // XI Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів. – Харків: НТУ «ХП», 2017, Ч. 2, с. 102.

*Здобувачем приведена методика проведення експериментальних досліджень вражаємості прямими ударами блискавки неізолюваних та захищених проводів та розглянуто фактори що впливають на блискавковражаємість.*

12. Данильченко Д. А. Определение зоны захвата молнии воздушными линиями средних классов напряжений экспериментальным путем на крупномасштабных моделях. / Д. А. Данильченко, С. Ю. Шевченко // XXV Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье». – Харків: НТУ «ХП», 2017, Ч. 2, с. 252.

*Здобувачем приведена методика проведення експериментальних досліджень вражаємості блискавкою неізолюваних та захищених проводів та наведені експериментальні дані щодо зони захоплення блискавок повітряними лініями.*

13. Данильченко Д. А. Поражаемость линий с защищенными проводами прямыми ударами молнии. / С. Ю. Шевченко, Д. А. Данильченко, А. И. Ганус, Ю. С. Громадский // – Промислова електроенергетика та електроніка. – Київ : ТОВ «Етін», 2016, 6 (102), с. 30 – 32.

*Здобувачем приведена методика проведення експериментальних досліджень вражаємості прямими ударами блискавки неізолюваних та захищених проводів.*

## АНОТАЦІЇ

**Данильченко Д.О. Захист ліній електропередавання з захищеними проводами від прямих ударів блискавки.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.14.02 - Електричні станції, мережі і системи (141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2018.

Дисертація присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі у галузі блискавко захисту повітряних ліній електропередавання із захищеними проводами середніх класів напруги від прямих ударів блискавки.

В роботі експериментально доведено, що захищені проводи рідше вражаються прямими ударами блискавки, ніж неізолювані проводи. Це пов'язано з захисною оболонкою захищених проводів, оскільки умови виникнення зустрічного лідеру значно ускладнюються, то і зона захоплення блискавки значно зменшується. Діючі методики розрахунку кількості прямих ударів блискавки не враховують тип проводу на ПЛ, що призводить до не коректних розрахунків кількості прямих ударів блискавки, і, як наслідок, кількості вимкнень лінії.

Отримані результати дозволили створити новий підхід до блискавкозахисту ПЛ з захищеними проводами, створити комбіновану лінію електропередавання. Ця лінія містить в своїй конструкції захищені проводи і неізолюваний провід, який виконує роль блискавкозахисного дроту. Створена модель комбінованої лінії була експериментально перевірена, жодного удару блискавки в захищені проводи зафіксовано не було.

*Ключові слова:* повітряна лінія електропередавання, захищений провід, прямий удар блискавки, повнофакторний експеримент, зона захоплення блискавки, регресійний аналіз, метод нечіткої логіки, комбінована лінія електропередавання.

**Данильченко Д.А. Защита линий электропередачи с защищенными проводами от прямых ударов молнии. На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.14.02 - Электрические станции, сети и системы (141 - Электроэнергетика, электротехника и электромеханика). - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи в области молниезащиты воздушных линий электропередачи с защищенными проводами средних классов напряжения от прямых ударов молнии.

В работе рассмотрены методы моделирования поражаемости воздушных линий прямыми ударами молнии. Применен метод основывающийся на моделировании относительно высоты ориентировки молнии. Проанализированы факторы, влияющие на поражаемость ВЛ прямым ударом молнии. Для проверки адекватности выбранной модели были проведены экспериментальные исследования вероятности прорыва молнии на провода воздушной линии сквозь тросовую защиту для линий 110 кВ. На полученной модели экспериментально доказано, что защищенные провода реже поражаются прямыми ударами молнии, чем неизолированные провода. Это связано с защитной оболочкой защищенных проводов, поскольку условия возникновения встречного стримера значительно усложняются, то и зона захвата молнии значительно уменьшается. Действующие методики расчета количества прямых ударов молнии не учитывают тип провода на ВЛ, что приводит к не корректным расчетам количества прямых ударов молнии, и, как следствие, количества отключений линии.

Результаты экспериментальных исследований позволили создать математическую модель поражаемости ВЛ прямыми ударами молнии. Проведен статистический анализ, регрессионный анализ и анализ на основании метода нечеткого вывода Мамдани.

Полученные результаты позволяют уточнить методику расчета грозоупорности воздушных линий средних классов напряжения на этапе проектирования.

Полученные результаты позволили создать новый подход к молниезащите ВЛ с защищенными проводами, создать комбинированную линию электропередачи. Эта линия содержит в своей конструкции защищенные провода и

неизолированный провод, который выполняет роль молниезащитного троса. Созданная модель комбинированной линии была экспериментально проверена, ни одного удара молнии в защищенные провода зафиксировано не было.

*Ключевые слова:* воздушная линия электропередачи, защищенный провод, прямой удар молнии, полнофакторный эксперимент, зона захвата молнии, регрессионный анализ, метод нечеткой логики, комбинированная линия электропередачи.

**Danylchenko D. D. Protection of power lines with protected wires from direct lightning strikes.** - Manuscripts.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.14.02 - Electric power stations, networks and systems (141 - Power engineering, electrical engineering and electromechanics). - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to the solution of the current scientific and applied problem in the field of lightning protection of overhead transmission lines with protected wires of medium voltage classes from direct lightning strikes.

In the work it has been experimentally proved that the protected wires are less likely to be struck by direct lightning strikes than bare wires. This is due to the protective envelope of the protected wires, since the conditions for the appearance of the oncoming streamer are significantly more complicated, then the lightning capture zone is significantly reduced. The current methods for calculating the number of direct lightning strikes do not take into account the type of wire on the overhead line, which leads to incorrect calculations of the number of direct lightning strikes, and, as a consequence, the number of line outages.

The obtained results made it possible to create a new approach to lightning protection of overhead lines with protected wires, to create a combined power transmission line. This line contains in its design protected wires and bare wire, which acts as a lightning protection cable. The created model of the combined line was experimentally tested, not a single lightning strike into the protected wires was recorded.

*Keywords:* overhead transmission line, protected wire, direct lightning strike, full-factor experiment, lightning grabber zone, regression analysis, non-precise logic method, combined power transmission line.

