

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**СВІТЛИЧНА ОЛЕНА ЄВГЕНІЇВНА**



УДК 621.317.42

**ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНИХ ЗАСОБІВ  
БЛИСКАВКОЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА  
ДОПОМОГОЮ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

Спеціальність 05.14.02 — Електричні станції, мережі і системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичних основ електротехніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків

**Науковий керівник:** доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Резинкіна Марина Михайлівна,**  
Державна установа «Інститут технічних проблем  
магнетизму Національної академії наук України»,  
провідний науковий співробітник

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Говоров Пилип Парамонович,**  
Харківський національний університет міського  
господарства ім. О.М. Бекетова,  
професор кафедри світлотехніка та джерел світла

кандидат технічних наук, доцент  
**Сотнік Ольга Василівна,**  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства ім. Петра Василенка,  
доцент кафедри автоматизованих електромеханічних  
систем

Захист відбудеться “ 03” березня 2016 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “ 02” лютого 2016 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



С.Ю.Шевченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Захист від прямих ударів блискавки є одним з найважливіших щодо підвищення надійності живлення споживачів електричної енергії. Зі збільшенням в електричних мережах кількості споживачів, обладнання яких є дуже чутливим до електромагнітних завад, що виникають під час ударів блискавки, вимоги до систем блискавкозахисту об'єктів електроенергетичних систем стають набагато жорсткішими. Це пов'язано зі зростаючим використанням напівпровідникової і цифрової техніки, а також різноманітних систем виміру, контролю і управління електроенергетичними об'єктами.

Кожен удар блискавки безпосередньо в об'єкт електричної мережі або поблизу нього стає причиною виникнення перенапруги, яка може призвести до пошкодження обладнання та збоїв у роботі електронних систем, розташованих на цьому об'єкті. Одним з найважливіших питань при реконструкції та проектуванні систем блискавкозахисту об'єктів електричних систем є прогнозована кількість вражень їх блискавкою з певним розподілом амплітуд струмів блискавки. Тому оцінка вірогідності ураження блискавкою електроенергетичних об'єктів вимагає уточнених методик і спеціального розгляду. Такі ж проблеми виникають при удосконаленні засобів блискавкозахисту діючих об'єктів, ураження яких пов'язане з підвищеною небезпекою (наприклад, стартові ракетні комплекси нафтохранилища, засоби передавання газу і нафти, атомні електростанції та ін.), а також при їх проектуванні. При цьому важливою є інформація про прогнозовану кількість ударів у такі об'єкти блискавки з найбільшими, найменшими і найбільш поширеними рівнями токів блискавки.

При виборі параметрів систем блискавкозахисту електроенергетичних об'єктів, а також визначенні зон, в яких ними забезпечується надійний захист від удару блискавки, використовується фізичне та математичне моделювання відповідних електромагнітних процесів.

Тому дослідження, спрямовані на розвиток методів математичного і фізичного моделювання електромагнітних процесів, що супроводжують фінальну стадію руху лідерного каналу блискавки до землі, і вибір на їх основі надійних засобів блискавкозахисту об'єктів електроенергетичних систем та об'єктів, ураження яких пов'язане з підвищеною небезпекою, є актуальними і дають можливість вирішити важливу науково-практичну проблему підвищення надійності систем блискавкозахисту.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі теоретичних основ електротехніки НТУ «ХП» в межах держбюджетних НДР МОН України: “Підвищення електробезпеки персоналу та надійності експлуатації енергооб'єктів України при аварійних режимах роботи” (№ ДР 0115U000610); “Розробка методів створення нелінійних керамічних діелектричних середовищ з поліпшеними імпульсними електромагнітними властивостями” (№ ДР 0112U000415);

“Розробка фізичних та математичних моделей електрофізичних процесів у термостійких радіопоглинаючих покриттях” (№ ДР 0114U003724) та господарчими договорами “Розробка і виготовлення стенду випробувань номінальними струмами” (ПрАТ «Завод Елокс» Харківська обл., смт. Комсомольське); “Певірка омичного дільника напруги ОДН-1,2 і емнісного дільника напруги ЄДН-1,2”(ТОВ НВП «ES ПОЛІМЕР» м. Артемівськ), в яких здобувачка була виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є вибір параметрів ефективних засобів блискавкозахисту електроенергетичних об'єктів за допомогою моделей електрофізичних процесів на фінальній стадії руху лідерного каналу блискавки до землі з урахуванням можливості появи зустрічного лідера від заземлених об'єктів. Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

- проаналізувати існуючі методи та засоби захисту об'єктів електроенергетичних систем, провести моделювання електричного поля блискавковідводу і лідерного каналу блискавки;

- удосконалити математичну модель розподілу електричного поля в системах, які містять тонкі провідні об'єкти типу стрижнів або дротів та імітують лідерний канал блискавки, що рухається до землі, та стрижньові блискавковідводи;

- провести теоретичні та експериментальні дослідження зв'язку між інтенсивністю коронування заземленого електроду і вірогідністю влучення в нього високовольтного імпульсного розряду;

- розробити статистичну модель електрофізичних процесів на завершальній стадії руху лідерного каналу блискавки до землі з урахуванням вірогідності появи зустрічного лідера від заземлених об'єктів;

- проаналізувати розподіл вірогідності враження блискавкою об'єкта, що захищається, за умови різного конструктивного виконання і розташування систем блискавкозахисту на основі розробленої моделі електрофізичних процесів на завершальній стадії руху лідерного каналу блискавки до землі;

- розробити рекомендації щодо вибору параметрів блискавковідводів, які забезпечують підвищення ефективності блискавкозахисту досліджуваних об'єктів електричних систем.

*Об'єкт дослідження* - захист об'єктів електричних систем від удару блискавки.

*Предмет дослідження* – параметри засобів блискавкозахисту об'єктів електричних систем та моделі електрофізичних процесів при «виборі» блискавкою місця удару.

**Методи дослідження.** В основу роботи покладено системний підхід при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, що базується на фундаментальних положеннях теорії електромагнітного поля, теорії математичної фізики, теорії імовірності та математичної статистики. Для чисельного моделювання розподілів електричних полів використовувалися методи скінченних об'ємів і поглинаючих граничних умов. Розрахунки

здійснювалися в середовищі програмування FORTRAN. Достовірність розробок забезпечена використанням коректних методів, підтверджена експериментальними дослідженнями та впровадженням рекомендацій щодо оцінювання надійності засобів блискавкозахисту енергетичних об'єктів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

- вперше за допомогою фізичного та математичного моделювання електрофізичних процесів розвитку електричного пробою в системах з заземленими електродами з загостреними та округленими вершинами, доведено, що наявність або відсутність корони, а також її інтенсивність, пропорційна току корони, не оказує впливу на імовірність ураження заземленого електрода високовольтним розрядом при рівнях прикладеної напруженості електричного поля, які відповідають умовам грозової обстановки;

- вдосконалено модель електричного поля за умови грози, яка, на відміну від існуючих, дозволяє визначити розподіл електричного поля (ЕП) поблизу вершин блискавковідводів, а також у проміжку між блискавковідводом і лідерним каналом блискавки з урахуванням наявності об'ємного заряду навколо його вершини, а також з урахуванням можливості розвитку зустрічної іскри від заземлених об'єктів;

- вдосконалено статистичну модель електрофізичних процесів на фінальній стадії руху лідерного каналу блискавки до землі, яка дозволяє знайти розподіл прогнозованої кількості ударів блискавки в окремі частини електроенергетичних об'єктів з урахуванням їх висоти та габаритів, можливості розвитку від них зустрічної іскри, а також появи блискавок з різними потенціалами.

**Практичне значення отриманих результатів** для електроенергетичної галузі полягає у розробці систем з прогнозованою кількістю уражень блискавковідводів і об'єкту, що захищається; в оцінці ступені впливу кількості використаних блискавковідводів та запропонованої конструкції тросового блискавковідводу, застосування якого дозволяє практично виключити улучення блискавки за час експлуатації об'єкта, що захищається.

Визначено, що умови розвитку висхідного позитивного лідера від блискавковідводів з  $L/R \geq 300 - 500$  виконуються при наближенні лідерного каналу блискавки до блискавковідводу на відстань  $h \leq U_L/E_{cr-}$  (де  $U_L$  – потенціал вершини лідерного каналу,  $E_{cr-} = 10^6$  В/м – напруженість ЕП, за якої розвиваються лідери негативної полярності).

Проведене математичне та фізичне моделювання електрофізичних процесів показало, що наявність зони корони навколо вершини блискавкоприймача, що передує початку процесу високовольтного розряду, істотно не впливає на умови просування від нього висхідного лідера.

Основні результати виконаних у дисертації досліджень використані в "Національній енергетичній компанії УкрЕнерго" (м. Київ) щодо оцінювання надійності засобів блискавкозахисту електроенергетичних об'єктів, а також в

Науково-дослідному і проектно-конструкторському інституті "Молнія" НТУ "ХПІ" щодо розроблення рекомендацій з конструкцій блискавковідводів.

Положення дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрах Теоретичних основ електротехніки та Інженерної електрофізики НТУ «ХПІ» при викладанні дисциплін та дипломному проектуванні.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем самостійно. Серед них: методи математичного та фізичного моделювання електрофізичних процесів розвитку блискавки та довгих розрядів у повітрі, аналітичні та чисельні методи розрахунку електричних полів у системах, що містять довгі та тонкі канали пробою та блискавковідводи, методи розрахунку електричних полів у так званих відкритих системах, обґрунтування планів і програм експериментів по визначенню вливу корони на вірогідність влучення високовольтних розрядів у стрижневі електроди, статистична обробка даних щодо місць високовольтних пробоїв та узагальнення отриманих результатів, участь у виборі систем блискавкозахисту з підвищеною надійністю щодо їх впровадження у електричних системах.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати роботи доповідалися і обговорювалися на XVIII, XVIV, XVV Міжнародних науково-практичних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м.Харків, 2013 р., 2014 р., 2015 р.); 1-ої та 2-ї Науково-технічних конференціях студентів, аспірантів та молодих вчених "Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України" (м.Харків, 2014 р., 2015 р.).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 11 наукових праць, у тому числі 6 статей в наукових фахових виданнях України, (1- у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази SCOPUS ), 1 стаття – у періодичному іноземному фаховому виданні (SCOPUS), 4 – у матеріалах конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатка. Загальний обсяг дисертації становить 137 сторінки, з них 30 рисунків по тексту, 3 таблиці по тексту; списку використаних джерел з 100 найменувань на 10 сторінках, 1 додатку на 3 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також відомості про публікації, впровадження, апробацію та структуру роботи.

У **першому розділі** наводяться параметри електрофізичних процесів, що супроводжують розряд блискавки. Внаслідок труднощів, з якими

доводиться мати справу при дослідженні електрофізичних процесів при розряді блискавки в природних умовах, велика кількість робіт присвячена математичному і фізичному моделюванню процесів, що супроводжують розвиток блискавки. Наведено аналіз існуючих методів моделювання електрофізичних процесів при русі лідерного каналу блискавки до землі. Проведено огляд відомих експериментальних даних про параметри лідерного каналу блискавки, а також даних щодо параметрів високовольтних розрядів у довгих повітряних проміжках. Проаналізовано існуючі математичні і фізичні моделі, що описують рух лідерного каналу блискавки до землі при "вборі" їм місця удару. Визначені основні аналітичні і чисельні методи розрахунку електричних полів в системах з тонкими довгими об'єктами типу розрядних каналів і провідних стрижнів, поставлені завдання дослідження.

**Другий розділ** присвячений обґрунтуванню методів моделювання електрофізичних процесів та вибору на їх основі параметрів ефективних засобів блискавкозахисту електроенергетичних об'єктів.

При моделюванні електрофізичних процесів у засобах блискавкозахисту потрібне фізико-математичне моделювання електричних процесів у системах, що містять провідні стрижневі структури. До таких об'єктів належать як блискавковідводи, так і лідерний канал блискавки, що рухається до землі за умови грози, коли між зарядженою хмарою і землею має місце близька до однорідної напруженість ЕП. Найчастіше довгі розрядні канали представляють у вигляді зарядженої нитки з зарядом, що рівномірно розподілений по її довжині, або електропровідного еліпсоїда, на якому є заряд, а також електропровідного еліпсоїда, що знаходиться в рівномірному зовнішньому електричному полі. Найближчою до реальних об'єктів є модель "циліндр у зовнішньому ЕП". При вирішенні практичних завдань блискавкозахисту застосування чисельних методів розрахунку дозволяє врахувати реальну форму каналів блискавки і блискавковідводів, характер розподілу на них зарядів, наявність поблизу них іонізованих зон, а також вплив землі і об'єктів, що знаходяться на ній, на величину і характер розподілу напруженості ЕП.

Розраховуючи параметри ЕП, слід мати на увазі, що реальної ситуації за умови грози відповідає система, яка містить лідерний канал блискавки, що знаходиться у близькому до однорідного зовнішньому ЕП напруженістю  $E_0$  (див. рис. 1). Для чисельних розрахунків електричних полів застосовано метод скінченних об'ємів (МСО), який реалізовано у вигляді прикладної комп'ютерної програми. При цьому розрахункова область розділялася сіткою, у вузлах якої визначаються невідомі величини, що характеризують параметри ЕП. Відмінність МСО від звичайних скінченно-різницевих методів полягає в тому, що для отримання вирішуваної системи використовується інтегрування вихідних рівнянь за об'ємами елементарних комірок, на які розподілена розрахункова ділянка. Однією з переваг такого підходу є те, що умови на границях розподілу середовищ виконуються автоматично, що значно спрощує обчислення електромагнітних полів у неоднорідних середовищах.

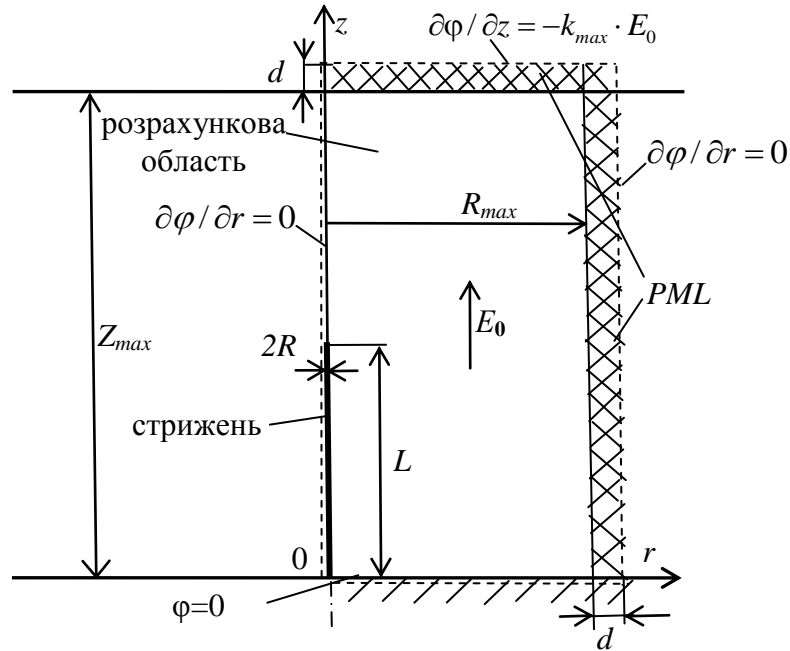


Рисунок 1 - Розрахункова система

За допомогою такого підходу розрахований розподіл ЕП в околиці лідерного каналу блискавки і стрижневих блискавковідводів за умови грози. Оскільки лідерний канал рухається до землі порівняно повільно (за час порядку 0.01 с), такий розрахунок може бути виконаний у квазістаціонарному наближенні. Вирішуване рівняння отримано шляхом застосування до рівняння Максвелла

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho, \quad (1)$$

де  $\vec{D}$  – електрична індукція, яка виражається через напруженість ЕП  $\vec{E}$  та електричний потенціал  $\phi$ ;

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} = -\epsilon_0 \epsilon \cdot \operatorname{grad} \phi;$$

$\epsilon$  – відносна діелектрична проникність середовища; ( $\epsilon_0 = 0.885 \cdot 10^{-11}$  Ф/м),

операції інтегрування за  $V$  – об'ємами елементарних комірок, на які розділена розрахункова область, і використання теореми Остроградського – Гауса. В результаті отримано остаточне рівняння, що вирішується як

$$-\int_S \epsilon \cdot \frac{\partial \phi}{\partial n} ds = \frac{q_s}{\epsilon_0}, \quad (2)$$

де  $S$  – поверхня, яка охоплює об'єм  $V$ ;  $n$  – нормаль до поверхні  $S$ ;  $q_s$  - елементарний заряд, що знаходиться всередині поверхні  $S$ .

Оскільки стрижень має осьову симетрію, для чисельного розрахунку використана циліндрична система координат. Розглядалася половина вихідної системи, така, що її ліва границя співпадає з віссю симетрії стрижня, права знаходиться від осі на відстані  $R_{max} = a$ , нижня границя співпадає з поверхнею землі, верхня границя віддалена від нижньої на відстань  $Z_{max}$  (рис. 1).



Вирішуване рівняння щодо розподілу ЕП записується в результаті представлення в (2) операцій диференціювання по простору через різниці значень потенціалів  $\varphi_{i,j}$  вузлах розрахункової сітки

$$\Lambda_r \varphi_{i,j} + \Lambda_z \varphi_{i,j} = 0, \quad (3)$$

де  $\Lambda_r \varphi_{i,j} = \varphi_{i-1,j} B_{i,j} - \varphi_{i,j} (B_{i,j} + C_{i,j}) + \varphi_{i+1,j} C_{i,j}$ ;

$$\Lambda_z \varphi_{i,j} = \varphi_{i,j-1} D_{i,j} - \varphi_{i,j} (D_{i,j} + F_{i,j}) + \varphi_{i,j+1} F_{i,j};$$

$$B_{i,j} = (1/\Delta r_{i-1})(r_i - \Delta r_{i-1}/2)(\Delta z_{j-1} \varepsilon_{i-1,j-1} + \Delta z_j \varepsilon_{i-1,j})/2;$$

$$C_{i,j} = (1/\Delta r_i)(r_i + \Delta r_i/2)(\Delta z_{j-1} \varepsilon_{i,j-1} + \Delta z_j \varepsilon_{i,j})/2;$$

$$D_{i,j} = (1/\Delta z_{j-1})[(r_i + \Delta r_i/4)\varepsilon_{i,j-1}\Delta r_i + (r_i - \Delta r_{i-1}/4)\varepsilon_{i-1,j-1}\Delta r_{i-1}]/2;$$

$$F_{i,j} = (1/\Delta z_j)[(r_i + \Delta r_i/4)\varepsilon_{i,j}\Delta r_i + (r_i - \Delta r_{i-1}/4)\varepsilon_{i-1,j}\Delta r_{i-1}]/2;$$

$i, j$  - індекси, що відносяться до координат  $r$  та  $z$  відповідно;  $\Delta r$ ,  $\Delta z$  - кроки по координатах  $r$  та  $z$  відповідно;  $\varepsilon_{i,j}$  - відносна діелектрична проникність щодо осередка  $(i, j)$ .

Система рівнянь (3) вирішувалася інтеграційним методом змінних напрямів за допомогою прогонки.

Для зменшення габаритів розрахункової області при знаходженні розподілу ЕП, на її правій та нижній границях використані так звані одновісні добре погоджені поглинаючі шари (*PML*). Відповідно до існуючих рекомендацій, при розрахунках використовувалися десять *PML* - шарів, що мають параметри  $m = 3$ ,  $k_{max} = 300$ . Граничні умови при розрахунках показані на рис. 1.

Порівняння результатів чисельного і аналітичного розрахунків рівнів напруженості ЕП при представленні стрижня у вигляді витягнутого еліпсоїда показало, що їх відносні відмінності не перевищують 4.6 %. Відмінність чисельних і аналітичних результатів пов'язана зі ступінчастою апроксимацією еліпсоїда при чисельному рішенні.

Відомо, що посилення напруженості ЕП поблизу вершини лідерного каналу блискавки викликає розвиток зустрічного лідера від наземних об'єктів. Для визначення умов, за яких це можливо, розраховані розподіли ЕП у системах, що моделюють рух лідерного каналу блискавки до землі. Для розвитку лідерних каналів потрібна наявність мінімальної напруженості ЕП  $E_{cr}$ . Згідно з експериментальними даними, лідери негативної полярності розвиваються при напруженості ЕП  $E_{cr-} \approx 10^6$  В/м, а позитивної полярності –  $E_{cr+} \approx 5 \cdot 10^5$  В/м.

Відомо, що розвиток численних стримерів від вершини лідерного каналу блискавки під час його руху до землі призводить до того, що стримерна зона стає заповненою об'ємним зарядом. Причому напруженість ЕП у цій зоні близька до однорідної, оскільки, як слідує з результатів вимірів,

швидкість стримерів складає близько  $10^5$  м/с і практично не змінюється по довжині стримерної зони, а таке можливе лише в однорідному ЕП, напруженість якого близька до мінімальної напруженості, при якій відбувається розвиток стримерних каналів ( $E_{cr}$ ). Представляючи стримерну зону у вигляді неоднорідної зарядженої сфери з однорідним ЕП, за допомогою теореми Гауса записується вираз для щільності заряду в ній у вигляді

$$\rho(r) = 2\varepsilon_0 E_{cr} / r, \quad (4)$$

де  $r$  – відстань до вершини лідерного каналу.

Радіус стримерної зони  $R_{str}$  визначається з виразу

$$U_L = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \int_0^{R_{str}} \frac{4\pi r^2 \rho(r)}{r} dr = 2E_{cr} \cdot R_{str},$$

де  $U_L$  – потенціал вершини лідерного каналу.

Для негативно зарядженого лідерного каналу вираз для  $R_{str}$  має вид

$$R_{str} = 0.5 \cdot U_L / E_{cr-}. \quad (5)$$

Умовою, за якої можливий розвиток висхідного лідера позитивної полярності від блискавковідводів, є досягнення в зоні руху лідерного каналу блискавки критичної напруженості  $E_{cr+}$ :

Відомо, що в локальних зонах, які примикають до вершин довгих тонких провідних стрижнів, напруженість ЕП значно (на 1 – 2 порядки) перевищує прикладену напруженість  $E_0$ . Тому умова досягнення на вершині блискавковідводу напруженості, необхідної для початку розряду, для блискавковідводів з  $L/R \geq 300 - 500$  за умови грози завідомо виконується. Тоді пропонується вважати, що розвиток висхідного лідера від блискавковідводу з такими параметрами можливий, якщо в зоні між його вершиною і голівкою низхідного лідерного каналу існує безперервна ділянка (шлях для стримера), в якій рівні напруженості ЕП перевищують  $E_{cr+}$

$$|\vec{E}_z| / E_{cr+} \geq 1, \quad (6)$$

де  $|\vec{E}_z|$  – модулі напруженості ЕП у зоні, що з'єднує вершини блискавковідводу і лідерного каналу блискавки.

Проаналізовано приклад використання описаних розрахунків ЕП для оцінювання можливості розвитку зустрічного лідера від блискавковідводів. Згідно з даними, радіус лідерного каналу блискавки  $R$  складає близько декількох міліметрів, а його довжина  $L$  має порядок  $H$  - середньої висоти хмар за умови грози ( $H \sim 3 - 5$  км). Проаналізована система з середніми параметрами блискавок і блискавковідводів:  $E_0 = 2 \cdot 10^4$  В/м,  $H = 4000$  м, потенціал лідерного каналу в ділянці хмар  $U_0 = 80$  МВ, потенціал вершини лідерного каналу з урахуванням зниження напруги в ньому через наявність градієнта  $E_L$  в каналі:  $U_L = U_0 - E_L \cdot H = 40$  МВ, відстань від вершини лідерного каналу до вершини блискавковідводу  $h = 40$  м, висота блискавковідводу  $H_R = 30$  м, радіус зарядженої стримерної зони  $R_{str} = 20$  м (див. (5)). Для простоти вважається, що лідерний канал прямий. Граничні умови, використані при розрахунку, показані на рис. 1, габарити розрахункової області:  $R_{max} = 0.5 \cdot H$ ,  $Z_{max} = H$ , крок

розрахункової сітки  $\Delta = \Delta_r = \Delta_z = 1.25$  м. Результати розрахунку ліній рівного потенціалу і рівної напруженості ЕП в околі вершини лідерного каналу і блискавковідводу показані на рис. 2.

Проведені розрахунки показали, що за описаних вище параметрів системи "лідер – блискавковідвід" умова (6) досягається, коли відстань між вершиною лідерного каналу блискавки і вершиною блискавковідводу менша або рівна, ніж

$$h \leq U_L/E_{cr-}. \quad (7)$$

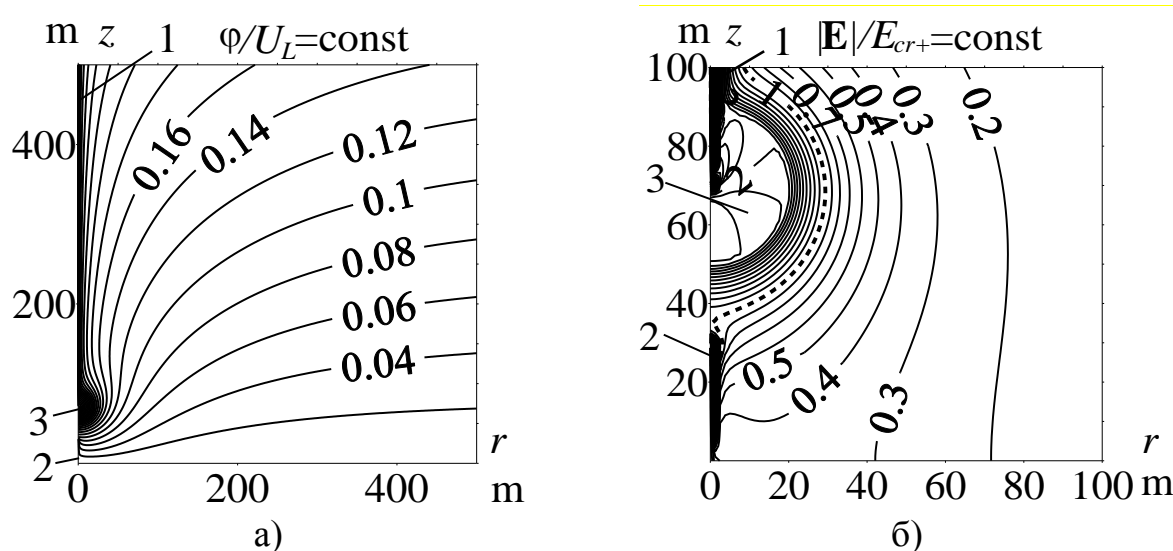


Рисунок 2 – Розраховані розподіли ліній рівного потенціалу (а) і рівної напруженості ЕП (б) у системі, що моделює наближення лідерного каналу блискавки (1) до блискавковідводу (2) за наявності зарядженої стримерної зони (3).  $L/R=4 \cdot 10^5$ ,  $R_{str}=0.5 \cdot U_L/E_{cr-} = 20$  м,  $h=2 \cdot R_{str+} = 40$  м,  $E_0=2 \cdot 10^4$  В/м

Таким чином, за результатами чисельних розрахунків зроблений висновок, що виконання умови (7) достатнє для наявності ділянки між вершинами лідерного каналу і блискавковідводу з  $|\vec{E}|/E_{cr+} \geq 1$ . Причому в цій ділянці рівні ЕП суттєво не змінюються за варіювання висоти блискавковідводу  $H_R$  в межах 20 – 50 м.

Обчислення ЕП в розрахунковій області, що включає весь лідерний канал блискавки з довжиною порядку декількох кілометрів з досить дрібним кроком по простору, пропорційному поперечним розмірам зарядженої області пов'язано як з великим порядком отриманої системи рівнянь, так і з поганою збіжністю ітерацій, необхідних для її вирішення. Для того щоб уникнути даної проблеми запропоновано обмежити розрахункову область габаритами  $10 \cdot (H_R + h)$  в радіальному і азимутному напрямках і використовувати на верхній границі такої усіченої області однорідні умови Неймана  $\partial\phi/\partial z = 0$ . Виконані таким чином розрахунки при врахуванні наявності корони показали, що максимальні відстані між вершинами блискавкоприймача і лідерного каналу блискавки, при яких напруженість ЕП достатня для руху висхідного лідера, збільшуються не більше ніж на 10 - 20%.

У **третьому розділі** запропонована удосконалена статистична модель електрофізичних процесів для визначення імовірності удару блискавки в електроенергетичні об'єкти. Ця модель базується на узагальненні експериментальних досліджень імпульсних високовольтних розрядів у довгих проміжках "стрижень-площина", а також при ударі блискавки. Сутність запропонованої моделі полягає у наступному: використовується припущення, що останній етап руху лідерного каналу блискавки при її орієнтуванні на наземний об'єкт починається, коли його досягає стримерна зона лідерного каналу низхідного лідерного каналу блискавки. При роботі моделі вважається, що "останній удар" є процесом переміщення лідерного каналу через стримерну зону. При цьому враховувалося, що величини швидкості і прискорення лідерного каналу блискавки залежать від її потенціалу, а також від кута між векторами швидкості його руху і напруженості електричного поля в навколишньому середовищі. При роботі моделі вважалося, що за виконання хоча б однієї з двох описаних нижче умов відповідна заземлена ділянка уражається блискавкою в розглядуваному чисельному експерименті. Першою умовою є зменшення питомого опору одного з каналів стримерів до рівня, близького до питомого опору лідерного каналу блискавки. Друга умова передбачає, що один з конкуруючих каналів іскри, що переміщується в стримерній зоні лідерного каналу блискавки, досягає цієї заземленої ділянки.

Для опису процесу "вибору" лідерним каналом блискавки місця удару на землі використано принцип, аналогічний відомому принципу "найменший час – максимальна вірогідність". Вважається, що вірогідність удару блискавки в заземлену ділянку обернено пропорційна часу її досягнення лідерним каналом блискавки на завершальній стадії його руху. При роботі моделі враховувалися висота і габарити заземлених об'єктів, можливість розвитку від них зустрічної іскри, поява блискавок з різними потенціалами. Порівняння розрахованих співвідношень між прогнозованим числом проривів блискавки на блискавковідвід і об'єкт, що захищається, з відповідними співвідношеннями щодо нормованих в РД 34.21.122-87 зон захисту показав їх збіг у межах 10 %.

Використання комп'ютерної програми оснований на описаній моделі дозволило також розрахувати імовірності місць пробую при прикладенні до проміжку "високовольтний стрижень - два стрижні на заземленій площині" імпульсів позитивної і негативної полярності. Дані моделювання і експериментів, що покладені в основу норм РД 34.21.122-87, збігаються в межах 5 - 25 %.

Проведені розрахунки по вибору системи блискавкозахисту ємкості для зберігання нафтопродуктів на електроенергетичних об'єктах, що представляє собою циліндр радіусом 39 м і висотою 34 м. За допомогою розробленої моделі електрофізичних процесів проаналізовано 6 варіантів систем блискавкозахисту. При цьому варіювалася кількість блискавковідводів, що оточують цей об'єкт, та їх висота. На основі розробленої методики статистичного моделювання електрофізичних процесів при русі лідерного

каналу блискавки на фінальній стадії "вибору" місця удару на землі доведено, що якщо з міркувань безпеки потрібно суттєво зменшити сумарну прогнозовану кількість влучень блискавки, слід використовувати тросові блискавковідводи. На рис. 3 показаний розрахований розподіл імовірності влучення блискавки в цьому випадку (висота, на яку підняті троси, становить 50 м, кількість тросів – 7,  $N$  - розраховане прогнозоване число ударів блискавки за рік). При такому розташуванні тросових блискавковідводів прогнозоване число проривів блискавки на розглянутий об'єкт не вище, ніж один за 100 років. Як показало проведене комп'ютерне моделювання, використання 14 блискавковідводів висотою 90 м, розташованих по контуру досліджуваного об'єкту, дає прогнозоване число проривів блискавки на нього один раз в 43 роки. Таким чином визначено, що використання тросових блискавковідводів виявляється більш ефективним, ніж стрижневих.

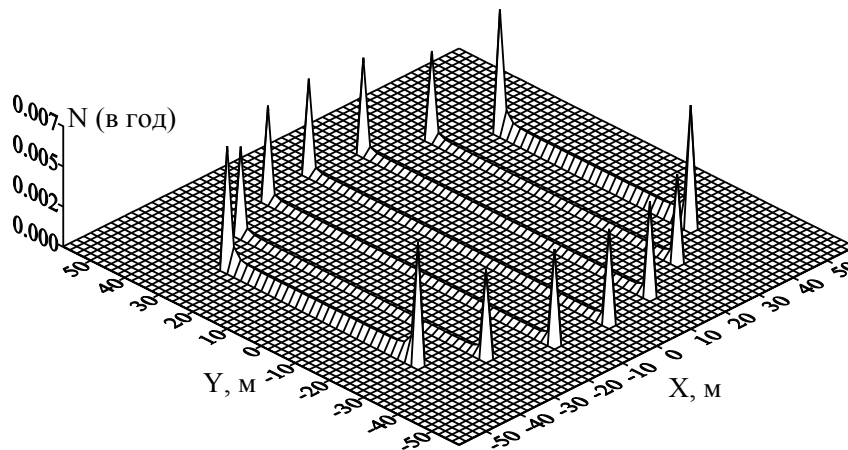
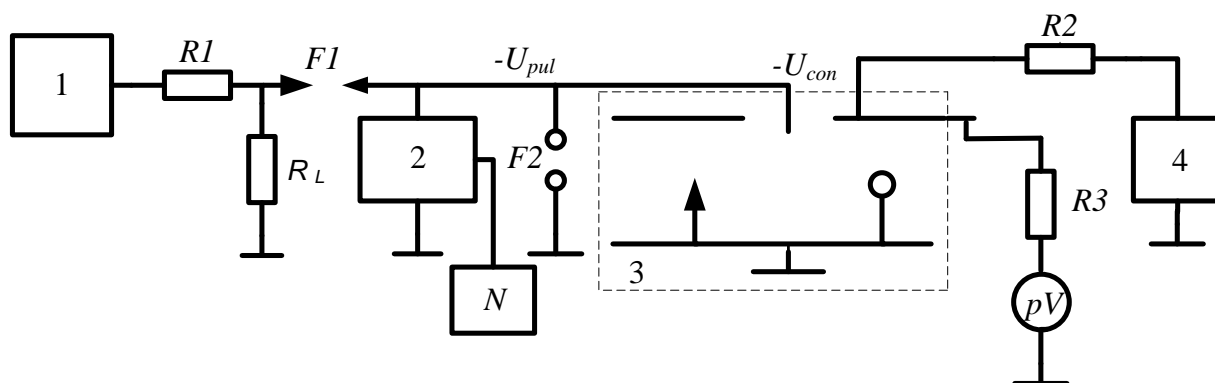


Рисунок 3 - Розрахований розподіл кількості ударів блискавки в системі "цистерна - 7 тросових блискавковідводів"

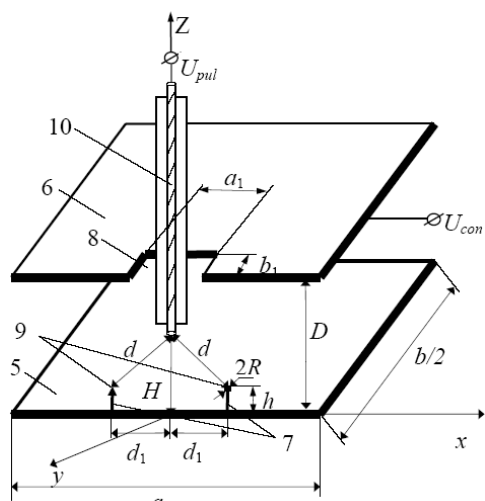
У четвертому розділі дисертаційної роботи наведені результати фізичного і математичного моделювання процесів, що супроводжують пробій повітряних проміжків "стрижень – стрижень" довжиною до 1 м за наявності і відсутності умов для виникнення передпробійної корони навколо вершин заземлених стрижневих електродів. Проведено дослідження впливу величини струму корони, залежної від рівня напруженості прикладеного ЕП і форми вершини заземленого електроду, на вірогідність його враження високовольтним розрядом.

Для дослідження цих процесів використане фізичне моделювання за допомогою високовольтного стенду, що забезпечує прикладення до проміжку "площина – стрижень на площині" (відстань між площинами – 2.1 м) постійної напруги негативної полярності  $|U_{con}| \leq 200$  кВ, а також прикладення до розрядного проміжку "стрижень – стрижень" імпульсної напруги негативної полярності амплітудою  $|U_{pul}| \leq 1$  МВ.

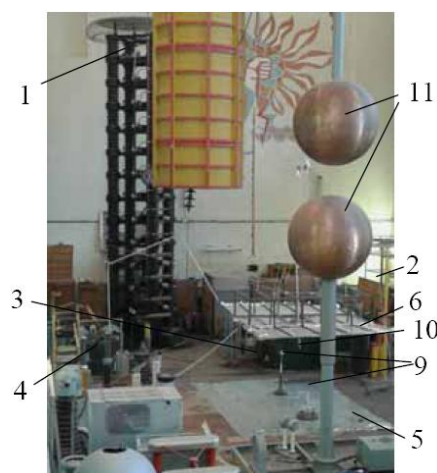
Для експериментального моделювання процесів враження високовольтним розрядом заземлених стрижневих електродів, що імітують блискавковідводи і об'єкти, що захищаються, використано устаткування високовольтного стенду НТУ "ХПІ". Цей стенд містить генератор Маркса заввишки 10 м, що має 12 поверхів (схема високовольтного стенду і його фотографія показані на рис. 4).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Схема високовольтного стенду і його фотографія.  
а) – електрична схема стенду; б) – схема фізичної моделі для дослідження впливу струму корони на процеси пробую; в) – фотографія високовольтного залу; г) – фотографії високовольтних розрядів

Для проведення експериментального моделювання була створена фізична модель, що містить генератор постійної напруги (рис. 4). Напруга з генератора подається на провідну площину (рис. 4), що має розміри  $3 \times 3 \text{ м}^2$ . Ця площина підвішена на висоті  $D=2.1 \text{ м}$  над заземленою площиною (рис. 4). У результаті прикладення напруги  $U_{con}$  до початку високовольтного пробою, в просторі між площинами 5 і 6 (рис. 4) виникає напруженість ЕП, що приблизно дорівнює  $E_0=U_{con}/D$ . Ця напруженість імітує умови перед грозою. Наявність напруженості  $E_0$  може стати причиною виникнення на вершинах розташованих на заземленій площині електродів (рис. 4) висотою  $h$  коронних розрядів, інтенсивність яких характеризується вимірюваними діючими значеннями струму корони ( $I_{cor}$ ).

Для того щоб пояснити експериментально отримані залежності струму корони від форми вершини заземлених електродів і величини прикладеної постійної напруги, проведено математичне моделювання розподілу ЕП у досліджуваних системах на основі розробленої прикладної програми.

При проведенні експериментів досліджена ступінь впливу інтенсивності передпробійних процесів утворення корони на вірогідність враження заземлених електродів лідером негативної полярності. Для цього використана така схема проведення експериментів. На підвішений високовольтний електрод (10, рис. 4б) з генератора імпульсних напруг (ГІН) (1, рис. 4б) подавалася імпульсна напруга негативної полярності  $U_{pul}$ . На рівній відстані від високовольтного електроду розміщувалися два заземлені електроди (7, рис. 4б). Причому вершина одного з них мала форму конуса висотою  $0.14 \text{ м}$ , діаметром основи  $0.04 \text{ м}$ , а другого – форму сфери діаметром  $0.045 \text{ м}$  або  $0.125 \text{ м}$ . До потенційної площини 6, підвішеної на відстані  $2.1 \text{ м}$  над заземленою площиною 5 (рис. 4б), подавалася постійна напруга  $U_{con}$ , рівень якої варіювався від  $0$  до  $-200 \text{ кВ}$ . У процесі експериментів фіксувалася кількість пробойів на заземлений електрод з вершиною у вигляді конуса ( $N_P$ ) і з закругленою вершиною ( $N_R$ ), причому в разі, коли високовольтний розряд вражав обидва електроди одночасно (рис. 4г), на одиницю збільшувалося значення і  $N_P$ , і  $N_R$ .

Для того, щоб інтерпретувати отримані експериментальні дані з пробою довгих повітряних проміжків, проведений розрахунок розподілів електричних полів у системах, що містять заземлений електрод з закругленою або загостреною вершиною (рис. 5). Аналіз процесів передпробійної корони навколо закруглених і загострених вершин заземлених електродів показав, що наявність або відсутність корони, а також її інтенсивність, пропорційна зареєстрованому струму корони, не оказує достовірно значимого впливу на вірогідність враження відповідного заземленого електроду високовольтним розрядом, якщо рівень прикладеної постійної напруженості ЕП нижче певного критичного рівня, який більший, ніж типові напруженості електричного поля за умови грозової обстановки.

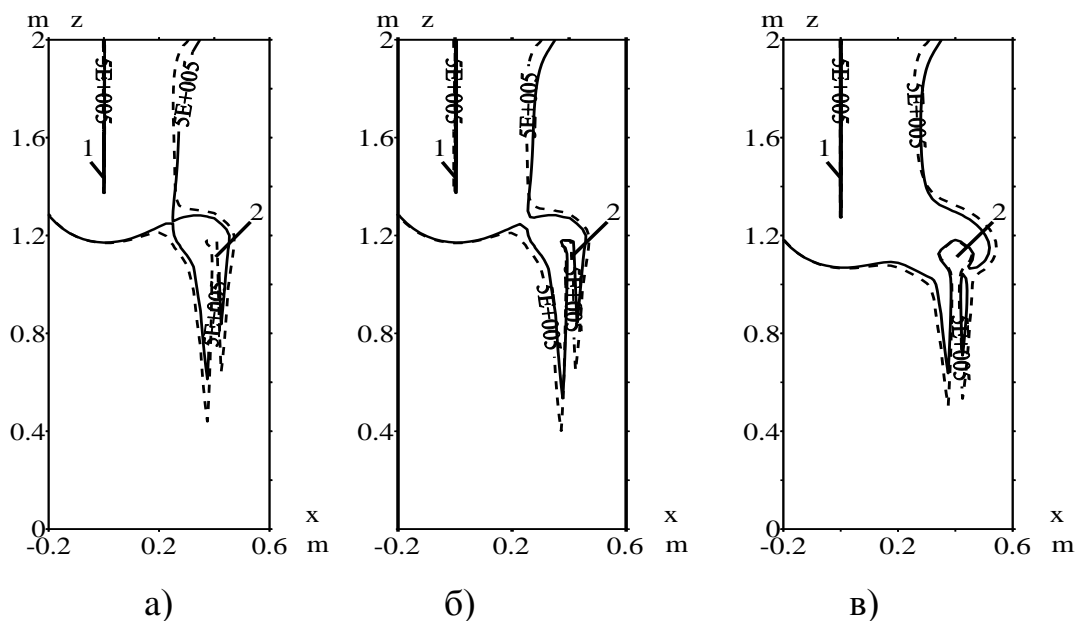


Рисунок 5 – Розраховані лінії рівної напруженості ЕП у перетині  $z=0$  за рівнем  $E=5$  кВ/см при таких параметрах системи:  $h=1.2$  м,  $d=0.44$  м,  $U_{pul}=750$  кВ. \_\_\_\_\_ -  $U_{con}=-120$  кВ, ----- -  $U_{con}=-200$  кВ; 1 - високовольтний електрод, 2 - заземлений електрод. а) - вершина заземленого електрода має форму конуса з радіусом скруглення 0.015 м через наявність корони; б) - вершина заземленого електрода має форму сфери діаметром 0.045 м; в) - вершина заземленого електрода має форму сфери діаметром 0.125 м

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання вибору параметрів ефективних засобів блискавкозахисту електроенергетичних об'єктів за допомогою моделей електрофізичних процесів на фінальній стадії руху лідерного каналу блискавки до землі з урахуванням можливості появи зустрічного лідера від заземлених об'єктів та математичних моделей розподілу електричного поля в системах, які містять тонкі провідні об'єкти типу стрижнів.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Проаналізовані існуючі методи та засоби захисту об'єктів електроенергетичних систем від ударів блискавки. Проведене чисельне моделювання електричного поля блискавковідводу і лідерного каналу блискавки з урахуванням наявності навколо його вершини іонізованої неоднорідно зарядженої зони показало, що умови розвитку висхідного позитивного лідера від блискавковідводів з  $L/R \geq 300 - 500$  виконуються при наближенні лідерного каналу блискавки до блискавковідводу на відстань  $h \leq U_L/E_{cr}$  (де  $U_L$  - потенціал вершини лідерного каналу,  $E_{cr} = 10^6$  В/м - напруженість ЕП, при якій поширюються лідери негативної полярності).



2. Запропоновано математичну модель розподілу ЕП в системі, що включає дуже довгий і тонкий лідерний канал блискавки і блискавковідводу, а також розташовані поблизу їх вершин зони з об'ємним зарядом, що полягає в усіканні розрахункової області до зони, віддаленої від блискавковідводу на відстані  $10 \cdot (H_R + h)$  в радіальному і азимутному напрямках. При цьому вважалось, що на верхній границі такої усіченої розрахункової області виконуються однорідні умови Неймана. Збіг результатів розрахунку потенціалів в зоні з габаритами  $2 \cdot (H_R + h)$  при розрахунку ЕП за допомогою усіченої і повної розрахункових систем підтвердило правомірність такого підходу.

3. Проведене фізичне і математичне моделювання процесів коронування, що передуює пробією, навколо скруглених та загострених вершин заземлених електродів показало, що наявність або відсутність корони, а також її інтенсивність, пропорційна току корони, що реєструється, не оказує впливу на імовірність враження відповідного заземленого електрода високовольтним розрядом, якщо рівень напруженості прикладеного постійного ЕП нижче критичного рівня, меншого за напруженість в умовах грозової обстановки. Чисельне моделювання засвідчило, що наявність зони корони навколо вершини блискавкоприймача не робить істотного впливу на умови руху висхідного лідера. Так, для блискавкоприймачів висотою 30 - 70 м максимальну відстань до головки лідерних каналу блискавки, при якому виконуються умови руху висхідного лідера, може збільшитися не більше ніж на 10 - 20%.

4. Розроблено статистичну модель електрофізичних процесів для визначення імовірності удару блискавки в електроенергетичні об'єкти з урахуванням їх висоти і габаритів, а також можливості розвитку від них зустрічної іскри. Дана модель заснована на аналізі наявних даних про параметри блискавок, а також електрофізичних процесах при пробії довгих повітряних проміжків. Запропонована модель використана для розрахунку імовірності місця удару довгою іскри при прикладенні до високовольтного електроду напруги позитивної і негативної полярності. Порівняння отриманих результатів з відомими експериментальними даними показало їх збіг в межах 5 - 25%.

5. Проведене комп'ютерне моделювання процесів, що супроводжують рух лідерного каналу блискавки на останньому етапі перед "вибором" місця удару заземленого об'єкта дозволило визначити прогнозоване число ураження блискавковідводів різного конструктивного виконання та нестандартного електроенергетичного об'єкта, що захищається.

6. На основі проведеного математичного моделювання за допомогою розробленої статистичної моделі електрофізичних процесів з урахуванням висоти і габаритів об'єктів, що захищаються, показано, що застосування тросових блискавковідводів обраної конфігурації дозволяє практично виключити потрапляння блискавки в розглянутий об'єкт протягом всього терміну його експлуатації.

7. Основні результати виконаних у дисертації досліджень використані в Науково-дослідному і проектно-конструкторському інституті "Молнія" НТУ «ХПІ» при розробці рекомендацій щодо конструктивного виконання блискавководів, в "Національній енергетичній компанії УкрЕнерго", м. Київ, при оцінці надійності засобів блискавкозахисту енергетичних об'єктів, а також у навчальному процесі на кафедрах Теоретичні основи електротехніки та Інженерної електрофізики НТУ «ХПІ».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Светличная Е.Е. Моделирование статистических процессов под час удара блискавки в наземні об'єкти для вибору засобів блискавкозахисту підвищеної / М.М. Резинкина, Е.Е. Светличная // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №8 – С. 104–109.

*Здобувачем здійснено вибір параметрів засобів блискавкозахисту підвищеної надійності.*

2. Светличная Е.Е. Електричні параметри довгих провідних каналів / М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, Е.Е. Светличная // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – №60 (1033) – С. 108–114.

*Здобувачем виконані розрахунки електричних полів у системах з довгими провідними каналами за допомогою аналітичних та чисельних методів. .*

3. Светличная Е.Е. Моделирование електрофізичних процесів під час орієнтування блискавки на наземні об'єкти/ М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, Е.Е. Светличная // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – №15(1058) – С. 122–127.

*Здобувачем виконано комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів на останній стадії руху лідерного каналу блискавки до землі.*

4. Светличная Е.Е. Статистичне моделювання орієнтування блискавки на наземні об'єкти з урахуванням можливості виникнення зустрічної іскри / М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, Е.Е. Светличная // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – №50 (1092) – С. 127–134.

*Здобувачем запропонована та реалізована у вигляді програмного забезпечення статистична модель, що враховує виникнення висхідної іскри від наземних об'єктів.*

5. Светличная Е.Е. Моделирование електричного поля в системах з тонкими провідними стрижнями за наявності об'ємного заряду / М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, Е.Е. Светличная, Е.В. Сосина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – №67 – С. 59–67.

*Здобувачем виконані розрахунки електричного поля в розглянутих системах.*

6. Светличная Е.Е. Комбінований розрахунок підсилення електричного поля в околі вершин тонких провідних стрижнів / М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, Е.Е. Светличная, Е.В. Сосина // Технічна електродинаміка. - 2015. - № 3. - С. 10-16.

*Здобувачем виконаний чисельний розрахунок посилення напруженості електричного поля на вершинах провідних стрижнів.*

7. Светличная Е.Е. Електричне поле в околі тонких провідних стрижнів великої довжини / М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, Е.Е. Светличная // Журнал технической физики. – М., 2015. - Т. 85, № 9. - С. 17-24.

*Здобувачем здійснена чисельна реалізація запропонованих методів розрахунку електричних полів.*

8. Светличная Е.Е. Математичне моделювання електричного поля в околі наземних об'єктів за умов грози / М.М.Резинкина, Е.Е.Светличная // Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 15-17 травня) – Харків : НТУ «ХП», 2013. – С. 82.

*Здобувачем виконано аналіз даних щодо розподілів електричного поля в околиці вершин лідерного каналу блискавки і блискавковідводу.*

9. Светличная Е.Е. Розрахунок електричного поля в околі блискавковідводу з урахуванням наявності об'ємного заряду / М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, Е.Е. Светличная, Е.В. Сосина // Тези доповідей 1-ой Науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України» (Харків, 12-13 грудня) – Харків: НТУ «ХП», 2014 – С. 132–133.

*Здобувачем виконано розрахунок електричного поля в околиці вершин лідерних каналу блискавки і блискавковідводу з врахуванням наявності об'ємного заряду.*

10. Светличная Е.Е. Вибір засобів блискавкозахисту протяжних об'єктів / Е.Е. Светличная // Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 15-17 травня) – Харків: НТУ «ХП», 2014 – С. 120.

11. Светличная Е.Е. Експериментальні дослідження процесів розряду в довгих повітряних проміжках з урахуванням наявності корони на вершинах заземлених стрижнів/ М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, Е.Е. Светличная, В.И Ревуцкий // Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 20-22 травня) – Харків : НТУ «ХП», 2015 – С. 130.

*Здобувачем запропонований план експериментальних досліджень процесів розряду в довгих повітряних проміжках.*

## АНОТАЦІЇ

**Світлична О.Є. Вибір параметрів ефективних засобів блискавкозахисту електроенергетичних об'єктів за допомогою моделювання електрофізичних процесів – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків 2016.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання вибору параметрів ефективних засобів блискавкозахисту електроенергетичних об'єктів за допомогою вдосконалених моделей електрофізичних процесів на фінальній стадії руху лідерного каналу блискавки до землі з урахуванням можливості появи зустрічного лідера від наземних об'єктів.

За допомогою фізичного та математичного моделювання електрофізичних процесів розвитку електричного пробою у системах з заземленими електродами, що мають загострені або округлені вершини, доведено, що наявність або відсутність корони, а також її інтенсивність, пропорційна току корони, не оказує впливу на імовірність поразки заземленого електрода високовольтним розрядом при рівнях прикладеної постійної напруги, що відповідають умовам грозової обстановки.

Запропоновано статистичну модель для визначення імовірності удару блискавки в електроенергетичні об'єкти з урахуванням їх висоти і габаритів, а також можливості розвитку від них зустрічної іскри. Ця модель заснована на використанні експериментальних даних щодо параметрів блискавок, а також процесів при пробіі довгих повітряних проміжків.

Наведено результати експериментальних досліджень кореляції між інтенсивністю коронування заземленого електрода (імітує блискавковідвід за умови грози) та імовірністю влучення в нього високовольтного імпульсного розряду (імітує удар блискавки).

*Ключові слова:* електроенергетичні об'єкти, захист, моделювання, блискавковідвід, лідерний канал блискавки, електричне поле.

**Светличная Е.Е. Выбор параметров эффективных средств молниезащиты электроэнергетических объектов с помощью моделирования электрофизических процессов – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков 2016.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи выбора параметров эффективных средств молниезащиты электроэнергетических объектов с помощью усовершенствованных моделей электрофизических процессов на финальной стадии продвижения лидерного

канала молнии к земле с учетом возможности появления встречного лидера от заземленных объектов.

В диссертации обоснована цель и актуальность проводимых исследований, проведен обзор известных из литературы экспериментальных данных о параметрах лидерного канала молнии при высоковольтном разряде. Проведен анализ существующих методов моделирования электромагнитных процессов при продвижении лидерного канала молнии к земле, а также методов расчета электрического поля в системах с тонкими длинными проводящими объектами типа разрядных каналов и проводящих стержней.

Предложена статистическая модель для определения вероятности удара молнии в электротехнические объекты с учетом их высоты и габаритов, а также возможности развития от них встречной искры, основанная на использовании имеющихся данных о параметрах молний и электрофизических процессах при пробое длинных воздушных промежутков.

Компьютерное моделирование процессов, сопровождающих продвижение лидерного канала молнии на последнем этапе перед "выбором" места удара заземленного объекта, позволило определить прогнозируемое число поражений молниеотводов и защищаемого нестандартного электротехнического объекта (цистерны с нефтепродуктами). При этом оценена степень влияния числа используемых молниеотводов на вероятность поражения защищаемого объекта, а также показано, что применение тросовых молниеотводов выбранной конфигурации позволяет практически исключить попадание молнии в рассмотренный объект в течение всего срока его эксплуатации.

Приведены результаты экспериментальных исследований корреляции между интенсивностью коронирования заземленного электрода (имитирует молниеотвод в условиях грозовой обстановки) и вероятностью попадания в него высоковольтного импульсного разряда (имитирует удар молнии).

Проведенное физическое и математическое моделирование процессов предпробойного коронирования вокруг скругленных и заостренных вершин заземленных электродов показало, что наличие или отсутствие короны, а также ее интенсивность, пропорциональная регистрируемому току короны, не оказывает влияния на вероятность поражения заземленного электрода высоковольтным разрядом, если уровень напряженности приложенного постоянного электрического поля ниже критического уровня, меньшего напряженности в условиях грозовой обстановки.

*Ключевые слова:* электроэнергетические объекты, защита, моделирование, молниеотвод, лидерный канал молнии, электрическое поле.

**Svetlichnaya E.E.** Selection of the parameters of effective means of lightning protection of electric power facilities by modeling of the electrical physical processes. - Manuscript.

Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.02 – electrical power stations, networks and systems. - National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov 2016.

The thesis is devoted to solution of modern scientific and technical problem of choosing of the parameters of effective means of lightning protection of electric power facilities using advanced models the electrical processes in the final stages of motion of leader channel of lightning to the ground with regard of the possibility of appearance of an ascending leader from grounded objects.

A statistical model for determination of the probability of lightning strokes at objects on the ground, taking into account their height and size, as well as probabilities of development of ascending sparks from them, based on the usage of experimental data on the parameters of lightning and the electrical physical processes at breakdown of long air gaps has been proposed.

The results of experimental studies of the correlation between the intensity of corona from earthed electrodes (simulate a lightning rod in a thunderstorm situation) and probability of being hit by a high-voltage impulse discharges (simulate lightning strike) have been presented.

*Keywords:* electric power facilities, defense, simulation, lightning, lightning leader channel, electric field.

