

УДК 621.315

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.20

## СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСУВАННЯ БЛИСКАВКИ В НАПРЯМКУ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ

**С. А. ЛИТВИНЕНКО**

кафедра теоретичних основ електротехніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА  
e-mail: svetlitvinenkoua@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Запропоновано огляд методів фізичного та математичного моделювання процесу просування лідера блискавки з метою порівняння ефективності їхнього застосування при обранні засобу блискавкозахисту наземного об'єкта: дослідження фізичних процесів з використанням тригерної блискавки, запущеної ракетою, моделювання з використанням електро-геометричних методів та фрактальних моделей, та ін. Докладно розглянуте статистичне моделювання, яке описує процес просування лідера блискавки на останній фазі в напрямку наземного об'єкта, з урахуванням стохастичного характеру просування лідера на попередньому етапі. За використання статистичного моделювання є можливим обчислення часу просування низхідного лідера блискавки з висоти, на якій відбувається орієнтування на об'єкт, з урахуванням можливості виникнення від об'єкту зустрічного лідера протилежної полярності. Обчислений масив часу просування каналу лідера від кожної точки грозової хмари використаний при обчисленні ймовірності прикріплення низхідного лідера до наземного об'єкта за використання критерію «найбільший час-найменша ймовірність». Моделювання виконується з використанням систематизованих експериментальних даних, отриманих при численних дослідженнях тих електрофізичних процесів, які визначають напрямок просування лідерного каналу блискавки та визначають момент та місце в просторі початку орієнтування лідера на об'єкт: розподіл напруженості електричного поля навколо верхівки лідера та у повітряному проміжку, струм зворотного удару, рівень потенціалу верхівки каналу лідера, зміна швидкості просування лідерного каналу та ін. Використання інформації про статистичний розподіл величин струмів та потенціалів дозволило обчислити ймовірність ураження кожної ділянки об'єкту, враховуючи також і бічні удари. Розрахунки показали можливість використання запропонованої методики для оцінки ефективності системи блискавкозахисту при проектуванні через порівняння ймовірності ураження наземного об'єкта та середньорічної кількості прогнозованих ударів для різних систем блискавкозахисту.

**Ключові слова:** статистичне моделювання; електрофізичні процеси; лідерний канал блискавки; блискавкозахист; ймовірність ураження блискавою; прогнозована кількість ударів

## STATISTICAL MODELING OF LIGHTNING PROPAGATION IN THE DIRECTION OF GROUND OBJECTS

**S. LYTVYVENKO**

Department of Theoretical Electrical Engineering, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** An overview of physical and mathematical modeling methods of lightning leader propagation process in order to compare the effectiveness of their application in the selection of ground object lightning protection is proposed: the study of physical processes using a trigger lightning, launched by a rocket, modeling using electro-geometric methods and fractal models. Detailed statistical modeling that describes the process of moving the lightning leader in the last phase toward the grounded object is considered in detail. The stochastic nature of the leader propagation in the previous stage was used. Using statistical modeling, it is possible to calculate the time of the downward lightning leader propagation from the height at which the leader is oriented to the object, taking into account the possibility of the opposite polarity upward leader emerging from the grounded object. The calculated time of the leader channel propagation from each point in the thunderstorm cloud was used to calculate the probability of attaching a downward leader to a grounded object using the "highest time-least probability" criterion. The performed simulation is using systematic experimental data obtained from numerous studies of those electrophysical processes that determine the direction of the lightning channel propagation and determine the moment and place in the space of the initial orientation of the leader to the object: the distribution of electric field strength around the top of the leader and in the air gap, return stroke current, the level of the leader channel top potential, change of the leader channel propagation speed, etc. The use of information on the statistical distribution of currents and potentials made it possible to calculate the predicted probability of damage to each section of the object, including side impacts. The calculations showed the possibility of using the proposed methodology to evaluate the effectiveness of a lightning protection system in designing by comparing the probability of hitting a ground object and the average annual number of projected impacts for different lightning protection systems.

**Keywords:** statistical modeling; electrophysical processes; lightning channel leader; lightning protection; lightning strokes probability; predicted number of strokes

### Вступ

Наближення низхідного лідера блискавки до землі призводить до збільшення напруженості електричного поля (ЕП) навколо заземлених об'єктів, що може спричинити виникнення висхідних лідерів та подальше прикріплення низхідного лідера до об'єкта.

З метою прогнозування місця ураження застосовується фізичне та математичне моделювання процесу просування лідерів блискавки в просторі між грозовою хмарою та землею.

Для дослідження фізичних процесів, які викликають появу та розвиток низхідних та зустрічних лідерів, проводиться фізичне моделювання розрядів в

великих проміжках в польових умовах. В [1] наведені результати експериментів із запуску блискавки, ініційованої ракетою, на лінії електропередачі з вимірюванням струму зворотного ходу для більш ніж 200 випадків зворотного удару. Зі статистичного аналізу отриманих даних зроблені висновки про зв'язок між величиною пікового струму зворотного ходу та перенесеним за першу 1 мс від початку зворотного ходу зарядом, також різний час наростання струму зворотного ходу для ударів по землі (0,4 мс) та в лінію електропередачі (1,2 мс) виявив зв'язок з електричними властивостями ураженого об'єкту. В [2] при дослідженні процесів прикріплення блискавки, запущеної ракетою, отримані виміри висоти початку зворотного ходу (23 м), початкової швидкості першого зворотного ходу  $1,4 \cdot 10^8$  м/с та початкової швидкості поширення низхідного лідера  $2,2 \cdot 10^7$  м/с. Результатом дослідження в [3] процесів розвитку двонаправленого лідера, приєднання низхідного лідера до землі є отримані за допомогою високошвидкісної камери виміри зміни швидкості просування лідерів обох полярностей, виміри розмірів лідерів на окремих стадіях (початковій та передпробійній). Надані криві зміни напруженості та швидкості просування лідерів в часі. Інформація, отримана з цих експериментів, може бути використана при аналізі процесу вибору місця можливого удару блискавки за різних конструкцій систем блискавкозахисту.

У вітчизняних та міжнародних стандартах з блискавкозахисту [4,5] для проектування систем захисту об'єктів від ураження блискавою використовують електро-геометричні методи, які дозволяють змоделювати процес поширення блискавки з урахуванням величини максимального значення струму зворотного удару та габаритів об'єкта захисту. Застосований підхід заснований на зв'язку між відстанню, з якої відбувається орієнтування блискавки на заземлений об'єкт, та формою та габаритами самого об'єкта. Цей метод не враховує фізичні процеси, які супроводжують просування лідера блискавки, отже є не достатньо точним з точки зору прогнозування місця удару та визначення ефективності системи блискавкозахисту. Електро-геометричний метод став основою для розробки методу сфер кочення [6,7]. За цим методом місце прикріплення низхідного ступінчастого лідера визначається критичною відстанню до заземленого об'єкта. Ця відстань обумовлена максимальним значенням струму зворотного удару та є радіусом уявної сфери, яка використовується для визначення захищених та незахищених зон об'єкта. Система блискавкозахисту проектується з урахуванням співвідношення між габаритами заземленого об'єкту та радіусом сфери. Але такі методи моделювання розвитку лідера є узагальненими та не враховують зміни таких фізичних параметрів, як потенціал верхівки низхідного лідера та швидкість поширення лідера, рівень напруженості ЕП в зоні поширення ступінчастого низхідного лідера. Це може призвести

до помилкових висновків з приводу відстані, на якій виконуються умови останнього стрибка, та ймовірного місця ураження об'єкту.

Розроблена в [8] фізична та математична моделі двостороннього лідера тригерної блискавки дозволила дослідити процес розвитку низхідного лідера від старту до моменту прикріплення до наземного об'єкту. Зафіксовано швидкість зміни рівня напруженості навколо заземленого об'єкта при наближенні низхідного лідера (від 30 кВ/м до 121 кВ/м). Процес виникнення та поширення зустрічного висхідного лідера від проводу довжиною 50 м супроводжувався збільшенням напруженості ЕП від 10 кВ/м до 45 кВ/м в момент прикріплення лідерів та імпульсами струму висхідного лідера шириною 20 мкс та з амплітудою, що збільшувалась до 200 А. Чисельне моделювання базувалось на представленні лідерів як заряджених осей, що просуваються в осьовому напрямку. Розподіл напруженості ЕП та потенціалів визначався з використанням методу моделювання зарядів (CSM). Рівень напруженості ЕП визначався як сума трьох компонентів: ЕП навколишнього середовища, ЕП двонаправленого лідера, обчисленого за спрощеною моделлю, локального ЕП, спричиненого каналом лідера та об'ємним зарядом зони корони. Такий спосіб моделювання процесу просування лідера в напрямку землі є надто спрощеним, бо не враховує стохастичний характер процесу просування та не дає можливості використання цього методу для визначення ймовірного місця удару блискавки.

Іншим підходом до моделювання лідерного каналу блискавки є використання фрактальної моделі [9]. В цій моделі враховано, що шлях блискавки до останнього етапу має стохастичний характер. Такі параметри як напрямок просування та ступінь розгалуженості лідера обумовлені зміною потенціалу його верхівки, їх визначають критична для просування лідера напруженість ЕП в повітряному проміжку, напруженість ЕП каналу лідера, його полярність, напруженість ЕП перед верхівкою лідерного каналу, відстань між верхівкою каналу та заземленим об'єктом. Умовою появи та розвитку висхідних лідерів від заземлених конструкцій при цьому є критична напруженість ЕП та фіксована критична відстань, виміри яких були проведені в експериментальних дослідженнях. Фрактальна модель дає змогу моделювати неповні розряди та відхилення каналів від ліній поля, що спричиняють бічні удари, прогнозувати кількість ударів, що залежить від струму блискавки, полярності лідера та геометричних параметрів об'єкта. У той же час модель не враховує інших важливих факторів розвитку блискавки, які впливають в тому числі і на вибір місця удару. Зокрема це швидкість зміни напруженості ЕП, час проходження відстані, яку долає лідер на останньому етапі просування до заземленого об'єкту.

Статистична модель [10] просування низхідного лідера розроблена з урахуванням можливості виникнення зустрічного висхідного лідера для

розрахунку ймовірності місця удару при подачі на високовольтний електрод позитивної та негативної напруги. З метою оцінки ефективності блискавководу стрижневого типу у [11] розроблена статистична модель просування лідера блискавки, в якій врахований стохастичний характер траєкторії просування лідера від початку і до моменту останнього удару. Модель описує завершальну стадію та визначає ймовірність ураження ділянок об'єкта. Використовуючи ймовірнісний розподіл величини струму зворотного ходу та враховуючи зміну швидкості просування лідера в останній стадії, що залежить від динаміки напруженості ЕП, яка призводить до зміни потенціалу лідера, був отриманий розподіл відносної ймовірності приєднання лідера до об'єкта. Розрахунок був виконаний в для різних рівнів потенціалу верхівки лідера (50 МВ та 3 МВ) з метою оцінки ефективності використання стрижневого блискавководу, розташованого на об'єкті захисту.

### Мета роботи

Метою роботи є удосконалення методів оцінки ефективності засобів блискавкозахисту шляхом створення статистичної математичної моделі просування низхідного лідера в напрямку землі та заземлених об'єктів на останньому етапі з урахуванням статистичного розподілу струмів зворотного удару та потенціалів.

### Основний матеріал

Потенціал верхівки лідера та висота, на якій відбувається орієнтування його на об'єкт, залежить від величини струму зворотного удару. Результати експериментів з вимірювання струму зворотного удару головної стадії в [4] систематизовані та представлені у вигляді розподілу ймовірності появи струму відповідної величини. Цей статистичний розподіл величин струмів зворотного удару блискавки та потенціалів верхівки лідера має бути врахований для прогнозування місця удару блискавки.

Прикріплення лідера до заземленого об'єкту відбувається за наявності в повітряному проміжку напруженості ЕП  $E$ , що перевищує критичне значення  $E_{cr}$ , за якого можливий розвиток лідера блискавки. Для негативних лідерів критичною є напруженість 1000 кВ/м, для позитивних – біля 500 кВ/м [12-14]. Зв'язок критичної напруженості з потенціалом верхівки лідера дає можливість визначити висоту, на якій відбувається орієнтація лідера на об'єкт:

$$l_0 = \frac{U_L}{E_{cr}}.$$

Опір каналу лідера  $Z$  прийнятий у розмірі 850 Ом [13]. Потенціал верхівки лідера може бути отриманий з виразу:

$$U_L \approx Z \cdot I_L,$$

Звідси

$$l_0 \sim 0,85 I_L.$$

Розрахункова система складається з двох областей: досліджувана поверхня землі  $S_G$  (площина 1 на рис. 1), поділена на  $N_G$  квадратних ділянок площею  $S_{Gm} = S_G/N_G = \Delta^2$ , та область грозової хмари, що має більшу площу  $S_T$  (область 2 на рис. 1), оскільки досліджувана ділянка землі може бути уражена блискавкою, ініційованою від значно ширшої області грозової хмари та за необхідності врахування всіх можливих місць утворення каналів низхідних лідерів для моделювання в тому числі і бічних ударів. При моделюванні ця область ділиться на  $N_T$  ділянок з площею  $S_{Tm} = S_T/N_T = \Delta^2$ . З метою спрощення моделювання прийнято, що ймовірність ураження розподілена елементарною площадкою  $S_{Gm}$  рівномірно.

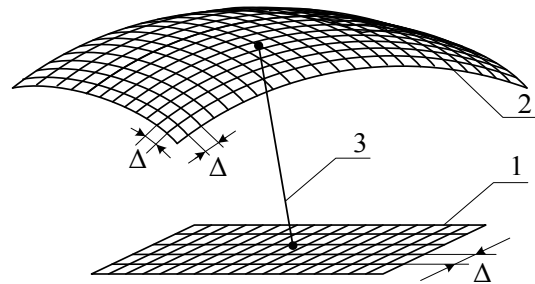


Рис. 1 – Розрахункова система поверхонь «Земля – грозова хмара»: 1 – досліджувана поверхня землі, 2 – область ймовірного старту орієнтованого лідера від хмари, 3 – канал лідера блискавки

При моделюванні також слід врахувати відхилення величини пробійної напруги від найбільш ймовірного значення для повітряних проміжків розміром від 2 м до 30 м. Це відхилення обумовлене відхиленням напруженості ЕП в стримерній та лідерній зонах, зміною швидкості їхнього просування, довжини стримерів та моменту утворення лідерів [13]. Для вищезазначеного діапазону величини проміжку відхилення пробійної напруги, отже і часу просування лідера на останньому етапі складає 6%–7%. В цій роботі відносне відхилення тривалості процесу розряду прийнято  $\alpha=0,07$ .

При моделюванні з усіх можливих комбінацій пробою від  $n$ -тої ділянки грозової хмари на  $m$ -ту ділянку земної поверхні під дією потенціалу верхівки каналу лідера  $U_k$  створений масив тривалості руху лідера на останній стадії  $\{t_{nm}^k\}$ . З цього масиву обирається найменше значення часу  $t_{nm \min}^k$ . Критерієм можливого ураження  $m$ -тої ділянки земної поверхні є виконання умови, що час руху до неї не перевищуватиме мінімальний час у  $1+\alpha$  разів. Ділянки поверхні землі, що відповідають цій умові, в розрахунку мають індекс  $p$ . В моделі застосований принцип «найменший час – найбільша ймовірність».

Таким чином, кожному з лідерів, які можуть уразити  $N_p$  ділянок на землі, відповідає різна

імовірність цієї події. Решта лідерів вважаються неспроможними до прикріплення, тобто імовірність ураження дорівнює нулю.

Час руху лідера на останньому етапі просування від  $m$ -тої ділянки грозової хмари до  $p$ -тої ділянки землі враховує можливий вплив висхідного лідера, що виникає від заземленого об'єкта:

$$t_{pn}^k = \frac{H_{pn} - h_l^k}{v_{0dl}^k} + \frac{h_l^k}{v_{dl}^k + v_{ul}^k},$$

де  $H_{pn}$  – відстань між  $p$ -тою ділянкою на землі та  $m$ -тою ділянкою на грозовій хмарі на початку руху каналу лідера;  $h_l^k$  – висота розташування верхівки лідера з потенціалом  $U_k$ , на момент його орієнтації на заземлений об'єкт;  $v_{0dl}^k$ ,  $v_{dl}^k$  – швидкість просування низхідного лідера відповідно перед та після початку останньої стадії пробую;  $v_{ul}^k$  – швидкість просування зустрічного лідера від заземленого об'єкта в напрямку низхідного лідера (у випадку відсутності умов для виникнення висхідного лідера ця швидкість дорівнює нулю).

Ймовірність ураження ділянки на землі зворотно пропорційна часу, який потрібен на подолання лідером відстані між нею та ділянкою грозової хмари:

$$P_{np}^k \sim \frac{1}{t_{np}^k},$$

де  $P_{np}^k$  – імовірність ураження  $p$ -тої ділянки на землі лідером блискавки з потенціалом  $k$ , що просувається від  $n$ -тої ділянки грозової хмари.

Ймовірність ураження ділянки на землі залежить від площі та кількості тих ділянок, які мають ненульову ймовірність ураження блискавкою. Для визначення цієї ймовірності необхідно обчислити коефіцієнти ймовірності ураження  $K$  для кожної ділянки з урахуванням того, що величина цього коефіцієнту варіюється в межах від 0 до 1.  $K = 1$  для тих ділянок, яким відповідає найменший час просування лідера  $t_{n \min}^k$ ,  $K = 0$  для ділянок, яким відповідає час, у  $1+\alpha$  разів більший за мінімальний, для решти випадків  $0 < K < 1$ . Для зручності запису використаємо позначення  $L = 1/t$ , мінімальний його рівень для тих лідерів, що задовольняють умові ураження, відповідатиме виразу  $L_{n \min}^k = \frac{1}{(1+\alpha) \cdot t_{n \min}^k}$ ,

а максимальний –  $L_{n \max}^k = \frac{1}{t_{n \min}^k}$ . Обчислені

коефіцієнти ймовірності ураження  $K$  для всіх ділянок, що можуть бути уражені, належать проміжку:

$$L_{n \min}^k < K_{pn}^k = \frac{L_{pn}^k - L_{n \min}^k}{L_{n \min}^k - L_{n \max}^k} < L_{n \max}^k.$$

Якщо при обчисленні отримано негативний результат ( $K_{pn}^k < 0$ ), приймається, що  $K_{pn}^k = 0$ .

Ймовірність кожного випадку ураження не може бути більшою за одиницю, отже при обчисленні вона має бути нормована сумою всіх коефіцієнтів  $K_{pn}^k$ :

$$P_{pn}^k = \frac{K_{pn}^k}{\sum_{p=1}^{N_p} K_{pn}^k}.$$

Така імовірність має бути обчислена для всіх  $Y$  можливих струмів  $I_k$  блискавки, що виникають з імовірністю  $P_k$ , згідно інформації, отриманої з узагальнення вимірів [5]. Для обчислення прогнозованої середньорічної кількості ударів у  $p$ -ту ділянку землі сума всіх ймовірностей  $P_{pn}^k$  має бути помножена на середньорічну кількість ударів блискавки на  $\text{км}^2$  в конкретному регіоні  $N_m$  та на площу ділянки землі  $\Delta^2$ :

$$N_p = 10^{-6} \cdot N_m \cdot \sum_{k=1}^Y \left( P_k \cdot \sum_{n=1}^{N_T} [P_{pn}^k \cdot \Delta^2] \right).$$

Запропонований метод обчислення ймовірності удару блискавки був застосований для споруди, розташованої на території високовольтної підстанції. Площа будівлі складає  $24 \times 60 \text{ м}^2$ , а висота – 24 м. Необхідність блискавкозахисту викликана наявністю в будівлі складного електронного обладнання систем контролю та зв'язку. З метою обрання найефективнішого виду блискавкозахисту було проведено обчислення прогнозованої відносної кількості ударів в кожну  $p$ -ту ділянку на досліджуваному об'єкті за формулою

$$P^* = \frac{N_p}{S},$$

де  $S$  – площа об'єкту в  $\text{м}^2$ ,  $N_p$  – прогнозована середньорічна кількість ударів у  $p$ -ту ділянку землі.

### Обговорення результатів

При розрахунку, докладно наведеному в [15], виконаному для будівлі за відсутності блискавкозахисту, отримані значні величини прогнозованої відносної кількості ударів ( $P^* = 10^{-5}$ ) з істотним збільшенням в області кутів споруди ( $P^* = 4 \cdot 10^{-5}$ ). За використання стрижневого блискавкопримача висотою від поверхні землі 56 м, розташованого посередині даху будівлі, ця величина значно зменшилась по всій площі будівлі, але в зоні блискавкопримача суттєво збільшилась до рівня порядку  $P^* = 60 \cdot 10^{-5}$ . В даній роботі використана ідеалізована картина, в якій не враховано викривлення поля через наявність будівлі. На результати розрахунків не вплинула зміна висоти

блискавкоприймача від 56 м до 86 м (висота відносно рівня землі). За використання тросової системи блискавкозахисту, розташованої на висоті 34 м та на відстані 4 м від будівлі, прогнозована відносна кількість ударів в будівлю дорівнює 0, всі прогнозовані удари зосереджені на тросовій системі ( $P^* = 30 \cdot 10^{-5}$ ).

Для порівняння ефективності засобів блискавкозахисту об'єкта для кожного випадку також було обчислено середньорічну кількість ударів як в об'єкт, так і в систему блискавкозахисту та ділянки землі навколо будівлі:

$$N_b = \sum_v N_v,$$

де  $v$  відповідає кількості ділянок з урахуванням тих, що безпосередньо прилягають до будівлі.

Результати розрахунку ймовірних місць ударів високовольтними розрядами при наявності та відсутності висхідних лідерів із наземних об'єктів порівняно з експериментальними даними фізичного моделювання в системі високовольтний електрод - заземлені стрижні 1, 2 та заземлена площина [13]. При подачі напруги на високовольтний електрод висхідні лідери утворюються від вищого стрижня 1 (стрижень, що імітує блискавквідвід), уразили  $N_1 \approx 85\%$  усіх розрядів, жодні розряди не уразили менший стрижень 2, який імітує об'єкт ( $N_2 = 0$ ), а  $N_3 \approx 15\%$  розрядів вражають заземлену площину [13]. Математичне моделювання за допомогою описаного методу дало такі результати:  $N_1 \approx 84\%$ ,  $N_2 = 0$  та  $N_3 \approx 16\%$ . Таким чином, збіг експериментальних та розрахованих даних є прийнятним для опису статистичних процесів. Відносні відмінності – менше 17%.

### Висновки

Дослідження процесу просування блискавки може бути виконане шляхом фізичного та математичного моделювання. Параметри штучної блискавки, отриманої при фізичному моделюванні через запуск ракет з електропровідним тросом, значно відрізняються від параметрів природних блискавок. Тож такий підхід не дозволяє дослідити процеси обрання місця прикріплення низхідних лідерів. На даний момент математичне моделювання процесів є прийнятним шляхом дослідження природної блискавки. Статистичне моделювання дає можливість враховувати геометричні параметри об'єкта та електрофізичні процеси при просуванні низхідного лідера. Воно показало свою ефективність при прогнозуванні місця удару блискавки в наземний об'єкт. Відхилення в порівнянні з отриманими експериментальними даними складає 17%.

### Список літератури

1. Schoene J., Uman M. A., Rakov V. A., Rambo K. J., Jerauld J., Mata C. T., Mata A. G., Jordan D. M., and Schnetzer G. H. Characterization of return-stroke currents in rocket-triggered lightning, *Journal of geophysical research*. 2009. vol. 114, D03106. doi:10.1029/2008JD009873.

2. Wang D., Gamerota W. R., Uman M. A., Takagi N., Hill J. D., Pilkey J., Ngin T., Jordan D. M., Mallick S., Rakov V. A. Lightning attachment processes of an "anomalous" triggered lightning discharge. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. vol. 119, P. 1524–1533. doi:10.1002/2013JD020787.
3. Tran M. D., and Rakov V. A. Initiation and propagation of cloud-to-ground lightning observed with a high-speed video camera. *Sci. Rep.* 2016. vol. 6, P. 39521. doi: 10.1038/srep39521.
4. ДСТУ EN 62305:2012 Блискавкозахист (IEC 62305:2011, IDT). Київ, Держстандарт України, 2012, 419 с.
5. IEC 62305-3. International standard "Protection against lightning – Part 3: Physical damage and life hazard", Geneva: IEC, 2010. 160 p.
6. Arevalo L., Cooray V. The mesh method' in lightning protection standards – Revisited. *Journal of Electrostatics*. 2010. Vol. 68, P. 311-314. doi 10.1016/j.elstat.2010.03.003.
7. D'Alessandro F., Gumley J. R. A "Collection Volume Method" for the placement of air terminals for the protection of structures against lightning. *Journal of Electrostatics*. 2001. vol. 50, Issue 4, P. 279-302
8. Lalande P., Bondiou-Clergerie A., Laroche P., Bacchiega G. L., Bonamy A., Gallimberti I., Eybert-Berard A., Berlandis J. P., Bador B. Modelling of the lightning connection process to a ground structure. *Int. Conf. on Lightning Protection Florence (Italy)*. 23-27 sept. 1996.
9. Petrov N. I., Petrova G. N., D'Alessandro F. Quantification of the probability of lightning strikes to structures using a fractal approach. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*. 2003. Vol. 10, P. 641 - 654. doi: 10.1109/TDEI.2003.1219649.
10. Резинкина М. М., Князев В. В., Кравченко В. И. Статистическая модель процесса ориентировки лидера молнии на наземные объекты. *Журнал технической физики*. 2005. Т. 75, вып. 9. С. 44-51.
11. Сокол Е. И., Резинкина М. М., Резинкин О. Л., Гриб О. Г., Светличная Е. Е. Статистическая модель для определения вероятности поражения молнией наземных объектов. *Техн. электродинамика*. 2016. № 2. С. 11-18.
12. Cooray V. *Lightning Protection*. London: The Institution of Engineering and Technology. 2010. 1036 p.
13. Bazelyan E. M., Yu. P. Raizer. *Lightning physics and lightning protection*. Bristol: Institute of Physics. 2000. 325 p.
14. Uman M. A. *The Art and Science of Lightning Protection*. New York: Cambridge University Press, 2008. 240 p.
15. Rezinkina M., Rezinkin O. and Lytvynenko S. Simulation of Electrical Physical Processes in Electro-Energetic Systems at Thunderstorm Conditions. *Telecommunications and Computer Engineering (TCSET): Proceedings of the 15th International Conference, (25–29 February 2020, Lviv-Slavske, Ukraine)*. IEEE, 2020. P. 106-108.

### References (transliterated)

1. Schoene J., Uman M. A., Rakov V. A., Rambo K. J., Jerauld J., Mata C. T., Mata A. G., Jordan D. M., and Schnetzer G. H. Characterization of return-stroke currents in rocket-triggered lightning. *Journal of geophysical research*, 2009. vol. 114, D03106, doi:10.1029/2008JD009873.
2. Wang D., Gamerota W. R., Uman M. A., Takagi N., Hill J. D., Pilkey J., Ngin T., Jordan D. M., Mallick S., Rakov V. A. Lightning attachment processes of an "anomalous" triggered lightning discharge. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2014, vol. 119, pp. 1524–1533, doi:10.1002/2013JD020787.
3. Tran M. D., and Rakov V. A. Initiation and propagation of cloud-to-ground lightning observed with a high-speed video

- camera. *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, 39521, doi: 10.1038/srep39521.
4. DSTU EN 62305:2012 "Blyskavkozakhyt" (IEC 62305:2011, IDT) Kyiv, Derzhstandart Ukrainy, 2012, 419 p.
  5. IEC 62305-3. International standard "Protection against lightning – Part 3: Physical damage and life hazard", Geneva: IEC, 2010. 160 p.
  6. Arevalo L., Cooray V. The mesh method' in lightning protection standards – Revisited. *Journal of Electrostatics*, 2010, vol. 68, pp.311-314, doi 10.1016/j.elstat.2010.03.003
  7. D'Alessandro F., Gumley J.R., A "Collection Volume Method" for the placement of air terminals for the protection of structures against lightning, *Journal of Electrostatics*, 2001, vol. 50, Issue 4, pp. 279-302
  8. Lalande P., Bondiou-Clergerie A., Laroche P., Bacchiega G. L., Bonamy A., Gallimberti I., Eybert-Berard A., Berlandis J. P., Bador B. Modelling of the lightning connection process to a ground structure. *Int. Conf. on Lightning Protection Florence (Italy)*, 23-27 sept. 1996.
  9. Petrov N. I., Petrova G. N., D'Alessandro F. Quantification of the probability of lightning strikes to structures using a fractal approach. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on.* 2003, vol. 10, pp. 641 – 654, doi 10.1109/TDEI.2003.1219649.
  10. Rezinkina M. M., Knjazev V. V., Kravchenko V. I. Statisticheskaja model' processa orientirovki lidera molnii na nazemnye ob'ekty. *Zhurnal tehnichejskoj fiziki*, 2005, Vol. 75, vyp. 9, pp. 44-51.
  11. Sokol E. I., Rezinkina M. M., Rezinin O. L., Grib O. G., Svetlichnaja E. E. Statisticheskaja model' dlja opredelenija verojatnosti porazhenija molniej nazemnyh ob'ektov. *Tehn. elektrodinamika*. 2016, № 2, pp. 11-18.
  12. Cooray V. *Lightning Protection*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010, 1036 p.
  13. Bazelyan E. M., Raizer Yu. P. *Lightning physics and lightning protection*. Bristol: Institute of Physics, 2000, 325 p.
  14. Uman M. A. *The Art and Science of Lightning Protection*. New York: Cambridge University Press, 2008, 240 p.
  15. Rezinkina M., Rezinin O. and Lytvynenko S. Simulation of Electrical Physical Processes in Electro-Energetic Systems at Thunderstorm Conditions, *Telecommunications and Computer Engineering (TCSET): Proceedings of the 15th International Conference (Lviv-Slavske, Ukraine, 25–29 February 2020)*. IEEE, 2020, pp. 106-108.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Литвиненко Світлана Анатоліївна** – аспірант кафедри «Теоретичні основи електротехніки», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0818-2470; e-mail: svetlitvinkoua@gmail.com.

**Svitlana Lytvynenko** – postgraduate of the Theoretical Electrical Technique Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0003-0818-2470; e-mail: svetlitvinkoua@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю таким чином:*

Литвиненко С. А. Статистичне моделювання просування блискавки в напрямку наземних об'єктів. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія Нові рішення в сучасних технологіях.* - Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2(4). С.152-157. doi:10/209998/2413-4295.2020.02.20.

*Please cite this article as:*

Lytvynenko S. Statistical modeling of lightning propagation in the direction of ground objects. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 152-157. doi:10/209998/2413-4295.2020.02.20.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Литвиненко С. А. Статистическое моделирование продвижения молнии в направлении наземных объектов. *Вестник НТУ «ХПИ», Серія Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 152-157. doi:10/209998/2413-4295.2020.02.20.

**АННОТАЦІЯ** Представлен обзор методов физического и математического моделирования процесса продвижения лидера молнии с целью сравнения эффективности их применения при выборе средств молниезащиты наземного объекта: исследование физических процессов с применением триггерной молнии, запущенной с помощью ракеты, моделирование с использованием электро-геометрических методов и фрактальных моделей и пр. Подробно рассмотрено статистическое моделирование, которое описывает процесс продвижения лидера молнии на последней фазе в направлении наземного объекта, с учетом стохастического характера продвижения лидера на предыдущем этапе. Использование статистического моделирования дает возможность вычислить время продвижения нисходящего лидера молнии с высоты, на которой происходит ориентировка на объект, с учетом возможности возникновения от объекта встречного лидера противоположной полярности. Вычисленный массив времени продвижения канала лидера от каждой точки грозового облака используется при расчетах вероятности прикрепления нисходящего лидера к наземному объекту с применением критерия «наибольшее время - наименьшая вероятность». Моделирование выполняется с использованием систематизированных экспериментальных данных, полученных при многочисленных исследованиях тех электрофизических процессов, которые определяют направление продвижения лидерного канала молнии и определяют момент и место в пространстве начала ориентации лидера на объект: распределение напряженности электрического поля вокруг вершины лидера и в воздушном промежутке, ток обратного хода, уровень потенциала вершины канала лидера, изменение скорости продвижения лидерного канала и т.д.. Использование информации о статистическом распределении величин токов и потенциалов позволило рассчитать вероятность поражения каждого участка объекта, учитывая также и боковые удары. Расчеты показали возможность использования предложенной методики для оценки эффективности системы молниезащиты при проектировании посредством сравнения вероятности поражения наземного объекта и среднегодового количества прогнозируемых ударов для различных систем молниезащиты.

**Ключевые слова:** статистическое моделирование; электрофизические процессы; лидерный канал молнии; молниезащита; вероятность поражения молнией; прогнозируемое количество ударов

Надійшла (received) 18.05.2020