

В.В. Князєв

## Визначення ймовірності удару блискавки в елементи об'єкта з урахуванням статистичного розподілу сили струму

В роботі розглянуто застосування методу «сфери що котиться» до об'єктів інфраструктури у вигляді території, яка включає будівлі та споруди довільної форми. Запропоновано алгоритм урахування статистичного розподілу ймовірності сили струму блискавки для визначення ймовірності влучення блискавки у елементи об'єкту. Визначено, що не урахування цього аспекту у сучасних нормативних документах, призводить до суттєвих помилок. Такий підхід надасть можливість оптимізувати схему розміщення блискавкоприймачів під час відновлення об'єктів з урахуванням зеленої реконструкції. Бібл. 21, табл. 2, рис. 1.

**Ключові слова:** блискавкозахист, оцінка ризику, RSM – метод сфери що котиться, об'єкт довільної форми, розподіл ймовірності сили струму блискавки, площа стягування.

**Постановка проблеми.** Широке застосування на виробництві та побуті різних технічних засобів, оснащених електронними елементами контролю, прийняття рішень та управління, зумовлює більш ретельно підходити до визначення необхідності оснащення об'єктів системами захисту (Lightning Protection System – LPS) від негативних наслідків ударів блискавки. Такі системи повинні забезпечувати задану ймовірність перехоплення блискавки та зниження рівнів напруги та струму, що виникають у гальванічних зв'язках об'єкта, внаслідок удару блискавки. Міжнародні стандарти ІЕС серії 62305 [1-3] вимагають здійснення такої оцінки, але запропоновані в них методи, основані на визначенні зон захисту, не дозволяють вирішити проблему повною мірою. У цих стандартах наведено зони лише для обмеженої групи блискавкоприймачів, та не враховується розподіл ймовірності сили струму блискавки, наявність інших будівель і споруд, які знаходяться поряд. Регламентований метод «сфери що котиться» (Rolling Sphere Method – RSM) потенційно може бути використане для уточнення розрахункової оцінки ймовірності влучення блискавки в елементи об'єкту.

**Аналіз останніх досліджень й публікацій.** Сучасний підхід визначення вимог до LPS будівель та споруд регламентується міжнародними стандартами [1-3]. Стандарт [2] визначає алгоритм оцінки величини ризику, внаслідок можливого удару блискавки у будівлю чи споруду тощо (далі – об'єкт). Ризик  $R$ , визначений як ймовірна середня щорічна втрата на об'єкті через спалахи блискавки, залежить від [2]:

- щорічного числа спалахів блискавок, які мають дію на об'єкт;
- ймовірності пошкодження від дії однієї з цих блискавок;
- середньої кількості непрямих втрат.

За результатами оцінки ризику приймається рішення про необхідність улаштування системи LPS та вимоги до її рівня захисту. Доземні спалахи блискавки, що діють на об'єкт, може бути розділено на:

- спалахи, що влучили у об'єкт;
- спалахи, що влучили поблизу об'єкту, безпосередньо до лінії електричного живлення, телекомунікаційної лінії, або поблизу ліній.

Число блискавок, що впливають на об'єкт, залежить від густини доземних спалахів блискавки у регіоні, де знаходяться об'єкт. У пункті 4.1.1 [2] визначено що зворотній струм блискавки є першоджерелом пошкодження. Серед факторів, які впливають на компоненти

ризика є кількість небезпечних подій [2]. Середнє річне число небезпечних подій  $N$ , які діють на об'єкт внаслідок спалахів блискавки, залежить від грозової активності у регіоні, де розташовано об'єкт, та від його геометричних та фізичних характеристик. Для розрахунку значення  $N$ , зазвичай множать густину доземних спалахів блискавки  $N_G$  на еквівалентну площу збирання будівлі (споруди), беручи до уваги корегуючі коефіцієнти.

Густина доземних спалахів блискавки  $N_G$  – це число спалахів блискавки на  $1 \text{ км}^2$  протягом року. Ця величина зазвичай є доступною від мереж локації блискавок та щорічно коригується. За відсутності даних щодо значень  $N_G$ , для середніх широт північної півкулі Землі цей показник може бути оцінено як [2]:

$$N_G \approx 0,1 T_D, \quad (1)$$

де  $T_D$  – число грозових днів протягом року (який можна отримати з ізокераунічних мап).

Слід вказати, що у наш час існують більш точні методи визначення  $N_G$ , тому використання грозових днів пропонується [4] змінити на:

$$N_G = 0,25 \cdot N_t,$$

де  $N_t$  – загальна густина оптично виявлених спалахів на  $\text{км}^2$  протягом року, отримана з [5].

Стандарт [3] регламентує можливість застосування методу RSM для побудови зон захисту LPS. Радіус сфери залежить від класу споруди. Зрозуміло, що для класу I потрібен найвищий рівень захисту, тому радіус сфери визначено найменшим (дорівнює 20 м). Приклади застосування такого підходу представлено у [6-11]. Відмічено, що розраховані зони відрізняються від зон, які визначено за методом захисного кута. Це протиріччя вимагає надати оцінку який метод є більш коректним. Внаслідок багаторічної дискусії визначено можливість застосовувати обидва методи, а вибір здійснює проектувальник. Так сталося тому, що доказів безумовної достовірності не має жоден з цих методів. Зони захисту за методом захисного кута не можуть бути обґрунтовані лабораторними експериментами, результати яких неоднозначні. Встановлено, що результати модельних випробувань сильно залежать від довжини іскрового розряду, що використовується, від полярності імпульсної напруги і його часових параметрів. Крім того, захисні властивості зони не підтверджуються досвідом експлуатації блискавковододів різної висоти.

Метод RSM має суттєві переваги тому, що дозволяє розрахувати зони для об'єктів довільної форми, врахувати колективну дію блискавкоприймачів, у тому числі природних. Розрахунки підтверджують більш

високу ефективність системи блискавкоприймачів у порівнянні з поодиноким, внаслідок зменшення площі стягування. Однак, метод у стандартизованому виді не враховує наявність зустрічних лідерів від елементів об'єкту. Які безумовно впливають на місце влучення блискавки, але також мають стохастичну природу. Спроби врахування зустрічних лідерів представлено у [12, 13]. Отримані результати мають певну цінність щодо розвитку методів, але поки не знайшли відображення у стандартах. Тому, вплив зустрічних лідерів не може бути враховане проєктантами LPS.

Слід додатково відмітити, що метод RSM дозволяє враховувати будь який радіус сфери, який визначається силою зворотного струму блискавки. Саме цей нюанс використане у роботі, про що наведено далі. Для однозначного розуміння змісту роботи, обговоримо низку важливих моментів.

До висоти орієнтування  $H_{at}$  траєкторії блискавок не детерміновані та їх голівки з рівномірною щільністю заповнюють площину орієнтування. Далі все залежить від стану земної поверхні. З найбільшою ймовірністю блискавка піде далі вниз по найкоротшій відстані, але навіть у лабораторних проміжках чітко фіксується розкид траєкторій довгої іскри та розкид пробивної напруги. Канали блискавок, що прямують до блискавководу та до незбуреної поверхні землі, як правило, віддалені на відстані в десятки метрів і більше. Тому, взаємний вплив їх електричних полів один на одного незначний, і розвиток кожного з каналів слід вважати незалежним від інших. Для таких процесів добре розвинена теорія ймовірності. За її законами, ймовірність пробою одного з двох розрядних проміжків – до блискавководу та до поверхні землі, крім геометричних розмірів, визначається єдиним параметром – стандартом розкиду пробивної напруги  $\sigma$ , що є стандартом орієнтування, він мало змінюється з довжиною багатометрового проміжку і тому може бути запозичений з лабораторних вимірювань, де його відносна величина близька до 0,1. Зрозуміло, що наявність стандарту орієнтування обумовлює відомий факт удару блискавки у бокові поверхні будівель та споруд. Цей аспект не враховує стандартизований метод RSM. Але, що ймовірність не потрібне враховувати для споруд за висоти менш ніж 60 м [3].

Для проєктування системи блискавкозахисту, серед інших характеристик, важливо оцінити очікувану кількість ударів  $N_s$  за певний період (зазвичай 1 рік) у територію об'єкту та визначити ймовірнісні статистичні розподіли ударів блискавки у його елементи. Зрозуміло, що кількість ударів залежить від  $N_G$  та площі стягування  $S_{at}$ . Для ізольованих будівель (споруд) на рівнинній місцевості  $S_{at}$  є площею, що визначається перетином між поверхнею землі та прямою під нахилом  $1/3$ , яка є дотичною до найвищих точок будівлі (споруди) та яка обертається навколо них [2]. Визначення розміру  $S_{at}$  може бути виконано графічно або математично. Для математичного визначення  $S_{at}$  у стандарті [2, формула А.2] наведено емпіричну формулу (2) для ізольованої прямокутної споруди з довжиною  $L$ , шириною  $W$  і висотою  $H$ , розташованій на рівнинній місцевості:

$$S_{at} = L \cdot W + 6 \cdot H \cdot (L + W) + 9 \cdot \pi \cdot H^2. \quad (2)$$

Використання формули (2) для реальних об'єктів критичної інфраструктури є складним та не достатньо

достовірним. Метод RSM базується на застосуванні відстані удару блискавки ( $R$ ) до конструкції або до землі, які пов'язані з максимальним значенням сили струму зворотного ходу ( $I$ ). Залежність значення  $R$  від сили струму визначається низкою формул, отриманих різними авторами для різних варіантів полярності струму та форми споруди на підставі експериментальних спостережень. Порівняння таких формул наведено у [14]. Доцільне на цей час застосовувати формулу (3) наведену у стандарті [1]:

$$R = 10 \cdot I^{0.65}, \quad (3)$$

де  $R$  – відстань удару блискавки, м;  $I$  – максимальне значення сили струму блискавки, кА.

Важливим фактором, що впливає на результати оцінок, є розподіл ймовірності максимальної сили струму блискавки у зоні розміщення об'єкту. Варіанти статистичних розподілів сили струму диференціюються залежно від висоти конструкцій, для позитивної чи негативної полярності блискавки, що отримані на опорах та лініях електропередачі або дистанційними методами в мережах виявлення блискавки. Це слід враховувати при використанні статистичних розподілів. На цей час доцільне використовувати залежності, які узагальнено у стандарті [1] та технічному звіті CIGRE [15]. Слід розуміти, що дослідження щодо уточнення залежності продовжуються [16]. Але, зміна залежності не вплине на можливість застосування підходу, що пропонується. Застосування концепції методу RSM дозволяє оцінити ймовірність влучення блискавки у елементи об'єкту для будь якої заданої сили струму блискавки. У [14] наведено результати розрахунку для 5 форм споруд (циліндр, паралелепіпед, ангар у формі частини циліндричної поверхні, круглі та прямокутні будинки з внутрішнім відверненням) та трьох рівнів ймовірності сили струму (0,5 %, 50 % та 95 %). Результати показують, що кількість блискавок розрахованих за методом RSM помітно відрізняються від оцінки за стандартним підходом [2], через використання площі стягування.

Врахування розподілу ймовірності сили струму блискавки у заданому діапазоні струмів, з довільною кількістю інтервалів запропоноване у [17-19].

**Мета роботи** – обґрунтування доцільності врахування статистичного розподілу сили струму блискавки при визначенні ймовірності влучення блискавки в елементи об'єкта, та ефективності застосування вдосконаленого методу «сфери що котиться».

**Методи дослідження:** метод математичного моделювання, на основі RSM з додатковим урахуванням розподілу ймовірності сили струму блискавки.

**Математична модель процесу.** Досліджуваний об'єкт є територія, де довільно розміщені елементи об'єкта (будівлі та споруди). З деяким кроком на поверхні землі задається сітка. Якщо по осі  $X$  вузли сітки індексувати значенням  $i$ , а осі  $Y$  – значенням  $j$ , то довільний вузол сітки позначається як  $(i, j)$ . Фактично, вузли сітки визначають координати проєкції точки, з якої блискавка орієнтується на об'єкт, на горизонтальну площину. Щільність вузлів сітки слід задавати з урахуванням розмірів елементів об'єкту. Для кожного вузла сітки визначається максимальна висота, при якій «сфера, що котиться» торкається до поверхні будь-якої будови. Зрозуміло, що для поверхні землі висота дорівнює нулю. Як-

що таких точок декілька (позначимо їх кількість як  $k$ ), то, вважаючи, що з даного центру «сфери, що котиться» вони будуть уражатися з однаковою ймовірністю, робиться висновок, що кількість поразок блискавкою будь-якої з цих точок буде в  $k$  разів менше.

Процес орієнтування блискавки вважається розпочатим, коли радіус  $R$  (пробивна відстань) досягає поверхні елементу об'єкта. Таким чином, відстань орієнтування кожної блискавки залежить від сили струму блискавки. Цей аспект суттєво впливає на визначення ймовірної площі стягування, та як наслідок, ймовірної кількості ударів блискавки у об'єкт на протязі року. Запропонована модель процесу обумовлює важливі висновки:

- площа стягування визначається максимальною силою струму з діапазону, що враховується;
- ймовірність оминати систему блискавкоприймачів мають блискавки з мінімальною силою струму.

Очевидно, що такі властивості не враховуються за використання формули (2), та визначені зон захисту методом кута. Задання геометричних параметрів елементів об'єкта доцільно задавати безпосередньо у спеціалізованій програмі для ПК без застосування додаткових елементів САД програм. За використання генерального плану об'єкту, визначається оптимальний шаг сітки. Досвід досліджень [17-19] свідчить про те, що довільні конструкції можуть бути адекватно задані за використання комбінації вертикальних дротів та тросів (горизонтальних або похилих). Відстань між такими елементами конструкції має узгоджуватися з кроком сітки, та бути менш ніж мінімальний радіус  $R$  діапазону струмів, що розглядається.

Точки об'єкта – точки фрагментів споруд і вузлові точки землі на території об'єкта для яких в процесі роботи програми визначаються статистичні характеристики їх ураження блискавкою із заданим рівнем зворотного струму. Пробивна відстань визначається за заданим значенням сили струму блискавки формулою (3). Реалізацію розрахункового алгоритму у виді двох спеціалізованих програм [20, 21] для персонального комп'ютера виконав доцент НТУ «ХПІ» В.М. Дронов. Програми [20, 21] передбачають, що закон розподілу струму блискавки описується залежністю за якої ймовірність  $P$  того, що пікове значення струму блискавки перевищить значення  $I$ , визначається відповідно до формули (4) [1]:

$$P(I) = \frac{1}{1 + (I/a)^b}, \quad (4)$$

де  $P$  – ймовірність ( $0 \leq P \leq 1$ );  $I$  – граничне значення струму блискавки, кА;  $a$  і  $b$  – невід'ємні параметри, мають відповідно до [1] значення:  $a = 31$  кА,  $b = 2.6$ .

Значення параметрів  $a$  і  $b$  можуть мати такі як зазначені вище за замовчуванням, так і інші значення за бажанням користувача програми.

**Результати розрахункової оцінки.** В якості прикладу розглянемо результати застосування програми [20] для оцінки прогнозованої кількості влучень блискавки у конструкцію Нового Безпечного Конфайнменту (НБК) 4 енергоблоку Чорнобильської АЕС. НБК має форму частини циліндричної поверхні. Для оцінки кількості очікуваних розрядів блискавок у споруду НБК прийняти такі розміри НБК: ширина 256 м, довжина 163 м, висота 110 м. Щільність розрядів блискавки у районі ЧАЕС

прийняте  $N_G = 4,69$  розрядів на  $1 \text{ км}^2$  на рік. Конструкція НБК змодельована 75-ма горизонтальними тросами розташованими вздовж довжини з вертикальними спусками, у тому числі:

- середній (по гребню);
- правий та лівий на ґрунті;
- проміжні з кроком 3,4 м вздовж ширини.

Розглянуто діапазон сили струму блискавки (2–200) кА. Відповідно до [1, табл. А.3] ймовірність того, що сила струму блискавки вийде за межі зазначеного діапазону – не більше 2 %. Результати розрахунків представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахункової оцінки

Діапазон струму, кА	Ймовірність удару в НБК	Кількість ударів за рік	Крок сітки, м
2 – 200	0,2478	1,162	2,5
2 – 200	0,2481	1,164	0,31

**Примітка:** Розрахунки проведені для двох варіантів кроку розрахункової сітки, що відрізняються між собою у 8 разів. Результати обох випадків відрізняються менш ніж на 0,2 %.

Програма [20], крім інтегрального значення, дозволяє визначити розподіл ймовірності ударів блискавки за окремими елементами. В якості прикладу на рис. 1 наведено скріншот розподілу ймовірності по землі навколо НБК. Така інформація також корисна з міркувань раціонального розміщення додаткового обладнання АЕС.

Слід зазначити, що визначення відносної ймовірності удару здійснюється по кожному об'єкту окремо (у цьому випадку це НБК і земля). Тому максимальні значення (відзначені червоним – 1) знаходяться як на укритті, так на землі віддалі від укриття. З наближенням до НБК ймовірність зменшується, тому що частина блискавок з великою силою струму орієнтується на НБК.

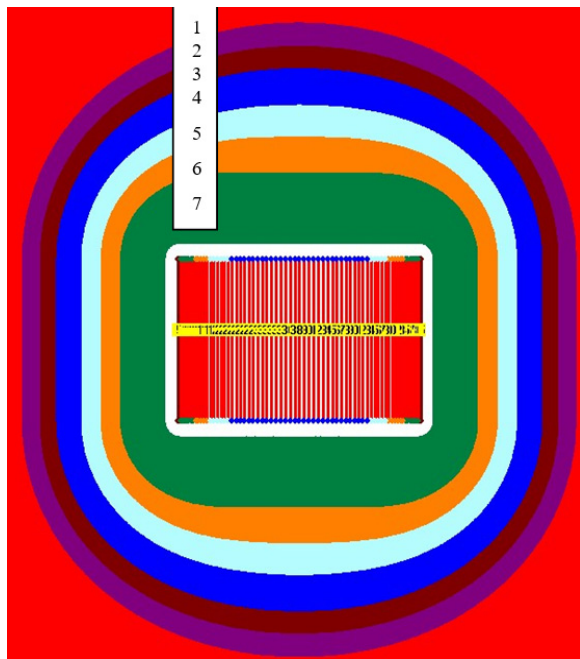
За результатами розрахункової оцінки визначено, що прогнозована кількість розрядів блискавки в конструкцію НБК складає 1,16 на рік. Отже, за 100 років експлуатації кількість ударів блискавки у НБК становитиме 116. Похибка оцінки в межах 3 %.

Порівняємо з результатами розрахунку за стандартизованою [2] методикою. Площа стягування визначається за (2). Після підстановки параметрів НБК отримане значення  $S_{at} = 0,66 \text{ км}^2$  на рік. З урахуванням середньої щільності  $N_G = 4,69$  розрядів/(рік·км<sup>2</sup>), кількість ударів блискавки в НБК оцінюється значенням 3,095 на рік. Отже, протягом 100 років може статися 310 ударів блискавки, що у 2,67 рази більше від кількості ударів, розрахованих за уточненою методикою.

Причини відмінності обумовлюються такими обставинами:

- стандартизована методика не враховує реальну форму НБК, відмінну від паралелепіпеда;
- стандартизована методика не враховує статистичного розподілу сили струму блискавки;
- стандартизована методика ґрунтується на результатах експериментальних досліджень, отриманих в основному для об'єктів типу щогла або стрижень.

Слід зазначити, що наявність суттєвої різниці між результатами оцінки кількості ударів блискавки в НБК за стандартизованою методикою та методикою, що враховує статистичний розподіл, зазначено також у [14].



Відповідність кольору діапазону ймовірності  $P$  відносно максимального рівня:

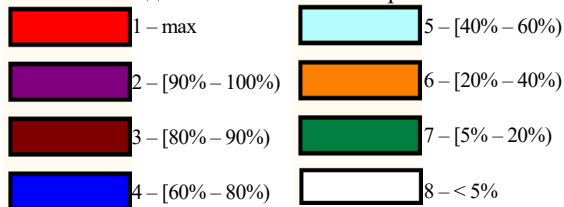


Рис. 1. Розподіл ймовірності влучення блискавки по землі навколо НБК

Розглянемо особливості розрахункової моделі програми [21] для визначення площі стягування. З метою спрощення та наочності, в якості моделі розглянемо найбільш поширений варіант блискавкоприймача – щоглу висотою  $h$ . У програмі враховане, що для щогли  $h$  і струму блискавки, якому відповідає радіус пробую блискавки  $r$ , радіус зони стягування  $R_{at}$  визначається як:

$$R_{at} = r, \quad r \leq h, \quad (5)$$

$$R_{at} = \sqrt{h \cdot (2r - h)}, \quad r > h.$$

З (5) слідує, якщо  $r \geq 5h$ ,  $R_{at}$  пропорційне  $h^{0.5}$ . Таким чином, площа стягування пропорційна  $h$ , а не  $h^2$ , як визначено у (2), в якій  $H=h$ . Для варіанту коли  $r \leq h$ , площа стягування наближається до пропорційності  $r^2$ , та не залежить від висоти  $h$ , що також відрізняється від емпіричної формули (2). Відомо, що формула (2) ґрунтується на результатах експериментальних досліджень за більшістю проведених у лабораторних умовах, за яких висота стрижня була співмірна довжині пробійного проміжку ( $R_{at} \approx h$ ). Автор припускає, що саме цей факт обумовив появу формули (2).

Визначено [19] відповідні формули для тросів, як горизонтальних так і похилих, паралелепіпедів, циліндрів тощо. Для прямокутної споруди площа стягування розраховується як:

$$S_{at} = \pi \cdot R^2 + L \cdot W + 2R(L + W), \quad (6)$$

де  $R$  – радіус зони стягування щогли тієї ж висоти, що й висота будівлі  $H$ . Значення  $R$  визначається за (5); інші позначення співпадають з (2).

Ще один аспект, з точки зору розвинутого підходу, полягає у тому, що значення струмів блискавки мають

стохастичний характер. Кожне з цих випадкових значень відповідає своєму значенню радіуса пробую блискавки та визначає площу стягування. Таким чином, про величину площі  $S_{at}$  необхідно говорити як про випадкову величину, а отже, доцільно розраховувати середнє значення площі стягування для конкретного складу споруд. Тоді, знаючи залежність значень  $S_{at}$  для конкретної конструкції із заданими параметрами її геометрії від радіуса пробую блискавки, а отже, відповідно до (3), від величини струму блискавки, можна визначити середнє значення площі зони стягування  $S_m$ :

$$S_m = \int_2^{200} S(I)F(I)dI, \quad (7)$$

де нижнє та верхнє значення визначають діапазон сили струму, що розглядається;  $S(I)$  – площа стягування об'єкта для заданого значення струму блискавки;  $F(I)$  – функція щільності значень струму блискавки, що визначається як:

$$F(I) = \frac{b \cdot a^b \cdot I^b}{I \cdot (a^b + I^b)^2}, \quad (8)$$

де  $a$  та  $b$  визначено у (4).

У програмі застосовано реалізацію за спрощеною формулою:

$$S_m = \sum_{i=1}^n (S_i F_i), \quad (9)$$

де  $n$  – кількість інтервалів чисельного інтегрування;  $S_i$  – значення шуканої характеристики при струмі блискавки рівному середньому значенню струму в межах  $i$ -го інтервалу інтегрування;  $F_i$  – ймовірність того, що значення струму блискавки виявиться в межах  $i$ -го інтервалу інтегрування;

Результати порівняння двох методів оцінки площі стягування для щогли різної висоти наведено у табл. 2. Розрахунки  $S_m$  виконане для діапазону сили струмів від 2 кА до 200 кА. Розрахунок за (2) цей діапазон не враховує.

Результати наведені у табл. 2 однозначно свідчать про значне завищення значення площі стягування блискавок, внаслідок чого завищені значення має й результат оцінки кількості влучень у об'єкт. З точки зору оцінки ризиків цей факт є несприйнятливим.

Таблиця 2

Порівняння результатів розрахунку площі стягування за RSM та стандартом [2]

Висота $h$ , м	Діапазон струму, кА	Площа $S_m$ , км <sup>2</sup>	$S_{at}$ , км <sup>2</sup>	$S_{at} / S_m$
20	2-100	0.012	0.011	0.92
40	2-100	0.020	0.045	2.25
60	2-100	0.027	0.102	3.78
80	2-200	0.031	0.181	5.86

Примітка:  $S_{at}$  розраховано за (2) для щогли висотою  $h$ .

### Висновки.

1. Доведено доцільність врахування статистичного розподілу сили струму блискавки при визначенні ймовірності влучення блискавки в елементи об'єкта, що обумовлюється залежністю дистанції пробую повітряного проміжку блискавка – об'єкт від потенціалу головки лідеру блискавки, який пов'язаний з силою струму блискавки. Підвищення достовірності оцінки кількості ударів у об'єкт впливає на якість прийняття рішення щодо ризиків, пов'язаних з наслідками удару блискавки.

2. Доведено ефективність вдосконаленого методу «сфери що котяться», реалізованого у виді комп'ютерної програми, який враховує заданий розподіл ймовірності сили струму блискавки у діапазоні від 2 кА до 200 кА. Задання реальної конфігурації елементів об'єкту забезпечується комбінацією вертикальних дротів та тросів.

3. Обґрунтовано доцільність введення поняття «середнього значення площі зони стягування», за урахування ймовірності появи блискавок з силою струму у заданому діапазоні, наприклад (2 – 200) кА. Наведено приклади відмінності отриманих результатів від оцінки за стандартизованими формулами у бік зменшення ймовірності. Для об'єкту типу ангар з габаритами: ширина 256 м, довжина 163 м, висота 110 м, ймовірність ударів блискавки менша у 2,67 разів.

4. Встановлене, що застосування стандартизованої формули призводить до значного (у рази) завищення прогнозованої кількості ударів блискавки у об'єкт, якщо висота об'єкту перевищує 20 м. Причини відмінності, на думку автора, обумовлюються такими властивостями стандартизованої методики:

- зазвичай, не враховується реальна форма об'єкту;
- не враховується статистичний розподіл сили струму блискавки;
- ґрунтується на результатах експериментальних досліджень, отриманих в основному для об'єктів типу щогла або стрижень в лабораторних умовах з обмеженим розрядним проміжком.

**Подяка.** Автор висловлює щире подяку Володимиру Дронову, доценту НТУ «ХПІ» за багаторічну плідну співпрацю. Без використання розроблених їм комп'ютерних програм не можливе було здійснити аналіз та зробити вказані вище висновки.

**Конфлікт інтересів.** Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Standard IEC 62305-1:2010 (Ed.2) Protection against Lightning – Part 1: General principles.* IEC, Geneva, Switzerland, 2010. 78 p.
2. *Standard IEC 62305-2:2010 Protection against lightning – Part 2: Risk management.* IEC, Geneva, Switzerland, 2010. 87 p.
3. *Standard IEC 62305-3:2010 Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazards.* IEC, Geneva, Switzerland, 2010. 156 p.
4. Bouquegneau C., Kern A., Rousseau A. Flash density applied to lightning protection standards. *International Conference on Grounding and Earthing & 5th International Conference on Lightning Physics and Effects.* Bonito – Brazil, November, 2012.
5. Режим доступу: <https://ghrc.nsstc.nasa.gov/lightning/> (Дата звернення: 16.03.2023).
6. Cooray V., Becerra M. Attachment of lightning flashes to grounded structures. *Lightning Protection*, 2010, pp. 165-268. doi: [https://doi.org/10.1049/PBPO058E\\_ch4](https://doi.org/10.1049/PBPO058E_ch4).
7. Bakar A.H.A., Tan C.K., Abidin A.Z., Khai P.J., Mokhlis H., Illias H.A. Comparative Study on Substation Shielding Due to Direct Lightning Strokes. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 600-611. doi: <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.24081>.
8. Cooray V., Rakov V., Theethayi N. The lightning striking distance – Revisited. *Journal of Electrostatics*, 2007, vol. 65, no. 5-6, pp. 296-306. doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2006.09.008>.
9. Koliushko D.G., Rudenko S.S., Kiprych S.V. Analysis of the state of the external lightning protection system for operating energy objects. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 5, pp. 66-70. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.10>.

10. Kern A., Brocke R., Raab V., Hannig M., Rock M., Beierl O., Zischank W. Detailed calculation of interception efficiencies for air-termination systems using the dynamic electrogeometrical model – Practical applications. *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2016, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791518>.

11. Tóth Z., Kiss I., Németh, B. (2021). Relation between the material of roof and the risk of lightning caused damage: The rolling sphere method in the use. *Electric Power Systems Research*, 196, 107286. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2021.107286>.

12. Leal A.F.R., de Oliveira R.M.S., Lopes N.M., de Lima T.S., Ferreira E.R., Rodrigues N.R.N.M. Lightning Protection Design for Small Riverboats Using the FDTD Method. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2021, vol. 20, no. 2, pp. 307-319. doi: <https://doi.org/10.1590/2179-10742021v20i21074>.

13. Guo J., Zhang X., Wang B., Hao X., Zheng S., Xie Y. A three-dimensional direct lightning strike model for lightning protection of the substation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2021, vol. 15, no. 19, pp. 2760-2772. doi: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12213>.

14. Shostak V., Tyulyukov V. Statistical distributions of current amplitudes and lightning incidence number to structures of various configurations. *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2014, pp. 1472-1478. doi: <https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973362>.

15. Rakov V.A. et al. CIGRE technical brochure on lightning parameters for engineering applications. *2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*, Belo Horizonte, Brazil, 2013, pp. 373-377. doi: <https://doi.org/10.1109/SIPDA.2013.6729246>.

16. Meppelink J. Statistics of Relevant Parameters of Lightning. *The Lightning Rod as a Danger*, 2023, pp. 143-147. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30434-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30434-7_15).

17. Rezinkina M.M., Knyazyev V.V., Kravchenko V.I. Computation of the probability of lightning damage to ground objects. *Technical Physics*, 2007, vol. 52, no. 1, pp. 59-64. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063784207010100>.

18. Kniaziev V.V., Melnik S.I. Assessment of probability of lightning direct strike into elements of stationary ground launch complex. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: Technique and Electrophysics of High Voltage*, 2018, no. 14 (1290), pp. 76-81.

19. Kniaziev V.V. Determination of the probability of a lightning strike to the elements of the launch complex using the modified rolling sphere method. *Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third millennium. Collective monograph.* Riga, Baltija Publishing, 2018, vol. 2. 492 p. (pp. 59-92).

20. Дронов В.М., Князев В.В. Комп'ютерна програма «Розрахунок ймовірностей рівнів блискавкозахисту будівель та споруд «Захист-2». Свідоцтво про реєстрацію авторського права №63631 від 21.01.2016.

21. Дронов В.М., Князев В.В. Комп'ютерна програма «Визначення ефективної площі стягування та ймовірності ураження блискавкою елементів об'єкту». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №83877 від 21.12.2018.

#### REFERENCES

1. *Standard IEC 62305-1:2010 (Ed.2) Protection against Lightning – Part 1: General principles.* IEC, Geneva, Switzerland, 2010. 78 p.
2. *Standard IEC 62305-2:2010 Protection against lightning – Part 2: Risk management.* IEC, Geneva, Switzerland, 2010. 87 p.
3. *Standard IEC 62305-3:2010 Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazards.* IEC, Geneva, Switzerland, 2010. 156 p.
4. Bouquegneau C., Kern A., Rousseau A. Flash density applied to lightning protection standards. *International Conference on Grounding and Earthing & 5th International Conference on Lightning Physics and Effects.* Bonito – Brazil, November, 2012.
5. Available at: <https://ghrc.nsstc.nasa.gov/lightning/> (accessed 16 March 2023).

6. Cooray V., Becerra M. Attachment of lightning flashes to grounded structures. *Lightning Protection*, 2010, pp. 165-268. doi: [https://doi.org/10.1049/PBPO058E\\_ch4](https://doi.org/10.1049/PBPO058E_ch4).
7. Bakar A.H.A., Tan C.K., Abidin A.Z., Khai P.J., Mokhlis H., Illias H.A. Comparative Study on Substation Shielding Due to Direct Lightning Strokes. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 600-611. doi: <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.24081>.
8. Cooray V., Rakov V., Theethayi N. The lightning striking distance – Revisited. *Journal of Electrostatics*, 2007, vol. 65, no. 5-6, pp. 296-306. doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2006.09.008>.
9. Koliushko D.G., Rudenko S.S., Kipyrych S.V. Analysis of the state of the external lightning protection system for operating energy objects. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 5, pp. 66-70. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.10>.
10. Kern A., Brocke R., Raab V., Hannig M., Rock M., Beierl O., Zischank W. Detailed calculation of interception efficiencies for air-termination systems using the dynamic electrogeometrical model – Practical applications. *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2016, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791518>.
11. Tóth Z., Kiss I., Németh, B. (2021). Relation between the material of roof and the risk of lightning caused damage: The rolling sphere method in the use. *Electric Power Systems Research*, 196, 107286. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107286>.
12. Leal A.F.R., de Oliveira R.M.S., Lopes N.M., de Lima T.S., Ferreira E.R., Rodrigues N.R.N.M. Lightning Protection Design for Small Riverboats Using the FDTD Method. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2021, vol. 20, no. 2, pp. 307-319. doi: <https://doi.org/10.1590/2179-10742021v20i21074>.
13. Guo J., Zhang X., Wang B., Hao X., Zheng S., Xie Y. A three-dimensional direct lightning strike model for lightning protection of the substation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2021, vol. 15, no. 19, pp. 2760-2772. doi: <https://doi.org/10.1049/gtd.12213>.
14. Shostak V., Tyulyukov V. Statistical distributions of current amplitudes and lightning incidence number to structures of various configurations. *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2014, pp. 1472-1478. doi: <https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973362>.
15. Rakov V.A. et al. CIGRE technical brochure on lightning parameters for engineering applications. *2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*, Belo Horizonte, Brazil, 2013, pp. 373-377. doi: <https://doi.org/10.1109/SIPDA.2013.6729246>.
16. Meppelink J. Statistics of Relevant Parameters of Lightning. *The Lightning Rod as a Danger*, 2023, pp. 143-147. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30434-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30434-7_15).
17. Rezinkina M.M., Knyazyev V.V., Kravchenko V.I. Computation of the probability of lightning damage to ground objects. *Technical Physics*, 2007, vol. 52, no. 1, pp. 59-64. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063784207010100>.
18. Kniaziev V.V., Melnik S.I. Assessment of probability of lightning direct strike into elements of stationary ground launch complex. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: Technique and Electrophysics of High Voltage*, 2018, no. 14 (1290), pp. 76-81.
19. Kniaziev V.V. Determination of the probability of a lightning strike to the elements of the launch complex using the modified rolling sphere method. *Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third millennium. Collective monograph*. Riga, Baltija Publishing, 2018, vol. 2. 492 p. (pp. 59-92).
20. Dronov V.M., Kniaziev V.V. Computer program «Calculation of probabilities of lightning protection levels of buildings and structures «Zakhyst-2»». Patent UA, no. 63631, 2016.
21. Dronov V.M., Kniaziev V.V. Computer program «Determination of the effective area of the screed and the probability of lightning damage to the elements of the object». Patent UA, no. 83877, 2018.

Надійшла (Received) 08.11.2022  
 Прийнята (Accepted) 22.02.2023  
 Опублікована (Published) 01.09.2023

Князєв Володимир Володимирович<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., пров.н.с.,  
<sup>1</sup>Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут  
 «Молнія» Національного технічного університету  
 «Харківський політехнічний інститут»,  
 61013, Харків, вул. Шевченка, 47,  
 e-mail: tc22emc@gmail.com (Corresponding Author)

V.V. Kniaziev<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Research and Design Institute «Molniya»  
 of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

**Determination of the probability of a lightning strike in the elements of the object taking into account the statistical distribution of the current value.**

**Problem.** Modern international standards in the field of lightning protection, when assessing the probability of a lightning strike into an object, do not take into account the statistical distribution of the lightning current. **Goal.** Justification of the expediency of taking into account the statistical distribution of the lightning current with a determined probability of lightning striking the elements of the object, and the effectiveness of the application of the improved «rolling sphere» method. **Methodology.** Method of mathematical modeling, based on RSM with additional consideration of the probability distribution of lightning current. **Results.** The expediency of taking into account the statistical distribution of lightning current at the determined probability of lightning striking the elements of the object has been proven. The effectiveness of the improved «rolling sphere» method, implemented in the form of a computer program, which takes into account the given probability distribution of lightning current in the range from 2 kA to 200 kA, has been proved. The expediency of introducing the concept of «average value of the area of the collection area» is substantiated, taking into account the probability of lightning with a current in a given range. It has been established that the application of the standardized formula leads to a significant (many times) overestimation of the predicted number of lightning strikes to the object, if the height of the object exceeds 20 m. The reasons for the difference, according to the author, are due to the following properties of the standardized methodology: usually, the real shape of the object is not taken into account; statistical distribution of lightning current is not taken into account; it is based on the results of experimental studies obtained mainly for mast or rod-type objects in laboratory conditions with a limited discharge interval. **Practical value.** This approach will provide an opportunity to optimize the layout of lightning arresters during the restoration of objects, taking into account green reconstruction. The obtained results are proposed for consideration by the Technical Committee TC 81 IEC for inclusion in the next editions of the standards. References 20, table 2, figure 1.

**Key words:** lightning protection, risk assessment, RSM - Rolling Sphere Method, object of arbitrary shape, probability distribution of lightning current, collection area.

How to cite this article:

Kniaziev V.V. Determination of the probability of a lightning strike in the elements of the object taking into account the statistical distribution of the current value. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 5, pp. 57-62. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.08>