

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗОНИ ЗАХИСТУ У РАЗІ
ДОВІЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ РОЗТАШУВАННЯ СТРИЖНЬОВИХ БЛИСКАВКОВІДВОДІВ**

Д.Г. Коліушко^{*}, канд.техн.наук, О.Є. Істомін^{**}, канд.техн.наук, С.С. Руденко^{***}, канд.техн.наук,
С.В. Кіприч^{****}

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.

E-mail: nio5_molniva@ukr.net

Метою роботи є аналіз основних принципів побудови зони захисту складної системи блискавковідводів за методом сфери, що котиться, який, наразі, є основним у галузі блискавкозахисту та відповідає вимогам сучасних європейських норм. Вирішено задачу визначення мінімальної кількості блискавковідводів, необхідних для розрахунку складної поверхні зони захисту, за їх довільної висоти та розташуванні. Вперше в Україні розроблено математичну модель для побудови такої зони захисту з використанням законів стереометрії. Перевірено роботу цієї моделі на прикладі електричної підстанції напругою 110 кВ із застосуванням розробленої комп'ютерної програми з реальним розташуванням блискавковідводів різної висоти. Результатом роботи цієї програми є тривимірне відображення зони захисту з можливістю візуального аналізу захищеності об'єктів від прямого удару блискавки із заданою імовірністю. Цінність роботи полягає у можливості практичної реалізації методу сфери, що котиться, для захисту енергооб'єктів України від прямого удару блискавки відповідно до сучасного стандарту EN 62305. Бібл. 12, рис. 5.

Ключові слова: метод сфери, що котиться, стрижньовий блискавковідвід, зона захисту, енергооб'єкт, підстанція, математична модель.

Постановка проблеми. Сьогодні в Україні одночасно діють два нормативних документи у галузі блискавкозахисту будівель та споруд:

– ДСТУ Б В.2.5-38:2008 Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд [1];

– ДСТУ EN 62305:2012 Захист від блискавки. Protection against lightning [2].

Однак законодавством передбачається повний перехід на гармонізований міжнародний стандарт [2]. Згідно з ним необхідним є проведення випробувань на дію прямого удару блискавки в досліджуваній об'єкт, що було на практиці реалізовано в Україні [3]. Також у [2] передбачено розрахунок зони захисту (ЗЗ) складної системи блискавковідводів (БВ) лише за методом сфери, що котиться. Метод сфери, що котиться, – це електрогеометрична модель, яка базується на обкатуванні конструкції уявною (фіктивною) сферою, радіус якої залежить від передбачуваного пікового значення струму зворотного удару блискавки [2]. Центр сфери розглядається як розташування вершини лідера блискавки, який рухається до землі. Таким чином, захищеним вважається усе, до чого не торкнулася сфера в процесі обкатування. Проте у [2] не наведені інженерні методики для використання цього методу, що унеможливило його практичне застосування для розрахунку такої ЗЗ, наприклад, на електричних станціях та підстанціях.

В інженерній практиці України, як правило, використовуються методики розрахунку, наведені в [1], а за основу для них взято співвідношення, що детально викладено в [4]. Аналіз документації з проектування систем блискавкозахисту, розробленої вітчизняними фірмами із застосуванням методу сфери, яка котиться, показує, що розрахунки виконуються за спрощеним алгоритмом: лише на площині (2D випадок) та лише поодиночі, без врахування сполучень БВ.

Аналіз низки публікацій [5–9] показав, що у вільному доступі є математичні співвідношення

© Коліушко Д.Г., Істомін О.Є., Руденко С.С., Кіприч С.В., 2020
ORCID ID: ^{*}<https://orcid.org/0000-0003-3112-4260>; ^{**}<https://orcid.org/0000-0002-5709-6459>;
^{***}<https://orcid.org/0000-0002-2544-1545>; ^{****}<https://orcid.org/0000-0002-1925-2596>

для простих конкретних випадків розташування БВ, які неможливо використовувати для розрахунків їх ЗЗ для комплексу будівель і споруд чи відкритих розподільчих пристроїв енергооб'єктів зі складною системою блискавкозахисту. Це призводить до того, що ані проектувальники, ані експлуатаційний персонал не може оцінити захищеність таких стратегічно важливих об'єктів від прямого удару блискавки за методом сфери, що котиться. Крім того, актуальність проблеми підвищується через те, що ймовірність ураження блискавкою електричних станцій та підстанцій більша ніж інших об'єктів [10].

Для розрахунку ЗЗ БВ довільних висоти та розташування використовуються спеціалізовані комп'ютерні програми, алгоритми, математичний опис та текст яких представляють собою комерційну таємницю компаній-розробників (наприклад, від "Primtech", Pentair, ERICO, Entegra тощо) і мають зауваження до результатів розрахунку, а саме – до форми отриманої ЗЗ системи БВ.

Тому авторами в [11] було поставлено задачу щодо розробки математичного апарату для розрахунку і побудови ЗЗ системи БВ довільної конфігурації з застосуванням методу сфери, що котиться, для діючих енергооб'єктів відповідно до ДСТУ EN 62305-3:2012. Для цього було розглянуто окремі випадки, що дають можливість побудови ЗЗ стрижньових БВ, коли співвідношення висот, відстаней між БВ та заданим рівнем блискавкозахисту не формують складну конфігурацію ЗЗ цих БВ, що дало змогу сформулювати підзадачі для подальших досліджень.

Метою роботи є розробка математичної моделі для побудови зон захисту системи блискавковідводів складної конфігурації згідно з ДСТУ EN 62305-3:2012 для захисту діючих енергооб'єктів від прямого удару блискавки.

Матеріали дослідження. Для вирішення даної задачі відповідно до [11] необхідно:

- визначити мінімальну кількість БВ, комбінація яких може сформувати складну ЗЗ;
- виконати побудову геометричної та математичної моделі для обраної конфігурації БВ.

Визначення мінімальної кількості одиничних блискавковідводів для формування складної поверхні зони захисту. Вибір мінімально необхідної кількості одиничних БВ для формування складної ЗЗ визначає геометричну та математичну модель, за якою буде виконуватися побудова поверхні.

Побудова ЗЗ складної системи блискавкозахисту складається з двох частин:

- 1) побудова бічних поверхонь ЗЗ (сфера торкається поверхні ґрунту та одного або двох БВ);
- 2) побудова внутрішньої поверхні (сфера лежить на вершинах БВ та не торкається ґрунту).

Перша частина детально розглянута у процесі побудови одиничних та подвійних БВ і є окремим випадком [10]. Для другої частини перерізом фіктивної сфери є коло, що проходить через вершини БВ, на яких лежить ця сфера (тобто описане коло трикутника). Згідно з властивостями описаного кола, необхідною та достатньою умовою для побудови такого кола (до того ж тільки одного) є наявність трьох БВ, вершини яких утворюють трикутник. За більшої кількості вершин побудувати коло можливо лише в окремих випадках за виконання низки умов [12].

Отже, мінімально необхідна кількість БВ для формування складної ЗЗ дорівнює трьом.

Побудова математичної моделі зони захисту трьох одиничних блискавковідводів. На рис. 1 показано геометричну модель для побудови ЗЗ трьох одиничних БВ.

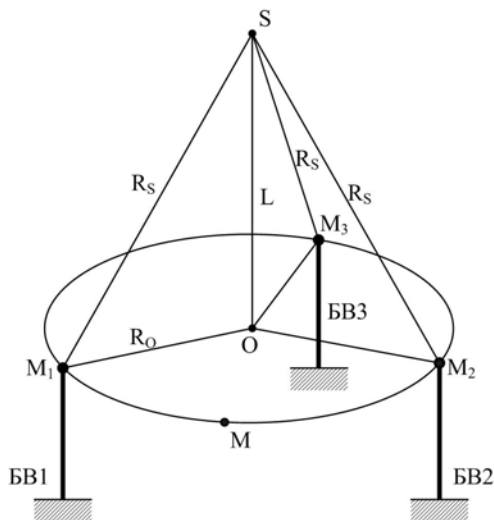


Рис. 1

Для знаходження координат центра сфери, що лежить на трьох БВ, необхідно:

- записати рівняння площини, що проходить через вершини трьох БВ ($M_1; M_2; M_3$), та нормального вектора до неї;
- визначити радіус R_0 та координати центра O описаного кола;
- визначити відстань L , на якій розташовано центр сфери S відносно площини, що проходить через вершини трьох БВ;
- визначити координати центра сфери S .

Розглянемо першу задачу. Необхідно записати рівняння площини, що проходить через три задані точки $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$, $M_3(x_3, y_3, z_3)$, які визначають положення відповідних БВ.

Множина точок $M(x, y, z)$ визначає у прямокутній системі координат xuz у тривимірному просторі площину, яка проходить через три різні точки, що не лежать на одній пря-

мій – $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$, $M_3(x_3, y_3, z_3)$, тоді та тільки тоді, коли три вектори $\overline{M_1M}$, $\overline{M_1M_2}$ та $\overline{M_1M_3}$ компланарні. Отже, повинна виконуватися умова компланарності трьох векторів

$$\overline{M_1M} = (x - x_1, y - y_1, z - z_1); \quad \overline{M_1M_2} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1);$$

$$\overline{M_1M_3} = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1),$$

тобто, змішаний добуток векторів $\overline{M_1M}$, $\overline{M_1M_2}$, $\overline{M_1M_3}$ повинен дорівнювати нулю

$$\overline{M_1M} \cdot \overline{M_1M_2} \cdot \overline{M_1M_3} = 0.$$

Вказане рівняння в координатній формі має вигляд

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

Після обчислення визначника, отримаємо загальне рівняння площини, що проходить через три задані точки $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$, $M_3(x_3, y_3, z_3)$. Розкривши визначник з використанням програми *Mathlab*, отримаємо

$$\begin{aligned} & xy_1z_2 - xy_2z_1 - x_1y_2z_2 + x_1y_2z_2 + x_2y_2z_1 - x_2y_1z_2 - xy_1z_3 + xy_3z_1 + x_1y_2z_3 - \\ & - x_1y_3z_2 - x_3y_2z_1 + x_3y_1z_2 + xy_2z_3 - xy_3z_2 - x_2y_2z_3 + x_2y_3z_2 + x_3y_2z_2 - \\ & - x_3y_2z_2 - x_1y_2z_3 + x_1y_3z_2 + x_2y_1z_3 - x_2y_3z_1 - x_3y_1z_2 + x_3y_2z_1 = 0. \end{aligned}$$

Згрупувавши отриманий вираз відносно x , y та z , отримаємо

$$\begin{aligned} & (y_1z_2 - y_2z_1 - y_1z_3 + y_3z_1 + y_2z_3 - y_3z_2)x + (x_2z_1 - x_1z_2 + x_1z_3 - \\ & - x_3z_1 - x_2z_3 + x_3z_2)y + (x_1y_2 - x_2y_1 - x_1y_3 + x_3y_1 + x_2y_3 - x_3y_2)z + \\ & + x_1y_3z_2 - x_1y_2z_3 + x_2y_1z_3 - x_2y_3z_1 - x_3y_1z_2 + x_3y_2z_1 = 0. \end{aligned}$$

Прийmemo

$$A = y_1z_2 - y_2z_1 - y_1z_3 + y_3z_1 + y_2z_3 - y_3z_2, \quad (2)$$

$$B = x_2z_1 - x_1z_2 + x_1z_3 - x_3z_1 - x_2z_3 + x_3z_2, \quad (3)$$

$$C = x_1y_2 - x_2y_1 - x_1y_3 + x_3y_1 + x_2y_3 - x_3y_2, \quad (4)$$

$$D = x_1y_3z_2 - x_1y_2z_3 + x_2y_1z_3 - x_2y_3z_1 - x_3y_1z_2 + x_3y_2z_1. \quad (5)$$

Тоді з урахуванням (1)–(4) нормальний вектор площини буде мати вигляд

$$\vec{n} = (A, B, C). \quad (6)$$

Далі розглянемо вирішення другої задачі, яка полягає у знаходженні радіуса та координат центра описаного кола, що проходить через три вершини БВ. Задля цього скористаємося формулою [11]

$$R_O = \frac{abc}{4\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}}, \quad (7)$$

де a, b, c – сторони трикутника; $p = (a + b + c)$ – периметр трикутника.

Нехай точки $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$, $M_3(x_3, y_3, z_3)$ є координатами вершин трикутника у декартовій системі координат. Тоді рівняння описаного кола може бути представлено у вигляді

$$\begin{vmatrix} x^2 + y^2 + z^2 & x & y & z \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 & x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 & x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 & x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} = 0. \quad (8)$$

Підставивши до виразу (8) замість загальних координат x, y, z координати центра описаного кола $O(x_o, y_o, z_o)$ та використовуючи теорему Лапласа для розкриття визначника матриці, отримаємо координати центра сфери S у загальному вигляді

$$x_o = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 & y_1 & z_1 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 & y_2 & z_2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}, \quad y_o = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 & x_1 & z_1 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 & x_2 & z_2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 & x_3 & z_3 \end{vmatrix}, \quad z_o = \frac{1}{D} \begin{vmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 & x_1 & y_1 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 & x_2 & y_2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}, \quad (9,10,11)$$

$$\text{де } D = 2 \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}.$$

Для визначення відстані L , на яку віддалена точка центра сфери S від центра описаного кола O , що лежить у площині $M_1M_2M_3$, розглянемо прямокутний трикутник ΔM_1OS (рис. 1). За теоремою Піфагора з трикутника ΔM_1OS

$$L = \sqrt{R_S^2 - R_O^2}. \quad (12)$$

Виходячи з геометричної моделі на рис. 1, координату точки центра сфери S , що лежить на трьох вершинах БВ, можна визначити, спираючися на те, що ця точка належить нормалі до площини $M_1M_2M_3$ (відрізок OS). Рівняння прямої, що проходить через точку O , має наступний вигляд:

$$\frac{x-x_o}{A} = \frac{y-y_o}{B} = \frac{z-z_o}{C}, \quad (13)$$

де A, B, C – коефіцієнти у рівнянні площини (2)–(4).

Для визначення координат центра сфери $S(x_s, y_s, z_s)$ складемо систему рівнянь третього порядку. Для формування першого рівняння скористаємося співвідношенням, що описує відстань від точки $O(x_o, y_o, z_o)$ до точки $S(x_s, y_s, z_s)$, які належать прямій (13) та розташовані на відстані L одна від одної

$$L = \frac{Ax_s + By_s + Cz_s + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (14)$$

Для двох інших рівнянь скористаємося рівнянням прямої (13). Тоді система буде мати вигляд

$$\begin{cases} Ax_s + By_s + Cz_s = L\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} - D \\ Bx_s - Ay_s = Bx_o - Ay_o \\ Cy_s - Bz_s = Cy_o - Bz_o. \end{cases} \quad (15)$$

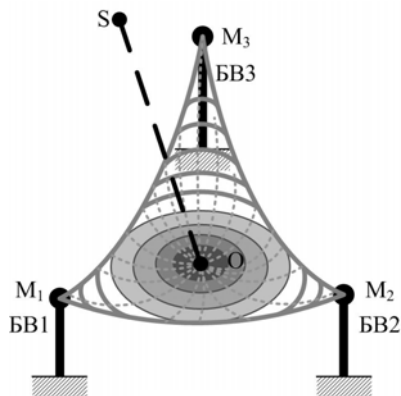


Рис. 2

ний на рис. 3.

На моделі рис. 3 зона захисту розділена на три типи. Зона типу A складає центральну частину ЗЗ, утворену поверхнею сфери, що спирається на три вершини БВ (M_1, M_2 та M_3). Зона типу B – поверхнею сфери, що спирається на вершини двох БВ та поверхню ґрунту. Зона типу C включає поверхню ЗЗ, утворену поверхнею сфери, що спирається тільки на один із трьох БВ та поверхню ґрунту.

Нехай задані координати X_i, Y_i деякої точки у декартовій системі координат $OXYZ$. Знайдемо координату Z_i цієї точки, яка належить поверхні ЗЗ.

У випадку, коли точка належить зоні A , то координата Z_i визначається наступним чином:

$$Z_i = z_s - \sqrt{R_s^2 - (X_i - x_s)^2 - (Y_i - y_s)^2}. \quad (16)$$

Розв'язок системи (15) відносно x_s, y_s, z_s може бути знайдено методом Гауса. Визначивши координати точки центра сфери $S(x_s, y_s, z_s)$, можна виконати побудову середньої частини ЗЗ трьох одиничних стрижньових БВ. Вона буде мати вигляд, який наведено на рис. 2.

Для завершення побудови повної ЗЗ, утвореної трьома БВ, необхідно додати зони, що утворюються у разі торкання сфери двох вершин трикутника на кожній його грані. Тоді геометрична модель ЗЗ має вигляд, показаний на рис. 3.

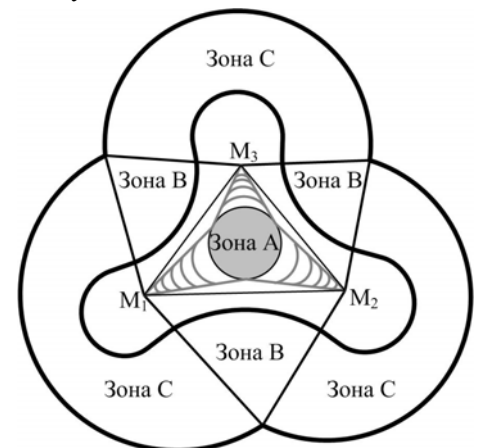


Рис. 3

Якщо точка належить зоні типу *B* або *C*, то координата Z_i визначається за виразами для подвійного або одиничного БВ відповідно [11].

На основі вказаних виразів було розроблено програму для побудови ЗЗ БВ від прямого удару блискавки. На рис. 4 наведено результати розрахунку ЗЗ для підстанції класом напруги 110 кВ, діагностику системи блискавкозахисту якої було виконано в Донецькій області у 2018 р. Система блискавкозахисту об'єкта від прямого удару блискавки складається з шести стрижньових БВ, радіус сфери для побудови ЗЗ обраний 45 м (III рівень блискавкозахисту). Задля побудови цієї складної поверхні БЗ систему БВ було розбито на дві групи по три БВ, виконано побудову поверхні БЗ для кожної групи БВ та оцінено отримані результати.

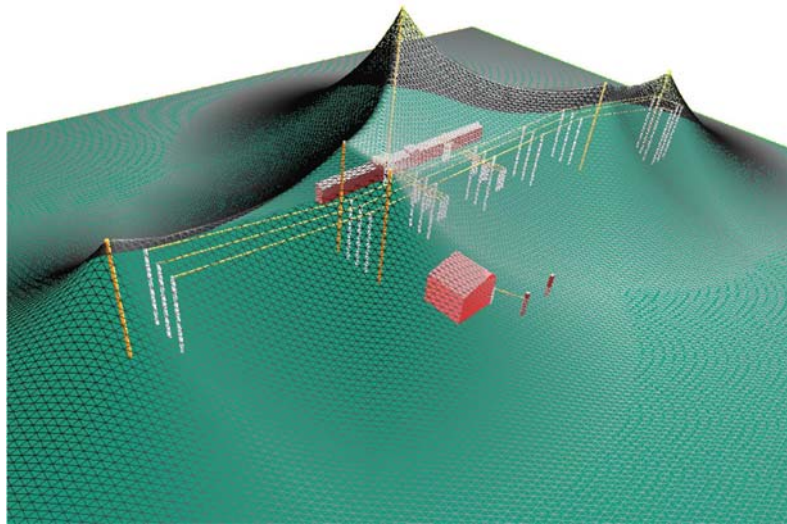


Рис. 4

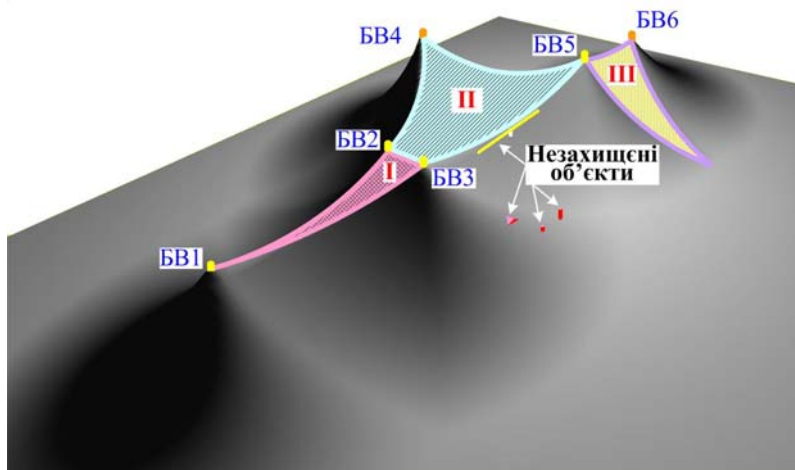


Рис. 5

Проаналізуємо побудову ЗЗ, використовуючи рис. 5, на якому позначено: I – зона типу *A*, утворена БВ1, БВ2 та БВ3, II – зона типу *A*, утворена БВ2, БВ3, БВ4 та БВ5, III – зона типу *B*, утворена БВ5 та БВ6.

Очевидно, що побудована поверхня ЗЗ має складну форму й відповідає геометрії, яка утворена об'єктами встановлених шести блискавководвідів сферою радіусом 45 м. При цьому ЗЗ, визначена за методом сфери, що котиться, не повністю охоплює ошиновку та споруди підстанції, тобто окремі частини об'єкта не захищені від прямого удару блискавки.

Висновки.

1. У роботі обґрунтовано вибір мінімальної кількості БВ (три БВ), які утворюють складну поверхню ЗЗ у разі довільної конфігурації розташування стрижньових БВ.

2. Створено математичну модель для побудови зони захисту у випадку довільної конфігурації розташування трьох стрижньових БВ.

3. На основі розробленої математичної моделі створено комп'ютерну програму розрахунку ЗЗ стрижньових БВ з застосуванням методу сфери, що котиться. Наведено та проаналізовано результати розрахунку ЗЗ системи з шістьма БВ у тривимірному вигляді.

Роботу виконано за кошти державного бюджету України: науково-дослідна робота МОН України «Забезпечення енергетичної безпеки України шляхом підвищення надійності роботи стратегічних енергооб'єктів у нормальному та аварійному режимах» (номер державної реєстрації № 0117U000534).

1. ДСТУ Б В.2.5-38:2008 Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (IEC 62305:2006, NEQ). Київ: ДНДПВТІ Енергоперспектива, 2008. 54 с.

2. ДСТУ EN 62305:2012 Блискавкозахист. Protection against lightning (IEC 62305:2011, IDT). Київ: Держстандарт України, 2012. 419 с.

3. Varanov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10 μ s/350 μ s with an amplitude of $\pm(100-200)$ kA. *Instruments and Experimental Techniques*. 2015. Vol. 58. No 6. Pp. 745–750.

4. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений (РД 34.21.122–87). Москва: Энергоатомиздат, 1989. 56 с.
5. Базелян Э.М. Нормирование молниезащиты в России. Основные проблемы и пути совершенствования. III Российская конференция по молниезащите. Санкт-Петербург, 2012. С. 372-382.
6. Комаров В.І. До питання проектування зовнішньої блискавкозахисної системи методом фіктивної сфери. *Науковий огляд*. 2014. № 3(4). С. 100-105.
7. Dung L.V., Petcharaks K. Lightning protection systems design for substations by using masts and Matlab. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*. 2010. Vol. 4. No 5. Pp. 562-566.
8. Berger G. Recent considerations on a 3D electrogeometric model and its applications to the PIC DU MIDI. *V international conference on lightning protection*. St.-Peterburg, May, 2016. Pp. 21-26.
9. Petcharaks N. Lightning protection zone in substation using mast. *KKU Engineering Journal*. 2013. No 40(1). Pp. 11-20.
10. Rezinkina M.M. Technique for predicting the number of lightning strokes to extended objects. *Technical Physics*. 2008. Vol. 53. No 5. Pp. 533-539.
11. Istomin O.Ye., Koliushko D.G., Kipyrych S.V., Rudenko S.S. Construction problems of volume protected by airtermination rod for the Ukrainian nuclear power plant under standard EN 62305. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2019. No 5(123). Pp. 100-104
12. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. М.: АСТ: Астрель, 2006. 509 с.

УДК 621.316.98

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ

Д.Г. Колюшко^{*}, канд.техн.наук, О.Є. Истомин^{**}, канд.техн.наук, С.С. Руденко^{***}, канд.техн.наук, С.В. Киприч^{****}

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", ул. Кирпичова, 2, Харьков, 61002, Украина.

E-mail: nio5_molniva@ukr.net

Целью работы является анализ основных принципов построения зоны защиты сложной системы молниеотводов по методу катящейся сферы, который на текущий момент является основным в области молниезащиты и соответствует требованиям современных европейских норм. Решена задача определения минимального количества молниеотводов, необходимых для расчета сложной поверхности зоны защиты, при их произвольной высоте и расположении. Впервые в Украине разработана математическая модель для построения такой зоны защиты с использованием законов стереометрии. Проведена работа этой модели на примере электрической подстанции напряжением 110 кВ с помощью разработанной компьютерной программы с реальным расположением молниеотводов разной высоты. Результатом работы этой программы является трехмерное отображение зоны защиты с возможностью визуального анализа защищенности объектов от прямого удара молнии с заданной вероятностью. Ценность работы заключается в возможности практической реализации метода катящейся сферы для защиты энергообъектов Украины от прямого удара молнии в соответствии с современным стандартом EN 62305. Библ. 12, рис. 5.

Ключевые слова: метод катящейся сферы, стержневой молниеотвод, зона защиты, энергообъект, подстанция, математическая модель.

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROTECTION ZONE DURING AN ARBITRARY CONFIGURATION OF THE AIR-TERMINATION RODS LOCATION

D.G. Koliushko^{*}, O.Ye. Istomin^{**}, S.S. Rudenko^{***}, S.V. Kipyrych^{****}

National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute, Kirpichova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.

E-mail: nio5_molniva@ukr.net

The aim of the paper is to analyze the basic principles of design the protection zone of a complex system of air-termination rods according to the rolling sphere method, which, at the moment, is the main in the field of lightning pro-

tection and meets the requirements of modern European standards. The problem of determining the minimum number of air-termination rods required to calculate the surface of the protection zone of any complexity, with their arbitrary height and location, is solved. Through the use of the stereometry laws of, for the first time in Ukraine, a mathematical model was developed to build such a protection zone. The operation of this model was tested on the example of an electrical substation with a voltage of 110 kV using a test computer program with a real arrangement of air-termination rods with different heights. The result of this program is a three-dimensional display of the protection zone with the possibility of visual analysis of the protection of objects from direct lightning strike with a given probability. The value of the work lies in the possibility of practical implementation of the rolling sphere method to protect power facilities of Ukraine from direct lightning strikes in accordance with the modern standard EN 62305. References 12, figures 5.

Key words: rolling sphere method, air-termination rod, protection zone, power facility, substation, mathematical model.

1. State standard of Ukraine B V.2.5-38:2008 Engineering equipment of buildings and structures. Lightning protection of buildings and structures (IEC 62305:2006, NEQ). Kyiv: DNDPVTI Enerhoperspektyva, 2008. 54 p. (Ukr)
2. State standard of Ukraine EN 62305:2012 Protection against lightning. (IEC 62305: 2011, IDT). Kyiv: State Standard of Ukraine, 2012. 419 p. (Ukr)
3. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of $10 \mu\text{s}/350 \mu\text{s}$ with an amplitude of $\pm(100-200)$ kA. *Instruments and Experimental Techniques*. 2015. Vol. 58. No 6. Pp. 745-750.
4. Guidelines for Installation of Lightning Protection Systems for Buildings and Structures (RD 34.21.122-87). Moskva: Energoatomizdat, 1989. 56 p. (Rus)
5. Bazelyan E.M. Rationing of lightning protection in Russia. The main problems and ways to improve. III Russian conference on *lightning protection*. St.-Peterburg, 2012. Pp. 372-382. (Rus)
6. Komarov V.I. To the question of designing an external lightning protection system by the rolling sphere method. *Naukovyi oghiad*. 2014. No 3(4). Pp. 100-105. (Ukr)
7. Dung L.V., Petcharaks K. Lightning protection systems design for substations by using masts and Matlab. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*. 2010. Vol. 4. No 5. Pp. 562-566.
8. Berger G. Recent considerations on a 3D electrogeometric model and its applications to the PIC DU MIDI. *V international conference on lightning protection*. St.-Peterburg, May, 2016. Pp. 21-26.
9. Petcharaks N. Lightning protection zone in substation using mast. *KKU Engineering Journal*. 2013. No 40(1). Pp. 11-20.
10. Rezinkina M.M. Technique for predicting the number of lightning strokes to extended objects. *Technical Physics*. 2008. Vol. 53. No 5. Pp. 533-539.
11. Istomin O.Ye., Koliushko D.G., Kiprych S.V., Rudenko S.S. Construction problems of volume protected by air-termination rod for the Ukrainian nuclear power plant under standard EN 62305. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2019. No 5(123). Pp. 100-104.
12. Vygodskiy M.Y. Elementary mathematics reference book. Moskva: AST: Astrel, 2006. 509 p. (Rus)

Надійшла 05.09.2019
Остаточний варіант 21.11.19