

УДК 621.316.99

doi:10.20998/2413-4295.2023.04.13

## РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ПРОЦЕДУРИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЗОН ЗАХИСТУ БЛИСКАВКОВІДВОДІВ ЗА МІЖНАРОДНИМ СТАНДАРТОМ ІЕС 62305

Д. Г. КОЛУШКО<sup>1</sup>, О. Є. ІСТОМІН<sup>2</sup>, С. С. РУДЕНКО<sup>1\*</sup>, С. В. КІПРИЧ<sup>1</sup>, О. Ю. ГЛЄБОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НДПКІ «Молнія», НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup> ІТСКГМ ім. О.О. Морозова, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Продовжено серію публікацій щодо проблеми захисту від проявів блискавки в електричних станціях та підстанціях, особливо в умовах зниження стабільності функціонування енергосистеми України. Додатково актуальність роботи аргументовано збільшенням грозової активності на планеті в цілому та даними національної енергокомпанії в Україні, що призводить до аварійних вимкнень на лініях електропередачі. Розроблено систему алгоритмів для обчислювальної процедури при розрахунку зон захисту системи, яка складається з багаточисельних стрижньових і тросових блискавковідводів та захисних сіток, за методом сфери, що котиться. Зазначено, що більшість стратегічних енергооб'єктів в Україні мають системи блискавкозахисту, побудовані згідно застарілих стандартів, тому необхідна їх перевірка та модернізація з урахуванням діючих нормативних документів. Розроблено узагальнений алгоритм побудови зони захисту з використанням методу Делоне та отриманих раніше математичних виразів, який в свою чергу складається з підалгоритмів: побудови полігональної сітки по точкам координат блискавковідводів, знаходження зон торкання сфери вершин полігональної сітки, побудови сітки вузлів точок аналізу, знаходження координати висоти для кожної точки аналізу, побудова поверхні захисту по координатам сітки вузлів точок аналізу. Виконано програмну реалізацію та показано приклад застосування алгоритмів при розрахунку захищеності діючої підстанції класом напруги 150 кВ. Наведено загальні особливості програмної реалізації в програмному комплексі LiGro. Розроблений програмний продукт знайшов своє застосування при модернізацію існуючих систем блискавкозахисту діючих енергетичних об'єктів України класом напруги 35-750 кВ.

**Ключові слова:** метод сфери, що котиться; стрижньовий блискавковідвід; зона захисту; енергооб'єкт; підстанція; полігональна сітка.

## DEVELOPMENT OF THE CALCULATION PROCEDURE ALGORITHM FOR THE CALCULATION OF LIGHTNING RODS PROTECTION ZONES ACCORDING TO THE INTERNATIONAL STANDARD IEC 62305

D. KOLIUSHKO<sup>1</sup>, O. ISTOMIN<sup>2</sup>, S. RUDENKO<sup>1</sup>, S. KIPRYCH, O. GLEBOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research and Design Institute "Molniya", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Information Technologies and Systems of Wheeled and Tracked Vehicles named after O.O. Morozov, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** A series of publications on the problem of lightning protection in power stations and substations, especially in the conditions of decreasing stability of the functioning of the energy system of Ukraine is continued. In addition, the relevance of the work is substantiated by the increase in thunderstorm activity on the planet as a whole and by the data of the national energy company in Ukraine, which leads to emergency shutdowns on power transmission lines. The system of algorithms for the computational procedure for calculating the protection zones of the system, which consists of numerous rod and cable lightning conductors and protective nets, using the rolling sphere method is developed. It is noted, that the majority of strategic energy facilities in Ukraine have lightning protection systems built according to outdated standards, therefore, their inspection and modernization is necessary taking into account current regulatory documents. A generalized algorithm for constructing a protection zone using the Delaunay algorithm and previously obtained mathematical expressions has been developed, which in turn consists of sub-algorithms: constructing a polygonal grid based on the points of the coordinates of the lightning conductors, finding the areas of contact with the sphere of the vertices of the polygonal grid, constructing a grid of nodes of the analysis points, finding the height coordinates for of each analysis point, construction of the protection surface based on the grid coordinates of the analysis point nodes. The software implementation was carried out and an example of the application of algorithms was shown when calculating the protection of an operating substation with a voltage class of 150 kV. The general features of software implementation in the LiGro software complex are given. The developed software product found its application in the modernization of existing lightning protection systems of operating power facilities of Ukraine with a voltage class of 35-750 kV.

**Keywords:** rolling sphere method; lightning rod; protection zone; power facility; substation; polygonal grid.

### Вступ

В умовах зниження стабільності функціонування енергосистеми України (що

спровоковано в першу чергу цілеспрямованими терористичними атаками росії на енергетичну інфраструктуру України), надзвичайно актуальним є

підвищення безаварійної роботи електричних станцій та підстанцій за умови впливу як природніх, так і штучних факторів.

Одним з таких факторів, який може призвести до відключення електроспоживачів, значного матеріального збитку через порушення технологічного процесу, простою обладнання, а іноді навіть до електротравматизму та гибелі експлуатуючого персоналу є прямий удар блискавки в споруди чи обладнання електричних станцій та підстанцій.

Згідно з даними НЕК "Укренерго" збільшення грозової активності в Україні разом з неврахуванням фізики розтікання струму блискавки призвело до того, що з 350 аварійних вимкнень на лініях електропередачі 220-750 кВ внаслідок удару блискавки, 50 супроводжувалися утворенням короткого замикання (КЗ). На рис. 1, показано, що очікувана кількість вимкнень магістральних ліній електропередач класом напруги 220-750 кВ в 2023 р. складе – 130 одиниць [1].

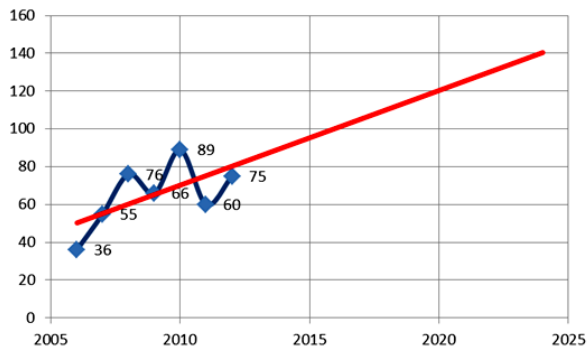


Рис. 1 – Кількість вимкань ліній електропередач 220-750 кВ в Україні унаслідок грозової діяльності по роках експлуатації (фактична та очікувана)

Крім того, підвищення грозової активності, як в Україні, так і на планеті в цілому вказує на актуалізацію проблеми захисту від проявів блискавки. На рис. 2 наведено мапу грозової активності згідно даних NASA та фінської екологічної компанії VAISALA [2].

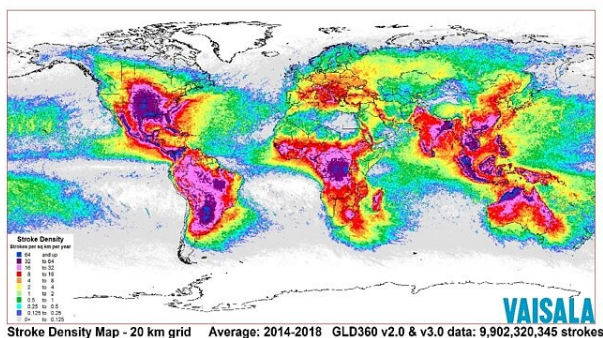


Рис. 2 – Мапа грозової активності [2]

Тому для захисту від прямого удару блискавки електричних станцій та підстанцій облаштовується зовнішня система блискавкозахисту (СБЗ), яка представляє собою складну за конфігурацією систему з багаточисельних стрижньових і тросових блискавковідводів (БВ), а також захисних сіток, встановлених на дахах будівель та споруд.

Для переважної більшості стратегічних енергооб'єктів України СБЗ була спроектована згідно вимог застарілих стандартів [3, 4]. У зв'язку з цим, виникає необхідність її перевірки та модернізації відповідно до діючих нормативних документів [5].

Гармонізований міжнародний стандарт з блискавкозахисту [6] передбачає розрахунок зон захисту (ЗЗ) БВ від прямого удару блискавки за допомогою двох методів: захисного кута або сфери, що котиться. Перший з них є прийнятний лише для будівель простої форми й має обмеження щодо висоти БВ. Тому для розрахунку ЗЗ системи БВ стратегічних об'єктів від прямого удару блискавки може бути використаний лише метод сфери, що котиться (див. рис. 3).

Метод сфери, що котиться – це електрогеометрична модель, яка базується на обкатуванні конструкції уявною (фіктивною) сферою, радіус якої залежить від передбачуваного пікового значення струму зворотнього удару блискавки [6]. Центр сфери розглядається як розташування вершини лідера блискавки, який рухається до землі. Таким чином, захищеним вважається усе, до чого не торкнулася сфера при обкатуванні. Проте в [6] не наведені інженерні методики для використання цього методу, що унеможливує його практичне застосування для розрахунку такої ЗЗ, наприклад, на електричних станціях та підстанціях.

Вказаний метод має більш жорсткі вимоги до зон захисту БВ, ніж раніше діючий ДСТУ Б В.2.5-38:2008 [4]: ЗЗ окремого БВ при ймовірності ураження 10 % зменшується з 55 м до 45 м, а розрахунок на його основі системи блискавкозахисту дозволяє зменшити ймовірність ураження блискавкою об'єкту, що підлягає захисту.

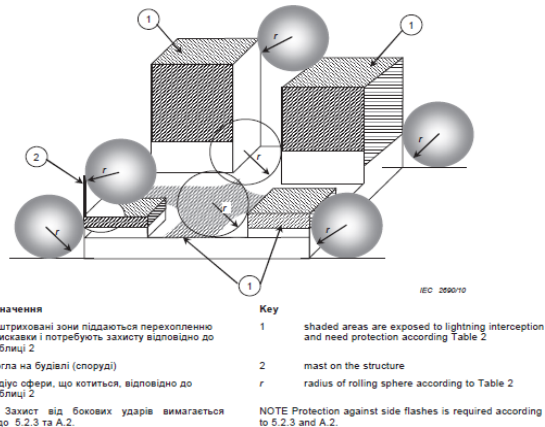


Рис. 3 – Приклад проектування СБЗ за допомогою методу сфери, що котиться згідно з IEC 62305-3 [6]

В інженерній практиці України, як правило, використовується методика розрахунку наведена в [4], оскільки за основу для них взяті співвідношення, що детально викладені в [3]. Аналіз документації з проектування систем блискавкозахисту, розробленої рядом вітчизняних фірм із застосуванням методу сфери, що котиться, показує, що розрахунки виконуються за спрощеним алгоритмом: лише на площині (2D випадок) та лише поодиноці, без врахування сполучень БВ.

Аналіз низки публікацій [7–10] показав, що у вільному доступі є математичні співвідношення 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. Для розрахунку ЗЗ БВ довільних висоти та розташування за кордоном 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, а в [12] вирішено задачу щодо розробки математичного апарату для розрахунку і побудови ЗЗ системи БВ довільної конфігурації за допомогою методу сфери, що котиться, для діючих енергооб'єктів відповідно до ІЕС 62305-3. Наступним кроком є реалізація розроблених в [11,12] математичних моделей у вигляді програмного комплексу. Головною складністю (проблемою) щодо вказаної реалізації є необхідність побудови в тривимірному просторі поверхонь, які описують зону захисту.

Для побудови поверхні будь-якого об'єкту в просторі існує декілька способів, одним з яких є полігональне моделювання [13-15]. Суть його полягає у тому, що поверхні розбиваються на прості геометричні двомірні примітиви – трикутники. Для побудови поверхні ЗЗ при "обкатуванні" сферою певного радіусу (відповідно до заданого рівня блискавкозахисту) пропонується використати метод побудови полігональної сітки у вигляді набору трикутників, що з'єднують точки моделі об'єкту.

### Мета роботи

Розробка алгоритму для побудови полігональної сітки зон захисту системи блискавковідводів довільної складності.

Виходячи з запропонованого методу, можна сформулювати підхід для формування складної поверхні ЗЗ:

- 1 Виконати побудову полігональної сітки за набором точок координат розташування БВ;
- 2 Визначити вершини БВ на яких спирається сфера при "обкатуванні" та які утворюють трикутники;

3 Програмно реалізувати розроблені алгоритми.

### Побудова полігональної сітки за набором точок координат розташування БВ

Розглянемо основний алгоритм методу побудови спільної зони захисту комплексом блискавковідводів (див. рис. 4).

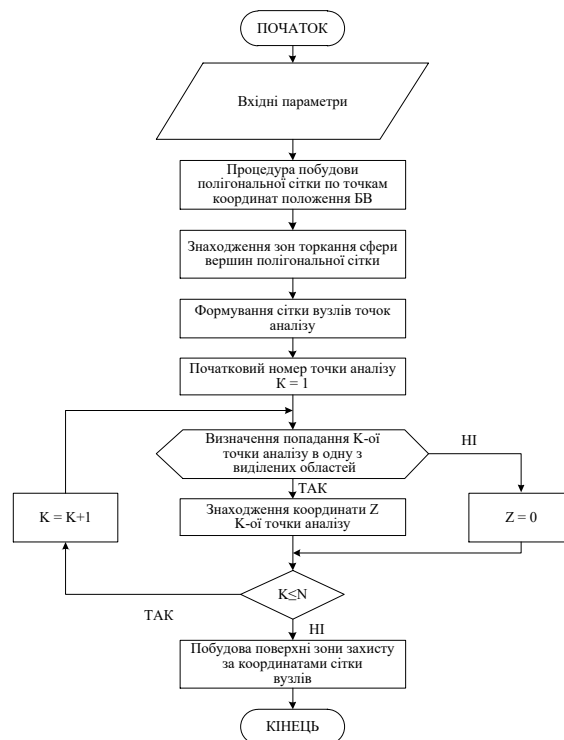


Рис. 4 – Блок-схема А1 загального алгоритму побудови зони захисту

Вхідні параметри для алгоритму:

- кількість БВ, розташованих на схемі об'єкту;
- список БВ, який містить координати розташування та висоти кожного БВ;
- рівень СБЗ, який визначає радіус сфери: 20 м, 30 м, 45 м або 60 м;
- розмір схеми об'єкту, на якій розташовані БВ;
- крок сітки розбиття схеми, що містить вузлові точки аналізу.

Робота основного алгоритму А1 складається зі складових елементів, кожен з яких описує певний етап вирішення задачі побудови спільної ЗЗ:

- побудова полігональної сітки по точкам координат БВ (алгоритм А1.1);
- знаходження зон торкання сфери вершин полігональної сітки з урахуванням заданої надійності захисту (радіусу сфери) (алгоритм А1.2);
- побудова сітки вузлів точок аналізу, які формують поверхню захисту (алгоритм А1.3);
- процедура знаходження координати Z (висоти) для кожної точки аналізу (алгоритм А1.4);

– побудова поверхні захисту по координатам сітки вузлів точок аналізу.

На рис. 5 наведений алгоритм побудови полігональної сітки по точкам координат розташування БВ на схемі об'єкту.

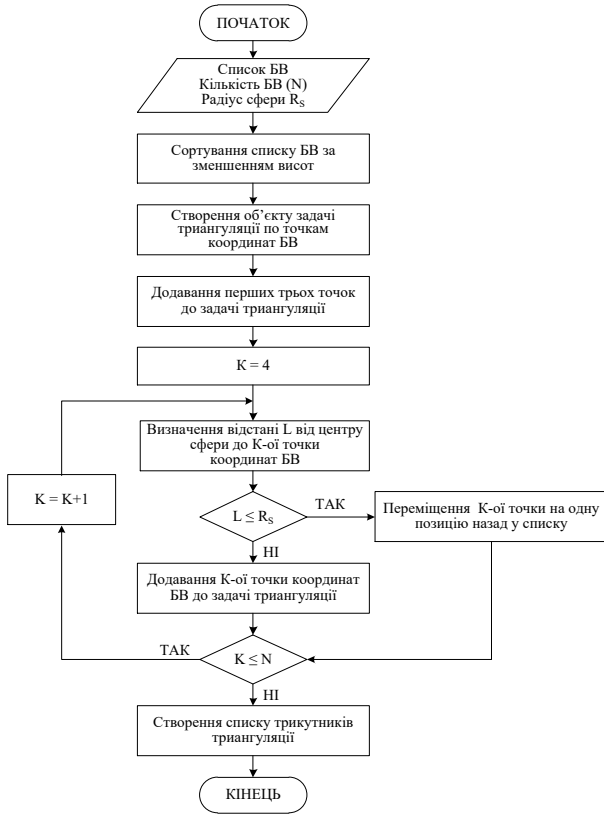


Рис. 5 – Алгоритм А1.1 побудови полігональної сітки по точкам координат БВ

Даний алгоритм дозволяє отримати полігональну сітку у вигляді списку трикутників (полігонів), вершинами яких є координати БВ. Побудова списку трикутників базується на використанні інкрементного алгоритму триангуляції Делоне [13], модифікованого з урахуванням висот БВ.

Приклад побудови триангуляції по довільному набору точок наведений на рис. 6.

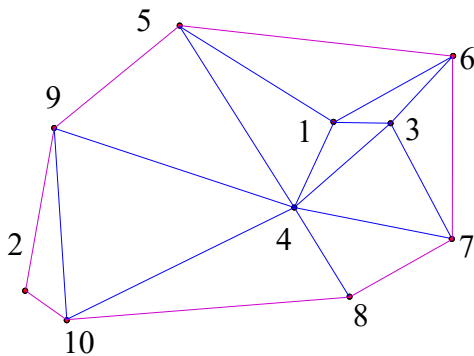


Рис. 6 – Триангуляція довільного набору точок

На рис. 6 синім кольором позначені внутрішні контури полігонів, на вершини яких може спиратися сфера. Бузовим позначений зовнішній контур, який позначає грань, на вершини якої може спиратися сфера, що лежить на ґрунті.

Таким чином, результатом роботи даного алгоритму є список трикутників (полігонів).

**Визначення вершин БВ на яких спірається сфера при "обкатуванні"**

В нашому випадку алгоритм знаходження зон торкання сфери вершин полігональної сітки з урахуванням заданої надійності захисту (радіусу сфери) пропонується розробити на підставі перевірки умови, що сфера спірається на вершини кожного з полігонів полігональної сітки, та обираються тільки ті полігони, для яких ця умова виконана (радіус сфери, що спірається на ці вершини, менший або рівний радіусу сфери заданої надійності). Кожен з полігонів, для якого виконана ця умова, заноситься до списку. Після цього, для всіх полігонів списку, визначаються зовнішні грані, на які може спиратися сфера (див. рис.7).

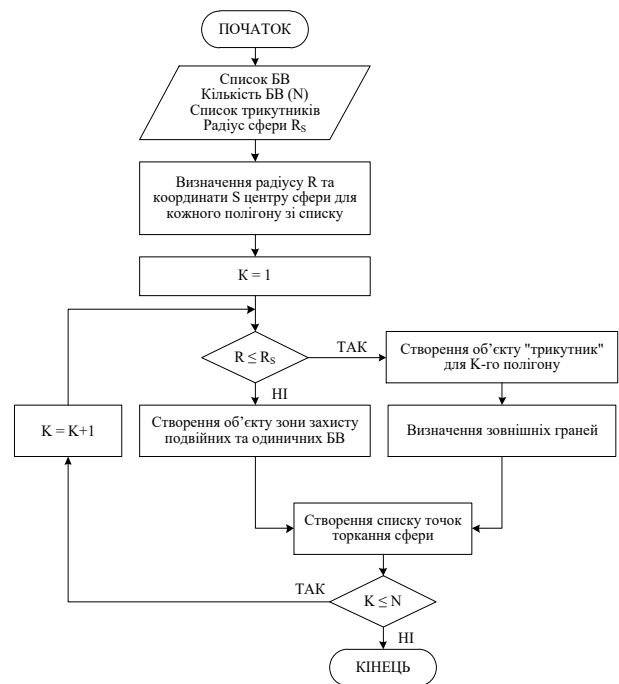


Рис. 7 – Алгоритм А1.2 знаходження зон торкання сфери вершин полігональної сітки

Ті полігони, які не увійшли до списку (для яких умова не виконується) аналізуються на предмет спроможності утворити ЗЗ подвійного БВ. Далі, ті вершини, які не задіяні в утворенні ЗЗ подвійного БВ, утворюють ЗЗ одиничних БВ.

Результат роботи алгоритму А1.2 з довільного набору 10 вершин полігональної сітки наведений на рис.8.

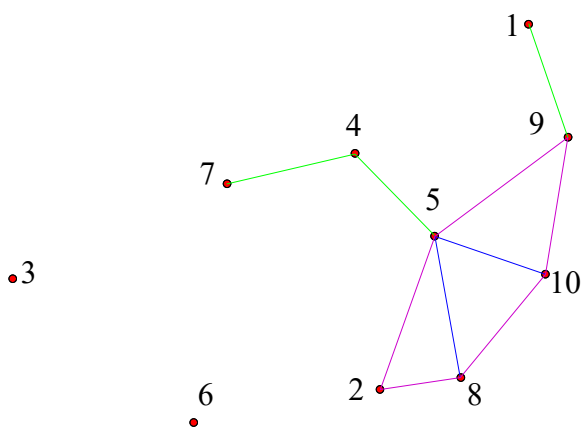


Рис. 8 – Знаходження зон торкання сфери вершин полігональної сітки

На рис. 8 синім кольором позначені внутрішні контури полігонів, на вершини яких спирається сфера заданого радіусу. Бузковим позначений зовнішній контур, який позначає грань, на вершини якої спирається сфера заданого радіусу, яка лежить на ґрунті. Зеленим кольором позначені грані полігонів, котрі утворюють 33 подвійного БВ. Решта вершин, утворюють 33 одиничних БВ.

Наступним кроком є створення списку вузлових точок P з координатами  $X_k, Y_k, Z_k$ , які формуються наступним чином:

$$\begin{aligned} X_k &= X_0 + hx \cdot i, i = 1, 2, \dots N_x, \\ Y_k &= Y_0 + hy \cdot j, j = 1, 2, \dots N_y, \\ Z_k &= Z_0, \end{aligned}$$

де  $X_k, Y_k, Z_k$  – координати k-ої точки аналізу; k – номер точки аналізу;  $hx, hy$  – крок сітки по осях X та Y;  $N_x, N_y$  – кількість точок по осях X та Y.

На рис. 9 наведена геометрична інтерпретація побудови сітки вузлів точок аналізу.

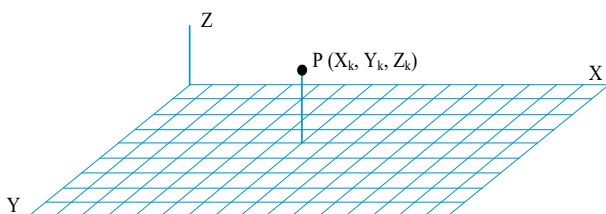


Рис. 9 – Сітка вузлів точок аналізу

На рис. 10 наведений алгоритм знаходження координати  $Z_k$  (висоти) для кожної точки аналізу.

Даний алгоритм дозволяє визначити координату Z для точки сітки вузлів, за якою виконується побудова поверхні спільної ЗЗ. Проходячи по кожній точці сітки вузлів визначається її приналежність одній з областей ЗМ1, ЗМ2 та ЗМ3 у списку об'єктів ЗЗ, де ЗМ1 – ЗЗ одиничного БВ, ЗМ2 – ЗЗ подвійного БВ, ЗМ3 – ЗЗ потрійного БВ.

Координати Z для точок сітки вузлів можна знайти за формулами:

$$\begin{cases} R = \sqrt{Rs^2 - (Rs - H_{MO})^2}, \text{ при } H_{MO} < Rs; \\ R = Rs, \text{ при } H_{MO} \geq Rs, \end{cases} \quad (1)$$

$$Rt = \sqrt{(x_m - x_k)^2 + (y_m - y_k)^2}, \quad (2)$$

$$Z_k = Rs - \sqrt{Rs^2 - (R - Rt)^2}. \quad (3)$$

$$Z_k = Rs - \sqrt{Rs^2 - (x_k - x_3)^2 - (y_k - y_3)^2}. \quad (4)$$

$$Z_k = z_s - \sqrt{Rs^2 - (x_k - x_s)^2 - (y_k - y_s)^2}, \quad (5)$$

де  $x_m, y_m$  – координати розташування МО;  $H_{MO}$  – висота МО;  $Rs$  – радіус сфери;  $x_3, y_3$  – координати центра сфери, що лежить на поверхні землі;  $x_s, y_s$  – координати центра сфери, що лежить на вершинах трьох МО.

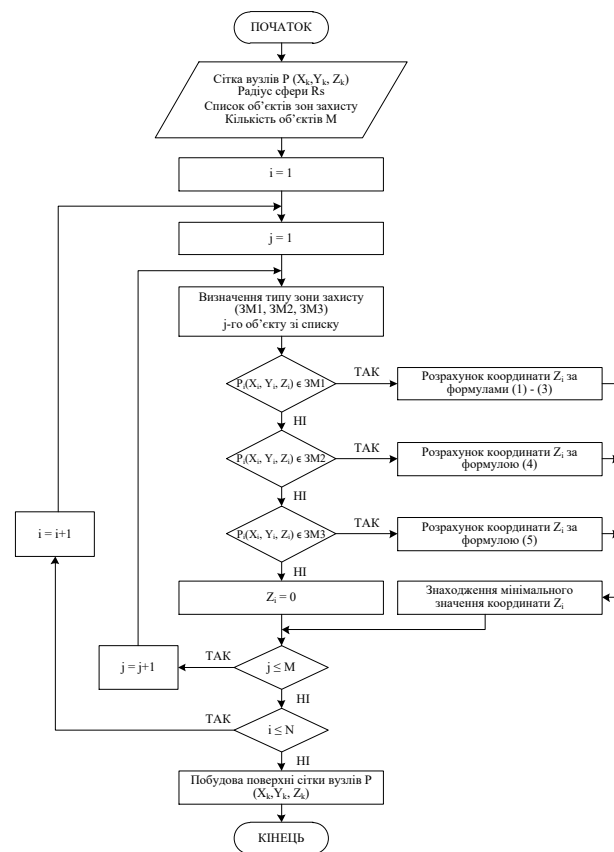


Рис. 10 – Алгоритм А1.4 Процедура знаходження координати Z (висоти) для кожної точки аналізу

При попаданні точки в зону ЗМ1, координата Z визначається за формулами (1-3). Для зони ЗМ2 координата Z визначається за формулою (4). Для зони ЗМ3 координата Z визначається за формулою (5) [12].



Розроблений алгоритм, дозволяє реалізувати розрахунок зони захисту СБЗ як за методами з оновленого стандарту [16], так і за перспективним методом [17], який знаходиться на стадії впровадження.

### Програмна реалізація розроблених алгоритмів.

З використанням отриманого раніше математичного апарату [11,12] для розрахунку ЗЗ двох та більше БВ довільної конфігурації та розташування, а також алгоритму обчислювальної процедури була розроблена комп'ютерна програма розрахунку СБЗ, яка дозволяє аналізувати захищеність об'єктів від прямого удару блискавки.

Вказана комп'ютерна програма складається з трьох логічних частин:

- графічного редактора, котрий дозволяє виконати введення необмеженої кількості будівель, споруд та блискавковідводів довільної форми в реальному масштабі;

- двомірного звіту, за допомогою якого можна проаналізувати результати розрахунку ЗЗ БВ на площині;

- тримірного звіту, за допомогою якого можна представити результати аналізу ЗЗ БВ у просторі.

Розглянемо ці частини детальніше.

Після вводу геометрії об'єкту виконується розрахунок заданої конфігурації будівель та БВ. Для того, щоб виконати аналіз ступеню захищеності об'єктів, розроблено програмний математичний модуль, котрий розраховує координати поверхонь ЗЗ встановлених БВ. Цей модуль дозволяє отримати масив координат поверхні захисту на вказаній висоті аналізу для різних рівнів надійності захисту.

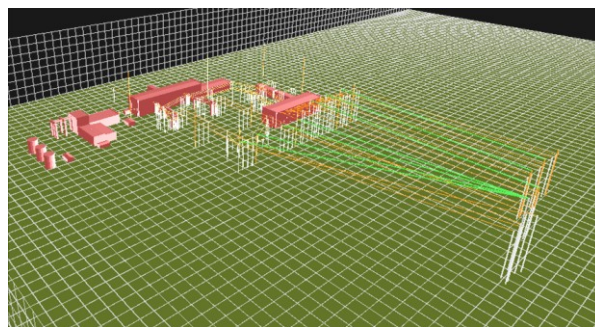
Двомірну візуалізацію виконана для використання результатів розрахунку при проектуванні СБЗ. Імовірна побудова двомірної картини ЗЗ на вказаному рівні для визначення захищеності тих чи інших об'єктів або їх частин. Це особливо зручно у тому випадку, якщо необхідно визначити захищеність комплексу різновисоких будівель та споруд, розташованих на достатньо великій території.

Незважаючи на достатню інформативність двомірної картини аналізу захищеності об'єктів, вона не дає всієї повноти якісної оцінки вигляду поверхонь захисту, їх висоту відносно будівель, взаємних перекриттів та незахищених частин за великої кількості БВ. Програмні засоби дозволяють у 3D схемі отримати більш якісне та повне уявлення ЗЗ при аналізі ступеню захищеності різних об'єктів.

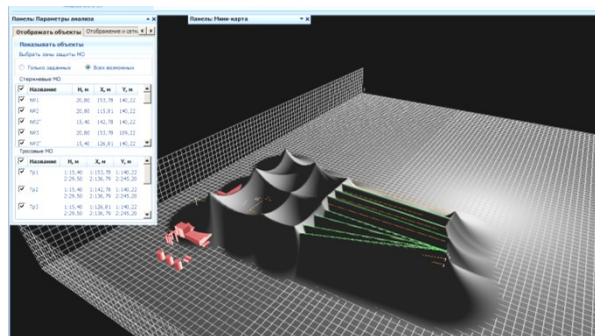
На рис. 11 наведено загальний вигляд підстанції 150 кВ (див. рис. 11, а) та ЗЗ згідно ДСТУ EN 62305 ((див. рис. 11, б).

Тримірну візуалізацію (3D схема) представляє собою об'ємний інтерактивний "світ" з розташованими на ділянці землі, що розглядається, будівлями, БВ та поверхнями ЗЗ. Також

відображаються осі координат, координатна сітка за трьома осями (X, Y, Z) та панель інструментів "Панель: Об'єкти 3D", що містить інформацію про активний об'єкт та основні налаштування відображення 3D схеми. У 3D схемі реалізовано можливість вибору об'єкту за допомогою "миші", обертання навкруги обраного об'єкту, пересування схемою за допомогою клавіатури уздовж головних осей координат, зміна кута огляду, а також обертання відносно будь-якої з трьох осей координат.



а)



б)

Рис. 11 – Тримірне відображення зон захисту блискавковідводів за допомогою розробленої комп'ютерної програми: модель енергооб'єкту та розрахована зона захисту

Розроблений програмний продукт знайшов своє застосування при модернізації існуючих систем блискавкозахисту діючих енергетичних об'єктів України: АЕС, ТЕС, магістральних підстанцій класом напруги 220-750 кВ та регіональних підстанцій класом напруги 35-150 кВ.

### Висновки

Розроблено алгоритм для побудови полігональної сітки зон захисту системи блискавковідводів довільної складності, що дозволяє реалізувати електрогеометричний метод сфери, що котиться, для оцінки захищеності електричних станцій та підстанцій від прямого удару блискавки.

Використання методу триангуляції Делоне дозволило реалізувати виділення вершин блискавковідводів, на які спирається сфера при

"обкатуванні", з метою утворення примітивів у вигляді трикутників з подальшим поєднанням їх у полігональну сітку.

Виконано програмну реалізацію математичної моделі та розроблених алгоритмів обчислювальних процедур у вигляді програмного комплексу LiGro. Розроблене програмне забезпечення дозволяє реалізувати експериментально-розрахунковий спосіб аналізу системи блискавкозахисту діючих електричних станцій та підстанцій України на відповідність сучасному міжнародному стандарту ІЕС 62305.

#### Список літератури

1. *Аналіз сучасного зарубіжного та вітчизняного досвіду влаштування систем блискавкозахисту об'єктів електричних мереж*. К.: НЕК "УКРЕНЕРГО", 2012. 75 с.
2. Holle R. L., Cooper M. A. Overview of lightning injuries around the World. *The 11th Asia-Pacific international conference on lightning*. June 12–14, Hong Kong, China, 2019, pp. 1-5.
3. *Guidelines for Installation of Lightning Protection Systems for Buildings and Structures (RD 34.21.122–87)*. Moskva, Energoatomizdat, 1989, 56 p.
4. State standard of Ukraine В V.2.5-38:2008 Engineering equipment of buildings and structures. Lightning protection of buildings and structures. Kyiv, DNDPVTI Energoperspectyva, 2008, 54 p.
5. 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, P. 66-70. doi: 10.20998/2074-272X.2020.5.10.
6. State standard of Ukraine EN 62305:2012 Protection against lightning. (IEC 62305: 2011, IDT). Kyiv: State Standard of Ukraine, 2012, 419 p.
7. 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, P. 372-382.
8. Komarov V. I. To the question of designing an external lightning protection system by the rolling sphere method. *Naukovyi oghlad*, 2014, No 3(4), P. 100-105.
9. 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, P. 562-566.
10. Petcharaks N. Lightning protection zone in substation using mast. *KKU Engineering Journal*, 2013, No 40(1), P. 11-20.
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), P. 100-104.
12. Koliushko D. G., Istomin O. Ye., Rudenko S. S., Kiprych S. V. Mathematical model of the protection zone during an arbitrary configuration of the air-termination rods location. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2020, № 1, P. 3-9. doi: 10.15407/techne2020.01.003.
13. Lee D. T., Schachter B. J. Two Algorithms for Constructing a Delaunay Triangulation. *Int. J. Computer Information Sci.* 1980, no 9, P. 219-242.

14. Okabe A., Boots B., Sugihara K. *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. New York: Wiley, 1992.
15. Preparata F. R. and Shamos M. I. *Computational Geometry: An Introduction*. NY: Springer-Verlag, 1985.
16. ДСТУ EN 62305-3:2021 Блискавкозахист. Частина 3. Фізичні пошкодження будівель (споруд) та небезпека для життя. Київ: Держстандарт України, 2022, 127 р.
17. D'Alessandro F. New Approach for Lightning Protection of Substations. *IEEE 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, Denpasar, Indonesia. 2019. P. 001-007. doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011036.

#### References (transliterated)

1. Analysis of modern foreign and domestic experience in installing lightning protection systems for electrical network facilities. K. NEK "UKRENERGO". 2012. 75 p.
2. Holle R. L., Cooper M. A. Overview of lightning injuries around the World. *In: The 11th Asia-Pacific international conference on lightning*. June 12–14, Hong Kong, China, 2019, pp. 1-5.
3. *Guidelines for Installation of Lightning Protection Systems for Buildings and Structures (RD 34.21.122–87)*. Moskva, Energoatomizdat, 1989, 56 p.
4. State standard of Ukraine В V.2.5-38:2008 Engineering equipment of buildings and structures. Lightning protection of buildings and structures. Kyiv, DNDPVTI Energoperspectyva, 2008, 54 p.
5. 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: 10.20998/2074-272X.2020.5.10.
6. State standard of Ukraine EN 62305:2012 Protection against lightning. (IEC 62305: 2011, IDT). Kyiv: State Standard of Ukraine, 2012, 419 p.
7. 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.
8. Komarov V. I. To the question of designing an external lightning protection system by the rolling sphere method. *Naukovyi oghlad*, 2014, No 3(4), pp. 100-105.
9. 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.
10. Petcharaks N. Lightning protection zone in substation using mast. *KKU Engineering Journal*, 2013, No 40(1), pp. 11-20.
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. Koliushko D. G., Istomin O. Ye., Rudenko S. S., Kiprych S. V. Mathematical model of the protection zone during an arbitrary configuration of the air-termination rods location. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2020, 1, pp. 3-9, doi: 10.15407/techne2020.01.003.
13. Lee D. T., Schachter B. J. Two Algorithms for Constructing a Delaunay Triangulation. *Int. J. Computer Information Sci.*, 1980, no 9, pp. 219-242.

14. Okabe A., Boots B., Sugihara K. *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. New York. Wiley, 1992.
15. Preparata F. R. and Shamos M. I. *Computational Geometry: An Introduction*. NY. Springer-Verlag, 1985.
16. State standard of Ukraine DSTU EN 62305-3:2021 Protection against lightning. Part 3. Physical damage to buildings (structures) and danger to life. (Kyiv: State Standard of Ukraine, 2022, 127 p.
17. D'Alessandro F. New Approach for Lightning Protection of Substations. *IEEE 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, Denpasar, Indonesia, 2019, pp. 001-007, doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011036.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Коліушко Денис Георгійович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**Denis Koliushko** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher, Senior researcher of the Department of Automated electromechanics systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0003-3112-4260; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**Істомін Олександр Євгенійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О.О. Морозова, м. Харків, Україна; e-mail: a.e.istomin@gmail.com

**Oleksandr Istomin** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Docent of the department of Information Technologies and Systems of Wheeled and Tracked Vehicles named after O.O. Morozov, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 000-0002-5709-6459; e-mail: a.e.istomin@gmail.com

**Руденко Сергій Сергійович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**Serhii Rudenko** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0002-2544-1545, e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**Кіпріч Світлана Вікторівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**Svitlana Kiprych** – Researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0002-1925-2596, e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**Глебов Олег Юрійович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**Glebov Oleg** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0003-0215-177X, e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

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

Коліушко Д. Г., Істомін О. Є., Руденко С. С., Кіпріч С. В., Глебов О. Ю. Розробка алгоритму обчислювальної процедури для розрахунку зон захисту блискавковідводів за міжнародним стандартом ІЕС 62305. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 4 (18). С. 90-97. doi:10.20998/2413-4295.2023.04.13.

*Please cite this article as:*

Koliushko D., Istomin O., Rudenko S., Kiprych S., Glebov O. Development of the calculation procedure algorithm for the calculation of lightning rods protection zones according to the international standard IEC 62305. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 4(18), pp. 90-97, doi:10.20998/2413-4295.2023.04.13.

*Надійшла (received) 07.10.2023  
Прийнята (accepted) 18.11.2023*