

**А.О. КУКСОВ**, бакалавр, НТУ «ХПИ»;  
**О.О. ПЕТКОВ**, докт. техн. наук, с.н.с., НТУ "ХПИ"

### ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЛУЧЕННЯ РОЗРЯДУ ДОВГОЇ ІСКРИ В ТОЧКИ ПЛОЩИНИ В НЕОДНОРІДНОМУ ПОЛІ

У статті запропонована двокрокова імітаційна модель влучення розряду довгої іскри в площину. Підтверджено адекватність розробленої моделі. Наведено результати чисельного імітаційного моделювання імовірнісного процесу влучення довгої іскри в площину. Здійснено порівняння результатів моделювання щільності розподілу точок ураження з даними експерименту.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, електричний розряд, щільність розподілу

**Постановка проблеми.** В результаті стрімкого розвитку електротехніки та електроенергетики, оснащення високочутливою електронікою різного обладнання та зростання його ціни все більш гостро постає питання надійності захисту встановленого обладнання від ураження блискавкою, яка являє собою багатоступінчатий розряд довгої іскри в атмосфері. Одним з аспектів забезпечення надійності роботи заглибленого обладнання, розташованого безпосередньо під поверхнею ґрунту (обладнання складів, комунікацій і т.п.), є вивчення закономірностей розподілу точок ураження фінальним розрядом блискавки. Для визначення розподілу ймовірностей влучення довгої іскри в площину в лабораторних умовах, необхідні значні витрати ресурсів. Останнім часом, з розвитком комп'ютерної техніки, все більше уваги приділяють розрахунковими моделями, які потребують менше часових і матеріальних ресурсів, а також дають можливість імітувати широкий діапазон зміни параметрів розряду довгої іскри.

**Аналіз публікацій.** Розробка моделей ураження об'єктів блискавкою, необхідна для дослідження надійності систем блискавкозахисту, але, в силу складності процесу, в теперішній час немає моделі, яка в повному об'ємі достовірно описувала б розподіл точок ураження площини довгою іскрою. Даному напрямку присвячена низка досліджень.

В [1] досліджувався розподіл точок ураження площини розрядом довгої іскри в розрядному проміжку довжиною 5 м.

Отримані результати були використані для вивчення захисних властивостей стрижневих блискавковідводів.

В роботі [2] наведено результати експериментальних даних по статистичному розподілу точок ураження заземленої площини в системі стрижень-площина у закритому приміщенні. При обробці даних була визначена кількість точок ураження для кожного з секторів досліджуваної зони площини. Експеримент проводився при позитивній полярності стрижня, максимальна напруга на виході ГІН не перевищує 800 кВ.

В [3] аналізуються експериментальні дані по ураженню заземленої площини та розташованих на ній об'єктів електричним розрядом з максимальним значенням напруги 1,2 МВ та довжиною розрядного проміжку – 3 м. Експерименти проводилися на відкритому просторі.

В [4] розглянуто статистичну модель розряду блискавки на об'єкт-стрижень, який розташований на нескінченному прямому провіднику. Модель має двоступінчатий характер. Показано залежність ймовірності ураження стрижня від величини півінтервалу горизонтального зміщення розряду. Моделювання проводилося при висоті початку руху розряду  $H = 10$  м та висоті об'єкта-стрижня  $h = 2$  м. Дана модель передбачає випадковість значень кута руху розряду та дає оцінку процесу ураження об'єкта-стрижня у вигляді імовірності ураження.

Як показує проведений аналіз, останнім часом, значна частина досліджень в галузі блискавкозахисту направлена на формування набору експериментальних даних по ураженню довгою іскрою площини та розташованих на ній об'єктів. Отримані результати дозволяють удосконалювати розроблені моделі ураження площини довгою іскрою та перевіряти адекватність моделей експериментальним даним.

**Мета роботи.** Розробка двокрокової моделі влучення розряду довгої іскри в площину та імітаційне моделювання щільності розподілу точок ураження площини довгою іскрою.

**Результати дослідження.** Розглянемо двокрокову модель ураження площини  $Q$  розрядом довгої іскри. На першому кроці (дивись рисунок 1) розряд рухається прямолінійно з початкової точки  $m$  в напрямку, який визначається випадковими значеннями кутів  $\theta_1$  і  $\alpha_1$

Довжина розряду на першому кроці фіксована і менша довжини розрядного проміжку  $R_1 < H_1$ . Величина розрядного проміжку приймається постійною.

Випадкові кути мають рівномірний розподіл з такими щільностями:

$$f(\theta_1) = \begin{cases} \frac{1}{\theta_{1\max}}, & \text{при } \theta_1 \in [0; \theta_{1\max}), \\ 0, & \text{при } \theta_1 \notin [0; \theta_{1\max}). \end{cases} \quad (1)$$

$$f(\alpha_1) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & \text{при } \alpha_1 \in [0; 2\pi), \\ 0, & \text{при } \alpha_1 \notin [0; 2\pi). \end{cases} \quad (2)$$

Кінцева точка руху іскри на першому кроці  $T_1$  має проекцію  $O_1$  на площину  $Q$  з полярними координатами  $\varphi = \alpha_1$  та  $\rho = r_1$  в системі з віссю  $OX$ , і декартові координати в системі  $XYZ$ :  $X = x_1$ ,  $Y = y_1$ ,  $Z = 0$ . Як видно із рисунка 1,  $Z$ -координата кінцевої точки руху  $T_1$  дорівнює:  $z_1 = H_1 - Z_0$ , де  $Z_0$  – величина зміщення розряду на першому кроці вздовж осі  $OZ$ .

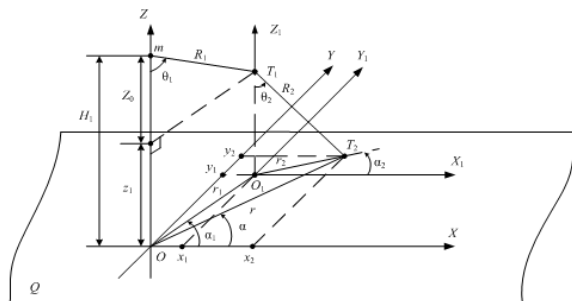


Рис. 1 – Ураження площини розрядом довгої іскри

На другому кроці розряд рухається також прямолінійно з точки  $T_1$  в напрямку, який визначається випадковими значеннями кутів  $\alpha_2$  та  $\theta_2$  до ураження площини  $Q$ . Випадкові кути мають рівномірний розподіл з такими щільностями:

$$f(\theta_2) = \begin{cases} \frac{1}{\theta_{2\max}}, & \text{при } \theta_2 \in [0; \theta_{2\max}), \\ 0, & \text{при } \theta_2 \notin [0; \theta_{2\max}). \end{cases} \quad (3)$$

$$f(\alpha_2) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & \text{при } \alpha_2 \in [0; 2\pi), \\ 0, & \text{при } \alpha_2 \notin [0; 2\pi). \end{cases} \quad (4)$$

Максимальні значення кутів  $\theta_{1\max}$  та  $\theta_{2\max}$  в (1) та (3) вибираються з інтервалу  $[0, \pi/2]$

Кінцева точка руху розряду на другому кроці  $T_2$  має полярні координати  $\varphi = \alpha_2$  та  $\rho = r_2$  в системі з віссю  $O_1X_1$ , і декартові координати в системі  $XYZ$ :  $X = x_2$ ,  $Y = y_2$ ,  $Z = 0$ .

З рисунка 1 висота  $z_1$  та полярний радіус  $r_1$  кінцевої точки першого кроку  $T_1$  визначаються за співвідношеннями (в системі координат  $XYZ$ ):

$$z_1 = H_1 - R_1 \cos(\theta_1), \quad (5)$$

$$r_1 = R_1 \sin(\theta_1), \quad (6)$$

Полярний радіус на другому кроці  $r_2$  з рисунка 1 визначається як (в системі координат  $X_1Y_1Z_1$ ):

$$r_2 = z_1 \operatorname{tg}(\theta_2), \quad (7)$$

Тоді, виходячи з того, що  $H_1$  і  $R_1$  фіксовані величини, а  $\theta_1$  випадкова величина розподілена за (1) та використовуючи методику наведену в [5], можемо визначити щільність розподілу  $z_1$  і  $r_1$ :

$$g(z_1) = \frac{1}{\theta_{1\max} \sqrt{R_1^2 - (H_1 - z_1)^2}}, \quad (8)$$

$$g(r_1) = \frac{1}{\theta_{1\max} \sqrt{R_1^2 - r_1^2}}, \quad (9)$$

Для цілей аналізу будемо рахувати, що на другому кроці висота  $z_1$  є фіксованою, а  $\theta_2$  випадкова величина розподілена за (3). Тоді, використовуючи методику з [5], знайдемо щільність розподілу  $r_2$  у вигляді:

$$g(r_2) = \frac{z_1}{\theta_{2\max}(z_1^2 + r_2^2)}, \quad (10)$$

Для проведення імітаційного моделювання ураження площини розрядом довгої іскри за двокроковою моделлю, була розроблена комп'ютерна програма в середовищі Excel з використанням Visual Basic for Application. Для тестування програми було проведено порівняння результатів розрахунку за аналітичними моделями з результатами імітаційного моделювання (показано на рис. 2 - рис. 4). З рис. 2 - рис. 4 видно, що результати розрахунків за аналітичними моделями (8), (9), (10), статистично співпадають з результатами чисельного імітаційного моделювання. Це дає підстави вважати, що розроблена програма адекватно описує імовірнісний характер зміни параметрів запропонованої моделі роздільно на кожному кроці.

Блок-схема програми наведена на рисунку 5. На початку роботи з програмою, користувач задає фіксовані величини та максимальні значення кутів  $\alpha_1, \alpha_2, \theta_1, \theta_2$ .

Після введення кількості імітувань розрядів, програма генерує значення випадкових величин та розраховує параметри розрядного проміжку  $z_1, r_1, r_2$ .

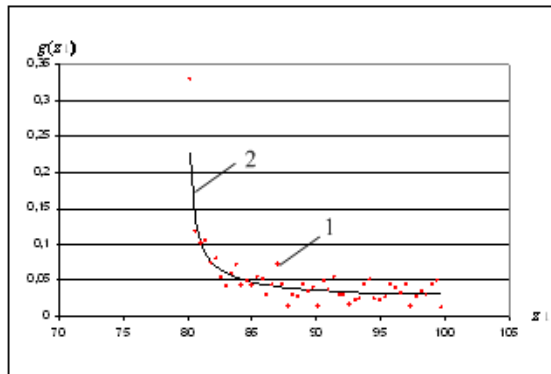


Рис. 2 – Графік щільності розподілу  $z_1$  при  $R_1 = 20$  м,  $H_1 = 100$  м при  $\theta_{1\max} = \frac{\pi}{2}$ : 1 – чисельне імітаційне моделювання; 2 – аналітична модель

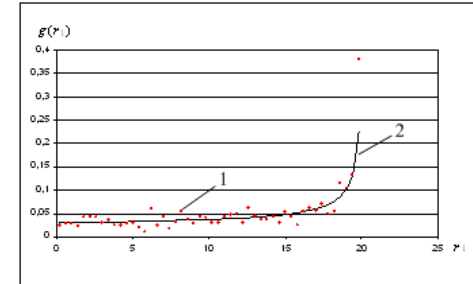


Рис. 3 – Графік щільності розподілу  $r_1$  при  $R_1 = 20$  м,  $H_1 = 100$  м при  $\theta_{1\max} = \frac{\pi}{2}$ : 1 – чисельне імітаційне моделювання; 2 – аналітична модель

На завершальному етапі формуються данні по ураженню ділянок площини та будується графік щільності розподілу точок ураження, а також розраховується середньоквадратичне відхилення (СКВ) отриманих розрахункових даних від експериментальних.

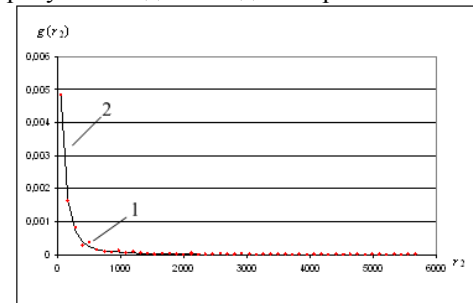


Рис. 4 – Графік щільності розподілу  $r_2$  при  $R_1 = 20$  м,  $H_1 = 100$  м при  $\theta_{1\max} = \frac{\pi}{2}$ : 1 – чисельне імітаційне моделювання; 2 – аналітична модель

В якості експериментальних даних були використані дані по ураженню площини розрядом довгої іскри, отримані на базі високовольтного електрофізичного стенду ГІН-1,2 (НДПКІ «Молнія»). При обробці експериментальних даних, була визначена щільність розподілу точок ураження в залежності від полярного радіуса  $r$  [2].

З допомогою розробленої програми була проведена серія дослідів, з метою визначення параметрів моделі при яких спостерігається мінімальне СКВ даних чисельного імітаційного моделювання від даних експерименту. Графіки залежності СКВ від  $\theta_{1\max}, \theta_{2\max}$  та  $R_1$  наведені на рисунку 6, 7 та 8. При обробці результатів було визначено,

що при  $R_1 = 0,8$  м,  $\theta_{1\max} = 10,6^\circ$ ,  $\theta_{2\max} = 20,4^\circ$  СКВ приймає мінімальне значення.

З рисунка 1 полярний радіус точки ураження площини  $T_2$  визначається як:

$$r = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, \quad (14)$$

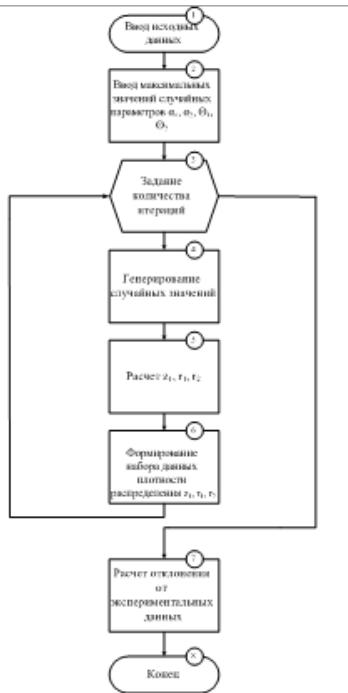


Рис. 5 – Блок - схема програми

На рисунку 9 показано порівняння щільність розподілу  $g(r)$ , визначених за результатам імітаційного моделювання та даними експерименту. З рисунка 9 видно, що графік, побудований за результатами імітаційного моделювання, має подібний характер до графіка за результатами експерименту. СКВ результатів імітаційного моделювання від експериментальних даних склало 15.

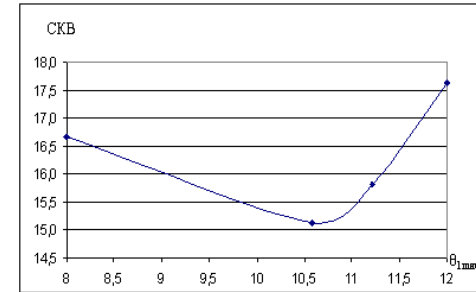


Рис. 6 – Залежність СКВ від  $\theta_{1\max}$  при  $R_1 = 0,8$ ,  $\theta_{2\max} = 20,4^\circ$

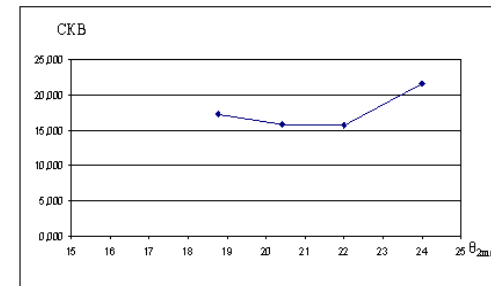


Рис. 7 – Залежність СКВ від  $\theta_{2\max}$  при  $R_1 = 0,8$ ,  $\theta_{1\max} = 10,6^\circ$

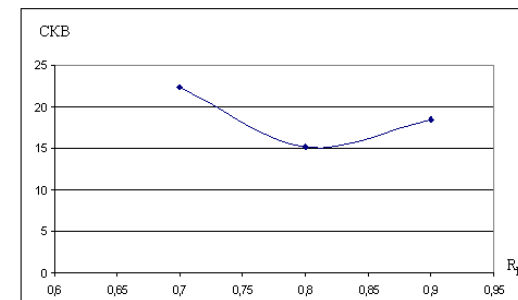


Рис. 8 – Залежність СКВ від  $R_1$  при  $\theta_{1\max} = 10,6^\circ$ ,  $\theta_{2\max} = 20,4^\circ$

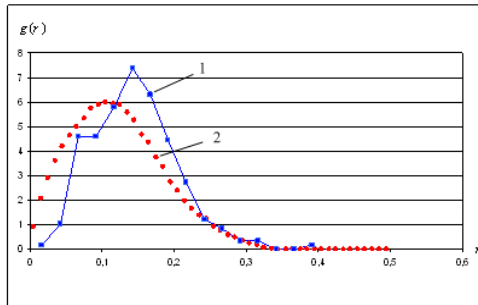


Рис. 9 – Графіки щільності розподілу  $r$ : 1 – за результатами експерименту; 2 – за результатами чисельного імітаційного моделювання

### Висновки:

1. Запропонована імітаційна двокрокова модель ураження площини розрядом довгої іскри.
2. Розроблена комп'ютерна програма для чисельного імітаційного моделювання.
3. Визначені параметри імітаційної моделі при яких середньоквадратичне відхилення даних чисельного імітаційного моделювання від даних експерименту мінімальне та не перевищує 15.

Матеріали статті будуть використані при подальшій розробці імітаційних моделей ураження довгою іскрою різних об'єктів.

**Список джерел інформації:** 1. Волкова О.В. Поражаемость искровым разрядом стержня на плоскости / О.В. Волкова, А.Р. Корявин // Электричество. – 1991. – №5. – С. 52 – 55. 2. Копиушко Г.М. Экспериментальное исследование поражения плоскости длинной искрой / Г.М. Копиушко, П.Н. Мельников, О.С. Недзельский, А.А. Петков, С.С. Руденко, А.Ю. Чернухин // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ "ХПІ". – 2012. – №21. – С. 146 – 153. 3. Баранов М.И. Экспериментальные исследования поражения заземленной плоскости и размещенных на ней объектов электрическим разрядом в длинном промежутке / М.И. Баранов, В.И. Доценко, В.М. Зиньковский, Г.М. Копиушко, О.С. Недзельский, А.А. Петков, Е.Г. Понуждаева, С.С. Руденко, В.Л. Цехмистро // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ "ХПІ". – 2013. – №27. – С. 11 – 20. 4. Копиушко Д.Г. Статистическая модель поражения одиночного стержня разрядом молнии / Д.Г. Копиушко, А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ "ХПІ". – 2011. – №49. – С. 103 – 107. 5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : «Наука», 1969. – 576 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Volkova O.V. Korjavin A.R. Porazhaemost' iskrovym razrjadom sterzhnja na ploskosti. Jelektrichestvo. 1991. No 5. 52 – 55 Print. 2. Koliushko G.M. P.N. Mel'nikov, O.S. Nedzel'skij, A.A. Petkov, S.S. Rudenko, A.Ju. Jeksperimental'noe issledovanie porazhenija ploskosti dlinnoj iskroj *Visnik Nacional'nogo tehcnogo universitetu "Harkivs'kij politehnicnij institut". Zbirnik naukovih prac'. Tematicnij vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug.* 2012. No 21. 146 – 153. Print 3. Baranov M.I. Docenko V.I., Zin'kovskij V.M., Koliushko G.M., Nedzel'skij O.S., Petkov A.A., Ponuzhdaeva E.G., Rudenko S.S., Cehmistro V.L. Jeksperimental'nye issledovanija porazhenija zazemlennoj ploskosti i razmeshennyh na nej ob'ektov jelektricheskim razrjadom v dlinnom promezhtke. *Visnik Nacional'nogo tehcnogo universitetu "Harkivs'kij politehnicnij institut". Zbirnik naukovih prac'. Tematicnij vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug.* 2013. No 27. 11 – 20. Print 4. Koliushko D.G., Petkov A.A. Statisticheskaja model' porazhenija odinochnogo sterzhnja razrjadom molnii *Visnik Nacional'nogo tehcnogo universitetu "Harkivs'kij politehnicnij institut". Zbirnik naukovih prac'. Tematicnij vipusk: Tehnika i elektrofizika visokih naprug.* 2011. No 49. 103 – 107. Print 5. Ventcel' E.S. Teorija verojatnostej. Moscow : «Nauka», 1969.

Надійшла (received) 05.02.2012