

УДК 551.594

А.А. ПЕТКОВ**ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПОРАЖЕНИЙ МОЛНИЕЙ
НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ СТЕРЖНЕВОГО ТИПА**

В работе показано, что существующая методика определения числа поражений наземных объектов стержневого типа, которая представлена в нормативных документах по молниезащите, требует корректировки. Предложена многошаговая модель поражения наземного стержневого объекта, позволяющая определить вероятность поражения стержня в зависимости от расстояния между осями стержня и высоковольтного электрода. Получены данные для определения функции распределения вероятности поражения стержневого объекта при отношении высоты расположения высоковольтного электрода к высоте стержневого объекта равном $H/h = 10$ и $H/h = 20$. Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований поражения длинной искрой различных объектов, расположенных на плоской поверхности.

Ключевые слова: математическая модель, вероятность поражения, доверительный интервал, разряд длинной искры, функция распределения, стержневой объект.

О.О. ПЕТКОВ**ІМОВІРНІСНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЧИСЛА УРАЖЕНЬ БЛИСКАВКОЮ
НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ СТРИЖНЕВОГО ТИПУ**

У роботі показано, що існуюча методика визначення числа уражень наземних об'єктів стрижневого типу, яка представлена в нормативних документах з блискавкозахисту, потребує коректування. Запропоновано багатокрокову модель ураження наземного стрижневого об'єкта, яка дозволяє визначити ймовірність ураження стрижня залежно від відстані між осями стрижня й высоковольтного електрода. Отримано дані для визначення функції розподілу ймовірності ураження стрижневого об'єкта при відношенні висоти розташування высоковольтного електрода до висоти стрижневого об'єкта рівному $H/h = 10$ та $H/h = 20$. Матеріали роботи можуть бути використані для подальших досліджень ураження довгою іскрою різних об'єктів, розташованих на плоскій поверхні.

Ключові слова: математична модель, ймовірність ураження, довірчий інтервал, розряд довгої іскри, функція розподілу, стрижневий об'єкт.

А.А. ПЕТКОВ**PROBABILISTIC DETERMINATION OF THE NUMBER OF LIGHTNING DEFEAT
IN GROUND-BASED ROD-TYPE OBJECTS**

Purpose. Improvement of the procedure for determining the expected number of lightning lesions of rod-type objects in the probabilistic formulation of the problem. *Methodology.* Mathematical modeling of the probability of affection of a rod object located on the surface of a ground, using a multi-step model of motion of a long spark, the variational coefficients of which are determined from the results of physical experiments. *Description of data* by methods of probability theory and mathematical statistics. *Results.* The probability distribution functions of the impact of the core object are determined. It is shown that the existing norms for determining the lightning capture zone give an underestimate. *Originality.* The method of determining the zone of capture of lightning by objects of the rod type has been further developed. *Practical value.* Based on the calculations carried out, it is proposed to correct the existing regulatory documents on the protection of buildings and structures against direct lightning.

Keywords: mathematical model, probability of defeat, confidence interval, long spark discharge, distribution function, core object.

Введение

Согласно ряду национальных и международных нормативных документов целесообразность и уровень защиты от прямого поражения молнией наземных объектов определяются в первую очередь ожидаемым количеством поражений этих объектов молнией в течение года. Определение ожидаемого количества поражений базируется на том, что каждый объект «стягивает» разряды молнии с некоторого объема окружающего его пространства («область захвата»).

В международном нормативном документе [1], ожидаемое количество поражений сосредоточенных объектов стержневого типа (дымовые трубы, башни и

т.п. см. рис. 1) в течение года N может быть определено по следующей формуле:

$$N = 9 \cdot 10^{-6} \pi h^2 n, \quad (1)$$

где h – высота стержневого объекта, м; n – плотность ударов молнии на 1 км^2 земной поверхности в течение года, определенная по данным метеорологических наблюдений в месте расположения объекта, $1 / (\text{км}^2 \cdot \text{год})$.

Ожидаемое количество поражений N , определенное по (1), основывается на том положении, что стержневой объект «стягивает» разряды молний с некоторого объема пространства, проекция которого на поверхность грунта представляет собой круг («круг

© А.А. Петков, 2018

стягивания») с центром на пересечении с осью стержня и радиусом $r = 3h$.

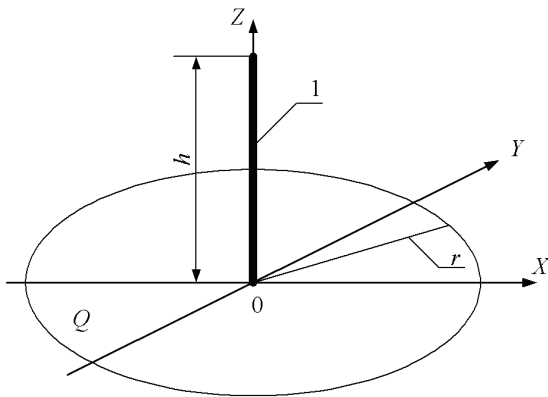


Рисунок 1 – «Круг стягивания» объектов стержневого типа:
1 – стержневой объект

В [2] приведены результаты имитации молнии разрядом длинной искры с высоковольтного электрода на одиночный стержень (см. рис. 2). В работе указывается, что при смещении высоковольтного электрода в горизонтальном направлении вплоть до расстояния между осями высоковольтного электрода и стержня $R = 3,5h$ все разряды длинной искры поражают стержневой объект, а при большем радиусе часть разрядов попадает в землю. Таким образом, на основании указанных данных можем сделать вывод, что радиус «круга стягивания» (см. рис. 1) превышает $r > 3,5h$ для условий описанного эксперимента.

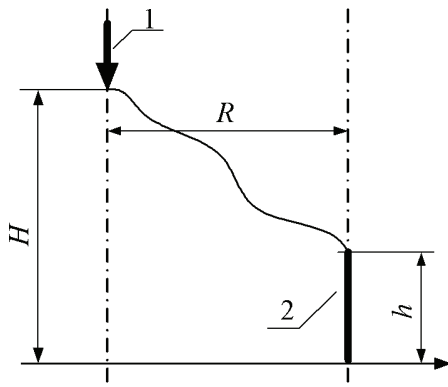


Рисунок 2 – Схема имитационных испытаний поражения стержневого объекта разрядом молнии:
1 – высоковольтный электрод, 2 – стержневой объект

Однако в [3] на основании проведенных имитирующих молнию экспериментов, аналогичных [2], показано, что в ряде случаев ($H = 10$ и 15 м и отношения $H/h = 5$ и 10) вероятность поражения стержня гораздо меньше 1 даже при соосном расположении высоковольтного электрода и стержня.

Приведенные факты показывают несогласованность данных различных источников и являются основой для дальнейших исследований.

Целью работы является усовершенствование процедуры определения ожидаемого количества поражений молнией объектов стержневого типа в вероятностной постановке задачи.

Основные материалы исследований

Зависимость вероятности поражения стержневого объекта от расстояния между осями объекта и высоковольтного электрода, которая была исследована во многих работах, дает оценку единичного акта поражения при условии, что финальный разряд длинной искры, поражающий стержневой объект, развивается с конкретной точки, определяемой условиями эксперимента. В реальной ситуации финальный разряд может развиваться из любой точки пространства, находящейся в «зоне захвата».

Произведем определение вероятности поражения стержневого объекта в предположении, что точки начала финального разряда, поражающего стержневой объект высотой h , равномерно распределены в плоскости, параллельной «кругу стягивания» на высоте H над поверхностью грунта.

Для решения задачи воспользуемся данными результатов испытаний [4], проведенных по схеме, показанной на рис. 2.

Экспериментальные данные [4], которые используются в данной работе, были получены при ограниченном количестве опытов и при увеличении количества разрядов наблюдаемые значения вероятности поражения стержневых объектов p^* могут измениться. Для учета этого факта при дальнейшем рассмотрении для каждого экспериментального значения вероятности поражения стержневых объектов p^* в соответствии с методикой, описанной в [5, 6], был определен доверительный интервал для вероятности поражения стержня (p_1, p_2) при доверительной вероятности $\beta = 0,99$. Графики изменения вероятности поражения стержневых объектов показаны на рис. 3 и рис. 4.

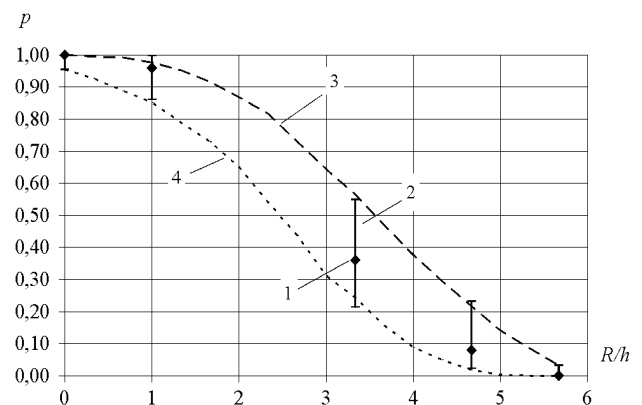


Рисунок 3 – Изменение вероятности поражения стержневых объектов при $h = 0,3$ м и $H = 3$ м в зависимости от расстояния до точки начального движения финального разряда (начала ориентировки длинной искры)

На рисунках обозначено: 1 – наблюдаемые в эксперименте значения вероятности поражения стержневых объектов p^* , 2 – доверительный интервал для

значений вероятности поражения стержневых объектов.

Как видно из рис. 3, при $h = 0,3$ м и $H = 3$ м имеет место поражение стержневого объекта при соотношении $R/h \leq 5,67$. Графики, приведенные на рис. 4, показывают, что при $h = 0,15$ м и $H = 3$ м имеет место поражение стержневого объекта при соотношении $R/h \leq 8,67$.

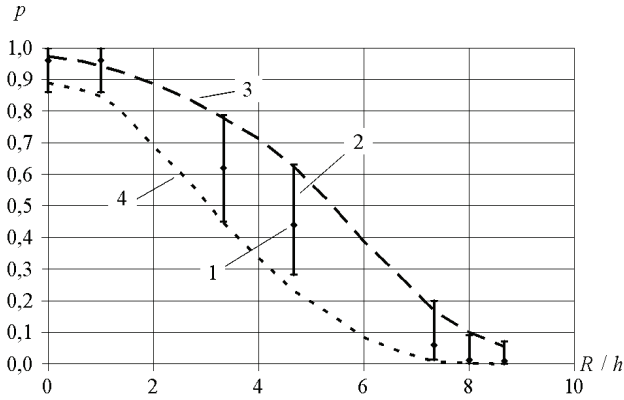


Рисунок 4 – Изменение вероятности поражения стержневых объектов при $h = 0,15$ м и $H = 3$ м в зависимости от расстояния до точки начального движения финального разряда (начала ориентировки длинной искры)

Имеющиеся экспериментальные данные в количественном плане ограничены, а для корректного решения поставленной задачи необходимы промежуточные значения.

Для построения промежуточных точек зависимости (верхняя граница график 3 и нижняя граница график 4) была использована модернизированная многошаговая модель, которая применялась в [7, 8]. Модернизация использованной многошаговой модели, геометрическая интерпретация которой показана на рис. 5, заключалась в учете механизма случайного равномерного движения длинной искры в направлении поражаемого объекта.

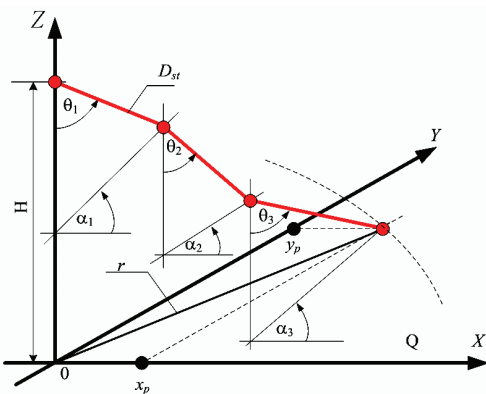


Рисунок 5 – Геометрическая интерпретация многошаговой модели движения длинной искры

Как видно из рис. 5, движение длинной искры на каждом шаге определяется углом движения θ (в вер-

тикальной плоскости) и углом ориентировки α (в горизонтальной плоскости). В модернизированной модели принято, что вероятность появления угла движения θ обратно пропорциональна расстоянию от начала движения искры до поражаемого объекта $\sim 1/D^m$, где m – числовой коэффициент. Модернизированная модель содержит два механизма определения угла движения α . По первому механизму вероятность появления угла α обратно пропорциональна расстоянию от начала движения искры до оси стержневого объекта (см. рис. 6) и определяется исходя из функции распределения угла α (базовый вариант)

$$F(\alpha) = \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha} \frac{d\alpha}{r_{cp}^m}}{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{r_{cp}^m}}, \quad \alpha \in [\alpha_1, \alpha_2]. \quad (2)$$

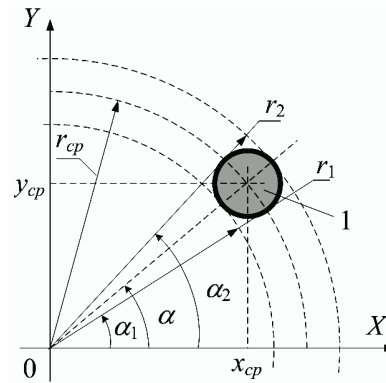


Рисунок 6 – Определение угла ориентировки длинной искры: 1 – проекция стержневого объекта на плоскость XOY

По второму механизму движения длинной искры угол ориентировки α определяется исходя из его равномерного распределения в интервале $[0, 2\pi)$. Физической основой данного механизма может служить случайный характер движения лавин, которые подпитывают длинную искру в процессе ее прорастания.

Учет механизма равномерного распределения угла ориентировки α произведем, используя следующий коэффициент.

$$K_\alpha = N_1 / N_2, \quad (3)$$

где K_α – коэффициент равномерного распределения угла α ; N_1 – число итераций имитационного эксперимента, при которых распределение угла α принималось равномерно распределенным в интервале $[0, 2\pi)$; N_2 – общее число итераций имитационного эксперимента.

Каждая итерация из N_1 реализовывалась в случайном порядке. Генерировалось число S , равномерно распределенное в интервале $[0, 1)$. Если выполнялось условие $S \leq K_\alpha$, то реализовывался механизм случайного угла ориентировки α . В противном случае реализовывался базовый вариант распределения угла ори-

ентировки α .

Таким образом, используя данные промежуточных значений, показанных на рис. 3 и рис. 4, можем построить функцию распределения вероятности поражения стержневого объекта, которая определяет вероятность поражения стержневого объекта разрядом длиной искры в случае, если начальная точка финального разряда располагается в «круге стягивания» $r < r_0$

$$Q(r_0) = \frac{\int_0^{r_0} 2\pi r p(r) dr}{\int_0^{\infty} 2\pi r p(r) dr}, \quad (4)$$

где $p(r)$ – зависимости вероятности поражения стержневого объекта от расстояния между осями стержня и высоковольтного электрода, показанные на рис. 3 и рис. 4.

Результаты проведенных расчетов по (4) показаны на рис. 7 и рис. 8.

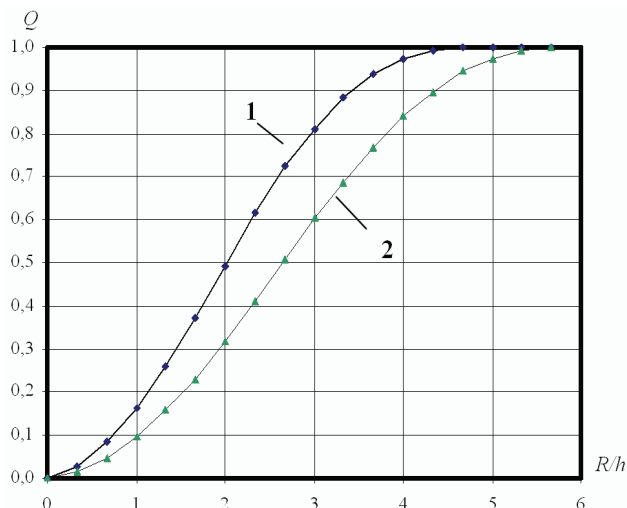


Рисунок 7 – Функция распределения вероятности поражения стержневых объектов при $h = 0,3$ м и $H = 3$ м:
1 – верхнее значение, 2 – нижнее значение

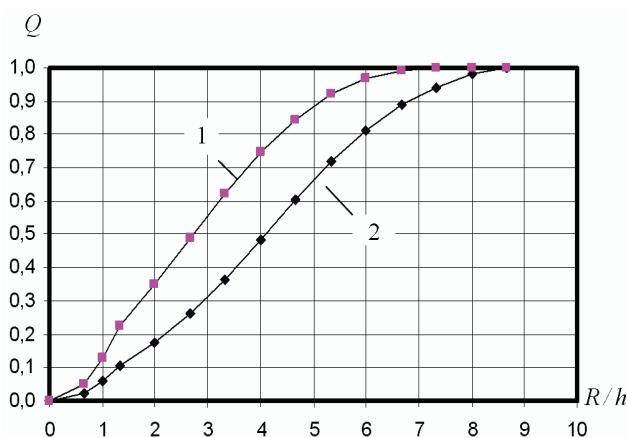


Рисунок 8. Функция распределения вероятности поражения стержневых объектов при $h = 0,15$ м и $H = 3$ м:
1 – верхнее значение, 2 – нижнее значение

Как видно из рисунков, при условиях, определяемых по (1) ($r = 3h$) вероятность захвата молний стержневым объектом находится в диапазоне 0,6 – 0,8 (при $h = 0,3$ м и $H = 3$ м) и 0,31 – 0,56 (при $h = 0,15$ м и $H = 3$ м). Таким образом, существенная часть молний, которые могут поразить объект, не учитывается при расчете по выражению (1).

Понятно, что в работе рассмотрены частные случаи поражения стержневых объектов, однако [1] является обобщающим нормативным документом и должен, каким-либо образом, учитывать и эти частные случаи. Разработчики национального нормативного документа [9], который содержит ту же норму (1), предусмотрели возможность, по желанию заказчика, закладывать при проектировании молниезащиты более жесткие параметры. Предложенные в работе материалы могут служить основанием для их применения.

Выводы. В работе показано, что существующая методика определения числа поражений наземных объектов стержневого типа, которая представлена в нормативных документах по молниезащите, требует корректировки. Предложена многошаговая модель поражения наземного стержневого объекта, позволяющая определить вероятность поражения стержня в зависимости от расстояния между осями стержня и высоковольтного электрода. Получены данные для определения функции распределения вероятности поражения стержневого объекта при отношении высоты расположения высоковольтного электрода к высоте стержневого объекта равном $H/h = 10$ и $H/h = 20$. Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований поражения длиной искрой различных объектов, расположенных на плоской поверхности.

Список литературы:

1. IEC 62305-2, Ed. 1: Protection against lightning – Part 2: Risk management. – IEC, 2004. – 95 p.
2. Кужекин И.П. Молния и молниезащита / И.П. Кужекин, В.П. Ларионов, Е.Н. Прохоров. – М.: Знак, 2003. – 330 с.
3. Александров Г.Н. Об ориентировке канала длинной искры / Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, Э.М. Базелян, Е.С. Садыхова // Электричество. – 1973. – №3. – С. 63-66.
4. 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 и др. // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – №27. – С. 11-20.
5. Korn, G. Mathematical handbook for scientists and engineers / G. Korn, T. Korn. – N.-Y.: McGraw-Hill Book Company, 1968. – 832 p.
6. Hauschild V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik / V. Hauschild, V. Mosch. – Berlin: VEB Verlag Technik, 1984. – 312 s.

7. Петков А.А. Моделирование поражения плоскости разрядом длинной искры с использованием многошаговой модели / А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – №51. – С. 78 – 82.
8. Петков А.А. Моделирование поражения стержня разрядом длинной искры с использованием многошаговой модели / А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – №14. – С. 73-77.
9. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (IEC 62305:2006, NEQ): – Нац. стандарт України. – К.: Мінорегіонбуд України, 2008. – 63 с.

References(transliterated):

1. IEC 62305-2, Ed. 1: Protection against lightning – Part 2: Risk management. IEC, 2004. 95 p.
2. Kuzhekin I.P., Larionov V.P., Prohorov E.N. Molniya i molniezaschita [Lightning and lightning protection]. Moscow: Znack Publ., 2003. 330 p.
3. Aleksandrov G.N., Ivanov V.L., Bazelyan E.M., Sadyhova E.S. Ob orientirovke kanala dlinnoy iskry [On the orientation of the channel of a long spark]. Elektrichestvo. 1973, no. 3. P. 63-66.
4. Baranov M.I., Docenko V.I., Zinkovskiy V.M., Koliushko G.M., Nedzelskiy O.S., Petkov A.A., Ponuzhdaeva E.G., Rudenko S.S., Cehmistro V.L. Eksperimentalnye issledovaniya porazheniya zazemlennoy ploskosti i razmeschennyh na ney obektov elektricheskim razryadom v dlinnom promezhutke [Experimental studies of the destruction of an earthed plane and objects placed on it by an electric discharge in a long gap].

- Visnik NTU "KhPI". Zbirnik naukovih prac. Tematichniy vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltages] Kharkiv, NTU "KhPI", 2013, no.27. P. 11-20.
5. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientists and engineers. N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1968. 832 p.
6. Hauschild V., Mosch V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik. Berlin.: VEB Verlag Technik, 1984. 312 p.
7. Petkov A.A. Modelirovanie porazheniya ploskosti razryadom dlinnoy iskry s ispolzovaniem mnogoshagovoy modeli [Simulation of plane damage by a long spark discharge using a multistep model]. Visnik NTU "KhPI". Zbirnik naukovih prac. Tematichniy vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltages] Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no.51. P. 78-82.
8. Petkov A.A. Modelirovanie porazheniya sterzhnya razryadom dlinnoy iskry s ispolzovaniem mnogoshagovoy modeli [Simulation of rod damage by discharge of a long spark using a multistep model]. Visnik NTU "KhPI". Zbirnik naukovih prac. Tematichniy vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltages] Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no.14. P. 73-77.
9. DSTU B V.2.5-38:2008. Ulashtuvannya bliskavkozahistu budivvel i sporud (IEC 62305:2006, NEQ) [State Standard B V.2.5-38:2008. Device lightning protection of buildings and constructions]. Kyiv, Ministry of Regional Construction Publ., 2008. 63 p.

Поступила (received) 22.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петков Олександр Олександрович (Петков Александр Александрович, Petkov Alexander Alexandrovich) – доктор технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ», професор кафедри інженерної електрофізики; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0101-0089>; e-mail: alexpetkov2014@gmail.com