

Д. Г. КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
А. А. ПЕТКОВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАЗРЯДА МОЛНИИ НА БЕСКОНЕЧНЫЙ ПРЯМОЛИНЕЙНЫЙ ПРОВОДНИК

У роботі запропонована статистична двовимірна модель розряду блискавки на нескінченний прямолінійний провідник. Наведено результати розрахунків імовірності поразки різних ділянок провідника.

In work the statistical two-dimensional model of the lightning stroke on an infinite rectilinear conductor is offered. The calculations results of defeat probability of various conductor sites are given.

Постановка проблемы. Вопросам молниезащиты объектов различного назначения в настоящее время уделяется все более значительное внимание. Это связано, в первую очередь, с опасными, а порой и катастрофическими последствиями поражения молнией объектов, обеспечивающих жизнедеятельность человеческого сообщества. В данный момент отсутствуют средства, позволяющие полностью исключить попадание разряда молнии даже в «защищенные» зоны. Создавшаяся ситуация инициирует разнонаправленные теоретические и экспериментальные исследования в области молниезащиты.

Анализ публикаций. Материалы, проведенные в [1], показывают, что имеют место существенные противоречия между действующей нормативной базой, например [2, 3], и фактическими данными по поражению различных объектов, что характерно для всего периода проведения работ по молниезащите. В работе [4], посвященной использованию вероятностного подхода к вопросу молниезащиты, в частности показано, что к протяженным объектам, размещенным в зоне защиты молниеотводов, декларируемых в нормативных документах, не применимы прогнозы относительно числа их поражений молнией. В работе [5], которая содержит общую схему развития разряда молнии, также указано на недостаточную обоснованность нормативных документов по молниезащите.

Сложность адекватного описания процесса поражения молнией связана, в первую очередь, с тем, что параметры импульса тока молнии имеют вероятностный характер [6], что приводит к различным длинам последнего, поражающего разряда молнии (так называемое расстояние ориентировки или дистанция поражения). Например, для молний, воздействующих на линии электропередачи, имеет место следующий интервал для значений дистанция поражения [7]

$$R = 10 - I^{0,65}, \quad (1)$$

где: R – дистанция поражения (м); I – амплитуда тока (кА).

Для анализа молниезащищенности зданий и сооружений в [7] рекомендован следующий ряд значений $R = 20, 30, 45, 60$. Приведенные данные свиде-

тельствуют, что даже такая важная характеристика молнии, на базе которой строится молниезащита не имеет однозначной трактовки.

Как показывает проведенный анализ, вопросы молниезащиты не имеют законченного рассмотрения и требуют дальнейших разработок по построению моделей поражаемости молнией различных объектов.

Одной из задач такого рода является описание поражения молнией проводящей плоскости, которая в силу симметрии может быть сведена к задаче описания поражения молнией проводящего прямолинейного проводника.

Целью настоящей работы является построение статистической модели разряда молнии на бесконечный прямолинейный проводник.

Материалы и результаты исследований. Рассмотрим двухмерную модель процесса поражения разрядом молнии произвольной точки, расположенной на бесконечной прямой.

Под траекторией разряда молнии условимся понимать отрезок прямой линии, соединяющий две точки плоскости. Введем некоторые определения. Точку, из которой исходит разряд молнии, обозначим т. Н. Точку, в которую приходит разряд молнии, обозначим т. К. Условимся, что протяженность траектории разряда молнии постоянна и равна R (дистанция или радиус поражения). Произвольная точка т. П (точка поражения), принадлежащая отрезку НК всегда поражается разрядом молнии, проходящим между т.Н и т.К.

Поместим т. Н на ось OZ плоскости XOZ , как показано на рис. 1. Обозначим точкой т. М, точку, одновременно принадлежащую оси OX и находящуюся на линии движения разряда молнии, определяемой углом θ (угол движения), отсчитываемого от оси OZ , как показано на рис. 1.

Отметим, что если протяженность траектории молнии (радиус поражения) равна или больше, чем отрезок NM , то точкой поражения будет являться и т. М.

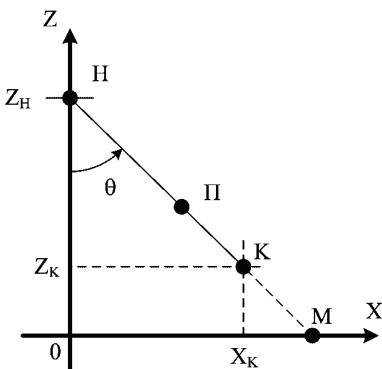


Рисунок 1

Предположим, что разряд может развиваться от т. Н только по направлению к оси OX . Это эквивалентно утверждению, что угол движения θ изменяется в интервале $-\pi/2 < \theta < \pi/2$. Положим, что молния в момент начала разряда представляет собой некоторый заряд Q , помещенный в т. Н, а вдоль оси OX натянута бесконечно тонкий проводящий цилиндр, потенциал которого всегда равен нулю. Тогда условную среднюю напряженность электрического поля E_{NM} между т. Н и т. М, произвольно расположенной на оси OX , определим как разность потенциалов между т. Н и т. М, деленную на длину отрезка NM . Так как при принятых допущени-

ях разность потенциалов между т. Н и т. М всегда постоянна, то напряженность поля определяется только величиной обратно пропорциональной расстоянию от т. Н до т. М, то есть длиной отрезка НМ, равной d_{HM} .

Как известно, направление движения молнии является случайной величиной [1]. Это эквивалентно тому, что случайной величиной является угол движения θ . Рассмотрим два варианта закона распределения случайного угла движения θ .

Вариант 1. Направление движения разряда статистически не зависит от каких-либо факторов (вариант равновероятного движения). Это означает, что угол движения подчиняется равномерному распределению [8] с плотностью

$$f(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{\pi}, & \text{при } -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}, \\ 0, & \text{при } \theta < -\frac{\pi}{2}, \theta > \frac{\pi}{2}, \end{cases}, \quad (2)$$

и функцией распределения

$$F(\theta) = \begin{cases} 0, & \text{при } \theta < -\frac{\pi}{2}, \\ \frac{\theta + \frac{\pi}{2}}{\pi}, & \text{при } -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}, \\ 1, & \text{при } \theta > \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

Вариант 2. Направление движения разряда статистически зависит от условной средней напряженности электрического поля: чем больше напряженность электрического поля между т. Н и т. М, тем выше вероятность движения в данном направлении. Это означает, что угол движения θ статистически зависит от величины $1 / d_{HM}$: чем меньше расстояние от т. Н до т. М, тем выше вероятность разряда в направлении, определяемом углом θ .

Использование методов теории вероятностей [8] и численных методов [9] позволило для рассматриваемого варианта (вариант движения с вероятностью обратной расстоянию до оси ОХ) описать распределение угла движения θ , плотностью (при максимальной абсолютной погрешности $\delta \leq 2 \cdot 10^{-3}$)

$$f(\theta) = \begin{cases} 1,915 \cdot 10^{-2} \theta^4 - 2,493 \cdot 10^{-1} \theta^2 + 5 \cdot 10^{-1}, & \text{при } -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}, \\ 0, & \text{при } \theta < -\frac{\pi}{2}, \theta > \frac{\pi}{2}, \end{cases} \quad (4)$$

и функцией распределения (при максимальной абсолютной погрешности $\delta \leq 2 \cdot 10^{-4}$)

$$F(\theta) = \begin{cases} 0, & \text{при } \theta < -\frac{\pi}{2}, \\ 3,83 \cdot 10^{-3} \theta^5 - 8,31 \cdot 10^{-2} \theta^3 + 5 \cdot 10^{-2} \theta + 5 \cdot 10^{-1}, & \text{при } -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}, \\ 1, & \text{при } \theta > \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

Отметим, что распределение угла движения θ в данном варианте не зависит от Z_H – высоты расположения точки начала движения разряда.

Графики плотности распределения угла движения $f(\theta)$ показаны на рис. 2.

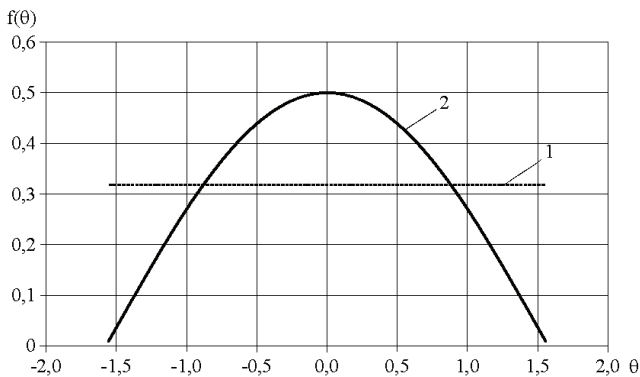


Рисунок 2 – Плотность распределения угла движения θ :
1 – вариант 1, по выражению (2); 2 – вариант 2, по выражению (4)

Графики, приведенные на рис. 2, можно трактовать как распределение плотности вероятности поражения разрядом молнии полуокружности радиуса R , обращенной к оси OX , при условии, что $Z_H > R$ (см. рис. 1).

Рассмотрим вариант поражающего движения молнии, который возможен при условии $Z_H \leq R$ (см. рис. 3).

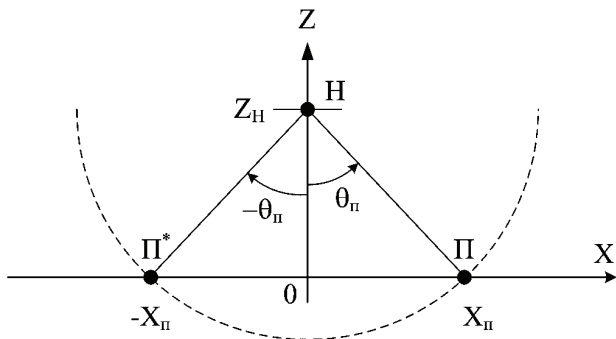


Рисунок 3 – Схема поражения оси OX разрядом молнии

Предельные точки поражения на оси ОХ $\Pi(X_{\Pi}, 0)$ и $\Pi^*(-X_{\Pi}, 0)$.
 Предельные углы поражения θ_{Π} и $-\theta_{\Pi}$.

$$\theta_{\Pi} = \arccos \frac{Z_H}{R}. \quad (6)$$

Длина полуинтервала зоны поражения

$$X_{\Pi} = \sqrt{R^2 - Z_H^2} \quad \text{или} \quad \frac{X_{\Pi}}{R} = \sqrt{1 - \frac{Z_H^2}{R^2}}. \quad (7)$$

Таким образом, зоны поражения подобны при одинаковом значении Z_H/R .

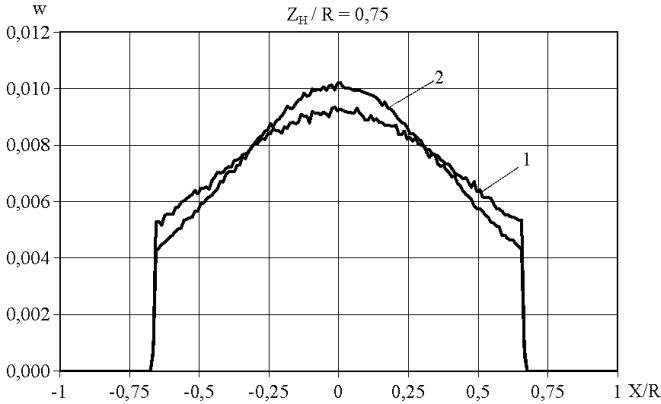


Рисунок 4

Используя методы статистического моделирования [10] и применяя рассмотренные распределения угла движения θ , можно определить частоту поражения отрезков оси ОХ. Суть статистического моделирования сводится к генерированию случайного угла движения θ и подсчету количества поражения определенных отрезков оси ОХ (ΔX).

Графики полигонов относительных частот поражения отрезков оси ОХ при $\Delta X = 0,01X$ показаны на рис. 4-6 (на рисунках графики 1 соответствуют 1-му варианту распределения θ ; графики 2 – 2-му варианту распределения θ). Относительная частота w определяется как

$$w = n/N, \quad (8)$$

где n – количество поражений отрезка прямой; N – общее количество поражений прямой.

Как видно из рис. 4-6, вероятности поражения отрезков оси ОХ подобны для рассмотренных вариантов распределения угла движения. При малых отклонениях от точки с координатами $(0,0)$ второй вариант распределения θ имеет большую вероятность поражения. Форма полигонов показывает, что молния с большой вероятностью будет поражать малый интервал оси ОХ,

симметричный относительно проекции точки начала движения молнии на ось OX независимо от рассмотренных видов распределения угла движения θ .

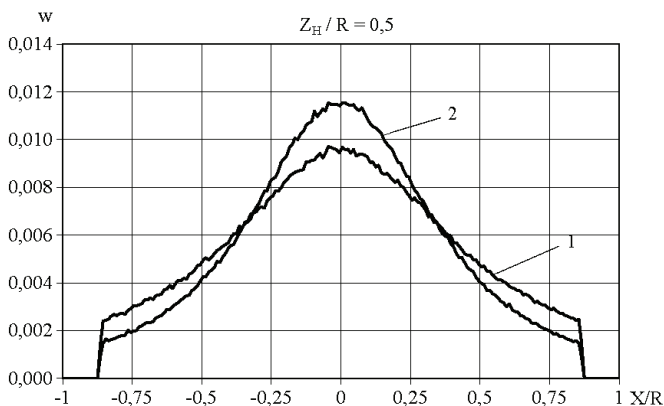


Рисунок 5

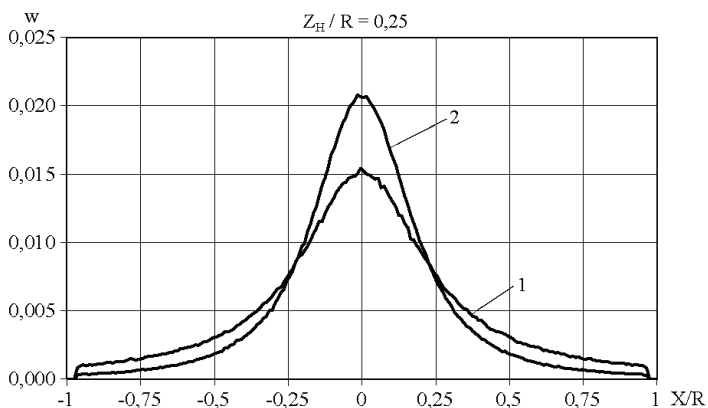


Рисунок 6

Как известно, радиус поражения может случайным образом изменяться под воздействием различных нестационарных факторов, в том числе определяемых экологической обстановкой [1].

На рис. 7 показаны полигоны относительных частот при постоянном значении $Z_H = 0,75$ и варьировании $R = 1-10$.

Реально возможно изменение не только R , но и Z_H . Для этого варианта были проведены соответствующие расчеты, результаты которых показаны на рис. 8.

На рис. 9 показаны графики изменения границ произвольного интервала оси OX ($-X_i, X_i$), симметричного относительно точки $(0,0)$, от вероятности по-

ражения этого интервала. Графики 1 и 2 соответствуют кривым, показанным на рис. 4 и рис. 6, графики 3 и 4 – кривым, показанным на рис. 7 и рис. 8.

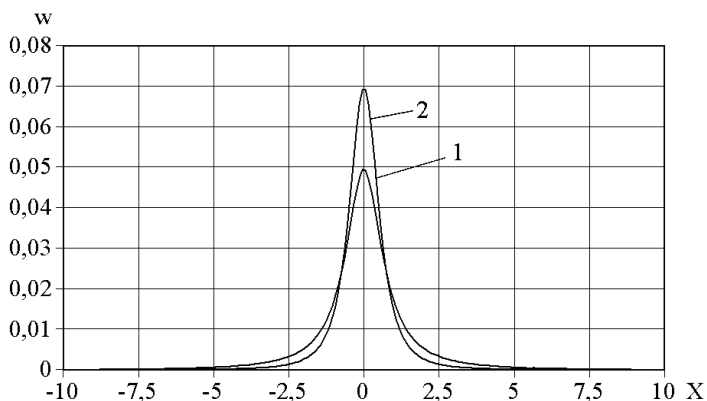


Рисунок 7 – Полигоны относительных частот поражения отрезков оси ОХ при $Z_H = 0,75$; $R = 1-10$: 1 – соответствует 1-му варианту распределения θ ; 2 – соответствует 2-му варианту распределения θ

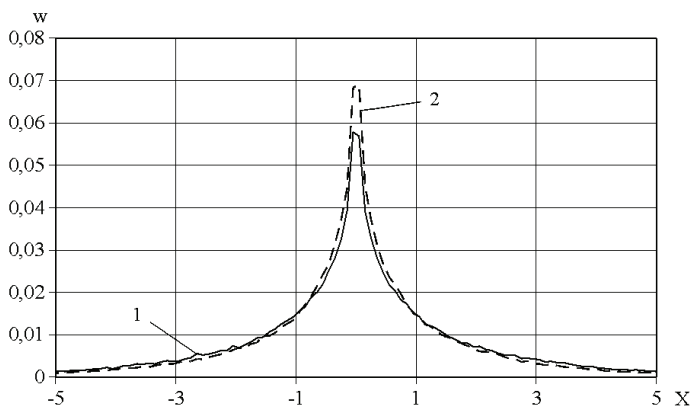


Рисунок 8 – Полигоны относительных частот поражения отрезков оси ОХ при $R = 1-10$; $Z_H = 0$ – R : 1 – соответствует 1-му варианту распределения θ ; 2 – соответствует 2-му варианту распределения θ

Проверка достоверности предложенной модели может быть осуществлена путем проведения физического эксперимента, заключающегося в формировании импульсного электрического разряда, моделирующего разряд молнии между стержнем и лежащим с ним в одной плоскости прямолинейным проводником, перпендикулярным стержню.

При проведении физического эксперимента высота начала разряда Z_H является фиксированной величиной, а радиус поражения может изменяться уве-

личением напряжения импульсного источника, инициирующего разряд, моделируемой молнии. При этом наименьшим радиусом поражения будет Z_H , что достигается плавным изменением напряжения импульсного источника до первого пробоя промежутка.

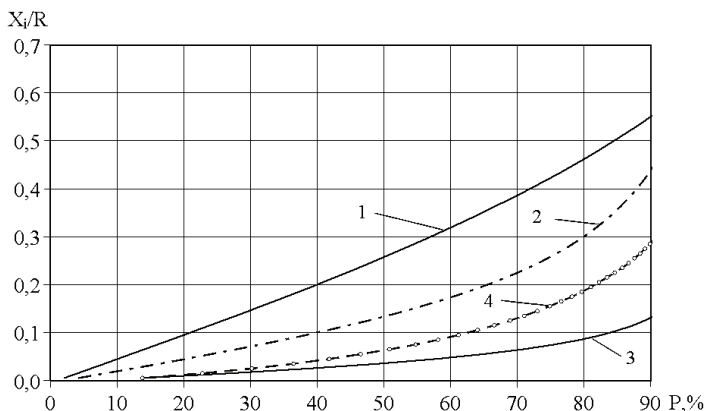


Рисунок 9 – Вероятность поражения при 2-м варианте распределения θ :
 1 – $Z_H/R = 0,75$; 2 – $Z_H/R = 0,25$; 3 – $Z_H = 0,75$; $R = 1-10$; 4 – $Z_H = 0 - R$; $R = 1-10$

Выводы

1. Предложена двухмерная модель разряда молнии в прямолинейный бесконечный проводник, базирующаяся на задании направления движения разряда углом движения.
2. Получены параметры распределения угла движения разряда молнии при вероятности, обратно пропорциональной расстоянию до точки проводника.
3. Исследована взаимосвязь параметров распределения вероятности поражения прямолинейного проводника при различных соотношениях между радиусом поражения и Z -координатой начальной точки движения разряда.
4. Описана методика проверки достоверности модели.

Список литературы: 1. *Базелян Э.М.* Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с. – ISBN 5-9221-0082-3. 2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений : РД 34.21.122-87 / М-во энергетики и электрификации СССР. – Офф. изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 56 с. 3. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (IEC 62305:2006, NEQ): ДСТУ Б В.2.5-38:2008. – [Чинний від 2009–01–01]. – К.: Мінергіонбуд України, 2008. – 48 с. – (Національний стандарт України). 4. *Резинкина М.М.* Методика расчета прогнозируемого числа поражений молнией протяженных объектов / М.М. Резинкина // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78, вып. 5. – С. 1-7. 5. *Александров Г.Н.* Молния и молниезащита / Г.Н. Александров. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 280 с. – ISBN 5-7422-1432-4. 6. *Кравченко В.И.* Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства / В.И. Кравченко. – Харьков: Изд-во «НТМТ», 2010. – 292 с. – ISBN 978-617-578-005-3. 7. Стандарт IEC 62305-1, Ed. 1: Protection against lightning. – Part 1: General Principles. – IEC, 2003. –

61 Р. **8.** *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей / *Е.С. Вентцель* – М.: Высш. шк., 2002. – 575 с. **9.** *Краскевич В.Е.* Численные методы в инженерных исследованиях / *В.Е. Краскевич, К.Х. Зеленский, В.И. Гречко*. – К.: Вища шк., 1986. – 263 с. **10.** *Ермаков С.М.* Статистическое моделирование / *С.М. Ермаков, Г.А. Михайлов*. – М.: Наука, 1982. – 296 с.

Поступила в редколлегию 05.04.2011.