

**Сизоненко Ольга Николаевна** – ведущий научный сотрудник; доктор технических наук, профессор, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев, тел.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

**Syzonenko Olga Mykolayivna** – Leading Researcher; Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, tel.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

**Мяльница Георгий Филлипович** – главный металлург комплекса; Академик АИН Украины, кандидат технических наук, доцент, ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект», г. Николаев, тел.: (050)418-22-30; e-mail: bas@zorya.com.ua.

**Myalnytsya Heorhii Pylypovych** – Main Metallurgist of Complex; Academician of Ac.Eng.Sc., PhD, assistant professor, SE GTSPC «Zorya» – «Mashproekt», Mykolaiv, tel.: (050)418-22-30; e-mail: bas@zorya.com.ua.

УДК 551.594

**А. А. ПЕТКОВ**

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРАЖЕНИЯ СТЕРЖНЯ РАЗРЯДОМ ДЛИННОЙ ИСКРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОШАГОВОЙ МОДЕЛИ

Разработана многошаговая модель для определения вероятности поражения стержневого электрода, расположенного на плоскости, в полеобразующей системе электродов «стержень – плоскость». Показано, что предложенная модель позволяет адекватно описывать вероятность поражения стержневого объекта в разрядном промежутке длиной  $H = 3 - 15$  м при соосном расположении электродов-стержней в полеобразующей системе. Близкие значения вариативного параметра  $K_s$  при моделировании наблюдаемых в экспериментах значений вероятности поражения  $p^* = 1$  позволяют считать одинаковыми процессы, приводящие к поражению стержня вне зависимости от размеров электродной системы и параметров импульсов напряжения, применяемых при испытаниях. Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований поражения длинной искрой объектов, расположенных на плоской поверхности.

**Ключевые слова:** математическая модель, вероятность поражения, доверительный интервал, разряд длинной искры.

**Введение.** В настоящее время защите от прямого поражения молнией различных объектов и, в первую очередь, электроэнергетических систем уделяется большое внимание, что отражено в ряде национальных [1, 2] и международных нормативных документах [3]. Следует отметить неоднозначность подходов к вопросам молниезащиты в различных документах. Последнее обстоятельство свидетельствует о необходимости совершенствования моделей поражения молнией объектов, на основании которых формируются требования к молниезащите.

**Анализ предварительных исследований и литературы.** Исследованиям поражения стержневого объекта разрядом длинной искры, имитирующем разряд молнии, посвящен ряд работ. Традиционно такие исследования проводятся с использованием системы электродов «стержень – плоскость» с размещением на плоскости стержня-объекта. В дальнейшем анализируются работы, содержащие результаты испытаний, при проведении которых стержень-объект располагался соосно с высоковольтным стержнем-электродом, с которого развивался разряд длинной искры.

В работе [4] приведены данные испытаний по поражению стержневого объекта в разрядном промежутке длиной 15 м. На рис. 1 (график 1) показана зависимость вероятности поражения стержня-объекта от отношения длины разрядного промежутка  $H$  к высоте

объекта стержня  $h$  (диаметр стержня-объекта равнялся  $d_s = 10$  мм).

В работе [5] приведены данные (рис. 1, график 2) по поражению стержневого объекта в разрядном промежутке длиной 5 м. При исследованиях использовались в основном импульсы напряжения положительной полярности: аperiodические импульсы 250/2500 мкс и колебательные импульсы 4000/6500 мкс.

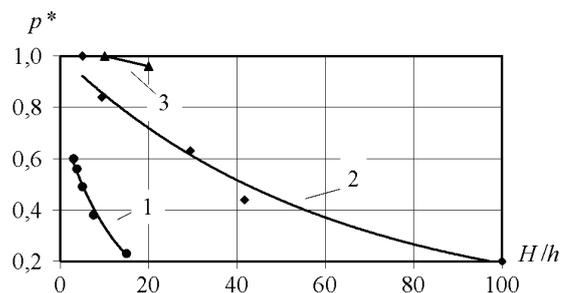


Рисунок 1 – Наблюдаемая вероятность поражения стержневого объекта в различных экспериментах

Наряду с обширными данными испытаний, результаты которых приведены в [4, 5], в литературе имеется информация по поражению стержневых объектов при ограниченном ряде значений отношения  $H/h$ .

В [6] указано, что в проведенных экспериментах

при длине промежутка  $H = 10$  и  $15$  м и отношении  $H/h = 5$  и  $10$ , вероятность поражения стержневого объекта при его соосном расположении с высоковольтным электродом не превышает  $0,62$  и  $0,5$  соответственно. Опыты проводились с импульсом колебательного затухающего напряжения при длине фронта первого полупериода положительной полярности  $3000$  мкс.

В работе [7] приведена зависимость вероятности поражения стержневого объекта от величины разрядного промежутка  $H$  при отношении  $H/h = 10$ . Во время проведения экспериментов длина разрядного промежутка варьировалась в интервале от  $2,5$  до  $15$  м. Опыты проводились с импульсом колебательного затухающего напряжения при длине фронта первого полупериода положительной полярности  $3000$  мкс.

В работе [8] приведены экспериментальные зависимости поражения стержня при длине разрядного промежутка  $H = 3$  м и высоте объекта-стержня  $h = 0,15$  и  $0,3$  м (рис. 1, график 3). Диаметр стержня-объекта в обоих случаях равнялся  $d_s = 20$  мм. В экспериментах использовался аperiodический импульс напряжения  $205/1900$  мкс.

Как показывает проведенный анализ, имеется обширная база экспериментальных данных по поражению стержневых объектов разрядом длинной искры. В связи с этим представляется целесообразным обобщенное описание имеющихся данных.

**Цель работы.** Разработка многошаговой модели поражения стержневого объекта длинной искрой и исследование ее применимости для описания поражения длинной искрой объектов-стержней при иницировании разряда со стержневого электрода, соосного со стержнем-объектом.

**Результаты исследований.** Предложенная в данной работе модель базируется на многошаговой модели, разработанной автором для имитации поражение плоскости длинной искрой [9]. Как было показано в [9], разработанная модель позволяет адекватно описать распределение точек поражения плоскости разрядом длинной искры, развивающемся с высоковольтного электрода (стержня) в системе «стержень-плоскость». Исходная модель включает ступенчатое (многошаговое) движение искры в направлении, определяемом углом движения  $\theta$  в вертикальной плоскости и углом ориентировки  $\alpha$  в горизонтальной плоскости. Причем, вероятностное распределение угла движения  $\theta$  определяется расстоянием  $D$  от точки начала движения искры на текущем шаге до точки плоскости в данном направлении, а угол ориентировки  $\alpha$  равномерно распределен в интервале  $[0, 2\pi)$ . Модификация исходной модели для описания поражения стержневого объекта заключается в учете в вероятностном распределении значений углов  $\theta$  и  $\alpha$  наличия стержневого объекта, расположенного на плоскости, перпендикулярно к ней.

Определение вероятностного распределения значений угла движения  $\theta$  производилось с использованием геометрической модели движения искры на текущем шаге, показанной на рис. 2.

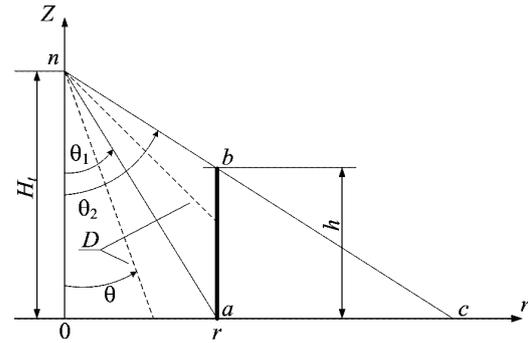


Рисунок 2 – Определение угла движения длинной искры:  $n$  – начальная точка движения искры на текущем шаге,  $H_i$  – высота над плоскостью начальной точки движения на текущем шаге,  $ab$  – стержень-объект, расположенный на плоскости

Функция распределения угла  $\theta$  определится из соотношения

$$F(\theta) = \frac{\Omega_\theta(\theta)}{\Phi_\theta}, \quad \theta \in [0, \frac{\pi}{2}]. \quad (1)$$

где  $\Omega_\theta(\theta)$  – область реализаций угла движения от 0 до значения  $\theta$ ;  $\Phi_\theta$  – область всех возможных реализаций угла движения.

Для принятого в модели механизма движения искры (вероятность направления движения обратно пропорциональна  $1/D^m$ ), указанные в (1) области могут быть описаны следующим образом (см. рис. 2):

$$\Phi_\theta = \int_0^{\theta_1} \frac{d\theta}{D^m} + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{D^m} + \int_{\theta_2}^{\pi/2} \frac{d\theta}{D^m}, \quad (2)$$

где углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  характеризуют место расположения и высоту стержня-объекта (рис. 2).

$$\Omega_\theta(\theta) = \begin{cases} \int_0^\theta \frac{d\theta}{D^m}, & 0 \leq \theta < \theta_1; \\ \int_0^{\theta_1} \frac{d\theta}{D^m} + \int_{\theta_1}^\theta \frac{d\theta}{D^m}, & \theta_1 \leq \theta < \theta_2; \\ \int_0^{\theta_1} \frac{d\theta}{D^m} + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{D^m} + \int_{\theta_2}^\theta \frac{d\theta}{D^m}, & \theta_2 \leq \theta < \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

Определение вероятностного распределения значений угла ориентировки  $\alpha$  производилось с использованием геометрической модели движения искры на текущем шаге, показанной на рис. 3.

Для принятого в модели механизма движения искры (вероятность направления движения обратно пропорциональна  $1/D^m$ ), функция распределения угла  $\alpha$  определится из соотношения (см. рис. 3):

$$F(\alpha) = \frac{\int_{\alpha_1}^\alpha \frac{d\alpha}{D^m}}{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{D^m}}, \quad \alpha \in [\alpha_1, \alpha_2]. \quad (4)$$

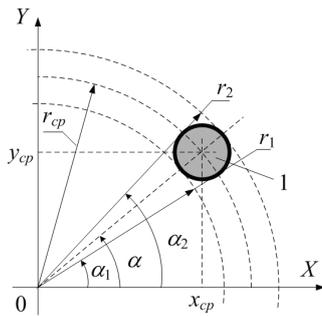


Рисунок 3 – Определение угла ориентировки длинной искры: 1 – стержень, перпендикулярный плоскости  $XOY$

В целом, алгоритм движения искры соответствует алгоритму, описанному в [9]:

- на текущем шаге генерируются случайные значения углов  $\theta_{sl}$  и  $\alpha_{sl}$ , в соответствии с их распределениями (1) и (4);

- проверяется факт поражения плоскости и, если он имеет место, то переходим к новому акту движения искры из исходной точки, расположенной на высоте  $H$  (проверка подробно описана в [9]);

- проверяется факт поражения стержня, и если он имеет место, то переходим к новому акту движения искры из исходной точки, расположенной на высоте  $H$  (факт поражения фиксируется с целью дальнейшей обработки);

- если факт поражения плоскости или стержня не подтверждается, то начальная точка движения искры смещается на величину шага движения  $D_{st}$  в направлении, определяемом углами  $\theta_{sl}$  и  $\alpha_{sl}$ , и процесс движения повторяется.

Для установления факта поражения стержня-объекта искрой на текущем шаге движения осуществляется следующая проверка:

- $\theta_1 \leq \theta_{sl} \leq \theta_2$ , луч случайного угла движения  $\theta_{sl}$ , определяющий движение искры на текущем шаге, пересекает стержневой объект (рис. 2);

- $\alpha_1 \leq \alpha_{sl} \leq \alpha_2$ , луч случайного угла ориентировки  $\alpha_{sl}$ , определяющий движение искры на текущем шаге, пересекает стержневой объект (рис. 3);

- $D_{st} \geq D$ , величина шага движения искры не меньше расстояния от точки начала движения до точки стержневого объекта (при выбранных  $\theta_{sl}$  и  $\alpha_{sl}$ ) на текущем шаге движения.

Если указанные условия выполняются, то фиксируется факт поражения стержня.

В некоторых рассмотренных выше источниках, данные которых в дальнейшем используются для проверки адекватности предлагаемой модели, отсутствует информация о поперечном размере стержневого объекта, необходимая для определения угла ориентировки, поэтому, опираясь на аналогичные эксперименты с известными данными, при моделировании диаметр объекта-стержня принимался равным  $d_s = 10$  мм.

Для проведения численного моделирования в соответствии с описанным алгоритмом была разработана компьютерная программа в среде *Excel* с использованием *Visual Basic for Application*.

В предлагаемой модели, как и в модели [9], име-

ется два вариативных параметра: показатель степени  $m$  и величина шага движения искры  $D_{st}$ . Предварительные расчеты показали, что в качестве значений вариативного параметра модели  $m$  может быть принято его значение, полученное в [9] при моделировании поражения плоскости с подобной электродной системой («стержень – плоскость») и в данной работе использовалось значение  $m = 17$ . В процессе моделирования изменялось значение коэффициента шага  $K_{st} = D_{st}/H$  с целью достижения наилучшего совпадения расчетных и экспериментальных данных.

Рассмотренные выше экспериментальные данные получены при ограниченном количестве опытов и при увеличении количества разрядов наблюдаемые значения вероятности поражения стержневых объектов  $p^*$  могут измениться. Поэтому при дальнейшем рассмотрении, учитывая статистический характер экспериментальных данных, для каждого экспериментального значения в соответствии с методикой [10, 11] был построен доверительный интервал для вероятности поражения стержня ( $p_1, p_2$ ) при доверительной вероятности  $\beta = 0,99$ .

Для данных, приведенных в [4], на рис. 4 показаны доверительные границы и результаты моделирования.

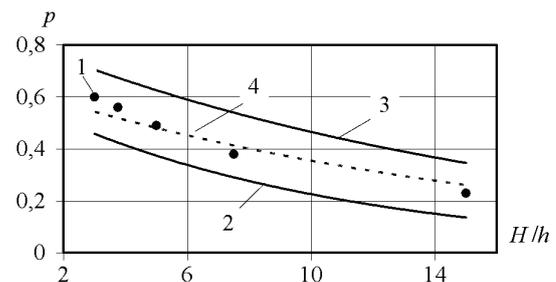


Рисунок 4 – Вероятности поражения стержня-объекта по данным экспериментов [4] при  $H = 15$  м

На рис. 4 и в дальнейшем на рис. 5–7 обозначено: 1 – наблюдаемые экспериментальные данные –  $p^*$ , 2 – нижняя граница доверительного интервала –  $p_1$ , 3 – верхняя граница доверительного интервала –  $p_2$ , 4 – результат моделирования.

Результаты моделирования, показанные на рис. 4 получены при изменении коэффициента шага в интервале 0,33 – 0,41.

Результаты моделирования данных, приведенных в [5], показаны на рис. 5.

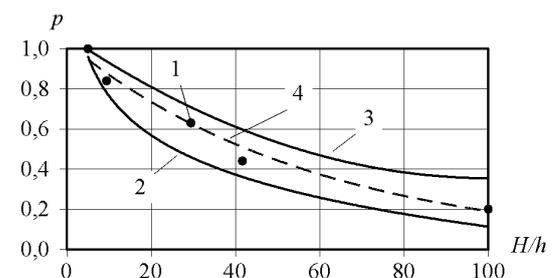


Рисунок 5 – Вероятности поражения стержня-объекта по данным экспериментов [5] при  $H = 5$  м

При моделюванні значення коефіцієнта шага змінювались в інтервалі 0,21 – 0,35.

Для даних, приведених в [8], результати моделювання показані на рис. 6.

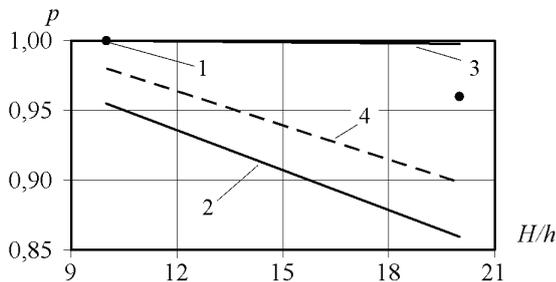


Рисунок 6 – Вероятности поражения стержня-объекта по данным экспериментов [8] при  $H = 3$  м

При моделюванні значення коефіцієнта шага рavnялось 0,2.

Результаты моделирования данных, приведенных в [7], показано на рис. 7.

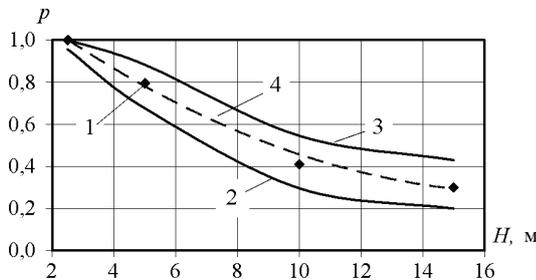


Рисунок 7 – Вероятности поражения стержня-объекта по данным экспериментов [7] при  $H/h = 10$

При моделюванні значення коефіцієнта шага змінювались в інтервалі 0,21 – 0,49.

Как видно из рис. 4 – 7, результаты моделирования располагаются между нижней и верхней доверительными границами вероятности поражения стержня, что позволяет признать предложенную модель адекватной исходным данным.

Результаты моделирования указывают на такую особенность, что для больших значений вероятности поражения стержневого объекта (наблюдаемые в экспериментах значения  $p^* = 1$  [5, 7, 8]) коэффициент шага движения изменялся в достаточно узком интервале  $K_{st} = 0,2 - 0,22$  для  $H = 2,5 - 5$  м и  $H/h = 5 - 10$ . Близкие значения  $K_{st}$  позволяют считать одинаковыми процессы, приводящие к поражению стержня всеми разрядами длинной искры вне зависимости от размеров электродной системы и параметров используемых при испытаниях импульсов напряжения.

В рассмотренных выше источниках отсутствуют данные по поражению стержня с наблюдаемой вероятностью  $p^* = 1$  при  $H > 5$  м. Предложенная модель позволяет рассмотреть задачу взаимосвязи размеров элементов электродной системы при больших значениях  $H$ , для варианта поражения объекта-стержня всеми разрядами длинной искры, имеющих одну и ту же исходную точку (с вероятностью такого события близкой к 1). Учитывая область адекватности предло-

женной модели, решение задачи будет иметь характер прогноза.

Для решения данной задачи проводилось моделирование при  $K_{st} = 0,22$ . Объект-стержень считался пораженным всеми разрядами, если вероятность такого события находилась в интервале (0,97 – 1,0), что составляло минимальный доверительный интервал при обработке экспериментальных данных с наблюдаемой вероятностью  $p^* = 1$ .

На рис. 8 показана взаимосвязь размеров электродной системы при поражении объекта-стержня с вероятностью близкой к 1. На рис. 8 (и далее на рис. 9) обозначено: 1 – экспериментальные данные; 2 – данные моделирования; 3 – кривая, аппроксимирующая в совокупности данные эксперимента и моделирования. Как видно из рисунка, при увеличении высоты точки начала движения длинной искры (в физическом эксперименте – высоты подвеса высоковольтного электрода) высота поражаемого объекта-стержня увеличивается и достигает примерно половины разрядного промежутка.

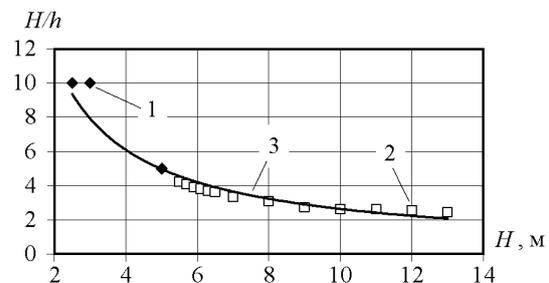


Рисунок 8 – Взаимосвязь размеров электродной системы

Аппроксимирующая кривая 3 при коэффициенте детерминированности  $r^2 = 0,94$  может быть описана выражением

$$H/h = 21,7H^{0,91} \tag{5}$$

Зависимость (5) может быть использована при подготовке натуральных экспериментов по поражению объектов длинной искрой.

На рис. 9 показана зависимость наибольшего расстояния между стержнями  $A = H - h$ , которое обеспечивает поражение объекта-стержня с вероятностью близкой к 1, от высоты точки начала движения искры  $H$ .

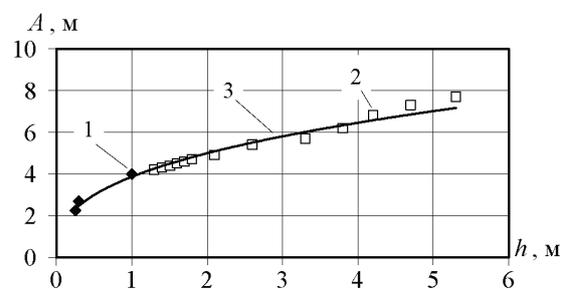


Рисунок 9 – Взаимосвязь расстояния между стержнями и высоты объекта-стержня

Аппроксимирующая кривая 3 при коэффициенте детерминированности  $r^2 = 0,98$  может быть описана выражением

$$A = 3,87h^{0,37}. \quad (6)$$

Трансформировав полученные результаты в область расчетов молниезащиты с использованием метода катящейся сферы [1, 3], для варианта появления поражающего разряда молнии, развивающегося из точки пространства, расположенной на оси стержневого молниеотвода, можно предположить, что значения  $A$ , рассчитанные по выражению (6), является дистанцией поражения (расстоянием ориентировки), так как в экспериментах и при моделировании вероятность поражения объекта-стержня (стержневого молниеотвода) близка к 1.

#### Выводы.

1. Разработана многошаговая модель определения вероятности поражения стержневого электрода, расположенного на плоскости, в полеобразующей системе электродов «стержень – плоскость».

2. Показано, что предложенная многошаговая модель позволяет адекватно описывать вероятность поражения стержневого объекта в разрядном промежутке длиной от  $H = 3 - 15$  м при соосном расположении электродов-стержней в полеобразующей системе.

3. Близкие значения вариативного параметра  $K_{st}$  при моделировании наблюдаемых в экспериментах значениях вероятности поражения  $p^* = 1$  позволяют считать одинаковыми процессы, приводящие к поражению стержня вне зависимости от размеров электродной системы и параметров импульсов напряжения, применяемых при испытаниях.

Материалы работы могут быть использованы для дальнейших исследований поражения длинной искрой объектов, расположенных на плоской поверхности.

**Список литературы:** 1. Улаштування у блискавкозахисту будівельних споруд (IEC 62305:2006, NEQ): DSTU B V.2.5-38:2008. – [Чинний від 2008–01–01]. – К. : Мінорегіонбуд України, 2008. – 63 с. 2. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. 108 p. 3. IEC 62305-3, Ed. 1: Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. – IEC, 2004. – 150 p. 4. Куприенко В.М. Методика и результаты испытаний по определению угла защиты  $\alpha$  для отдельно стоящих стержневых и тросовых молниеотводов / В.М. Куприенко // Вісник НТУ «ХПІ» Тематичний випуск «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х. : НТУ «ХПІ». – 2006. – № 17. – С. 24 – 32. 5. Волкова О.В. Поражаемость искровым разрядом стержня на плоскости / О.В. Волкова, А.Р. Корявин // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 1152-1155. 6. 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.

7. Александров Г.Н. К вопросу об оценке защитного действия молниеотводов / Г.Н. Александров, М.М. Зеленецкий, В.Л. Иванов и др. // Известия академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – №3. – С. 48 – 54. 8. 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. Зинковский и др. // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х. : НТУ «ХПІ». – 2013. – №27. – С. 11 – 20. 9. Петков А.А. Моделирование поражения плоскости разрядом длинной искры с использованием многошаговой модели / А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х. : НТУ «ХПІ». – 2015. – №51. – С. 78 – 82. 10. Korn, G. Mathematical handbook for scientists and engineers / G. Korn, T. Korn. – N. Y. : McGraw-Hill Book Company, 1968. – 832 p. 11. Hauschild V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik / V. Hauschild, V. Mosch. – Berlin. : VEB Verlag Technik, 1984. – 312 s.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ulashtuvannya bliskavkozahistu budivell sporud (IEC 62305:2006, NEQ): DSTU B V.2.5-38:2008. [Chinniy vid 2008–01–01]. Kyiv: Minoregionbud Ukraini, 2008. 63 p. 2. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. 108 p. 3. IEC 62305-3, Ed. 1: Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. IEC, 2004. 150 p. 4. Kuprienko V.M. Metodika i rezultaty ispytaniy po opredeleniyu ugla zaschity  $\alpha$  dlya otdelno stoyaschih stержnevyyh i trosovyh molnieotvodov. V.M. Kuprienko. Visnik NTU "KhPI". Tematichniy vipusk "Tehnika ta elektrofizika visokih naprug". Kharkiv: NTU "KhPI". 2006. No 17. pp. 24-32. 5. Volkova O.V. Porazhaemost iskrovym razryadom stержnnya na ploskosti O.V. Volkova, A.R. Koryavin, Elektrichestvo. 1991. No 5. pp. 1152-1155. 6. Aleksandrov G.N. Ob orientirovke kanala dlinnoy iskry G.N. Aleksandrov, V.L. Ivanov, E.M. Bazelyan, E.S. Sadyhova. Elektrichestvo. 1973. No 3. pp. 63-66. 7. Aleksandrov G.N. K voprosu ob ocnenke zaschitnogo deystviya molnieotvodov. G.N. Aleksandrov, M.M. Zeleneckiy, V.L. Ivanov i dr. Izvestiya akademii nauk SSSR. Energetika i transport. 1970. No 3. pp. 48-54. 8. Baranov M.I. Eksperimentalnye issledovaniya porazheniya zazemlennoy ploskosti i razmeschennyh na ney obektov elektricheskim razryadom v dlinnom promezhtke. M.I. Baranov, V.I. Docenko, V.M. Zinkovskiy i dr. Visnik NTU "KhPI". Tematichniy vipusk "Tehnika ta elektrofizika visokih naprug". Kharkiv: NTU "KhPI". 2013. No 27. pp. 11-20. 9. Petkov A.A. Modelirovanie porazheniya ploskosti razryadom dlinnoy iskry s ispolzovaniem mnogoshagovoy modeli. A.A. Petkov. Visnik NTU "KhPI". Tematichniy vipusk "Tehnika ta elektrofizika visokih naprug". Kharkiv: NTU "KhPI". 2015. No 51. pp. 78-82. 10. Korn, G. Mathematical handbook for scientists and engineers. G. Korn, T. Korn. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 832 p. 11. Hauschild V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik. V. Hauschild, V. Mosch. Berlin: VEB Verlag Technik, 1984. – 312 p.

Поступила (received) 31.03.2016

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Петков Александр Александрович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Инженерная электрофизика», НТУ «ХПІ»; тел.: (067) 572–00–58; email: apetkov@yandex.ua.

**Petkov Alexander Alexandrovich** – Doctor of technical sciences, Senior researcher, Professor of the Department "Engineering Electrophysics", NTU "KhPI"; tel.: (067) 572–00–58; email: apetkov@yandex.ua.