

**И.В. НИЖЕВСКИЙ**, ст. инж., ПАО «Укрэнергопроект», Харьков  
**В.И. НИЖЕВСКИЙ**, канд. техн. наук., доц., НТУ «ХПИ»,  
**С.К. БЕРЕЗКА**, канд. техн. наук., ст. преп., НТУ «ХПИ»,  
**О.Н. ХАЗАРОВ**, студент, НТУ «ХПИ»

### К РАСЧЕТУ ВЕРОЯТНОСТИ ПЕРЕКРЫТИЯ ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПО КРИВОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СЛУЧАЯ УДАРА МОЛНИИ В ОПОРУ

Применяемая на практике кривая вероятности опасных параметров не позволяет выполнить точный численный расчет из-за неопределенных пределов интегрирования. Приведены результаты анализа и расчета вероятности перекрытия изоляции на опоре линии электропередачи напряжением 500 кВ. Показана необходимость при расчете вероятности использовать видоизмененную кривую вероятности опасных параметров. Это позволяет рассчитать вероятность перекрытия линейной изоляции.

**Ключевые слова:** анализ, расчет, вероятность, перекрытие изоляции, кривая вероятности опасных параметров

**Введение.** Несмотря на значительные успехи в области молниезащиты, исследования продолжают. Это связано с необходимостью дальнейшего повышения уровня молниезащиты, снижения риска отказов оборудования и развития аварий по причине несовершенства молниезащиты и неточности методов ее расчета.

Согласно литературным источникам [1-4], необходимо отметить следующее. Амплитуда токов первых компонентов отрицательных молний, соответствующих 50%-ной вероятности, составляет 30 кА, а последующих компонентов – только 13 кА. Для первых компонентов отрицательных молний 50%-ное значение максимальной крутизны фронта тока молнии составляет 13 кА/мкс, а для последующих компонентов – 30 кА/мкс.

При оценочных расчетах можно использовать усредненные распределения тока молнии и крутизны его фронта для отрицательных нисходящих от облака молний без учета различия первого и последующих компонентов. В этом случае статистические распределения можно аппроксимировать экспоненциальными функциями

$$P(I_M) = \exp(-0.4I_M), \quad (1)$$

$$P(a) = \exp(-0.8a), \quad (2)$$

где  $P(I_M)$  и  $P(a)$  – вероятности того, что соответственно ток молнии и крутизна его фронта будут равны или превысят данные значения.

Между амплитудой и крутизной фронта тока молнии имеется слабая положительная корреляционная связь: большим токам соответствует большая крутизна. Однако данных пока недостаточно, поэтому принято считать  $I_M$  и  $a$  независимыми случайными величинами. В этом случае при малых значениях вероятностей

$$P(I_M, a) = P(I_M) + P(a). \quad (3)$$

**Целью** настоящей работы является уточнение метода расчета вероятности перекрытия линейной изоляции.

**Основные результаты.** Исследование возможности уточненного метода расчета вероятности перекрытия линейной изоляции выполнено на примере гирлянды из двадцати двух изоляторов типа П-8,5, которая применяется для линий электропередачи номинальным напряжением 500 кВ. Возможность обратного перекрытия при прямом ударе молнии в опору оценивается путем построения кривой опасных параметров, которая определяет область опасных сочетаний амплитуды и крутизны токов молний, приводящих к перекрытию изоляции. Оценку вероятности перекрытия изоляции линии производят путем сопоставления изменения во времени напряжения на изоляции с ее вольт-секундной характеристикой. Поэтому, прежде всего, необходимо определить вольт-секундную характеристику данной гирлянды по уравнению

$$U(t) = A \sqrt{1 + \frac{T_0}{t}} \quad (4)$$

где  $t$  – время, мкс;  $A$  и  $T_0$  – постоянные, значения которых находят подстановкой в (4) испытательных напряжений полным и срезанным импульсами соответственно при  $t=10$  мкс и  $t=2$  мкс. Для рассматриваемой гирлянды испытательное напряжение полным импульсом составляет  $U_{из}^+(t)=2310$  кВ, а испытательное напряжение срезанным импульсом составляет  $U_{из}^+(t)=3080$  кВ. В результате расчетов по уравнению (4) получаем вольт-секундную характеристику, которая представлена в табл. 1 и на рис. 1.

Табл. 1 – Вольт-секундная характеристика гирлянды изоляторов 22хПФ-120 с защитной арматурой для положительной полярности

$t$	мкс	2	4	6	8	10	20
$U_{из}^+(t)$	кВ	3080	2630	2460	2370	2310	2200

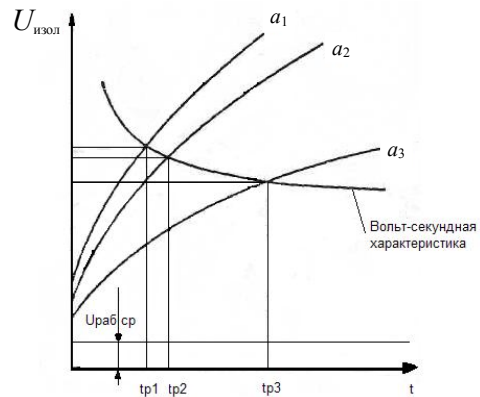


Рис. 1 – Кривые изменения напряжения при разных крутизнах фронта тока молнии ( $a_1 > a_2 > a_3$ ) и вольт-секундная характеристика гирлянды изоляторов. Определение времени разряда линейной изоляции

Данная вольт-секундная характеристика позволяет получить кривую опасных параметров следующим образом.

Значение напряжения на изоляции  $U_{из}(t)$  зависит от крутизны фронта тока молнии, которая при заданном времени  $t_{ф}$  определяет максимальное значение тока молнии  $I_M = a t_{ф}$ . Если построить зависимости напряжения на изоляции от времени  $U_{из}(t)$  при разных крутизнах фронта тока молнии  $a$ , как показано на рис. 1, то точки пересечения этих кривых с вольт-секундной характеристикой изоляции определяют длительность фронта тока молнии  $t_{ф} = t_p$  и минимальное значение амплитуды тока  $I_M = a t_p$ , при котором произойдет перекрытие изоляции. Например, пересечение вольт-секундной характеристики с кривой напряжения, построенной при определенной крутизне тока молнии  $a_1$ , определит время разряда  $t_{p1}$ , а следовательно, и амплитуду тока молнии  $I_{M1} = a_1 t_{p1}$ , при которой происходит перекрытие изоляции. На рис. 1 схематически изображены кривые изменения напряжения, действующего на изоляцию для трех значений крутизны  $a_1, a_2, a_3$  и вольт-секундная характеристика гирлянды изоляторов. Из пересечения этих кривых определяются три значения времени перекрытия  $t_{p1}, t_{p2}, t_{p3}$ . Соответствующие этим временам значения токов молнии будут:  $I_{M1} = a_1 t_{p1}; I_{M2} = a_2 t_{p2}; I_{M3} = a_3 t_{p3}$ .

Таким образом, можно определить все возможные сочетания амплитуды и крутизны тока молнии, которые приводят к перекрытию изоляции. По полученным значениям  $a_i$  и  $I_{Mi}$  строится так называемая кривая опасных параметров тока молнии, которая приведена на рис. 2.

Эта кривая ограничивает область сочетаний максимального значения и крутизны тока молнии, при которых происходит перекрытие изоляции. Каждый удар молнии характеризуется определенным сочетанием параметров  $I_M$  и  $a$ , следовательно, ему соответствует определенная точка в плоскости  $I_M$  и  $a$ . При этом все удары молнии, которые будут изображены точками, находящимися в области, лежащей справа от кривой опасных параметров, соответствуют сочетаниям  $I_M$  и  $a$ , вызывающим перекрытия линейной изоляции. Например, при крутизне  $a_1$  перекрытие изоляции происходит при токах, больших  $I_{M1}$ , при крутизне  $a_2$  – при токах, больших  $I_{M2}$  и т. д. В то же время все удары молнии, изображаемые точками, находящимися слева от кривой опасных параметров, соответствуют сочетаниям параметров молнии, которые оказываются для изоляции безопасными.

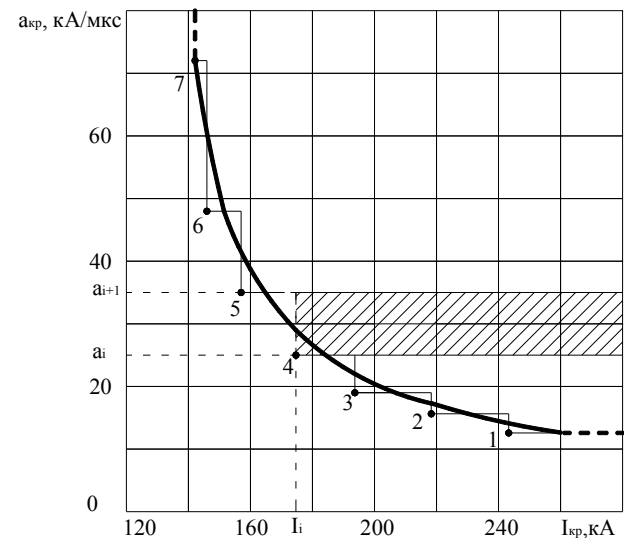


Рис. 2 – Кривая опасных параметров для удара молнии в опору

Кривая опасных параметров может быть построена только в пределах значений  $t$ , для которых известна вольт-секундная характеристика. Концы кривой опасных параметров экстраполируются прямыми, параллельными осям координат.

В этом случае вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в опору определяется графоаналитическим интегрированием рас-

пределения случайных сочетаний параметров молнии  $I_M$  и  $a$ , заданного двумерной функцией  $f(I_M, a)$  по всей опасной области, лежащей справа от кривой опасных параметров. Для этого плавная кривая опасных параметров заменяется ступенчатой кривой, и область справа от нее разбивается на конечное число  $n$  прямоугольных полосок. Тогда вероятность перекрытия изоляции при ударе в опору

$$P_{on} = \sum_{i=1}^n \Delta_i P$$

где  $\Delta_i P$  определяется по формуле

$$\Delta_i P = P_{I_i} (P_{a_i} - P_{a_{i+1}}),$$

в которой  $P_{I_i}$  – вероятность значений  $I$  превышающих  $I_i$  по формуле (1), а  $P_{a_i}$  – вероятность значения  $a$ , превышающего  $a_i$  по формуле (2). В результате расчетов получаем  $P_{on} = 24,27 \cdot 10^{-4}$ .

По полученной кривой опасных параметров (рис. 2) строим кривую вероятности опасных параметров, которая приведена на рис. 3.

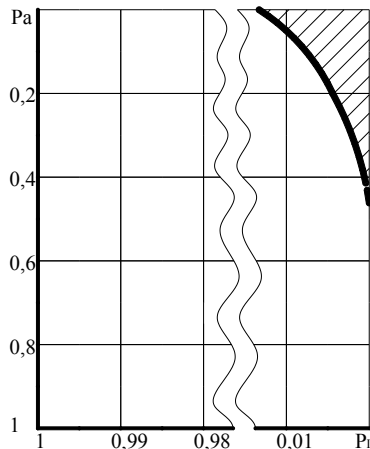


Рис. 3 – Кривая вероятности опасных параметров (заштрихованная область дает значение вероятности)

Полученная кривая вероятности опасных параметров не позволяет выполнить точный численный расчет из-за неопределенных пределов интегрирования, поэтому необходимо построить кривую вероятности опасных параметров в виде зависимости  $1 - P_a = f(1 - P_I)$ , которая, как по-

казано на рис. 4, имеет четкие пределы интегрирования, что позволяет рассчитать вероятность перекрытия линейной изоляции.

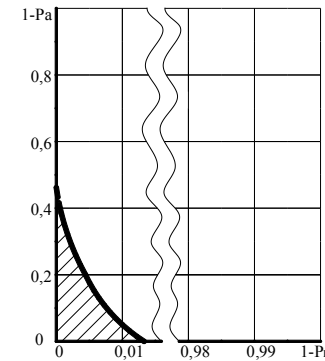


Рис. 4 – Определение вероятности перекрытия изоляции (заштрихованная область дает значение вероятности)

Аналитическим путем вероятность перекрытия изоляции определяется как:

$$P = \iint f(I_M, a) dI_M da, \quad (4)$$

где  $f(I_M, a)$  – двумерная функция плотности вероятности максимального значения амплитуды и крутизны тока молнии, а интегрирование осуществляется по всей заштрихованной области.

При практических расчетах на основании результатов измерений можно считать, что амплитуда  $I_M$  и крутизна фронта  $a$  волны тока молнии не связаны между собой однозначной функциональной зависимостью. В соответствии с этим расчетный закон двумерного распределения различных сочетаний амплитуды  $I_M$  и крутизны фронта тока  $a$  выражается формулой:

$$\lg P_{I,a} = - \left( \frac{I_M}{60} + \frac{a}{36} \right), \quad (5)$$

где  $P_{I,a}$  – вероятность того, что амплитуда и крутизна фронта тока молнии косоугольной формы одновременно превышают значения  $I_M$  и  $a$ .

В настоящее время нет достаточной информации для надежного определения функции  $f(I_M, a)$ , поэтому в качестве первого приближения

принимают их за независимые величины. В этом случае с учетом (5) вероятность перекрытия определяется как:

$$P = \int \int_{(D)} f_1(I_M) f_2(a) dI_M da = \int_0^{\infty} f_1(I_M) dI_M \int_0^{\infty} f_2(a) da = , \quad (6)$$

$$= \int_0^1 dP_I \int_0^1 dP_a = \int_0^1 P_I dP_a = \int_0^1 P_a dP_I$$

т. е. вероятность перекрытия линейной изоляции равна в соответствующем масштабе заштрихованной площади на рис. 4, которая ограничена видоизмененной кривой вероятности опасных параметров.

**Выводы.** Результаты выполненных исследований показывают, что вероятность перекрытия линейной изоляции можно рассчитать с достаточной точностью при использовании предложенной зависимости  $1-P_a=f(1-P_I)$ .

**Список литературы:** 1. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов / И.М. Богатенков, Г. М. Иманов, В. Е. Кизеветтер и др. ; под ред Г. С. Кучинского. – СПб : Изд. ПЭИПК 1998. - 700 с. 2. Базуткин В. В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь; Под общ. ред. В. П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с. 3. Координация изоляции и перенапряжения в электрических высоковольтных сетях : учеб. пособ. / В. И. Гуль, В. И. Нижевский, И. В. Хоменко и др.; под ред. проф. В. И. Гуля. – Харьков : ЭДЭНА, 2009. – 270 с. 4. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. – 2-е изд. – СПб. : ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 355 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. I.M. Bogatenkov, G. M. Imanov, V. E. Kizevetter *Tehnika vysokih naprjazhenij*: SPb. : PJeIPK 1998.. 2. Bazutkin V. V. V. P. Larionov, Ju. S. Pinal'; Pod obshh. *Tehnika vysokih naprjazhenij: Izoljacija i perenaprjazhenija v jelektricheskikh sistemah*:. - Moscow.: Jenergoatomizdat. 3. V. I. Gul', V. I. Nizhevskij, I. V. Homenko *Koordinacija izoljacji i perenaprjazhenija v jelektricheskikh vysokovol'nyh setjah*. Khar'kov : JeDJeNA, 2009. . 4. RD 153-34.3-35.125-99. Rukovodstvo po zashhite jelektricheskikh setej 6-1150 kV ot grozovyh i vnutrennih perenaprjazhenij / Pod nauchnoj redakciej N.N. Tihodeeva. – 2-e izd. – SPb. : PJeIPK Mintopjenergo RF, 1999. .

*Поступила (received) 28.11.2014*

УДК 551.594.221

**А.А. ПЕТКОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ";  
**Н. В. ФЕДОРОВА**, магистрант НТУ "ХПИ"

## ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТЕРЖНЕВОГО МОЛНИЕОТВОДА

В статье получены аналитические соотношения для определения вероятности поражения грунта длинной искрой в районе расположения стержневого объекта. Сравнение параметров зоны защиты стержневого молниеотвода на поверхности грунта рассчитанное по предложенным соотношениям и материалам действующего нормативного документа показало корреляцию результатов расчета.

**Ключевые слова:** разряд молнии, вероятность поражения, плотность распределения. поверхность грунта

**Постановка проблемы.** В условиях возрастающей в последнее время грозовой активности большое значение приобретает защита от прямого удара молнии как зданий и сооружений, возвышающихся над поверхностью грунта, так и объектов, расположенных на его поверхности: кабельные коммуникации, заземляющие спуски; металлоконструкции, соединенные с броней кабеля; различные вводы в подземные объекты, а также объекты, расположенные непосредственно под поверхностью грунта. Для оценки их молниезащищенности необходима информация о вероятности поражения поверхности грунта при наличии молниеотводов различного вида и, в частности, стержневых молниеотводов.

**Анализ публикаций.** Согласно нормативному документу [1], одним из видов зоны защиты (ЗЗ) стержневого молниеотвода является коническая форма, которая характеризуется высотой конуса и радиусом ЗЗ на поверхности грунта. Радиус ЗЗ определяется в зависимости от надежности защиты и высоты молниеотвода. Надежность защиты представлена дискретным рядом {0,9; 0,99; 0,999} и предписывается всей поверхности грунта, находящейся в ЗЗ вне зависимости от расстояния от оси стержневого молниеотвода. Однако теоретические основы электрогеометрического метода построения ЗЗ молниеотводов [2], дают основания предполагать, что предписанные значения надежности ЗЗ являются некими обобщающими оценками и существует определенная зависимость вероятности поражения точек поверхности

© А.А. Петков, Н. В. Федорова. 2014