

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

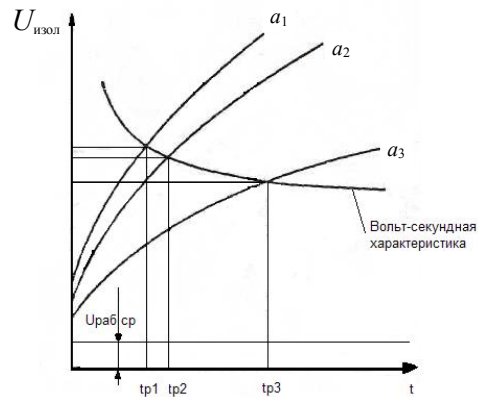


Рис. 1 – Кривые изменения напряжения при разных крутизнах фронта тока молнии ($a_1 > a_2 > a_3$) и вольт-секундная характеристика гирлянды изоляторов. Определение времени разряда линейной изоляции

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.

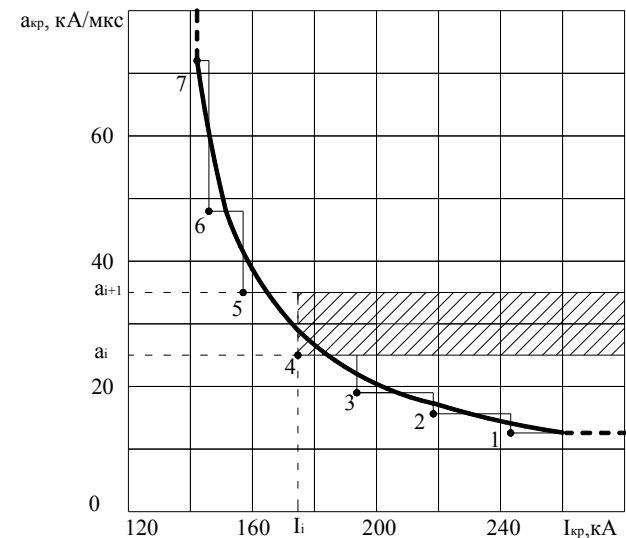


Рис. 2 – Кривая опасных параметров для удара молнии в опору

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.

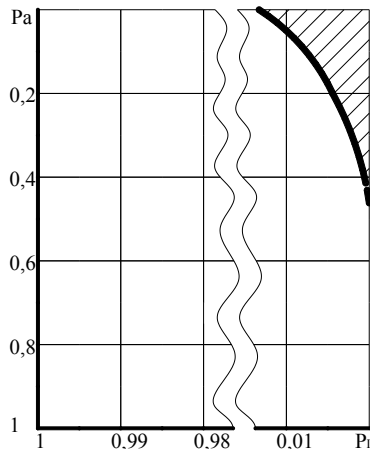


Рис. 3 – Кривая вероятности опасных параметров (заштрихованная область дает значение вероятности)

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.

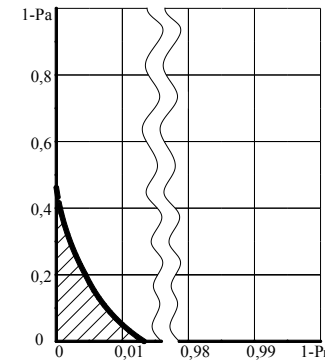


Рис. 4 – Определение вероятности перекрытия изоляции (заштрихованная область дает значение вероятности)

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:

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

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

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'tnyh 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