

# Оценка влияния полярности мгновенного фазного напряжения ВЛ 110–220 кВ без молниезащитных тросов на вероятность поражения молнией

ПОДПОРКИН Г.В.

*Приведены результаты расчётов вероятности поражения фаз бестросовых воздушных линий (ВЛ) 110–220 кВ в зависимости от полярности мгновенного значения напряжения. В качестве критерия поражения той или иной фазы принят критерий устойчивого развития с провода встречного лидера. Показано, что при отрицательной полярности молнии более вероятно поражение фазы линии с положительной полярностью. Для ВЛ 220 кВ вероятность попадания молнии в положительную полуволну напряжения промышленной частоты составляет примерно 70%. Результаты расчётной оценки хорошо согласуются с данными регистрации на опытно-промышленной ВЛ 220 кВ.*

*Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, молниезащита, встречный лидер, полярность напряжения, поражаемость*

В последнее время для молниезащиты воздушных линий (ВЛ) высокого напряжения предлагается использовать изоляторы – разрядники мультикамерные (ИРМК) [1]. Они могут применяться на ВЛ как при наличии молниезащитного троса, так и без него. В последнем случае условия работы ИРМК наиболее тяжёлые, так как при прямом ударе молнии в провод через мультикамерную систему (МКС) протекает импульсный ток молниевое перенапряжения, который может достигать десятков килоампер. Кроме того, по каналу разряда, образованному импульсным током  $i_{и}$ , стремится протекать сопровождающий ток сети  $i_{с}$ :

$$i_{р} = i_{и} + i_{с}. \quad (1)$$

Молния может ударить в провод в любой момент. При этом мгновенное значение напряжения на проводе может быть той же полярности, что и молния, а может быть и противоположной.

При разнополярных напряжениях молнии и провода токи  $i_{и}$  и  $i_{с}$  протекают встречно и суммарный ток разряда  $i_{р}$  переходит через нуль.

При однополярных напряжениях условия гашения импульсной дуги более тяжёлые, чем при разнополярных, так как токи  $i_{и}$  и  $i_{с}$  протекают в одном направлении, и в случае негашения дуги (например на обычной гирлянде изоляторов) суммарный ток разряда  $i_{р}$  не переходит через нуль.

Для проведения адекватных испытаний ИРМК, предназначенных для установки на ВЛ без троса, желательно знать соотношение полярностей молнии и провода ВЛ при прямом ударе молнии (ПУМ).

Влияние рабочего напряжения на вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту рассмотрено в [2, 3], где показано, что при наличии троса

эффект влияния рабочего напряжения существенно проявляется для линий сверхвысокого напряжения (500 кВ и выше). Для линий более низкого номинального напряжения он незначителен.

Однако при отсутствии троса ситуация может существенно измениться, так как различные фазы ВЛ находятся примерно в одинаковых условиях и влияние мгновенных значений напряжения на проводах может стать существенным для ориентировки молнии.

Решающим фактором поражения провода является развитие с него устойчивого встречного лидера. Условия его развития аналогичны условиям развития лидера в длинных воздушных промежутках при воздействии на них импульсов коммутационных перенапряжений с длиной фронта 1–3 мс [4].

Поясним этот тезис подробнее с помощью несложного расчёта. Как это принято во многих аналогичных расчётных работах, упрощенно молнию можно представить в виде вертикально расположенного достаточно длинного эквивалентного проводящего цилиндра (см. рис. 1).

«Погонный» заряд может быть приближённо связан с током молнии соотношением [6]:

$$q_0 = \sqrt{\frac{I_M}{1,56}} 100, \quad (2)$$

где  $I_M$  – ток молнии, кА;  $q_0$  – «погонный» заряд, мкКл/м.

Расчёт проведён для среднего значения тока молнии  $I_M = 30$  кА. При этом заряд, вычисленный по (2), составляет  $q_0 = 440$  мкКл/м.

При расчётах по методу эквивалентных зарядов канал молнии моделировался вертикальным цилиндрическим проводником с длиной  $L = 5000$  м.

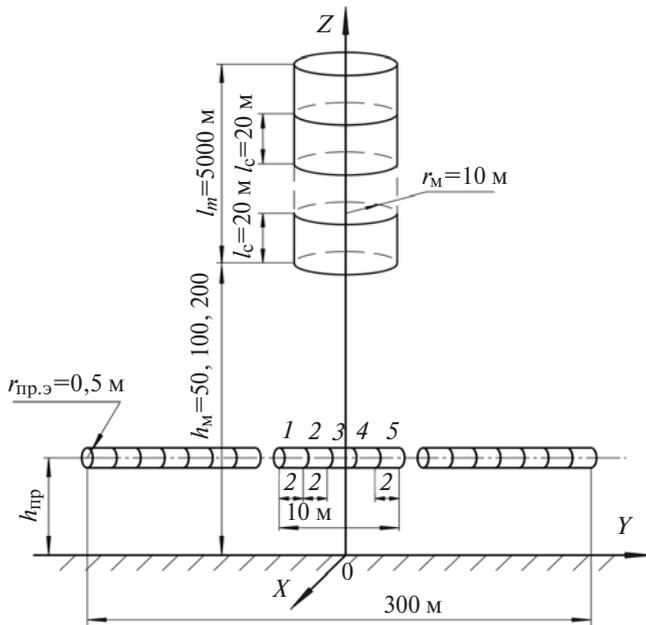


Рис. 1. Расчётная схема для молнии над проводом ВЛ

Радиус цилиндра, моделирующего канал молнии, определялся по формуле

$$r_M = \frac{q_0}{2\pi\epsilon_0 E_{\text{стр}}} = \frac{440 \times 10^{-6}}{2 \times 3,14 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 0,8 \times 10^6} \approx 10 \text{ м}, (3)$$

где  $E_{\text{стр}} = 0,8 \text{ МВ/м}$  – напряжённость электрического поля в стримерной зоне отрицательно заряженного канала молнии.

Высота молнии (расстояние от нижнего конца цилиндра до поверхности земли) изменялась от  $h_M = 200$  до  $50 \text{ м}$ . Потенциал цилиндра принят  $20 \text{ МВ}$  [4].

Одиночный провод линии электропередачи моделировался (с учётом его коронирования) отрезком цилиндра с радиусом  $0,5 \text{ м}$  и длиной  $300 \text{ м}$ , расположенным параллельно поверхности земли на высоте  $h_{\text{пр}} = 15 \text{ м}$ . Для учёта неравномерности распределения заряда вдоль указанного цилиндра он разбивался на отрезки длиной  $2 \text{ м}$ . Потенциал цилиндра, моделирующего провод, задавался равным нулю.

На рис. 2 приведены результаты расчётов распределения напряжённости электрического поля вдоль провода в зависимости от расстояния по горизонтали от вертикальной оси, на которой располагался цилиндр, имитирующий молнию. Естественно, чем ниже молния над землёй, тем больше напряжённость на проводе. Причём в центральной части провода напряжённость наибольшая, а по мере удаления от центра она уменьшается.

Вместе с тем видно, что при заданной высоте молнии над землёй  $H$  на поверхности цилиндра (имитирующего провод, окружённый объёмным зарядом) на расстоянии от вертикальной оси вплоть



Рис. 2. Зависимости напряжённости электрического поля на поверхности горизонтального цилиндра от расстояния до вертикальной оси для различной высоты нижнего конца цилиндра (молнии) над поверхностью земли  $H$

до  $5 \text{ м}$  напряжённость остаётся практически постоянной. Причём это справедливо при уменьшении высоты молнии над землёй до  $50 \text{ м}$ , т.е. практически при всех высотах ориентировки молнии. Это означает, что картина электрического поля вблизи провода на центральном участке длиной примерно  $10 \text{ м}$  является плоскопараллельной. Поэтому при определении электрического поля на центральном участке ВЛ непосредственно под молнией не имеет принципиального значения то, как расположена модель молнии. Фактически важны значения зарядов, наводимых молнией на разных фазах ВЛ, которые также определяются расположением проводов и их потенциалами. Развитие встречного положительно заряженного лидера – это, по существу, решающая стадия пробоя длинного воздушного промежутка между проводом и молнией. Поэтому для анализа условий возникновения встречного лидера с того или иного провода можно воспользоваться результатами исследований электрической прочности длинных воздушных промежутков между параллельными проводами.

В [5] предложен метод расчёта электрической прочности длинных воздушных промежутков между параллельными проводами при воздействии импульсов коммутационных перенапряжений. Этот метод может быть использован также для оценки вероятности развития встречного лидера с той или иной фазы ВЛ.

**Краткое содержание метода расчёта 50%-х разрядных напряжений.** Суть метода иллюстрирует рис. 3. При воздействии на провода импульсов коммутационных перенапряжений вблизи проводов образуются стримерные зоны. Напряжённости электрического поля вдоль стримерных зон постоянны. Их значения составляют для положительной зоны  $4,5 \text{ кВ/см}$ , а для отрицательной –  $7 \text{ кВ/см}$ . При увеличении приложенного к проводам напряжения длина зон увеличивается.

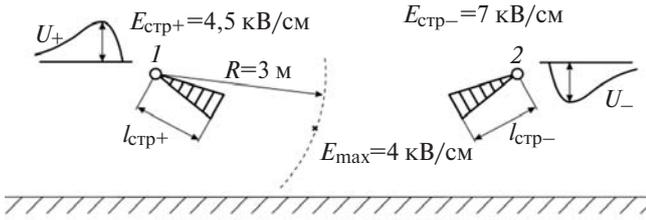


Рис. 3. К расчёту 50%-х разрядных напряжений между параллельными проводами: 1 – положительно заряженный провод со стримерной зоной длиной  $l_{стр+}$ ; 2 – аналогично для отрицательной полярности  $l_{стр-}$

При этом также возрастает средняя напряжённость поля на расстоянии  $R=3$  м от положительно заряженного провода. В одном из направлений средняя напряжённость электрического поля имеет наибольшее значение. При достижении в этом направлении значения  $E_{max} = 4$  кВ/см от положительно заряженного в сторону отрицательно заряженного провода развивается лидер. С вероятностью 50% этот лидер приведёт к пробое воздушного промежутка между проводами, т.е. это произойдёт при 50%-м разрядном напряжении.

После определения длины стримерных зон и соответствующих зарядов в них вычисляются потенциалы проводов  $U_+$  и  $U_-$ , а также  $U_{50\%} = U_+ - U_-$ .

**Метод оценки поражаемости фаз ВЛ.** Известно, что более 90% нисходящих молний имеют отрицательную полярность. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать отрицательно заряженную молнию.

Молния в своей лидерной стадии является извилистым проводящим каналом, окружённым объёмным зарядом. С головки лидера молнии развиваются стримеры, образуя стримерную зону, заполненную объёмным зарядом. По мере приближения отрицательно заряженной молнии к ВЛ на проводах наводится положительный заряд, возникает сильное электрическое поле, развиваются стримерные зоны положительной полярности, а затем встречные лидеры. Наиболее длинный восходящий лидер встречается с нисходящим лидером молнии, и тем самым определяется место удара молнии.

Для оценки вероятности поражаемости той или иной фазы предлагается использовать метод, аналогичный методу, рассмотренному в предыдущем разделе. Для определения провода, с которого раньше всех разовьётся лидер и, соответственно, в который попадёт молния, предлагается ввести значительные упрощения в расчёты электрического поля:

трёхмерная система молнии и ВЛ заменяется плоско-параллельной системой проводов со стримерными зонами (см. рис. 3);

динамически меняющаяся картина развития молнии и встречных лидеров заменяется серией

расчётов электростатического поля по методу эквивалентных зарядов.

Метод оценки поражаемости проводов иллюстрируется рис. 4. Провода и канал молнии считаются строго параллельными поверхности земли, которая тоже представляется в виде идеальной проводящей плоскости. Заряды считаются равномерно распределёнными вдоль проводов и стримерных зон.

Стримерные зоны, занятые объёмным зарядом, представляются в виде бесконечно длинных треугольных призм, параллельных проводам (см. рис. 3). Зоны объёмного заряда разбиваются на  $m$  параллелепипедов. Принимается, что объёмный заряд распределён в них равномерно. Заряды на поверхностях проводов и канала молнии замещаются линейными зарядами, расположенными по их осям.

Контрольные точки располагаются на поверхности каждого проводника, а также на границах каждого элементарного параллелепипеда объёмного заряда. Число контрольных точек равно числу неизвестных элементарных зарядов  $N = n(m+1)$ , где  $n = n_{пр} + 1$  – число проводов ВЛ плюс молния.

Структурная схема метода расчётов представлена на рис. 5. Первоначально задаются координаты проводов ВЛ, радиус провода и потенциалы проводов, равные мгновенным значениям напряжения фаз. Например (см. рис. 4), рассмотрим момент времени, при котором мгновенное значение напряжения на фазе А (на проводе № 1) максимально и имеет положительную полярность, т.е.  $U_A = +1,0$  отн. ед. При этом напряжения на фазах В (провод № 2) и С (провод № 3) равны  $U_B = -0,5$  и  $U_C = -0,5$  отн. ед.

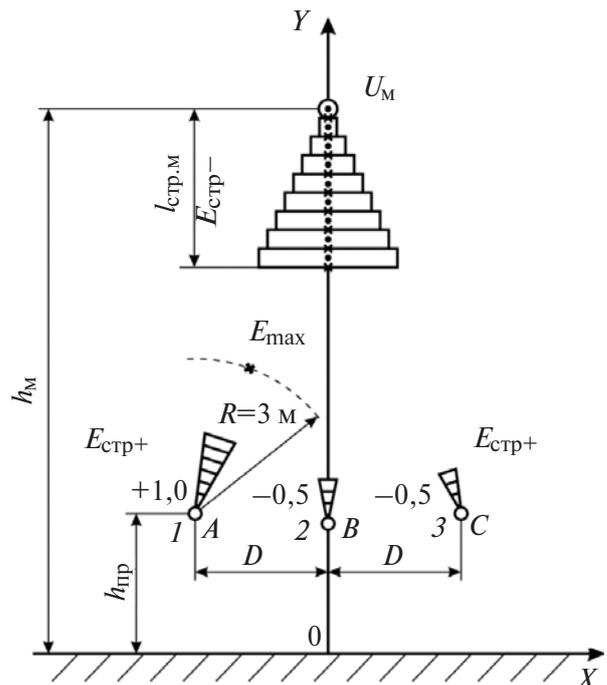


Рис. 4. Схема для оценки поражаемости проводов

Относительные единицы использованы для ясности рис. 4. При расчётах задаются фактические значения потенциалов. Также задаются координаты канала молнии. На рис. 4 для примера показана молния, находящаяся прямо по центру ВЛ на высоте  $h_M$ .

Вводятся исходные, ориентировочная длина стримерных зон проводов ВЛ и молнии, например:  $l_{стр1} = 1,0$  м;  $l_{стр2} = 0,5$  м;  $l_{стр3} = 0,5$  м и  $l_{стр.м} = 20$  м.

Вычисляется расположение эквивалентных зарядов и контрольных точек.

Задаются значения напряжённости электрического поля в контрольных точках. В положительно заряженных стримерных зонах проводов значение напряжённости электрического поля во всех контрольных точках задаётся одинаковым  $E_{стр+} = 4,5$  кВ/см, а в отрицательно заряженной стримерной зоне молнии  $E_{стр-} = 7$  кВ/см.

Составляется система линейных уравнений:

$$[b][q] = [E], \tag{4}$$

где  $[b]$  – матрица коэффициентов электрического поля в уравнениях  $E_i = b_{i,j} q_j$ ;  $E_i$  – напряжённость электрического поля в точке  $i$  от эквивалентного заряда  $q_j$  с номером  $j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ ).

В результате решения системы (4) определяются эквивалентные заряды  $[q]$  и вычисляются потенциалы всех проводов  $j_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Формулы для вычисления  $b_{i,j}$  и  $j_i$  приведены в [5].

Так как длина стримерных зон была задана произвольно, вычисленные потенциалы проводов  $j_i$  отличаются от заданных  $U_i$ . Длина зон  $l_i$  должна быть такой, чтобы вычисленные потенциалы проводов равнялись заданным напряжениям на проводах. Это условие выполняется, если функционал

$$F(l_1, l_2, l_3) = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \Phi}{\partial l_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial l_i} \left( \sum_{j=1}^3 \frac{q_j}{U_i} \right)^2, \tag{5}$$

зависящий от длины стримерных зон, принимает значение, близкое к нулю.

Необходимая длина зон  $l_1, l_2, l_3$  определяется итеративным путём. Если на какой-либо итерации  $k$  значение  $F$  больше допустимой погрешности  $\epsilon_1$ , то значения длины стримерных зон корректируются:

$$[l_{стр}]_{k+1} = [l_{стр}]_k + [Dl]_k \tag{6}$$

и цикл расчёта функционала повторяется (см. рис. 3). Если  $F < \epsilon_1$ , расчёт по программе переходит к другому этапу.

Вычисляются потенциалы в контрольных точках на окружностях с радиусом 3 м от проводов ВЛ  $j_{i,k}$  ( $i = 1, 2, 3$ ;  $k = 1, 2, \dots, 36$ ) и средние значения напряжённости электрического поля:

$$E_{срi,k} = (U_i - j_{i,k}) / 3 \text{ м}. \tag{7}$$

Далее осуществляются выбор наибольшего значения  $E_{ср.н}$  и определение соответствующего номера провода  $i$ .

Если на итерации  $m$  рассчитанное значение наибольшей средней напряжённости поля  $E_{ср.н}$  отличается от заданного критического значения  $E_{кр} = 4$  кВ/см больше, чем на заданную погрешность расчётов  $\epsilon_2$ , то корректируется высота молнии над землёй  $h_M$  и цикл расчётов повторяется. Причём, если  $E_{ср.н} > E_{кр}$ , то значение высоты молнии на последующей итерации  $m+1$  увеличивается  $h_{m+1} = h_m + Dh_i$ , а если  $E_{ср.н} < E_{кр}$ , то уменьшается  $h_{m+1} = h_m - Dh_i$ .

Если

$$|E_{ср.н} - E_{кр}| < \epsilon_2, \tag{8}$$

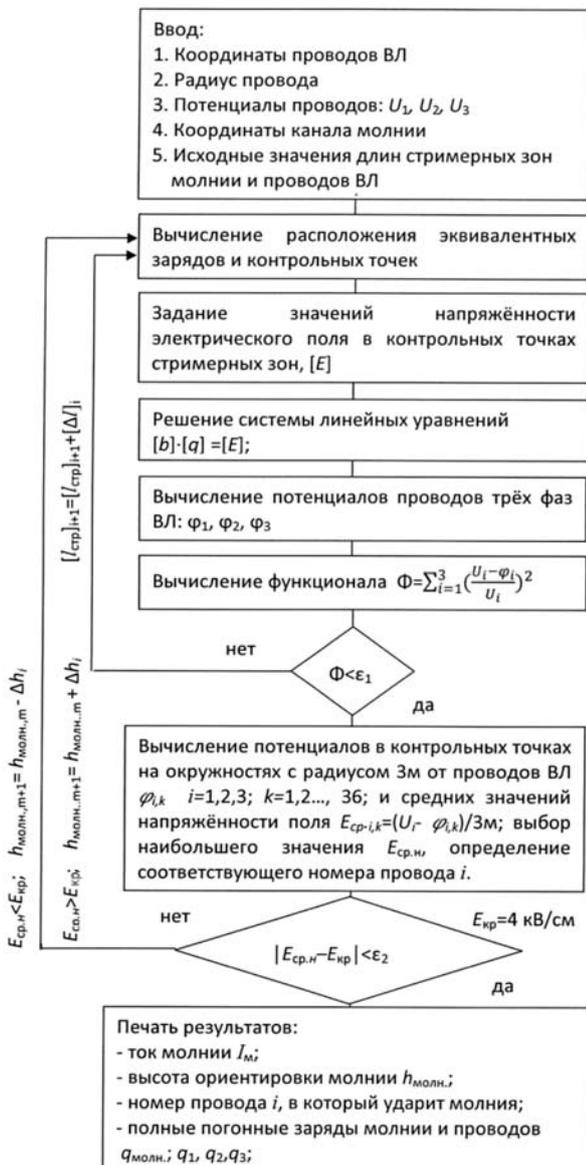


Рис. 5. Структурная схема расчёта поражаемости проводов

то оценивается ток молнии по полному «погонному» значению заряда молнии [6]:

$$I_M = 1,5 \frac{q_M \ddot{\alpha}}{100 \ddot{\alpha}} \quad (9)$$

На этом расчёты заканчиваются и выводятся результаты: ток молнии  $I_M$ ; высота ориентировки молнии  $h_M$ ; номер провода  $i$ , в который ударит молния, и его полярность; полные «погонные» заряды молнии и проводов  $q_M, q_1, q_2, q_3$ .

**Результаты расчётов. Одноцепная ВЛ 220 кВ.** Мгновенные значения напряжения на проводах трёхфазной ВЛ определяются по формулам:

$$\begin{aligned} U_A &= U_M \sin(\alpha); \\ U_B &= U_M \sin(\alpha - 120^\circ); \\ U_C &= U_M \sin(\alpha - 240^\circ), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\alpha$  – электрический угол, град.

Молния может ударить в провод линии в любой момент, т.е. при любом значении угла  $\alpha$ . При этом соотношение мгновенных значений напряжений на фазах может быть разным. Для анализа вероятности поражения той или иной фазы весь период напряжения, которому соответствуют изменения угла  $\alpha$  от 0 до 360°, разбит на шесть диапазонов. Расчёты проведены при средних мгновенных значениях напряжения на фазах для каждого диапазона.

В табл. 1 приведены следующие параметры (расчетные):

координаты левой и правой границ зоны захвата молнии  $x_L, x_P$  (м);

ширина зоны захвата  $b = x_P - x_L$  (м);  
координаты левой и правой границ участка попадания молнии в отрицательную фазу напряжения  $x_1$  и  $x_2$  (м);

ширина участка  $(x_2 - x_1)$ , из которого молния попадает в фазу с отрицательной или положительной полярностью  $b_+, b_-$  (м);

вероятность того, что отрицательно заряженная молния попадет в фазу, имеющую отрицательную или положительную полярность напряжения  $P_{-/-}, P_{-/ +}$  ( $P_{-/- \text{ ср}} = 0,25, P_{-/ + \text{ ср}} = 0,75$  – средние значения).

Положение молнии относительно ВЛ также может быть различным (см. рис. 6). При расчётах ВЛ располагалась симметрично относительно оси ординат.

Начальное положение канала молнии находилось на высоте 100 м над уровнем земли, координаты по оси абсцисс изменялись от –100 до +100 м. Расчёты проведены для тока молнии 30 кА, т.е. для математического ожидания его значения [7]. При этом, как показали расчёты, длина стримерной зоны молнии составляет примерно 20 м.

Конструкция ВЛ 220 кВ схематично показана на рис. 4. Расстояние между фазами 5 м; эквивалентная высота подвеса проводов 10 м; молниезащитного троса нет.

Расчёты проведены следующим образом. Задаются координаты канала молнии (т.е. металлического цилиндра, который его моделирует), например,  $x_M = -100$  м;  $y_M = 100$  м и все остальные исходные данные (см. рис. 4).

Таблица 1

Номер п/п	Параметр												
	Электрический угол $\alpha$ , град, диапазон среднее значение	Напряжение на фазах, отн.ед. $U_A, U_B, U_C$			$x_L$	$x_P$	$b$	$x_1$	$x_2$	$b_-$	$b_+$	$P_{-/-}$	$P_{-/ +}$
		$U_A$	$U_B$	$U_C$									
1	$\frac{0-60}{30}$	0,5 ●	-1,0 ●	0,5 ●	-50	50	100	–	–	0	100	0	100
2	$\frac{60-120}{90}$	1,0 ●	-0,5 ●	-0,5 ●	-55	40	95	10	40	30	65	0,32	0,68
3	$\frac{120-180}{150}$	0,5 ●	0,5 ●	-1,0 ●	-50	40	90	15	40	25	65	0,28	0,72
4	$\frac{180-240}{210}$	-0,5 ●	1,0 ●	-0,5 ●	-40	40	80	-40* 20	-20* 40	20* +20	40	0,50	0,50
5	$\frac{240-300}{270}$	-1,0 ●	0,5 ●	0,5 ●	-40	50	90	-40	-25	15	75	0,17	0,83
6	$\frac{300-360}{330}$	-0,5 ●	0,5 ●	1,0 ●	-40	55	95	-40	-15	25	70	0,26	0,74

\* В данном варианте существуют две зоны  $b_-$ .

Проводятся расчёты по методике, изложенной ранее. При этом оказывается, что при любой высоте молнии над землёй вблизи проводов ВЛ не создаются условия для развития устойчивого встречного лидера. Это означает, что молния не попадёт в ВЛ. Затем расстояние по горизонтали от молнии до ВЛ уменьшается на некоторое значение, например на 5 м, и расчёт повторяется.

На рис. 6 в качестве примера приведён случай, когда у крайней левой фазы *A* (провод № 1) мгновенное значение напряжения равно  $U_A = +1$  отн. ед. (180 кВ); у средней фазы *B* (провод № 2)  $U_B = -0,5$  отн. ед. (–90 кВ) и крайней правой фазы *C* (провод № 3)  $U_C = -0,5$  отн. ед. (–90 кВ). В табл. 2 приведены основные расчётные параметры для этого случая.

В результате серии расчётов определяется граница области  $x_{л}$ , в которой молния начинает ориентироваться на ВЛ (левая граница зоны захвата молнии линией), в данном случае – на положительно заряженную фазу *A*, вблизи которой выполняются условия устойчивого развития встречного лидера (см. предыдущий раздел).

Таблица 2

Объект	Длина стримерной зоны, м	Потенциал, МВ	Суммарный «погонный» заряд, мкКл/м
Фаза <i>A</i>	2,26	0,18	22,1
Фаза <i>B</i>	0,73	-0,09	8,13
Фаза <i>C</i>	1,04	-0,09	11,3
Молния	22,0	-28,7	-440

Примечание. Высота ориентировки молнии 100 м.

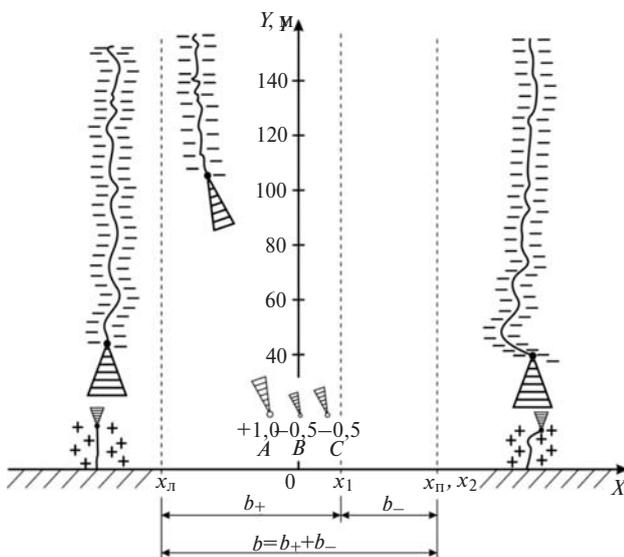


Рис. 6. Иллюстрация к оценке поражаемости проводов ВЛ

Затем проводится дальнейшее смещение положения молнии вправо и определяется граница  $x_1$ , правее которой молния начинает попадать в отрицательно заряженную фазу *C*.

Аналогично определяется правая граница зоны захвата молнии ВЛ  $x_{п}$ .

Ширина зоны, в которой отрицательно заряженная молния попадёт в положительно заряженную фазу ВЛ, в данном случае составляет  $b_+ = x_1 - x_{л}$ . Аналогично для зоны, в которой молния попадает в отрицательно заряженную фазу  $b_- = x_2 - x_1$ . Ширина общей суммарной зоны захвата равна  $b = b_+ + b_-$ .

Если молния ударила в линию, вероятность того, что отрицательно заряженная молния попала в положительно заряженную фазу, может быть оценена как  $P_{+/+} = b_+ / b$ . Аналогично для вероятности попадания в отрицательно заряженную фазу –  $P_{-/-} = b_- / b$ .

Как видно из табл. 1, вероятности  $P_{+/+}$  и  $P_{-/-}$  сильно зависят от момента удара молнии (т.е. от угла  $\alpha$ ). Например, при  $\alpha = 30^\circ$  (вариант № 1)  $P_{+/+} = 1$  и  $P_{-/-} = 0$ , а при  $\alpha = 210^\circ$  (вариант № 4)  $P_{+/+} = P_{-/-} = 0,5$ . Их средние значения составляют  $P_{-/-\text{cp}} = 0,26$  и  $P_{+/+\text{cp}} = 0,72$ , т.е. вероятность того, что отрицательно заряженная молния попадёт в положительно заряженную фазу примерно в 3 раза больше, чем в отрицательную.

В МЭС Юга на ВЛ 220 кВ ЦГЭС-Ш30 в 2011–2012 гг. проводилась опытно-промышленная эксплуатация системы регистрации отключений ВЛ. Система основана на регистрации осциллограмм напряжений и токов в фазах ВЛ с помощью аппаратуры, установленной на отправной и приёмной подстанциях (разработка СибНИИЭ). В результате обработки измерений получено, в том числе, обобщённое распределение моментов поражения молнией фаз ВЛ по периоду напряжения (см. рис. 7). Всего зафиксировано 9 ударов отрицательно заряженной молнии в провода: 7 ударов в положительный полупериод и 2 – в отрицательный. Таким образом, экспериментально зафиксированные частоты ударов  $F_{-/+} = 7/9 = 0,78$  и  $F_{-/-} = 2/9 = 0,22$  хорошо согласуются с расчётными оценками вероятности поражения фаз  $P_{+/+\text{cp}} = 0,75$  и  $P_{-/-\text{cp}} = 0,25$ .

**Двухцепная ВЛ 110 кВ.** На рис. 8,а показана схема традиционного расположения фаз двухцепной ВЛ 110 кВ при эквивалентной высоте подвески проводов. В этом случае провода, находящиеся на одном уровне над поверхностью земли, имеют одинаковые фазы напряжения: (*A*,*a*), (*B*,*b*), (*C*,*c*).

Как показали расчёты, выполненные по описанной методике, молния практически всегда попадает в верхние провода (т.е. в фазы *A*,*a*, см.

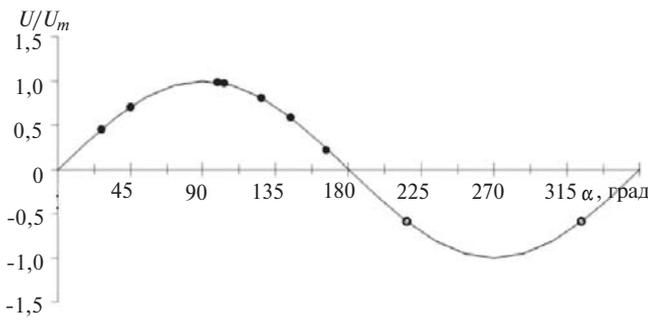


Рис. 7. Распределение моментов поражения молнией фаз ВЛ 220 по периоду напряжения: ● – попадание молнии в положительный полупериод напряжения; ○ – то же – в отрицательный

рис. 6,а) независимо от полярности мгновенного напряжения проводов. Так как длительность положительного и отрицательного полупериодов напряжения одинаковы, вероятности попадания отрицательно заряженной молнии в положительно или отрицательно заряженные провода также одинаковы:  $P_{-/ +} = P_{- / -} = 0,5$ .

Если изменить фазировку цепей ВЛ в соответствии с рис. 6,б, т.е. выполнить её по схеме (А,с), (В,а), (С,б), соотношение  $P_{-/ +}$  и  $P_{- / -}$  существенно меняется. В табл. 3 приведены результаты расчётов для двухцепной ВЛ 110 кВ с фазировкой по схеме рис. 6,б. В расчётах учитывались только провода, подвешенные на двух верхних траверсах, так как нижние провода практически не влияют на ориентировку молнии.

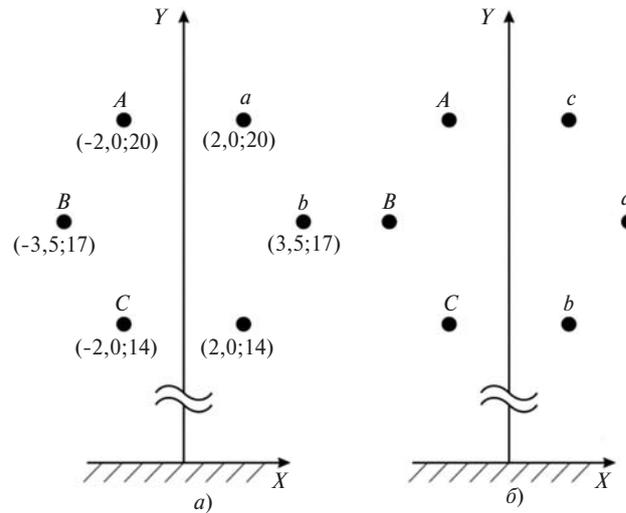


Рис. 8. Схема расположения проводов двухцепной ВЛ 110 кВ: а – традиционная; б – фазы цепей на одном уровне различны (в скобках – координаты проводов)

Как видно из табл. 3, в случае фазировки по рис. 6,б вероятность того, что отрицательно заряженная молния попадёт в положительно заряженную фазу, примерно в 4 раза больше, чем в отрицательную.

Условия гашения импульсной дуги мультимерными системами ИРМК при разной полярности молнии и сети существенно легче, чем при одинаковой полярности. Поэтому для увеличения эффективности работы ИРМК целесообразно расположить на верхних траверсах проводов разноимённых фаз (см. рис. 6,б).

Таблица 3

Номер п/п	Параметр										
	Электрический угол $\alpha$ , град, диапазон среднее значение	Напряжение на фазах, отн. ед.	$x_{л}$	$x_{п}$	$b$	$x_1$	$x_2$	$b_-$	$b_+$	$P_{- / -}$	$P_{- / +}$
1	$\frac{0-60}{30}$	$0,5 \bullet_A \bullet_c 0,5$ $-1,0 \bullet_A \bullet_a 0,5$	-60	60	120	-	-	0	120	0	1,0
2	$\frac{60-120}{90}$	$1,0 \bullet_A \bullet_c -0,5$ $-0,5 \bullet_B \bullet_a 1,0$	-60	55	115	30	55	25	90	0,22	0,78
3	$\frac{120-180}{150}$	$0,5 \bullet_A \bullet_c -1,0$ $0,5 \bullet_B \bullet_a 0,5$	-60	50	110	25	50	25	85	0,23	0,77
4	$\frac{180-240}{210}$	$-0,5 \bullet_A \bullet_c 0,5$ $1,0 \bullet_B \bullet_a 0,5$	-55	60	115	-55	-25	30	85	0,26	0,74
5	$\frac{240-300}{270}$	$-1,0 \bullet_A \bullet_c 0,5$ $0,5 \bullet_B \bullet_a -1,0$	-55	60	115	-55	-30	25	90	0,22	0,78
6	$\frac{300-360}{330}$	$-0,5 \bullet_A \bullet_c 1,0$ $0,5 \bullet_B \bullet_a -0,5$	-55	60	115	-55	-30	25	90	0,22	0,78

Примечание: расчетные параметры те же, что в табл. 1;  $P_{- / - \text{ ср}} = 0,19$  и  $P_{- / + \text{ ср}} = 0,81$  – средние значения.

**Выводы.** 1. Для ВЛ 220 кВ с горизонтальным расположением проводов без грозозащитного троса вероятность того, что отрицательно заряженная молния попадёт в положительно заряженную фазу, примерно в три раза больше, чем в отрицательную.

2. Результаты расчётов хорошо согласуются с данными полевых измерений на ВЛ 220 кВ.

3. В случае двухцепной ВЛ 110 кВ для увеличения эффективности работы ИРМК целесообразно расположение на верхних траверсах проводов разноимённых фаз. При этом вероятность того, что отрицательно заряженная молния попадёт в положительно заряженную фазу, примерно в 4 раза больше, чем в отрицательную.

4. Для ВЛ сверхвысокого напряжения 330–750 кВ без молниезащитных тросов можно ожидать ещё более существенного влияния рабочего напряжения на ориентировку удара молнии в фазу с полярностью противоположной полярности молнии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подпоркин Г.В. О разработке мультикамерных изоляторов-разрядников для ВЛ 220 кВ без грозозащитного троса. — Энергетик, 2010, №12, с. 10–14.

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 4, pp. 26–33.*

## Estimating the Effect the Polarity of Instantaneous Phase Voltage of 110–220 kV Overhead Power Lines without Overhead Ground Wires Has on the Lighting Strike Probability

G.V. PODPORKIN

*The results of calculation sone valuating the probability of striking the phases of 110-220kV over head power lines with outground wires by lightning depending on the polarity of instantaneous voltage value a represented. Sustained development of opposite leader from the wire is adopted as a phase striking criterion. Itiss hown that in case of negative-polarity lightning, striking of the power line phase with the positive polarity of instantaneous voltage is more probable. For 220 kV over head power lines the probability of coinciding the lightning stroke with the positive half-cycle of power frequency voltage is around 70%. The results of the calculated assessment are in good agreement with the data recorded on an experimental-commercial 220 kV overhead power line.*

**Key words:** *overhead power lines, lightning protection, opposite leader, voltage polarity, vulnerability to lightning strokes*

#### REFERENCES

1. Podporkin G.V. *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2010, No. 12, pp. 10–14.

2. Bazelyan E.M. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1981, No. 5, pp. 24–27.

3. Gaivoronskii A.S., Karasyuk K.V. *Nauchnyi vestnik NGTU – in Russ. (Scientific Bulletin of Novgorod State Technical University)*, 1998, No. 2(5), pp. 9–32.

4. Podporkin G.V., Pilshchikov V.E., Sivayev A.D., Yarmarkin M.K. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2004, No. 8, pp. 7–15.

2. Базелян Э.М. Влияние рабочего напряжения на вероятность прорыва молнии к проводам воздушных линий. — Электричество, 1981, №5, с.24–27.

3. Гайворонский А.С., Карасюк К. В. Новые методические принципы оценки грозоупорности воздушных линий электропередачи высших классов напряжения. — Научный вестник НГТУ, 1998, № 2(5), с. 9–32.

4. Подпоркин Г.В., Пильщиков В.Е., Сиваев А.Д., Ярмаркин М.К. Грозозащита ВЛ 10 кВ длинно-искровыми разрядниками антенного типа. — Электричество, 2004, № 8, с. 7–15.

5. Podporkin G.V. Calculating the switching surge critical flashover voltage of phase-to-ground and phase-to-phase bundle conductor gaps. —IEEE Trans. on Power Delivery, January 1995, vol. 10, No. 1, pp. 365–373.

6. Ларионов В.П., Колечицкий Е.С, Шульгин В.Н. Расчёт вероятности прорыва молнии сквозь тросовую защиту. — Электричество, 1981, № 5, с. 19–23.

7. Anderson K.B., Erikson A.J. Lightning parameters for engineering application. — Elektra, 1980, No.69, pp. 65–102.

*Автор: Подпоркин Георгий Викторович окончил в 1973 г. электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ). В 1990 г. в ЛПИ защитил докторскую диссертацию по воздушным линиям электропередачи повышенной пропускной способности. Научный руководитель ОАО «НПО Стример».*

*Author: Podporkin Georgii Viktorovich (St. Petersburg, Russia) – Dr. Sci. (Eng.), Scientific Leader of JSC «NPO Strimer».*

