

## Удар молнии в заземляющее устройство

КАРЯКИН Р.Н., ЛОСЕВ В.Г.

*Из рассмотрения статистических распределений параметров тока молнии, полученных в результате анализа осциллограмм естественных молний тремя исследовательскими центрами, установлено, что экстремальные значения этих параметров, положенные в основу рекомендаций стандартов МЭК, находятся в корреляционной зависимости от эквивалентного параметра заземляющего устройства (ЭПЗУ) объекта. Область применения рекомендаций стандарта МЭК, использующих экстремальные значения этих параметров тока молнии в качестве расчетных значений для I уровня молниезащиты, ограничена объектами, у которых  $\text{ЭПЗУ} \geq 2 \cdot 10^{-10} \text{ с/м}^2$ . Для стратегически важных объектов, у которых  $\text{ЭПЗУ} \leq 1 \cdot 10^{-10} \text{ с/м}^2$ , во избежание повторения известных катастроф и аварий, вызванных прямым ударом молнии (ПУМ), в качестве расчетных значений параметров тока молнии должны быть приняты рекомендуемые значения, гарантирующие безопасность при ПУМ для стратегически важных объектов, расположенных в Сибири и на Дальнем Востоке.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** длинная линия, молниезащита, ток молнии, канал молнии, заземляющее устройство, многолетнемерзлые породы

В последнее десятилетие частота пожаров и взрывов стратегически важных объектов (СВО), вызванных прямым ударом молнии (ПУМ), возрастает. Анализ известных катастроф и аварий этих объектов свидетельствует о выполнении в полном объеме всех молниезащитных мероприятий, предусмотренных действующими нормативными документами [1, 2]. Поэтому для выяснения причин несовершенства молниезащиты стратегически важных объектов становится актуальным рассмотрение *достаточности* молниезащитных требований как самих нормативных документов [1, 2], так и соответствующих международных стандартов [3], использованных при разработке упомянутых отечественных нормативных документов.

В основу исходных данных международных стандартов [3] положены статистические распределения параметров тока молнии, полученные в результате осциллографирования естественных молний [4–6].

В рамках повсеместно господствующей концепции «молния–генератор тока» вопрос о правомерности переноса результатов прямого натурального экспериментального исследования экстремальных значений амплитуды волны импульса тока молнии  $I$ , длительности фронта  $t_0$ , крутизны фронта  $di/dt$ , полученных в условиях Швейцарских Альп ( $\rho \leq 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), на условия Сибири и Дальнего Востока (многолетнемерзлые породы  $\rho \geq 20 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) до настоящего времени не возник.

В статье предпринята попытка рассмотреть этот вопрос вне рамок общепринятой концепции «молния–генератор тока».

Для решения поставленной задачи воспользуемся результатами, полученными в ранее выполненных работах [7–24], основанных на работах [25–32].

Рассмотрим замкнутую цепь «атмосфера (А) – грозовое облако (ГО) – канал молнии (КМ) – заземляющее устройство защищаемого объекта (ЗУ) – Земля». Заметим, что влияние на электромагнитный процесс отсутствующих в рассматриваемой цепи таких элементов как канал молнии встречного разряда (КВР) и молниепроводная система объекта (МПСО), образованная молниеприемником (МП) и токоотводами (ТО), исследовано в [20, 23], где было установлено: КВР и МПСО не оказывают заметного влияния на статистические распределения исследуемых параметров тока молнии, что освобождает авторов от необходимости включения этих элементов в рассматриваемую схему замещения.

В качестве расчетной модели КМ при коротком нисходящем отрицательном разряде (КРОН) рассматривается неоднородная длинная линия, образованная вертикально натянутым от нижней границы отрицательно заряженного грозового облака ( $y=H$ ) до «точки атаки» ( $y=0$ ) проводящим плазменным шнуром с продольным активным сопротивлением, нарастающим по высоте канала по закону:

$$r_{ay}(y) = r_a e^{k_r y}, \quad (1)$$

где  $r_a = r_{ay}(y=0)$ , Ом/м;  $k_r$  – вещественное положительное число, характеризующее интенсивность возрастания активного сопротивления плазменного шнура  $r_{ay}(y)$  по высоте канала в направлении вертикальной оси  $y$ , м<sup>-1</sup>.

Проводящий плазменный шнур окружен непроводящим чехлом в форме коаксиальной воронки, обращенной усеченной вершиной конуса к Земле, имеющим поперечную погонную емкость, нарастающую по высоте воронки в соответствии с выражением

$$C_y(y) = C e^{k_c y}, \quad (2)$$

где  $C = C_y(y=0)$ , Ф/м;  $k_c$  – вещественное положительное число, характеризующее интенсивность возрастания емкости чехла  $C_y(y)$  по высоте канала в направлении вертикальной оси  $y$ , м<sup>-1</sup>.

При анализе КРОН через канал молнии индуцированного отрицательно заряженным грозовым облаком положительного заряда Земли  $Q^+$  установлено [23], что амплитуда волны тока молнии

$$I(y) = \frac{2}{e^2} \frac{Q}{t_{0k}(y)}, \quad (3)$$

где  $t_{0k}(y)$  – длительность фронта тока молнии на высоте  $y$ :

$$t_{0k}(y) = t_{0k \min} e^{(k_r + k_c)y}, \quad (4)$$

$t_{0k \min}$  – длительность фронта тока молнии в «точке атаки» ( $t_{0k \min} = t_{0k}(y=0)$ ):

$$t_{0k \min} = \frac{1}{2} \frac{1}{k^2} r_a C, \quad (5)$$

и, следовательно,

$$I_{\max} = I(y=0) = \frac{2}{e^2} \frac{Q}{t_{0k \min}}. \quad (6)$$

В качестве расчетной модели сколь угодно сложного заземляющего устройства (ЗУ) объекта при ПУМ следует рассматривать эквивалентный протяженный заземлитель с распределенными параметрами (на единицу длины):  $L$  – эквивалентной продольной индуктивностью, Гн/м и  $r_n$  – эквивалентным поперечным переходным сопротивлением, Ом.

Предполагается, что максимальная плотность тока, стекающего при ПУМ с ЗУ в Землю (горную породу), ниже порогового значения, при котором возможно искрообразование [15, 24]. Это условие обеспечивается на стадии проектирования ЗУ [18].

Методика расчета параметров  $r_n$  и  $L$  для различных типов заземляющих устройств дана в [7–15].

Из решения дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитный процесс в ЗУ [24]:

$$-\frac{du_3(x,t)}{dx} = L \frac{di_3(x,t)}{dt}; \quad -\frac{di_3(x,t)}{dx} = \frac{1}{r_n} e^{kx} u_3(x,t), \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент электромагнитной совместимости, м<sup>-1</sup>;

при граничном условии [16–24]:

$$i_3(x=0,t) = \delta(t) Q^-, \quad (8)$$

где  $\delta(t)$  – импульсная функция Дирака [33];  $Q^-$  – разряжаемый заряд, Кл,

следует [24]:

$$t_{03}(x) = t_{03 \min} e^{kx}; \quad (9)$$

$$t_{03 \min} = t_{03}(x=0) = \frac{1}{2} \frac{1}{k^2} \frac{L}{r_n}; \quad (10)$$

$$I(x) = \frac{2}{e^2} \frac{Q^-}{t_{03}(x)}; \quad (11)$$

$$I_{\max} = I(x=0) = \frac{2}{e^2} \frac{Q^-}{t_{03 \min}}. \quad (12)$$

Решение рассматриваемой задачи для КМ и ЗУ при ПУМ дано без учета отраженных волн, что допустимо при выполнении инженерных расчетов молниезащитных устройств при коротких разрядах молнии (ПОК, СОК, ППК). Решение с учетом отраженных волн, что требуется во всех остальных случаях, дано в Приложении.

Условие непрерывности цепи КМ–ЗУ в «точке атаки»:

$$i_K(y=0,t) = i_3(x=0,t), \quad (13)$$

из которого следует

$$t_{0k \min} = t_{03 \min} \quad (14)$$

или

$$\frac{1}{k^2} r_a C = \frac{1}{k^2} \frac{L}{r_n}. \quad (15)$$

Выражения, стоящие в левой и правой частях равенства (15), будем называть критериями подобия канала молнии (КМ) и заземляющего устройства (ЗУ) и обозначать  $PK_{\text{КМ}}$  и  $PK_{\text{ЗУ}}$  соответственно ( $PK_{\text{КМ}} = PK_{\text{ЗУ}}$ ) [24]. Равенство обоих критериев подобия является условием совместимости двух частей цепи, соединенных ПУМ: КМ и ЗУ в продолжении времени разряда.

Это означает, что на формирование параметров волны тока молнии оказывают влияние не только непрерывно изменяющиеся параметры атмосферы, грозовых облаков, канала молнии, но и относительно неизменный эквивалентный параметр заземляющего устройства объекта ( $L/r_n$ ), определяющий длительность фронта волны тока молнии  $t_{03}$  (10) и экстремальную амплитуду этой волны  $I_{\max}$  (12).

Таким образом, из теоретического анализа следует, что для каждого конкретного объекта длительность фронта волны тока молнии, несмотря на стохастический характер процесса, будет ограничена сравнительно близкими предельными значениями ( $t_{0\min} \leq t_0 \leq t_{0\max}$ ) во всем возможном диапазоне изменения грозовых параметров, из которых важнейшим является разряжаемый заряд грозового облака  $Q$ .

При нетривиальности высказанного утверждения, основанного на предположении о том, что «бурю и натиск» грозовой атмосферы можно уложить в «прокрустово ложе» теории длинных линий, авторы считают, что это предположение нуждается в солидном экспериментальном подтверждении.

В качестве такого подтверждения воспользуемся результатами осциллографирования естественных молний, проводимого на Трансваальском плоскогорье в Южной Африке в течение 15 лет (1972–1987 гг.) [5, 16, 19].

Анализ статистической совокупности значений крутизны фронта импульса тока первого короткого нисходящего разряда  $di/dt$  (кА/мкс) в зависимости от амплитуды импульса тока  $I$  ( $10 \text{ кА} \leq I \leq 120 \text{ кА}$ ) [5] позволил получить корреляционную зависимость:

$$\frac{di}{dt}(I) = 0,069 I^{1,19}, \quad (16)$$

которая может быть с несущественной погрешностью представлена в виде линейного соотношения:

$$\frac{di}{dt}(I) = 0,17 I, \quad (17)$$

при этом оказалось, что  $t_0 = \text{const}$ , а именно  $t_0 = 15 \text{ мкс}$  (при  $I = \text{var}$ ).

В этой же работе [5] установлена корреляционная зависимость разряжаемого заряда  $Q$  и амплитуды импульса тока  $I$  (КРОН) в виде

$$Q = 0,051 I^{1,1}, \quad (18)$$

которая также может быть представлена в виде линейной зависимости

$$Q = 0,08 I \quad (19)$$

при  $t_0 = \text{const}$ , а именно  $t_0 \approx 15 \text{ мкс}$  (при  $I = \text{var}$ ).

Наконец, из рассмотрения осциллограммы волны импульса тока молнии при КРОН (осциллограмма снята на том же полигоне 12 апреля 1984 г. [5] (рис. 6, [19]) следует, что  $t_0 = 20 \text{ мкс}$  ( $I = 120 \text{ кА}$ ).

Осциллографирование естественных молний на Трансваальском плоскогорье в течение 15 лет (1972–1987 гг.) показало, что во всем исследованном диапазоне амплитуд волны импульса тока молнии при КРОН ( $10 \text{ кА} \leq I \leq 120 \text{ кА}$ ) длительность фронта волны лежит в сравнительно узких пределах:

$$15 \text{ мкс} \leq t_0 \leq 20 \text{ мкс}. \quad (20)$$

Таким образом, натуральный эксперимент [5, 16, 19] является бесспорным подтверждением стабилизирующего влияния эквивалентного параметра ЗУ ( $L/r_n$ ) на длительность фронта волны тока молнии  $t_{03\min}$  в зоне экстремальных значений параметров тока молнии.

Заметим, что на протяжении 15 лет, в течение которых выполнялось осциллографирование естественных молний на Трансваальском плоскогорье [5], непрерывно и в широких пределах изменялись параметры атмосферного электричества, грозовых облаков, канала молнии и только параметры, определяющие эквивалентный параметр заземляющего устройства ( $L/r_n$ ), оставались относительно неизменными, что дает основание предположить, что именно они оказывают стабилизирующее влияние на длительность фронта волны импульса тока молнии  $t_{0\min}$ .

Из экспериментов [4–6] установлено, что для первого короткого нисходящего разряда коэффициент электромагнитной совместимости

$$k_{\text{пкн}} = 0,316 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}, \quad (21)$$

для последующего короткого нисходящего отрицательного разряда

$$k_{\text{сок}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}. \quad (22)$$

Это означает, что длительность фронта волны тока молнии при первом коротком разряде (10):

$$t_{0\min}^{\text{пкн}} = t_{01} \left( \frac{L}{r_n} \right) = \frac{1}{2} \cdot 10^5 \frac{L}{r_n} \text{ с}, \quad (23)$$

при последующем коротком нисходящем отрицательном разряде

$$t_{0\min}^{\text{сок}} = t_{02} \left( \frac{L}{r_n} \right) = \frac{1}{2} \cdot 0,25 \cdot 10^4 \frac{L}{r_n} \text{ с}. \quad (24)$$

Заметим, что натуральный эксперимент, в результате которого были получены статистические распределения основных параметров тока молнии и

установлены экстремальные значения этих параметров, продолжался непрерывно в трех исследовательских центрах (см. табл. 1) в течение 30 лет (1963–1992 гг.). В результате тщательного анализа, выполненного Техническим комитетом по молниезащите Международной электротехнической комиссии (ТК81 МЭК [3]), за основу расчетных значений для проектирования и устройства молниезащиты I уровня были выбраны статистические распределения параметров тока молнии, полученные ИЦ «1» (табл. 2).

Анализ статистических распределений параметров тока всех трех ИЦ выявил зависимость экстремальных параметров тока молнии от эквивалентного параметра ЗУ  $(L/r_n)_i$ . Это обстоятельство позволяет утверждать, что статистическое распределение  $i$ -го ИЦ пригодно для любого  $j$ -го объекта, если

$$\left(\frac{L}{r_n}\right)_j \geq \left(\frac{L}{r_n}\right)_i. \quad (25)$$

Из табл. 2 следует, что расчетные параметры тока молнии для I уровня защиты [3] не могут быть использованы для объектов с эквивалентным параметром ЗУ:

$$\frac{L}{r_n} < 2 \cdot 10^{-10} \text{ с/м}^2. \quad (26)$$

Таким образом, для стратегически важных объектов (СВО), расположенных в молниепопасных районах Сибири и Дальнего Востока в зонах многолетнемерзлых пород ( $\rho \geq 20 \cdot 10^3$  Ом·м), у которых эквивалентный параметр ЗУ  $\frac{L}{r_n} \leq 1 \cdot 10^{-10} \text{ с/м}^2$ , во избежание повторения известных катастроф и аварий при ПУМ недопустимо использовать рекомендованные стандартом МЭК [3] расчетные значения параметров тока молнии для I уровня защиты (табл. 2, «1»).

Для установления расчетных значений параметров тока молнии воспользуемся результатами выполненного анализа статистических распределений. Используя характеристики ИЦ (табл. 1) и методики расчетов  $L$  и  $r_n$  [7–15], можно определить эквивалентные параметры  $(L/r_n)_i$  для каждого ИЦ (табл. 2). Далее по формулам (10), (12), (21)–(24) рассчитываются зависимости  $t_{01}\left(\frac{L}{r_n}\right)$  и  $t_{02}\left(\frac{L}{r_n}\right)$ , представленные на рис. 1; зависимости  $I_1\left(\frac{L}{r_n}\right)$ ,

Таблица 1

Исследовательский центр	Характеристики				Публикации
	Конструкция ЗУ	Параметр			
		$\rho$ , Ом·м	$L$ , Гн/м	$r_n$ , Ом·м	
«1» Швейцария, гора Сан Сальваторе (640 м) близ озера Лугано (912 в у.м.), 70-метровая башня 1963–1971 гг.	Скваженный заземлитель	$5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,5\rho$	[4, 16, 19]
«2» ЮАР, Трансваальское плоскогорье, 60-метровая мачта на 80-метровом холме на равнине на 1400 м в у.м.(вблизи Претории) 1972–1987 гг.	Классическое ЗУ, состоящее из горизонтальной сетки и вертикальных электродов	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-6}$	$0,5\rho$	[5, 16, 19]
«3» Германия, Южная Бавария, телебашня Пейсенберг (высота 160м), гора 288 м на равнине на 988 м в у.м., вблизи Мюнхена 1978–1992 гг.	Классическое ЗУ, состоящее из горизонтальной сетки и вертикальных электродов	$2,5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-6}$	$0,5\rho$	[6, 16]

Таблица 2

Объект	Параметр									
	$\rho$ , Ом·м	$L$ , Гн/м	$r_n$ , Ом·м	$L/r_n$ , с/м <sup>2</sup>	$t_{01}$ , мкс	$t_{02}$ , мкс	$I_1$ , кА	$I_2$ , кА	$(di/dt)_{\max}$ , кА/мкс	$(di/dt)_{30/90\%}$ , кА/мкс
«1»	$5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$12,5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-10}$	10	0,25	250*	50	500	200
«2»	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-10}$	20	0,50	125	–	320	130
«3»	$2,5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,25 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^{-10}$	40	1,0	–	19,5	133	55
СВО	$20 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-10}$	5	0,12	500	100	800	320
Тип разряда	–	–	–	–	ППК	СОК	ППК	СОК	СОК	СОК

Примечание: ППК – первый положительный короткий; СОК – последующий отрицательный короткий.

\* Вместо этого 5%-го значения амплитуды тока (натурный эксперимент) в стандарте МЭК [3] для I уровня защиты принято значение 200 кА.

$I_2\left(\frac{L}{r_n}\right)$  – на рис. 2 и зависимость  $\frac{\partial i}{\partial t}\left(\frac{L}{r_n}\right)$  – на рис.

3. На этих же рисунках даны экстремальные значения параметров тока молнии, полученные из осциллограмм естественных молний ИЦ «1»–«3»:

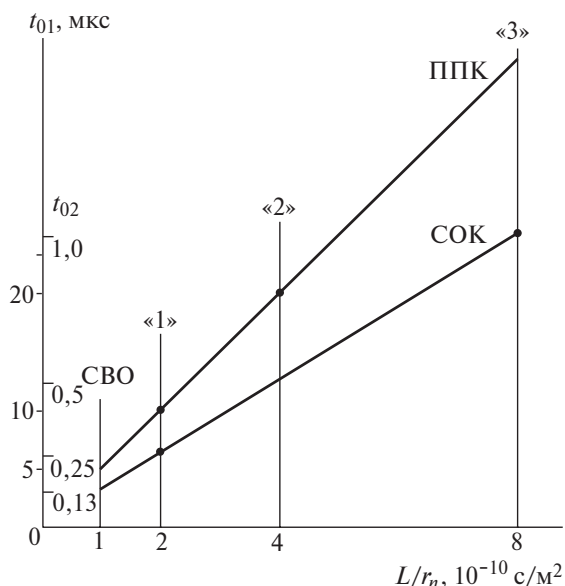
$$t_{01}\left(\frac{L}{r_n}\right)_1, t_{02}\left(\frac{L}{r_n}\right)_1, t_{01}\left(\frac{L}{r_n}\right)_2, t_{02}\left(\frac{L}{r_n}\right)_3;$$

$$I_1\left(\frac{L}{r_n}\right)_1, I_2\left(\frac{L}{r_n}\right)_1, I_1\left(\frac{L}{r_n}\right)_2, I_2\left(\frac{L}{r_n}\right)_3;$$

$$\frac{\partial i}{\partial t}\left(\frac{L}{r_n}\right)_1, \frac{\partial i}{\partial t}\left(\frac{L}{r_n}\right)_3.$$

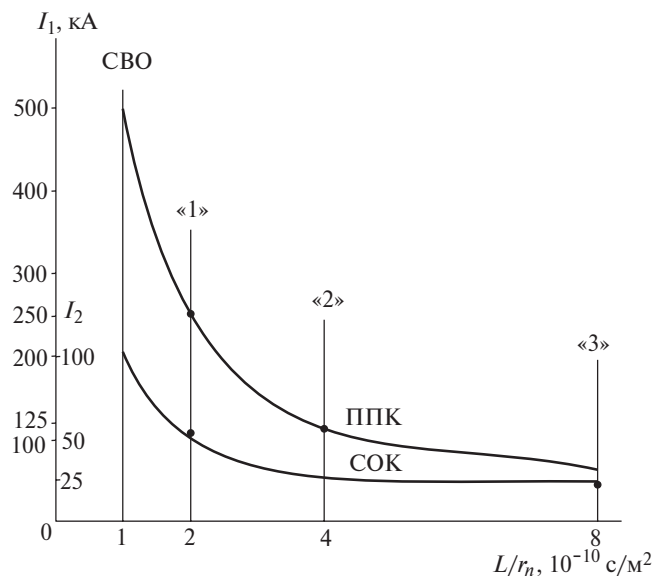
Хорошее согласие результатов теоретического анализа с экстремальными значениями, полученными из осциллограмм естественных молний, подтверждает правильность предположения о корреляционной зависимости параметров тока молнии от эквивалентного параметра ЗУ ( $L/r_n$ ). Это обстоятельство дает основание использовать полученные результаты для повышения уровня молниезащиты СВО в Сибири и на Дальнем Востоке при  $L/r_n \leq 1 \cdot 10^{-10}$  с/м<sup>2</sup> до безопасного.

Оценка экстремальных значений амплитуды волны импульса напряжения заземляющего устройства объекта в зависимости от его эквивалентного параметра ( $L/r_n$ ) при разряде молнии дана в Приложении 2.

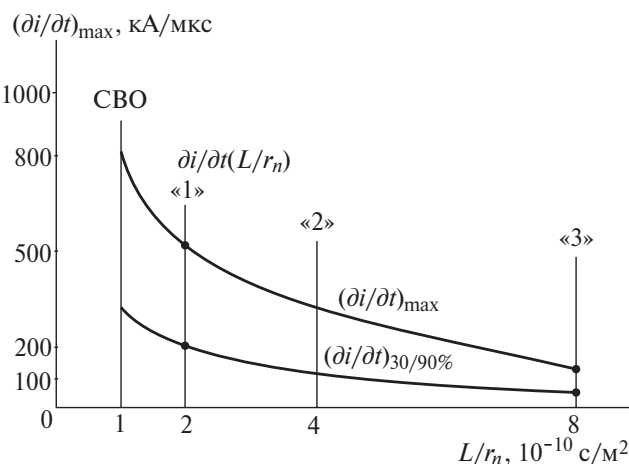


**Рис. 1.** Длительность фронта волны импульса тока молнии в зависимости от эквивалентного параметра ЗУ –  $L/r_n$ :  $t_{01}\left(\frac{L}{r_n}\right)_1$ ;

$t_{02}\left(\frac{L}{r_n}\right)_1$ : • – из осциллограмм естественных молний; — — теоретические зависимости  $t_{01}\left(\frac{L}{r_n}\right)_1$  и  $t_{02}\left(\frac{L}{r_n}\right)_1$



**Рис. 2.** Амплитуда волны импульса тока молнии в зависимости от эквивалентного параметра ЗУ –  $L/r_n$ :  $I_1\left(\frac{L}{r_n}\right)$  и  $I_2\left(\frac{L}{r_n}\right)$ ; • – из осциллограмм естественных молний; — — теоретические зависимости  $I_1\left(\frac{L}{r_n}\right)$ ;  $I_2\left(\frac{L}{r_n}\right)$



**Рис. 3.** Крутизна фронта волны импульса тока молнии при последующем отрицательном коротком разряде в зависимости от эквивалентного параметра ЗУ –  $L/r_n$ : • – из осциллограмм естественных молний; — — теоретические зависимости  $\frac{\partial i}{\partial t}\left(\frac{L}{r_n}\right)$

Приложение 1. Расчетная модель длинных линий конечной длины. В общем случае (для конечных  $h$  и  $l$ ) решения системы уравнений (7) имеют вид:

$$\bar{u}_k(y) = C_{1k} J_0(\eta p^{1/2}) + C_{2k} N_0(\eta p^{1/2}); \quad (\text{П1-1})$$

$$\bar{i}_k(y) = e^{-\frac{1}{2}ky} [C_{3k} J_1(\eta p^{1/2}) + C_{4k} N_1(\eta p^{1/2})]; \quad (\text{П1-2})$$

$$\bar{u}_3(x) = C_{13} J_0(\alpha p^{1/2}) + C_{23} N_0(\alpha p^{1/2}); \quad (\text{П1-3})$$

$$\bar{i}_3(x) = e^{-\frac{1}{2}kx} [C_{33} J_1(\alpha p^{1/2}) + C_{43} N_1(\alpha p^{1/2})], \quad (\text{П1-4})$$



где

$$\eta = 2j \frac{1}{k} \sqrt{r_a C} e^{\frac{1}{2}ky}; \quad (\text{П1-5})$$

$$\alpha = 2j \frac{1}{k} \sqrt{L/r_n} e^{\frac{1}{2}ky}. \quad (\text{П1-6})$$

При этом граничные условия для канала молнии (КМ):

$$\bar{i}_k = (y=0) = Q; \quad (\text{П1-7})$$

$$\bar{u}_k = (y=h) = 0; \quad (\text{П1-8})$$

$$-\frac{d\bar{u}_k(y=0)}{dy} = r_a Q; \quad (\text{П1-9})$$

$$-\frac{d\bar{i}_k(y=h)}{dy} = 0; \quad (\text{П1-10})$$

для протяженного заземлителя (ПЗ):

$$\bar{i}_3 = (x=0) = Q; \quad (\text{П1-11})$$

$$\bar{i}_3 = (x=l) = 0; \quad (\text{П1-12})$$

$$-\frac{d\bar{u}_3(x=0)}{dx} = pLQ; \quad (\text{П1-13})$$

$$-\frac{d\bar{i}_3(x=l)}{dx} = 0. \quad (\text{П1-14})$$

Тогда, решая системы уравнений для КМ: (П1-1), (П1-2) и (П1-7) – (П1-10) и для ПЗ: (П1-3), (П1-4) и (П1-11) – (П1-14), получим для КМ – (П1-2), где

$$C_{3k} = Q \frac{N_1'(\chi p^{1/2}) - \frac{1}{2} k N_1(\chi p^{1/2})}{J_1(\eta_0 p^{1/2}) [N_1'(\chi p^{1/2}) - \frac{1}{2} k N_1(\chi p^{1/2})] -} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1}{-N_1(\eta_0 p^{1/2}) [J_1'(\chi p^{1/2}) - \frac{1}{2} k J_1(\chi p^{1/2})]}; \quad (\text{П1-15})$$

$$C_{4k} = -Q \frac{J_1'(\chi p^{1/2}) - \frac{1}{2} k J_1(\chi p^{1/2})}{J_1(\eta_0 p^{1/2}) [N_1'(\chi p^{1/2}) - \frac{1}{2} k N_1(\chi p^{1/2})] -} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1}{-N_1(\eta p^{1/2}) [J_1'(\chi p^{1/2}) - \frac{1}{2} k J_1(\chi p^{1/2})]}; \quad (\text{П1-16})$$

$$\eta_0 = 2j \frac{1}{k} \sqrt{r_a C}; \quad (\text{П1-17})$$

$$\chi = 2j \frac{1}{k} \sqrt{r_a C} e^{\frac{1}{2}kh}, \quad (\text{П1-18})$$

получим для ПЗ:

$$\bar{u}(x) = QLp \frac{N_1(\lambda p^{1/2}) J_0(\alpha p^{1/2}) - J_1(\lambda p^{1/2}) N_0(\alpha p^{1/2})}{J_1(\alpha_0 p^{1/2}) N_1(\lambda p^{1/2}) - N_1(\alpha_0 p^{1/2}) J_1(\lambda p^{1/2})}; \quad (\text{П1-19})$$

$$\bar{i}(x) = Q e^{\frac{1}{2}kx} \frac{N_1(\lambda p^{1/2}) J_0(\alpha p^{1/2}) - J_1(\lambda p^{1/2}) N_0(\alpha p^{1/2})}{J_1(\alpha_0 p^{1/2}) N_1(\lambda p^{1/2}) - N_1(\alpha_0 p^{1/2}) J_1(\lambda p^{1/2})}; \quad (\text{П1-20})$$

$$\alpha_0 = 2j \frac{1}{k} \sqrt{L/r_n}; \quad (\text{П1-21})$$

$$\lambda = 2j \frac{1}{k} \sqrt{L/r_n} e^{\frac{1}{2}kl}. \quad (\text{П1-22})$$

Токи и потенциалы КМ и ПЗ находятся по формулам обращения Римана–Меллина:

$$i_{k(3)}(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} \bar{i}_{k(3)} e^{pt} dp; \quad (\text{П1-23})$$

$$u_{k(3)}(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} \bar{u}_{k(3)} e^{pt} dp. \quad (\text{П1-24})$$

Рассмотрим приближенное решение рассматриваемой задачи, удовлетворяющее требованиям к допустимой погрешности порядка 10 % искомого значения тока. Если пренебречь неоднородностью длинной линии, то ток КМ  $i_k(y,t)$  и ток ПЗ  $i_3(x,t)$  можно представить в виде [16]:

$$i_k(y \neq 0, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} Q \sqrt{r_a C} \frac{y}{t^{3/2}} e^{-\frac{1}{4} r_a C \frac{y^2}{t}} +$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{\pi}} Q \sqrt{r_a C} \frac{h}{t^{3/2}} \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} (-1)^n \left( \frac{y}{2h} - n \right) e^{-\left( n - \frac{y}{2h} \right)^2 r_a C \frac{h^2}{t}}; \quad (\text{П1-25})$$

$$i_3(x \neq 0, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} Q \sqrt{L/r_n} \frac{x}{t^{3/2}} e^{-\frac{1Lx^2}{4r_n t}} +$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{\pi}} Q \sqrt{L/r_n} \frac{1}{t^{3/2}} \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} \left( \frac{x}{2l} - n \right) e^{-\left( n - \frac{x}{2l} \right)^2 \frac{Ll^2}{r_n t}}. \quad (\text{П1-26})$$

Из анализа выражений (П1-25), (П1-26) видно, что токи КМ  $i_k(y,t)$  и ПЗ  $i_3(x,t)$  получаются в результате суперпозиции падающей волны и суммы бесконечного ряда отраженных волн. Причина отличия структуры выражения  $i_k$  и  $i_3$  в том, что отраженные от облаков волны тока имеют тот же знак, что и падающая волна канала молнии и потому вызывают увеличение суммарного тока  $i_k$ , а волны, отраженные от разомкнутого конца заземлителя, уменьшают суммарный ток  $i_3$  по сравнению с током падающей волны.

Следующее приближение к точному решению можно получить, если учесть неоднородность длинной линии, воспользовавшись соотношениями:

$$\bar{i}_k(y) = Q \frac{\text{ch}(\eta p^{1/2})}{\text{ch}(\chi p^{1/2})}; \quad (\text{П1-27})$$

$$\bar{i}_3(x) = Q \frac{\text{sh}(\alpha p^{1/2})}{\text{sh}(\lambda p^{1/2})}; \quad (\text{П1-28})$$

где

$$\eta = \sqrt{r_a C} e^{\frac{1}{2}ky} (h-y); \quad (\text{П1-29})$$

$$\chi = \sqrt{r_a C} e^{\frac{1}{2}ky} h; \quad (\text{П1-30})$$

$$x = \sqrt{L/r_n} e^{\frac{1}{2}ky} (l-x); \quad (\text{П1-31})$$

$$\lambda = \sqrt{L/r_n} e^{\frac{1}{2}kl} l. \quad (\text{П1-32})$$

Тогда

$$i_k(y,t) = -Q \frac{1}{\chi} \frac{\partial}{\partial \eta} \vartheta_1 \left( \frac{\eta}{2\chi} \left| \frac{j\pi t}{\chi^2} \right. \right); \quad (\text{П1-33})$$

$$i_3(x,t) = Q \frac{1}{\lambda} \frac{\partial}{\partial x} \vartheta_4 \left( \frac{x}{2\lambda} \left| \frac{j\pi t}{\lambda^2} \right. \right); \quad (\text{П1-34})$$

где  $\vartheta_1(v|\tau)$ ,  $\vartheta_4(v|\tau)$  – этта-функции [34–37];

$$\vartheta_1(v|\tau) = (-j\tau)^{\frac{1}{2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n e^{-j\pi(v-\frac{1}{2}+n)^2\tau^{-1}}; \quad (\text{П1-35})$$

$$\vartheta_4(v|\tau) = (-j\tau)^{\frac{1}{2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-j\pi(v-\frac{1}{2}+n)^2\tau^{-1}}. \quad (\text{П1-36})$$

Подставляя  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_4$  в (П1-33) и (П1-34), после преобразований получим:

$$i_k(y,t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} Q \sqrt{r_a C} e^{\frac{1}{2}kh} \frac{h}{t^{3/2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n \times$$

$$\times \left[ e^{-\frac{1}{2}k(h-y)\left(\frac{y}{2h}-\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}-n} \right]^2 \times$$

$$\times r_a C e^{kh} \frac{h^2}{t}; \quad (\text{П1-37})$$

$$i_3(x,t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} Q \sqrt{L/r_n} e^{\frac{1}{2}kl} \frac{l}{t^{3/2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ e^{-\frac{1}{2}k(l-x)\left(\frac{x}{2l}-\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}-n} \right]^2$$

$$\times \frac{L}{r_n} e^{kl} \frac{l^2}{t}. \quad (\text{П1-38})$$

Выражения (П1-37), (П1-38), также данные в виде падающей ( $n=0$ ) и отраженных волн ( $-\infty \leq n \leq +\infty$ ,  $n \neq 0$ ) позволяют рассчитать токи в канале молнии  $i_k(x,t)$  и в протяженном неоднородном заземлителе конечной длины  $i_3(x,t)$ .

**П р и л о ж е н и е 2.** Амплитуда волны импульса напряжения заземляющего устройства при ударе молнии. Согласно [24] напряжение заземляющего устройства  $i_3(x,t)$  при граничном условии

$$i_3(x=0, Q) = \delta(t) Q \quad (\text{П2-1})$$

определяется выражением

$$u_3(x,t) = Q \frac{1}{k_3} L t^{-2} e^{-2t_{03} t^{-1}} (2t_{03} t^{-1} - 1), \quad (\text{П2-2})$$

где

$$Q = \frac{e^2}{2} I t_{03}, \quad (\text{П2-3})$$

$$t_{03} = \frac{1}{2} \frac{1}{k_3^2} \frac{L}{r_n} e^{k_3 x}. \quad (\text{П2-4})$$

Напряжение ЗУ при  $x=0$

$$u_3(0,t) = \frac{e^2}{2} I t_{03 \min} \frac{1}{k_3} L t^{-2} e^{-2t_{03 \min} t^{-1}} (2t_{03 \min} t^{-1} - 1); \quad (\text{П2-5})$$

$$t_{03 \min} = \frac{1}{2} \frac{1}{k_3^2} \frac{L}{r_n}. \quad (\text{П2-6})$$

Анализ выражения (П2-5) показал, что экстремальные значения амплитуды волны импульса напряжения соответствуют двум моментам времени:

$$t_1 = 0,5858 t_{03 \min}; \quad (\text{П2-7})$$

$$t_2 = 3,413 t_{03 \min}, \quad (\text{П2-8})$$

при этом

$$|u_3(0,t_1)| >> |u_3(0,t_2)|. \quad (\text{П2-9})$$

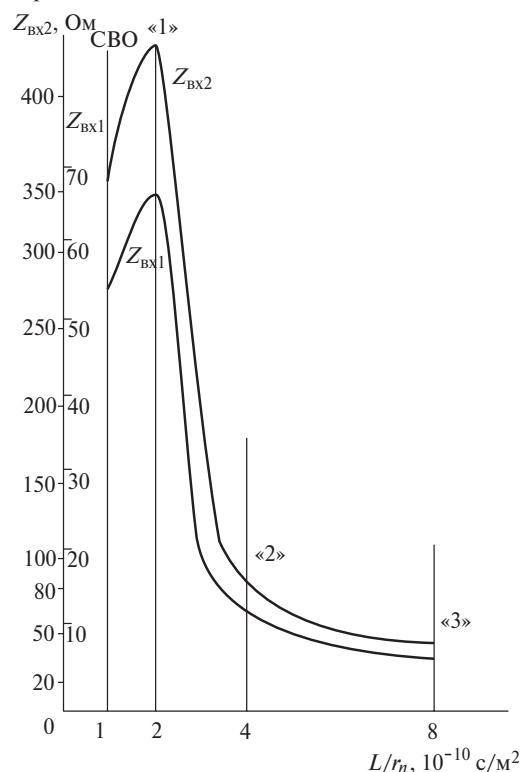
Максимальное значение амплитуды напряжения ЗУ при ПУМ, соответствующее координатам ( $x=0$ ,  $t=t_1$ ), обозначим  $U_3$ . В дальнейшем для упрощения обозначений примем

$$t_{03 \min} = t_0. \quad (\text{П2-10})$$

Подставляя найденные значения  $t_1$  (П2-7) в уравнение (П2-5), получим

$$U_3 = 0,855 I L / t_0 k_3, \quad (\text{П2-11})$$

из которого



**Рис. 4.** Зависимость кажущегося входного сопротивления заземляющего устройства объекта при первом (ППК) и последующем (СОК) разрядах молнии  $Z_{вх1}$  и  $Z_{вх2}$  от эквивалентного параметра ЗУ ( $L/r_n$ )

Таблица П2.1

Объект	Параметр													
	$\rho$ , Ом·м	$L$ , Гн/м	$r_n$ , Ом·м	$L/r_n$ , с/м <sup>2</sup>	$t_{01}$ , мкс	$t_{02}$ , мкс	$I_1$ , кА	$I_2$ , кА	$k_{31}$ , м <sup>-1</sup>	$k_{32}$ , м <sup>-1</sup>	$z_{вх1}$ , Ом	$z_{вх2}$ , Ом	$U_{31}$ , МВ	$U_{32}$ , МВ
«1»	$5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^6$	$12,5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-10}$	10	0,25	250	50	$0,316 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	67,6	427,5	16,9	21,4
«2»	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-10}$	20	0,5	125	30	То же	То же	13,5	85,5	1,7	2,6
«3»	$2,5 \cdot 10^3$	То же	$12,5 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^{-10}$	40	1,0	65	19,5	—	—	6,75	42,75	0,45	1,1
СВО	$20 \cdot 10^3$	—	$10 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-10}$	5	0,12	500	100	—	—	54,1	342	27,1	34,2
Тип разряда	—	—	—	—	ППК	СОК	ППК	СОК	ППК	СОК	ППК	СОК	ППК	СОК

$$U_3 = I z_{вх}, \tag{П2-12}$$

где  $z_{вх} = 0,855L/t_0 k_3$  – кажущееся входное сопротивление заземляющего устройства или

$$z_{вх} = 1,71 k_3 r_n \tag{П2-13}$$

Численные значения кажущегося входного сопротивления и амплитуды волны импульса напряжения заземляющего устройства при первом положительном и последующем отрицательном коротких разрядах молнии даны в табл. Приложения 2 и на рис. 4 и 5.

**Выводы.** 1. Анализ статистических распределений параметров тока молнии, полученных в результате 30-летнего осциллографирования естественных молний тремя исследовательскими центрами, выявил корреляционную зависимость экстре-

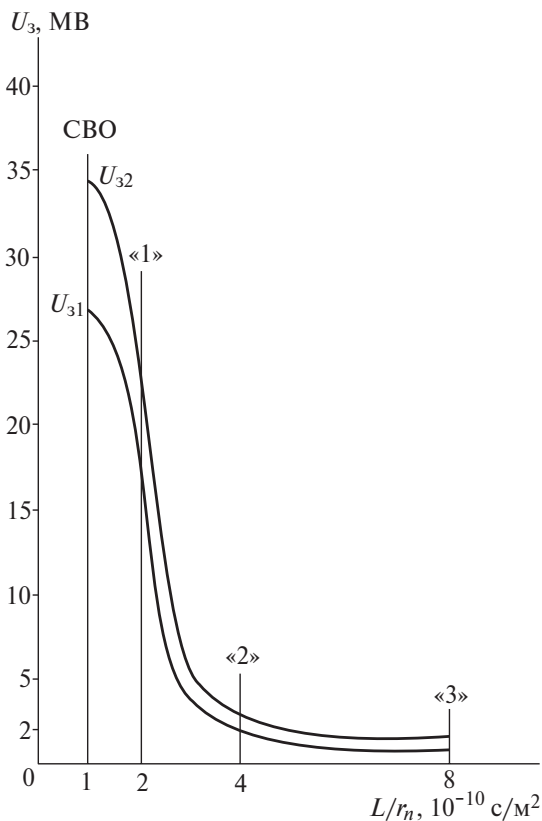


Рис. 5. Зависимость амплитуды волны импульса напряжения заземляющего устройства объекта  $U_{31}$ ,  $U_{32}$  от его эквивалентного параметра  $(L/r_n)$  при прямом ударе молнии

мальных значений этих параметров от эквивалентного параметра заземляющего устройства  $(L/r_n)_i$ .

2. Расчетные значения параметров тока молнии для I уровня защиты, рекомендованные стандартом МЭК [3] на основе эксперимента, выполненного тремя ИЦ при эквивалентном параметре каждого ЗУ  $(L/r_n)_j \geq 2 \cdot 10^{-10}$  с/м<sup>2</sup>, не могут быть использованы в качестве расчетных значений для защищаемых объектов с тем же уровнем защиты при  $(L/r_n)_j < 2 \cdot 10^{-10}$  с/м<sup>2</sup>.

3. Эквивалентный параметр ЗУ стратегически важных объектов, расположенных в Сибири и на Дальнем Востоке в зонах многолетнемерзлых пород ( $\rho \geq 20 \cdot 10^3$  Ом·м):

$$(L/r_n) \leq 1 \cdot 10^{-10} \text{ с/м}^2.$$

Это означает, что в качестве расчетных значений параметров тока молнии для указанных СВО следует использовать значения, приведенные в табл. 2 и на рис. 1–3.

4. Экстремальное значение амплитуды волны импульса тока молнии  $I$  при ударе в СВО в Сибири и на Дальнем Востоке в зонах многолетнемерзлых пород составляет 500 кА (при первом положительном коротком разряде – ППК) и 100 кА (при последующем отрицательном коротком разряде – СОК), при этом амплитуда волны импульса напряжения заземляющего устройства СВО достигает 27 МВ (ППК) и возрастает до 35 МВ при последующем отрицательном коротком разряде.

5. В Сибири и на Дальнем Востоке в зонах многолетнемерзлых пород в результате возрастания кажущегося входного сопротивления ЗУ объекта ( $z_{вх1}$ ,  $z_{вх2}$ ) стабилизирующее влияние ЭПЗУ на экстремальные значения параметров тока молнии, используемые в качестве расчетных значений для I уровня молниезащиты СВО, становится *определяющим*.

6. В качестве итогового резюме необходимо отметить: из установленной корреляционной зависи-



мости параметров тока молнии от ЭПЗУ (рис. 1–3), казалось бы, следует, что при ЭПЗУ  $>8 \cdot 10^{-10}$  с/м<sup>2</sup> ( $\rho < 2,5 \cdot 10^3$  Ом·м) расчетные параметры тока молнии можно понизить, что облегчило бы молниезащитные мероприятия. Однако от такого заманчивого решения приходится отказаться, так как при  $(L/r_n) > 8 \cdot 10^{-10}$  с/м<sup>2</sup> влияние ЭПЗУ на параметры тока молнии существенно ослабевает (кажущееся входное сопротивление ЗУ становится значительно меньше волнового сопротивления канала молнии), что не позволяет обеспечить *гарантированное* устойчивое снижение экстремальных параметров и, следовательно, – расчетных параметров тока молнии для I уровня защиты.

7. Для уточнения нормативных параметров тока молнии в диапазоне

$$4 \cdot 10^{-10} \text{ с/м}^2 \leq \text{ЭПЗУ} \leq 8 \cdot 10^{-10} \text{ с/м}^2$$

необходимо получить надежные статистические распределения параметров тока молнии из представительного натурального эксперимента в рассматриваемом диапазоне ЭПЗУ. Выполнение такого эксперимента предполагает координацию работ мировых исследовательских центров молниезащиты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Инструкция** по устройству молниезащиты зданий и сооружений. РД.34.21.122–87. М.: Министерство энергетики и электрификации СССР, 1988, 50 с.
2. **Инструкция** по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций (СО-153-34.21.122–2003). Изд-во МЭИ, 2004, 56 с.
3. **IEC 62305**. Protection against Lightning. Part 1-5, 2003.
4. **Berger K.** Messung und Resultate der Blitzforschung auf der Monte San Salvatore bei Lugano, der Jahre 1963 – 1971. Bull. SEV, 1972, vol. 63, № 24, pp. 1403–1422.
5. **Geldenhuis H.T., Ericsson A.T. and Bourn G.W.** Fifteen years Data of Lightning Current Measurements on a 60m Mast. – 19 Intern. Conf. on Lightning Protection (ICLP, 1988), Graz, Austria, pp. 451–456.
6. **Beierl O.** Front Shape Parameters of Negative Subsequent Strokes Measured at the Peissenberg Tower. (ICLP, 1992), Berlin, Germany, pp. 19–24.
7. **Карякин Р.Н.** Гальваническое влияние тяговых сетей переменного тока. – Электричество, 1965, № 8, с. 57–62.
8. **Карякин Р.Н.** Сопротивление растеканию контуров заземления тяговых подстанций переменного тока. – Электричество, 1966, № 3, с. 64–66.
9. **Карякин Р.Н., Власов С.П., Швейко И.А.** Распределение потенциала на поверхности земли территории тяговой подстанции. – Электричество, 1968, № 3, с. 54–58.
10. **Карякин Р.Н.** Электромагнитные процессы в протяженных заземлителях в неоднородных структурах. – Электричество, 1996, № 7, с. 43–51.
11. **Карякин Р.Н.** Нормативные основы использования проводящих частей в качестве PEN-проводников. – Электричество, 1997, № 10, с. 29–40.
12. **Карякин Р.Н.** Электробезопасность заземляющего устройства. – Электричество, 2000, № 12, с. 25–32.
13. **Карякин Р.Н.** Справочник по молниезащите. М.: Энергосервис, 2005, 880 с.
14. **Карякин Р.Н.** Заземляющие устройства электроустановок. 2-е изд. М.: Энергосервис, 2006, 520 с.
15. **Карякин Р.Н.** Нормы устройства сетей заземления. 4-е изд. М.: Энергосервис, 2006, 355 с.
16. **Карякин Р.Н.** Методика расчета основных параметров нисходящего отрицательного разряда молнии. – Электричество, 2006, № 11, с. 24–32.
17. **Карякин Р.Н., Лосев В.Г.** Форма волны тока молнии в контактной сети. – Электричество, 2008, № 11, с. 12–22.
18. **Карякин Р.Н., Лосев В.Г.** Удар молнии в протяженный неоднородный заземлитель – Электричество, 2009, № 4, с. 12–18.
19. **Карякин Р.Н., Лосев В.Г.** Математическая модель канала молнии. – Электричество, 2009, № 10, с. 25–35.
20. **Карякин Р.Н., Лосев В.Г.** Удар молнии в высокую башню. – Электричество, 2011, № 7, с. 25–31.
21. **Карякин Р.Н., Лосев В.Г.** Анализ инженерных моделей главной стадии молнии. – Электричество, 2012, № 3, с. 23–29.
22. **Карякин Р.Н., Лосев В.Г.** Математическая модель системы «канал молнии – линия электропередачи». – Электричество, 2013, № 1, с. 60–66.
23. **Карякин Р.Н., Лосев В.Г.** Модифицированная инженерная модель главной стадии молнии MQCV. – Электричество, 2017, № 4, с. 31–38.
24. **Карякин Р.Н., Лосев В.Г.** Математическая модель системы «канал молнии–протяженный заземлитель». – Электричество, 2018, № 6, с. 41–48.
25. **Горин Б.Н.** Математическое моделирование главной стадии молнии. – Электричество, 1985, № 4, с. 10–15.
26. **Базелян Э.М., Райзер Ю.П.** Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001, 319 с.
27. **Rakov V.A.** Lightning Return Stroke Speed: A Review of Experimental Data. – Proc. of 27th Intern. Conf. on Lightning Protection, 2004. Avignon, France, 13 p.
28. **Rakov V.A. and Uman M.A.** Lightning Physics and Effects. Cambridge University Press, 2006, 687p.
29. **Борисов Р.К., Смирнов М.Н., Коломиец Е.В., Янковский Б.Д.** Экспериментальные исследования импульсных характеристик заземляющих устройств. Сб. докладов Российской конф. по заземляющим устройствам/Под ред. Ю.В. Целебровского. Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2005, с. 107–113.
30. **Hasse P., Wessinger J., Zischank W.** Handbuch für Blitzschutz und Erdung. – Pflaum Verlag GMBH. Munchen–Berlin–Heidelberg, 2006, 314 p.
31. **Кадомская К.П., Рейхердт А.А.** Моделирование волн тока молнии при расчетах грозоупорности электрических сетей. – Электричество, 2006, № 11, с. 17–23.
32. **Александров Г.Н.** Молния и молниезащита. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007, 281 с.
33. **Ван дер Поль Б., Бреммер Х.** Операционное исчисление на основе двустороннего преобразования Лапласа. М.: Изд-во иностранной литературы, 1952, 506 с.
34. **Сикорский Ю.С.** Элементы теории эллиптических функций. М.; Л.: Изд-во ОНТИ НКТП СССР, 1936, 365 с.
35. **Янке Е. Эмде Ф. Лёш Ф.** Специальные функции. 2-е изд./Пер. с 6-го перераб. немецкого изд. М.: Наука, 1968, 344 с.

36. Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований. Том 1. Преобразования Фурье, Лапласа, Меллина. М.: Наука, 1969, 343 с.

37. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Изд-во иностранной литературы, 1951, 828 с.

[05.06.2019]

*А в т о р ы:* **Карякин Рудольф Николаевич** – доктор техн. наук, главный научный сотрудник отдела комплексной защиты электроустановок Научно-исследовательского института электромонтажной технологии, диссертацию защитил в 1976 г.

**Лосев Виктор Григорьевич** – кандидат техн. наук, заместитель начальника Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД», диссертацию защитил в 2007 г.

*Electrichestvo*, 2020, No. 3, pp. 28–38

DOI:10.24160/0013-5380-2020-3-28-38

## Lightning Strike at a Grounding Device

**KARYAKIN Rudol'f N.** (*Scientific and Research Institute of Wiring Technology, Moscow, Russia*) – Chief researcher of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

**LOSEV Viktor G.** (*Transenergo – Branch of the Public Company «RZhD», Moscow, Russia*) – Deputy Head, Cand. Sci. (Eng.)

The statistical distributions of lightning current parameters obtained from an analysis of natural lightning waveforms carried out by three research centers are considered, and it has been found from the consideration results that the extreme values of these parameters, based on which the recommendations of the relevant IEC standards were elaborated, are in correlation dependence on the protected facility's grounding device equivalent parameter (GDEP). The application field of the IEC standard's recommendations that use the extreme values of these lightning current parameters as the design inputs for level I lightning protection is limited to facilities having the  $GDEP \geq 2 \cdot 10^{-10}$  s/m<sup>2</sup>. For strategically important facilities having the  $GDEP < 1 \cdot 10^{-10}$  s/m<sup>2</sup>, to avoid repeated occurrence of well-known disasters and accidents caused by a direct lightning stroke (DLS), it is recommended to adopt the design values of lightning current parameters corresponding to those at which safety is guaranteed in the case of DLS for strategically important objects located in Siberia and the Far East.

**Key words:** long line, lightning protection, lightning current, lightning channel, grounding device, permafrost rocks

### REFERENCES

1. **Instruktsiya po ustroystvu molniyezashchity zdaniy i sooruzheniy.** RD.34.21.122–87 (Instructions for lightning protection of buildings and structures. RD 34.21.122–87). Moscow, Ministry of Energy and Electrification of the USSR, 1988, 50 p.
2. **Instruktsiya po ustroystvu molniyezashchity zdaniy, sooruzheniy i promyshlennykh kommunikatsiy (SO-153-34.21.122–2003)** (Instructions for lightning protection devices for buildings, structures and industrial communications (CO-153-34.21.122-2003)). Moscow, Publ. House of MPEI, 2004, 56 p.
3. **IEC 62305.** Protection against Lightning. Part 1-5, 2003.
4. **Berger K.** Messung und Resultate der Blitzforschung auf der Monte San Salvatore bei Lugano, der Jahre 1963 – 1971. Bull. SEV, 1972, vol. 63, № 24 (pp. 1403–1422).
5. **Geldenhuys H.T., Ericsson A.T. and Bourn G.W.** Fifteenyears Data of Lightning Current Measurements on a 60m Mast. – 19 Intern. Conf. on Lightning Protection (ICLP, 1988), Graz, Austria, pp. 451–456.
6. **Beierl O.** Front Shape Parametrs of Negative Subsequent Strokes Measured at the Peissenberg Tower. (ICLP, 1992), Berlin, Germany, pp. 19–24.
7. **Karyakin R.N.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1965, No. 8, pp. 57–62.
8. **Karyakin R.N.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1966, No. 3, c. 64–66.
9. **Karyakin R.N., Vlasov S.P., Sheveyko I.A.** *Elektrichestvo – in Russ (Electricity)*, 1968, No. 3, pp. 54–58.
10. **Karyakin R.N., Vlasov S.P., Sheveyko I.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1996, No. 7, pp. 43–51.
11. **Karyakin R.N.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1997, No. 10, pp. 29–40.
12. **Karyakin R.N.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2000, No. 12, pp. 25–32.
13. **Karyakin R.N.** *Spravochnik po molniyezashchite* (Lightning protection reference). Moscow, Energoservice, 2005, 880 p.
14. **Karyakin R.N.** *Zazemlyayushchiye ustroystva elektroustanovok. 2-ye izd.* (Grounding devices of electrical installations. 2nd ed.). Moscow, Energoservice, 2006, 520 p.
15. **Karyakin R.N.** *Normy ustroystva setey zazemleniya. 4-ye izd.* (Standarts for grounding networks. 4th ed.), Moscow, Energoservice, 2006, 355 p.
16. **Karyakin R.N.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2006, № 11, c. 24–32.
17. **Karyakin R.N., Losev V.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2008, No. 11, pp. 12–22.
18. **Karyakin R.N., Losev V.G.** *Elektrichestvo – in Russ (Electricity)*, 2009, No. 4, pp. 12–18.
19. **Karyakin R.N., Losev V.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 10, pp. 25–35.

20. **Karyakin R.N., Losev V.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 7, c. 25–31.
21. **Karyakin R.N., Losev V.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 3, pp. 23–29.
22. **Karyakin R.N., Losev V.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 1, pp. 60–66.
23. **Karyakin R.N., Losev V.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 4, pp. 31–38.
24. **Karyakin R.N., Losev V.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 6, pp. 41–48.
25. **Gorin B.N.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1985, No. 4, pp. 10–15.
26. **Bazelyan E.M., Rayzer Yu.P.** *Fizika molnii i molniyevyashchity (Physics of lightning and lightning protection)*. Moscow, Fizmatlit, 2001, 319 p.
27. **Rakov V.A.** Lightning Return Stroke Speed: A Review of Experimental Data. – Proc. of 27th Intern. Conf. on Lightning Protection, 2004. Avignon, France, 13 p.
28. **Rakov V.A. and Uman M.A.** *Lightning Physics and Effects*. Cambridge University Press, 2006, 687 p.
29. **Borisov R.K., Smirnov M.N., Kolomiyets Ye.V., Yankovskiy B.D.** *Eksperimental'nyye issledovaniya impul'snykh kharakteristik zazemlyayushchikh ustroystv. Sb. dokladov Rossiyskoy konf. po zazemlyayushchim ustroystvam/Pod red. YU.V. Tselebrovskogo (Experimental studies of the impulse characteristics of grounding devices. Sat reports of the Russian conf. on grounding devices / Ed. Yu.V. Celebrovsky)*. Novosibirsk: Sibirskaya energeticheskaya akademiya, 2005, pp. 107–113.
30. **Hasse P., Wessinger J., Zischank W.** *Handbuch fur Blitzschutz und Erdung. – Pflaum Verlag GMBH: Munchen–Berlin–Heidelberg, 2006, 314 p.*
31. **Kadomskaya K.P., Reykherdt A.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2006, No. 11, pp. 17–23.
32. **Aleksandrov G.N.** *Molniya i molniyevyashchita (Lightning and lightning protection)*. St. Petersburg, Publ. House of the Polytechnic University, 2007, 281 p.
33. **Van der Pol' B., Bremmer KH.** *Operatsionnoye ischisleniye na osnove dvustoronnego preobrazovaniya Laplasya (Operational calculus based on the two-sided Laplace transform)*. M.: Izd-vo inostrannoy literatury, 1952, 506 p.
34. **Sikorskiy Yu.S.** *Elementy teorii ellipticheskikh funktsiy (Elements of the theory of elliptic functions)*. Moscow; Leningrad, Publ. House ONTI NKTP USSR, 1936, 365 p.
35. **Yanke Ye., Emde F. Losh F.** *Spetsial'nyye funktsii. 2-ye izd. / Per. s 6-go pererab. nemetskogo (Special functions. 2nd ed. / Transl. from the 6th rev. German ed.)*. Moscow, Nauka, 1968, 344 p.
36. **Beytmen G., Erdeyi A.** *Tablitsy integral'nykh preobrazovaniy. Tom 1. Preobrazovaniya Fur'ye, Laplasya, Mellina (Tables of integral transformations. Vol. 1. Fourier, Laplace, Mellin transforms)*. Moscow, Nauka, 1969, 343 p.
37. **Kamke E.** *Spravochnik po obyknovennym differentsial'nyim uravneniyam (Handbook of ordinary differential equations)*. Moscow, Izd-vo inostrannoy literatury, 1951, 828 p.

[05.06.2019]