

Удар молнии в высокую башню

КАРЯКИН Р.Н., ЛОСЕВ В.Г.

Предложена инженерная модель обратного разряда молнии в высокое сооружение, позволяющая рассчитывать распространение волны импульса тока молнии в системе «канал молнии – высокое сооружение – протяженный неоднородный заземлитель» для определения электромагнитного влияния разряда на электронные устройства, расположенные в радиусе нескольких десятков километров от подверженного прямым ударом молнии сооружения.

Ключевые слова: высокая башня, удар молнии, обратный разряд, волновое сопротивление, инженерная модель, расчет

В последнее десятилетие внимание специалистов в области молниезащиты приковано к исследованию электромагнитных процессов в высоких сооружениях башенного типа, пораженных прямым ударом молнии (ПУМ). Экспериментальным и теоретическим результатам этих исследований посвящено более двух сотен публикаций, из которых следует особо отметить работы [1 и 2].

В [1] приведены аналитические выражения для расчета удаленных электромагнитных полей, вызванных ПУМ в высокую башню. Расчеты выполнены для пяти типов наиболее употребительных инженерных моделей обратного разряда: модель длинной линии (TL), модифицированная модель длинной линии с линейным затуханием тока по высоте канала молнии (MTLL), модифицированная модель длинной линии с экспоненциальным затуханием тока по высоте канала (MTLE), модель длинной линии Брюса – Голда (BG), модель с источником блуждающего тока (TCS).

В [2] представлены результаты синхронных измерений электрических и магнитных полей и волн тока обратного разряда при ПУМ в башню CN (Canadian National, Торонто) высотой 553 м. Ток обратного разряда молнии измерялся поясом Роговского, установленным на башне на высоте 474 м над уровнем земли. Вертикальная составляющая напряженности электрического поля E и горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля H , вызванные дипольным моментом тока, были измерены синхронно на расстоянии 2,0; 16,8 и 50,9 км от башни CN.

Сравнение результатов измерений с расчетными значениями показало, что все пять инженерных моделей занижают пиковые значения напряженностей магнитных полей H более чем на 25%. Для электрических полей расхождение между расчет-

An engineering model for describing a return lightning discharge at a tall structure is proposed, the use of which makes it possible to calculate the propagation of lightning current surge in the system «lightning channel - tall structure - extended nonuniform grounding conductor» for determining the electromagnetic influence of the discharge on electronic devices locating in a radius of a few tens of kilometers from the structure susceptible to direct lightning stroke.

Key words: tall tower, lightning stroke, current surge, surge impedance, engineering model

ными и измеренными значениями было значительно большим. Ни одна из моделей не была в состоянии воспроизвести характерные формы волн импульсов электромагнитного поля молнии в ближней (2 км) и дальней (16,8 и 50,9 км) зонах.

Расчет вызванных изменением дипольного момента восходящей волны импульса тока составляющей электрического поля $E_y(r,t)$ и составляющей магнитного поля $B_z(r,t)$, индуцированных в произвольной точке $M(r)$ поверхности земли, проводится по известным уравнениям [3], подтвержденным многочисленными экспериментами. Поэтому причину существенного расхождения расчета и измерений следует искать в несовершенстве положенных в основу расчета инженерных моделей обратного разряда молнии [4].

Предпринятые в последние годы различными исследователями попытки приспособить известные инженерные модели обратного разряда молнии при ПУМ в высокую башню не завершились созданием модели, пригодной для надежного расчета индуцированных электромагнитных полей.

В статье предложена инженерная модель обратного разряда при ПУМ в высокую башню, заземленную на протяженный неоднородный заземлитель, разработанная на основе исследований [4–7], а также с учетом ранее предложенных математических моделей канала молнии и протяженного неоднородного заземлителя, подверженного удару молнии [8–10].

Учитывая, что, по сравнению с первым обратным разрядом молнии последующий обратный разряд, характеризующийся значительно более крутым фронтом волны импульса тока молнии, вызывает гораздо большее электромагнитное влияние, в дальнейшем основное внимание уделим рассмотрению *последующего* обратного разряда молнии.

Рассмотрим деформацию волны импульса тока обратного разряда молнии в высокое сооружение при её движении по пути «канал молнии – строительная конструкция башни – протяженный неоднородный заземлитель». Представленная на рис. 1. расчетная схема позволяет свести решение задачи к анализу электромагнитных процессов в трех последовательно соединенных длинных линиях: канал молнии – неоднородная длинная линия с параметрами¹ $r_{a.к}, C_к e^{k_к y}$; высокая башня – длинная линия с параметрами $L_б, r_{a.б}, C_б, r_{п.б}$; протяженный заземлитель – неоднородная длинная линия с параметрами $L_з, r_{п.з} e^{-k_з x}$, где $r_{a.к}, r_{a.б}$ – активное сопротивление плазменного шнура канала молнии и строительных конструкций башни соответственно; $C_к, C_б$ – емкость чехла канала молнии в точке атаки ($y=0$) и башни соответственно; $L_б, L_з$ – индуктивность башни и протяженного заземлителя соответственно; $r_{п.б}, r_{п.з}(x=0)$ – переходное сопротивление башни и протяженного заземлителя соответственно; $k_к$ – вещественное положительное число, характеризующее изменение распределенной емкости чехла $C_y(y)$ по высоте канала в направлении вертикальной оси y , m^{-1} ; $k_з$ – вещественное положительное число, характеризующее изменение распределенного переходного сопротивления протяженного заземлителя $r_{п.з}(x)$ по его длине в направлении горизонтальной оси x , m^{-1} .

В момент достижения отрицательным лидером молнии вершины башни начинается обратный разряд через канал молнии и башню индуцированного отрицательно заряженным грозовым облаком положительного заряда земли Q^+ . Тогда граничные условия задачи для канала молнии [9]:

$$i_{к0}(y=0,t) = d(t)Q^+, \tag{1}$$

где $d(t)$ – импульсная функция Дирака [11].

Для рассматриваемых условий процесс распространения волн тока $i_к(y,t)$ и потенциала $u_к(y,t)$ вдоль канала молнии указанной структуры ($r_{a.к}, C_к e^{k_к y}$) при обратном разряде описывается уравнениями [9]:

$$\begin{aligned} - \frac{\partial u_к(y,t)}{\partial y} &= r_{a.к} i_к(y,t); \\ - \frac{\partial i_к(y,t)}{\partial y} &= C_к e^{k_к y} \frac{\partial u_к(y,t)}{\partial t}, \end{aligned}$$

решение которых в случае бесконечно длинного канала (отражение волн тока и потенциала после-

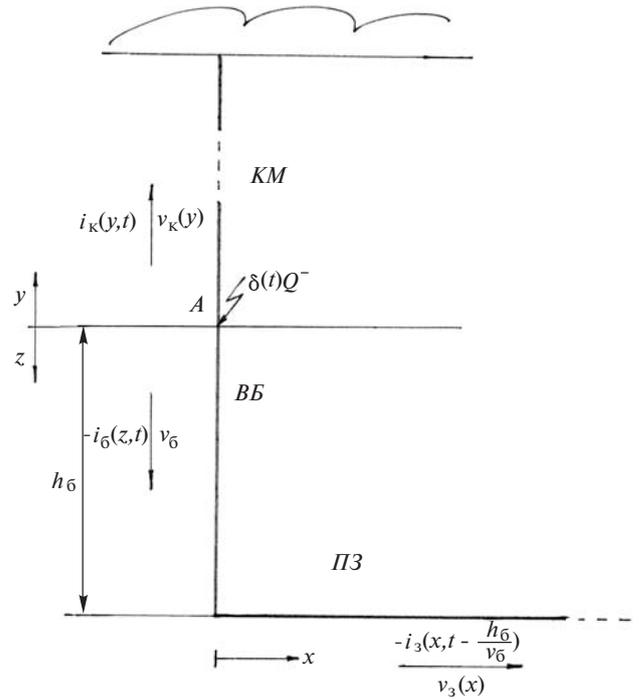


Рис. 1. Расчетная схема последующего обратного разряда молнии в высокую башню, строительные проводящие конструкции которой заземлены на протяженный неоднородный заземлитель: *КМ* – канал молнии; *ВВ* – строительные конструкции высокой башни; *ПЗ* – протяженный заземлитель

дующего разряда от грозового облака пренебрежимо мало) известно [9]:

$$u_к(y,t) = \frac{1}{k_к} r_{a.к} Q t^{-1} e^{-2t_{0к} t^{-1}}; \tag{2}$$

$$i_к(y,t) = 2Q t_{0к} t^{-2} e^{-2t_{0к} t^{-1}},$$

где $t_{0к}$ – длительность фронта волны тока:

$$t_{0к} = \frac{1}{2} \frac{1}{k_к^2} r_{a.к} C_к e^{k_к y}. \tag{3}$$

В инвариантной форме выражения (2) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} u_к(y,t) &= U_к s(x); \\ i_к(y,t) &= I_к h(x), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} U_к &= \frac{1}{e^2 t_{0к}} \frac{r_{a.к}}{k_к} Q; & I_к &= \frac{2}{e^2 t_{0к}} Q; \\ s(x) &= e^2 x^{-1} e^{-2x^{-1}}; & h(x) &= e^2 x^{-2} e^{-2x^{-1}} \\ x &= t/t_{0к}. \end{aligned} \tag{4}$$

Из (3) следует, что фазовая скорость распространения восходящей волны тока вдоль канала молнии равна:

¹Здесь и далее все параметры приведены на единицу длины.

$$u_{iK} = 2 \frac{k_K^2}{r_{a,K} C_K} y e^{-k_K y}. \quad (5)$$

Из выражений для U_K и I_K из (4) можно определить волновое сопротивление канала молнии:

$$Z_{в,K} = r_{a,K} / 2k_K. \quad (6)$$

Наконец, из (1) и (2) следует, что

$$d(t) = 2t_{0Kmin} t^{-2} e^{-2t_{0Kmin} t^{-1}},$$

где

$$t_{0Kmin} = \frac{1}{2} \frac{1}{k_K^2} r_{a,K} C_K, \quad (7)$$

и, следовательно,

$$d(t) = \frac{1}{k_K^2} r_{a,K} C_K t^{-2} e^{-\frac{1}{k_K^2} r_{a,K} C_K t^{-1}}.$$

При этом максимальный пик волны импульса тока из канала молнии в вершину башни I_{Kmax} с учетом (4) и (7) равен:

$$I_{Kmax} = \frac{4}{e^2} k_K^2 \frac{1}{r_{a,K} C_K} Q. \quad (4a)$$

Перейдем к рассмотрению процесса распространения нисходящих волн импульсов тока и потенциала обратного разряда вдоль строительной конструкции башни, описываемого телеграфными уравнениями:

$$\begin{aligned} - \frac{\partial u_{\bar{6}}(z,t)}{\partial z} &= L_{\bar{6}} \frac{\partial i_{\bar{6}}(z,t)}{\partial t} + r_{a,\bar{6}} i_{\bar{6}}(z,t); \\ - \frac{\partial i_{\bar{6}}(z,t)}{\partial z} &= C_{\bar{6}} \frac{\partial u_{\bar{6}}(z,t)}{\partial t} + \frac{1}{r_{п,\bar{6}}} u_{\bar{6}}(z,t). \end{aligned}$$

Рассмотрим разряд через строительную конструкцию башни отрицательного заряда лидера Q^- ; граничные условия задачи в этом случае:

$$i_{\bar{6}}(z=0,t) = d(t) Q^-. \quad (9)$$

Решая систему уравнений (8) при условии (9), получим ток [9]:

$$i_{\bar{6}}(z,t) = Q e^{-m_2 t} I_{0\bar{6}} \left[\eta_1 \sqrt{t^2 - \frac{z^2}{u_{\bar{6}}^2}} - \frac{z}{u_{\bar{6}}} \right] + m_2 I_{1\bar{6}} \left[\eta_1 \sqrt{t^2 - \frac{z^2}{u_{\bar{6}}^2}} - \frac{z}{u_{\bar{6}}} \right] - I_{0\bar{6}} \left[\eta_2 \sqrt{t^2 - \frac{z^2}{u_{\bar{6}}^2}} + \frac{z}{u_{\bar{6}}} \right] + m_2 I_{1\bar{6}} \left[\eta_2 \sqrt{t^2 - \frac{z^2}{u_{\bar{6}}^2}} + \frac{z}{u_{\bar{6}}} \right]$$

$$H_{\bar{6}}^{\bar{6}} \left(\frac{z}{u_{\bar{6}}} \right) e^{-\frac{z}{u_{\bar{6}}}} \quad (10)$$

где

$$\eta_1 = \frac{1}{2} u_{\bar{6}}^2 (r_{a,\bar{6}} C_{\bar{6}} - \frac{L_{\bar{6}}}{r_{п,\bar{6}}}); \quad (11)$$

$$\eta_2 = \frac{1}{2} u_{\bar{6}}^2 (r_{a,\bar{6}} C_{\bar{6}} + \frac{L_{\bar{6}}}{r_{п,\bar{6}}});$$

$I_0(w), I_1(w)$ – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно;

$H_{\bar{6}}^{\bar{6}} \left(\frac{z}{u_{\bar{6}}} \right) e^{-\frac{z}{u_{\bar{6}}}}$ – единичная функция, равная нулю при

$t - z/u_{\bar{6}} \leq 0$ и равная единице при $t - z/u_{\bar{6}} > 0$; $u_{\bar{6}}$ – фазовая скорость распространения волны импульса тока вдоль строительных конструкций башни:

$$u_{\bar{6}} = 1 / \sqrt{L_{\bar{6}} C_{\bar{6}}}. \quad (12)$$

Заметим, что волновое сопротивление строительных конструкций башни определяется теми же параметрами:

$$Z_{в,\bar{6}} = \sqrt{\frac{L_{\bar{6}}}{C_{\bar{6}}}}. \quad (13)$$

Из четырех основных параметров строительной конструкции башни ($L_{\bar{6}}, C_{\bar{6}}, r_{a,\bar{6}}, r_{п,\bar{6}}$) три первых параметра остаются, практически, неизменными, а четвертый параметр $r_{п,\bar{6}}$, определяемый процессами коронирования, в условиях эксплуатации может изменяться в широких пределах. Для упрощения вычислений в дальнейшем будем рассматривать один из возможных случаев, когда

$$r_{п,\bar{6}} \gg L_{\bar{6}} / r_{a,\bar{6}} C_{\bar{6}},$$

и, следовательно, $\eta_1 = 0$.

В этом случае выражение (10) приобретает вид:

$$i_{\bar{6}}(z,t) = Q d(t) e^{-\frac{z}{u_{\bar{6}}}} e^{-m_2 t}.$$

Это означает, что нисходящая волна импульса тока обратного разряда на входе в башню (в точке атаки) равна:

$$i_{\bar{6}}(z=0,t) = Q d(t) e^{-m_2 t},$$

а по мере распространения от вершины башни по её строительным проводящим конструкциям до основания башни на входе в заземлитель

$$i_{\bar{6}}(z=h_{\bar{6}},t) = Q d(t - \frac{h_{\bar{6}}}{u_{\bar{6}}}) e^{-m_2 \frac{h_{\bar{6}}}{u_{\bar{6}}}}, \quad (14)$$

где $h_{\bar{6}}$ – высота башни.

Далее, при распространении электромагнитной волны импульса обратного разряда по протяженному неоднородному заземлителю ($L_3, r_{п.з} e^{-k_3 x}$) ток $i_3(x,t)$ и потенциал $u_3(x,t)$ заземлителя связаны дифференциальными уравнениями [10]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u_3(x,t)}{\partial x} &= L_3 \frac{\partial i_3(x,t)}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i_3(x,t)}{\partial x} &= \frac{1}{r_3} y^{k_3 x} u_3(x,t), \end{aligned} \quad (15)$$

при граничном условии (условие непрерывности цепи):

$$i_3(x=0,t) = H(t - \frac{h_0}{u_0}) i_0(z = h_0, t),$$

т.е.

$$i_3(x=0,t) = Q e^{-m_2 \frac{h_0}{u_0}} d(t - \frac{h_0}{u_0}) H(t - \frac{h_0}{u_0}). \quad (16)$$

Решение уравнений (15) с учетом граничного условия (16) позволяет получить [10]:

$$u_3(x,t) = Q^- e^{-m_2 \frac{h_0}{u_0}} \frac{1}{k_3} L_3 (t - \frac{h_0}{u_0})^{-2} e^{-2t_{03}(t - \frac{h_0}{u_0})^{-1}}, \quad (17)$$

$$i_3(x,t) = 2Q^- e^{-m_2 \frac{h_0}{u_0}} t_{03} (t - \frac{h_0}{u_0})^{-2} e^{-2t_{03}(t - \frac{h_0}{u_0})^{-1}}, \quad (18)$$

где

$$t_{03} = \frac{1}{2} \frac{1}{k_3} \frac{L_3}{r_{п.з}} e^{k_3 x}.$$

Из (18) следует, что пик волны импульса тока заземлителя

$$I_3 = I_{3max} e^{-k_3 t},$$

где

$$I_{3max} = \frac{2}{e^2} t_{03} Q e^{-m_2 \frac{h_0}{u_0}}; \quad (19)$$

$$t_{03min} = \frac{1}{2} k_3^{-1} \frac{L_3}{r_{п.з}}. \quad (20)$$

Найдем результирующую волну тока в основании башни после отражения нисходящей волны тока (14) от заземлителя из условия непрерывности цепи «башня–заземлитель»:

$$i_{00}(z = h_0, t > \frac{h_0}{u_0}) = i_3(x = 0, t > \frac{h_0}{u_0}),$$

из которого следует, что этот ток определяется уравнением (18), а его максимальное пиковое значение I_{0max} (19).

Волновое сопротивление заземлителя с учетом выражений (17) и (18) равно:

$$Z_{в.з}(x=0, t - \frac{h_0}{u_0} = t_{03min}) = k_3 r_{п.з}$$

или согласно [12]:

$$Z_{в.з}(x=0, t - \frac{h_0}{u_0} = t_{03min}) = 265 k_3 \gamma, \quad (21)$$

где γ – удельное электрическое сопротивление земли в основании башни, Ом/м.

В отличие от канала молнии и протяженного заземлителя, где в основном распространяются затухающие однонаправленные волны тока: восходящие волны тока в канале молнии $i_k(y,t)$ и нисходящие волны тока в протяженном заземлителе $i_3(x,t)$, в башне имеют место как первоначальная нисходящая волна импульса тока $i_0(z,t)$, так и бесконечная последовательность отраженных от основания башни и от её вершины восходящих и нисходящих волн, восстанавливающая электродинамическое равновесие между втекающей в вершину башни волной импульса тока $i_k(z=0,t)$ и вытекающей из основания башни в заземлитель волной импульса тока $i_{30}(Z = h_0, t - \frac{h_0}{u_0}) H(t - \frac{h_0}{u_0})$.

Для качественного анализа процесса распространения волн тока в башне удобно воспользоваться упрощенным представлением: воздействие бесконечной прямоугольной волны тока на линии без потерь [13]. Тогда коэффициенты отражения волн тока равны: от основания башни

$$l_o = \frac{Z_{в.б} - Z_{в.з}}{Z_{в.б} + Z_{в.з}}; \quad (22)$$

от вершины башни

$$l_b = \frac{Z_{в.б} - Z_{в.к}}{Z_{в.б} + Z_{в.к}}; \quad (22a)$$

коэффициенты преломления волн тока: в основании башни

$$a_o = \frac{2Z_{в.б}}{Z_{в.б} + Z_{в.з}}; \quad (23)$$

на вершине башни

$$a_b = \frac{2Z_{в.б}}{Z_{в.б} + Z_{в.к}}; \quad (23a)$$

где $Z_{в.к}$, $Z_{в.б}$, $Z_{в.з}$ – волновые сопротивления канала молнии, башни и заземлителя, рассчитанные по (6), (13), (21) соответственно.

Заметим, что

$$a_o = 1 + l_o; a_b = 1 + l_b. \quad (24)$$

В этом случае после первого отражения нисходящей волны импульса тока от основания башни пик результирующей волны тока башни в её основании

$$I_{б0} = (1 + l_o) I_{бmax}(z = h_б), \quad (25)$$

где

$$I_{бmax} = I_{кmax} e^{-m_2 \frac{h_б}{u_б}}; I_{кmax} - \text{см. (4a)}.$$

Для обычных условий (последующие обратные разряды и триггерные молнии: $Z_{в.к} = 1000, 2000 \text{ Ом}$, $Z_{в.б} \gg 300 \text{ Ом}$, $Z_{в.з} = 5, 30 \text{ Ом}$) коэффициенты отражения изменяются в сравнительно узких пределах: $l_o = 0,8, 0,97$ и $l_b = (0,55, 0,75)$.

Следовательно, в этом случае пик результирующей восходящей волны тока в основании башни равен

$$I_{б0} = (1,8, 1,97) I_{бmax}(z = h_б, t^3 \frac{h_б}{u_б})$$

Для скальных грунтов ($\gamma^3 5 \cdot 10^3 \text{ Омж}$) в случае первого обратного разряда, когда волновые сопротивления всех трех участков цепи канала молнии, башни и заземлителя) могут быть примерно одинаковы ($Z_{в.к} \gg Z_{в.б} \gg Z_{в.з}$), оба коэффициента a_o и a_b близки к нулю.

В этом случае с погрешностью, не превышающей ошибки от пренебрежения искажением волны тока в башне, должно выполняться соотношение $t_{0к min} = t_{0з min}$ или

$$\frac{1}{k_k^2} r_{а.к} C_k = \frac{1}{k_3^2} r_{п.з}. \quad (26)$$

Выражения, стоящие в левой и правой частях равенства (26), будем называть критериями подобия канала молнии и протяженного заземлителя и обозначать $\Pi_{к.м}$ и $\Pi_{п.з}$ ($\Pi_{к.м} = \Pi_{п.з}$). Равенство критериев подобия является условием совместности обеих цепей, означающим возможность протекания по ним без искажения одного тока $i(t)$. При этом каждый из параметров $r_{а.к}$, C_k , k_k может принимать бесчисленное множество значений, удовлетворяющих этому уравнению. С физической точки зрения это означает, что при каждом разряде на башню заряда Q происходит автоматическая под-

стройка параметров канала молнии ($r_{а.к}$, C_k , k_k) под уравнение (26), а также уравнения:

$$2t_{0 min} = \Pi_{п.з};$$

$$\frac{2}{e} \frac{y_0}{u_{max}(y_0)} = \Pi_{п.з},$$

где $u_{max}(y_0)$ – максимальная фазовая скорость волны тока в канале молнии в точке с координатой $y_0 = 1/k_k$.

Нетрудно показать, что максимальное значение тока в «точке атаки»

$$I = \frac{10}{e^2} \frac{1}{L_3} k_3 \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t} Q,$$

где $r = r_0 e^{-k_3 x}$.

Поскольку параметры протяженного заземлителя определяются геометрически и физически неизменяемыми параметрами металлических конструкций заземлителя ($L_3 = \text{const}$), параметры волны тока при любых разрядах молнии в башню, заземленную на протяженный заземлитель ($L_3, r_{п.з}, k_3$), будут изменяться только при изменении значения разряжаемого заряда Q .

Пример расчета характерного профиля пиков волны импульса тока молнии при последующем разряде ($I = 25 \text{ кА}$, $t_{ок}(y = 0) = 0,25 \text{ мкс}$) в железобетонную башню высотой 600 м, заземленную на протяженный заземлитель. Параметры канала молнии: $C_k = 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$; $r_{а.к} = 19,6 \text{ Ом/м}$; $k_k = 0,98 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$; параметры строительных конструкций башни [14]: $L_б = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$; $r_{а.б} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м}$; $C_б = 12 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$; $r_{п.б} = 4 \cdot 10^8 \text{ Омж}$; параметры протяженного заземлителя [15, 16]: $L_з = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$; $r = 200 \text{ Омж}$; $k_3 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$.

Фазовая скорость восходящей волны импульса тока канала молнии (5) быстро нарастает, достигая своего максимального значения $u_{кmax} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ на высоте $y_0 = 102 \text{ м}$, и далее плавно уменьшается. При этом ток восходящей волны импульса в основании канала молнии (7–300 м), затухая по экспоненциальному закону

$$b = \frac{I_k(y)}{I_k(0)} = e^{-0,98 \cdot 10^{-2} y},$$

уменьшается на высоте 300 м (над вершиной башни) до 5% первоначального значения, не успев достигнуть нижней границы отрицательно заряженного грозового облака. В этом случае влиянием отраженных волн на пик тока в основании канала молнии можно пренебречь, полагая, что в канале молнии имеется только восходящая волна тока.

Волновое сопротивление канала молнии (6):

$$Z_{в.к} = \frac{19,6}{2 \cdot 0,98 \cdot 10^{-2}} = 10^3 \text{ Ом}.$$

Волновое сопротивление строительных конструкций башни (13):

$$Z_{в.б} = \sqrt{\frac{1 \times 10^{-6}}{12 \times 10^{-12}}} = 290 \text{ Ом.}$$

Скорость распространения волны тока вдоль строительных конструкций башни (12):

$$u_б = \frac{1}{\sqrt{1 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-12}}} = 2,9 \times 10^8 \text{ м/с.}$$

Декремент затухания пика волны тока, распространяющейся вдоль башни (11):

$$m_2 = \frac{1}{2} (2,9 \times 10^8)^2 (0,2 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{-12} + \frac{1 \times 10^6}{4 \times 10^8}) = 210 \text{ с}^{-1}.$$

Затухание пика волны тока за время распространения вдоль строительных конструкций башни (14):

$$b = e^{-210 \frac{600}{2,9 \times 10^8}} = 0,9996.$$

Волновое сопротивление заземлителя (21):

$$Z_{в.з} = 2,5 \times 2 \times 10^{-2} \times 200 = 10 \text{ Ом.}$$

Длительность фронта волны импульса тока на входе в заземлитель (20):

$$t_{0зmin} = \frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-2} \frac{2,5 \times 10^{-6}}{2,5 \times 200} = 0,125 \text{ мкс.}$$

Пик результирующей волны импульса тока в основании башни на входе в заземлитель (19):

$$I_{б0} = \frac{0,25 \times 10^{-6}}{0,125 \times 10^{-6}} \times 0,9996 \times 25 \times 10^3 = 50 \times 10^3 \text{ А.}$$

Сравним полученные результаты с расчетами по упрощенной модели, для которой ток $I_{б0}$ и определяются формулами (25). Для этой модели коэффициенты отражения и преломления рассчитаем по выражениям (22)–(24):

$$l_0 = \frac{290 - 10}{290 + 10} = 0,93; \quad l_в = \frac{290 - 1000}{290 + 1000} = -0,55;$$

$$a_0 = 1 + 0,93 = 1,93; \quad a_в = 1 - 0,55 = 0,45.$$

Следовательно, после первого отражения нисходящей волны тока от основания башни (25)

$$I_{б0}^{(1)} = (1 + 0,93) \times 25 = 48,25 \text{ кА.}$$

Как видно, значение тока $I_{б0}^{(1)}$ отличается от $I_{б0}$, рассчитанного по более строгой модели, на 3,5%.

Для предложенной инженерной модели расчетный профиль пиковых значений волны импульса тока последующего разряда молнии в башню высотой 600 м представлен на рис. 2. Для сравнения там же показан профиль (штриховая линия) пиковых значений волны импульса тока последующего разряда молнии (с тем же зарядом Q) непосредственно на протяженный заземлитель ($Z_{в.з} = 10 \text{ Ом}$). Из рассмотрения полученных профилей следует, что канал молнии вносит сравнительно скромный вклад в создание результирующего электромагнитного поля, создаваемого ударом молнии в высокую башню.

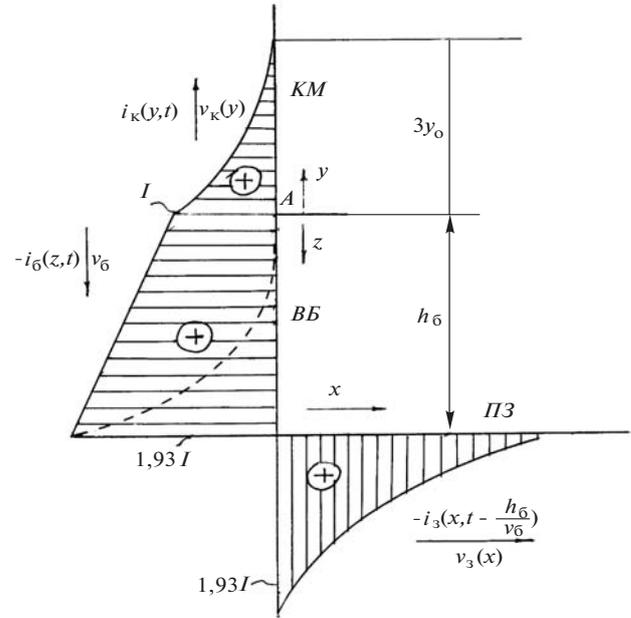


Рис. 2. Расчетный профиль пиковых значений волны импульса тока последующего разряда молнии ($I=25 \text{ кА}$, $t_{ок}(y=0)=0,25 \text{ мкс}$) в железобетонную башню высотой 600 м, заземленную на протяженный заземлитель ($Z_{в.з} = 10 \text{ Ом}$)

Основной вклад (более 80%) в создании этого поля принадлежит волнам тока башни: первоначальной (главной) нисходящей волне импульса тока и вызванной неоднородностью системы бесконечной последовательности восходящих и нисходящих волн тока, совершающих возвратно-поступательные затухающие колебания между основанием и вершиной башни с периодом $2h_б/u_б$ и восстанавливающих электродинамическое равновесие в неоднородной системе (канал молнии – высокая башня – протяженный заземлитель). Во время такого переходного процесса, имеющего колебательный характер, знак волн тока во всех точках системы остается неизменным.

Из сравнения двух профилей тока видно, что площадь эпюры, соответствующей удару молнии в высокую башню, в 2,5 раза превышает площадь эпюры, соответствующей удару молнии непосредственно в протяженный заземлитель. Это означает, что удар молнии в высокую башню будет создавать примерно в 2–3 раза более сильное поле, чем удар молнии в сооружение на уровне земли.

Выводы 1. При ударе молнии в высокую ($\approx 100 \text{ м}$) башню канал молнии вносит сравнительно скромный вклад в создание результирующего электромагнитного поля. Основной вклад в создание поля принадлежит волнам тока башни («эффект башни»). При этом можно ожидать возрастания электромагнитного влияния примерно в 2–3 раза по сравнению со случаем разряда того же заряда непосредственно на заземлитель, несмотря на почти двукратное уменьшение пика тока в основании канала. Указанные соотношения относятся к последующему обратному разряду молнии. При первом обратном разряде роль волны тока в канале молнии существенно возрастает, что приводит к уменьшению «эффекта башни».

2. Предложенная методология расчета может быть полезна для уточнения методики определения параметров токов молнии по измеряемым данным об индуцируемых ею полях.

3. Кроме рассмотренных высоких башен предложенная модель может быть использована для расчета токов и потенциалов в проводящих частях металлических и железобетонных строительных и технологических конструкций зданий и сооружений высотой свыше 60 м и, в частности, при ПУМ в высотные здания, опоры линий электропередачи сверхвысокого и ультравысокого напряжения в вышки нефтяных и газовых буровых скважин, в том числе на морских шельфах, в мачты океанских судов, в космические ракеты на пусковых устройствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ravanello D., Rachidi F., Rubenstein M. et al.** On return stroke currents and remote electromagnetic fields associated with lightning strikes to tall structures: Pt I. Computational models. – Journal of Geophysical Research, 2007, vol. 112.
2. **Ravanello D., Rachidi F., Janischewskyj W. et al.** On return stroke currents and remote electromagnetic fields associated with lightning strikes to tall structures: Pt II. Experiment and model validation. – Journal of Geophysical Research, 2007, vol. 112.
3. **Baba Y. and Rakov V.A.** Lightning: Principles, Instruments and Application: Ch.1. Present Understanding of the Lightning Return Stroke / Eds. H.D. Betz, U. Schumann and P. Laroche. – Springer, 2009.
4. **Горин Б.Н.** Математическое моделирование главной стадии молнии. – Электричество, 1985, № 4.
5. **Александров Г.Н.** Молния и молниезащита. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2007.
6. **Базелян Э.М., Райзер Ю.П.** Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001.
7. **Кадомская К.П., Рейхердт А.А.** Моделирование волны тока молнии при расчетах грозоупорности электрических сетей. – Электричество, 2006, № 11.
8. **Карякин Р.Н., Лосев В.Г.** Форма волны тока молнии в контактной сети. – Электричество, 2008, №11.

9. **Карякин Р.Н., Лосев В.Г.** Математическая модель канала молнии. – Электричество, 2009, № 10.

10. **Карякин Р.Н., Лосев В.Г.** Удар молнии в протяженный неоднородный заземлитель. – Электричество, 2009, №4.

11. **Ван дер Поль Б., Бреммер Х.** Операционное исчисление на основе двустороннего преобразования Лапласа. – М.: Иностранная литература, 1952.

12. **Карякин Р.Н.** Методика расчета основных параметров нисходящего отрицательного разряда молнии. – Электричество, 2006, №11.

13. **Сиротинский Л.И.** Техника высоких напряжений. Выпуск третий. Перенапряжения и защита от перенапряжений. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1945.

14. **Карякин Р.Н.** Нормативные основы использования проводящих частей строительных конструкций в качестве PEN-проводников. – Электричество, 1997, №10.

15. **Карякин Р.Н.** Электромагнитные процессы в протяженных заземлителях в неоднородных структурах. – Электричество, 1996, №7.

16. **Карякин Р.Н.** Электробезопасность заземляющего устройства. – Электричество, 2000, № 12.

[10.11.10]

Авторы: Карякин Рудольф Николаевич окончил факультет электрификации железных дорог Московского электромеханического института инженеров железнодорожного транспорта в 1952 г. В 1976 г. защитил докторскую диссертацию «Исследование электромагнитных процессов в тяговых сетях переменного тока (в связи с проблемами электробезопасности)» во Всесоюзном научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта. Главный научный сотрудник отдела комплексной защиты электроустановок Научно-исследовательского института электромонтажной технологии.

Лосев Виктор Григорьевич окончил факультет электрификации железных дорог Московского института инженеров железнодорожного транспорта в 1983 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Повышение эффективности молниезащиты тяговых сетей переменного тока» в Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ). Заместитель начальника Департамента электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД».

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ и ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы

можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).