

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НАВЕДЕННЫХ ТОКОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЗАЕМЛИТЕЛЯХ ПРИ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДАХ

СЛЫШАЛОВ В.К., д-р техн. наук, СОРОКИН А.Ф., СЛЫШАЛОВ А.В., КИСЕЛЕВА Ю.А., кандидаты техн. наук, КАНДАЛОВ Ю.В., асп.

Рассматривается методика оценки параметров импульса наведенного тока для случая, когда молния ударяет в землю вблизи воздушной линии электропередачи. Последняя в расчетной модели представлена системой проводов и заземленных защитных тросов, параллельных друг другу и поверхности земли. В расчете определяется ток в заземляющем проводе, соединяющем заземлитель линии электропередачи и тросы.

*Ключевые слова:* импульсный ток, грозовой разряд, лидерный канал, математическая модель, заземленный объект.

## EVALUATING INDUCED CURRENT PARAMETERS IN EARTH LEADS DURING LIGHTNING DISCHARGES

V.K. SLYSHALOV, Doctor of Engineering, A.F. SOROKIN, A.V. SLYSHALOV,  
Yu.A. KISELEVA, Candidates of Engineering, Yu.V. KANDALOV, Post-Graduate Student

The authors consider methods of evaluating induced current impulse parameters when lightning strikes the ground near an overhead power transmission line. The latter is presented by a system of wires and grounded cables parallel to each other and the ground surface. The authors determine the current values in the earth lead which connects the groundwire of the power transmission line and cables.

*Key words:* impulse current, lightning, mathematic model, grounded object.

Появление в заземлителях мощных импульсных токов обусловлено не только прямыми ударами молний в объекты, присоединенные к данному заземлителю, но также индукционным воздействием изменяющегося заряда в канале грозового разряда. При ударе молнии в землю или любое сооружение, не связанное гальванически с наблюдаемым заземлителем, в заземлитель с объекта стекают заряды, ранее наведенные на нем лидером молнии. Длительность этого процесса соответствует главной стадии грозового разряда, а протекающий при этом импульсный ток может, предположительно, достигать значений, соизмеримых с током прямого удара молнии.

Решение осуществляется при следующих допущениях: лидерный канал считается заряженным равномерно; ток молнии является заданной функцией времени  $i_M(t)$ ; скорость перемещения фронта нейтрализации зарядов лидерного канала пропорциональна току молнии; для системы заземления выполняется неравенство  $T_3 \ll T_M$ ,  $T_3$ ,  $T_M$  – характеристические значения расчетных интервалов времени для заземлителя и грозового разряда соответственно (рис. 1).

Принимаем, что канал грозового разряда имеет длину от земли до облака  $h$ , до высоты  $Z_\phi$  (координата положения фронта нейтрализации) плотность электрических зарядов  $\tau_K = 0$ . В пределах участка  $Z_\phi \leq Z \leq h_0$  канал заряжен при прохождении лидера молнии, поэтому  $\tau_K = \tau_L$ , ток на этом участке полагаем равным нулю. В пределах первого участка протекает ток главного разряда  $i_M(t)$ , замыкающийся в окружающем канале пространстве током смещения (рис. 1, пунктирные линии) и током проводимости в грунте.

Нейтрализация зарядов лидерного канала приводит к появлению наведенного тока  $i(t)$  в заземляющем проводе. Параметры этого тока, имеющего импульсный характер, а именно, максимальное значение, крутизна фронта, длительность импульса, и являются целью расчета. В качестве исходных дан-

ных, необходимых для его проведения, используются, наряду с геометрией системы «канал разряда – провода – тросы» (рис. 1), физические характеристики молнии: ток  $i_M(t)$  и скорость движения фронта нейтрализации  $V_\phi(t)$ , причем допустимо принять

$$i_M(t) = \tau_L V_\phi(t) \quad (\tau_L = const). \quad (1)$$

Для построения расчетной математической модели представляем нейтрализацию зарядов лидера как процесс заполнения канала зарядом с плотностью  $\tau_C = -\tau_L$ . Заряд вдвигается в канал лидера со скоростью  $V_\phi(t)$ .

Количественное соотношение между наведенным током и движущимся зарядом  $dq = -\tau_L dz$  (рис. 1) позволяет установить теорема Шокли-Рамо [1–3]. Для выбранного направления  $i_M(t)$ , т.е. при

$$i(t) = -\frac{dq_T}{dt} \quad (q_T - \text{наведенный заряд троса}), \text{ эта}$$

теорема в форме [2] имеет вид

$$di(t) = \tau_L dz \vec{V}_\phi(t) (\vec{E}_{OT} + \vec{E}'_{OT}) + \int_V (\vec{E}_{OT} + \vec{E}'_{OT}) \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_s}{\partial t} dv, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_s}{\partial t}$  – плотность тока смещения, созданного

движущимся элементарным зарядом  $dq = -\tau_L dz$ ;

$\vec{E}_{OT}$ ,  $\vec{E}'_{OT}$  – напряженности фиктивного электростатического поля, создаваемого в точке расположения заряда  $dq$  системой проводов и тросов при условии, что наблюдаемый трос (рис. 1) имеет безразмерный потенциал  $\varphi_T = 1$ , а провода и остальные тросы заземлены ( $\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_n = 0$ ), т.е. это поле условных линейных зарядов  $\tilde{\tau}_T, \tilde{\tau}_1, \dots, \tilde{\tau}_n$  и их изображений  $\tilde{\tau}'_T = -\tilde{\tau}_T, \tilde{\tau}'_1 = -\tilde{\tau}_1, \dots$ , размерность

$$\text{которых } \dim \tilde{\tau} = \frac{Kл}{M \cdot B},$$

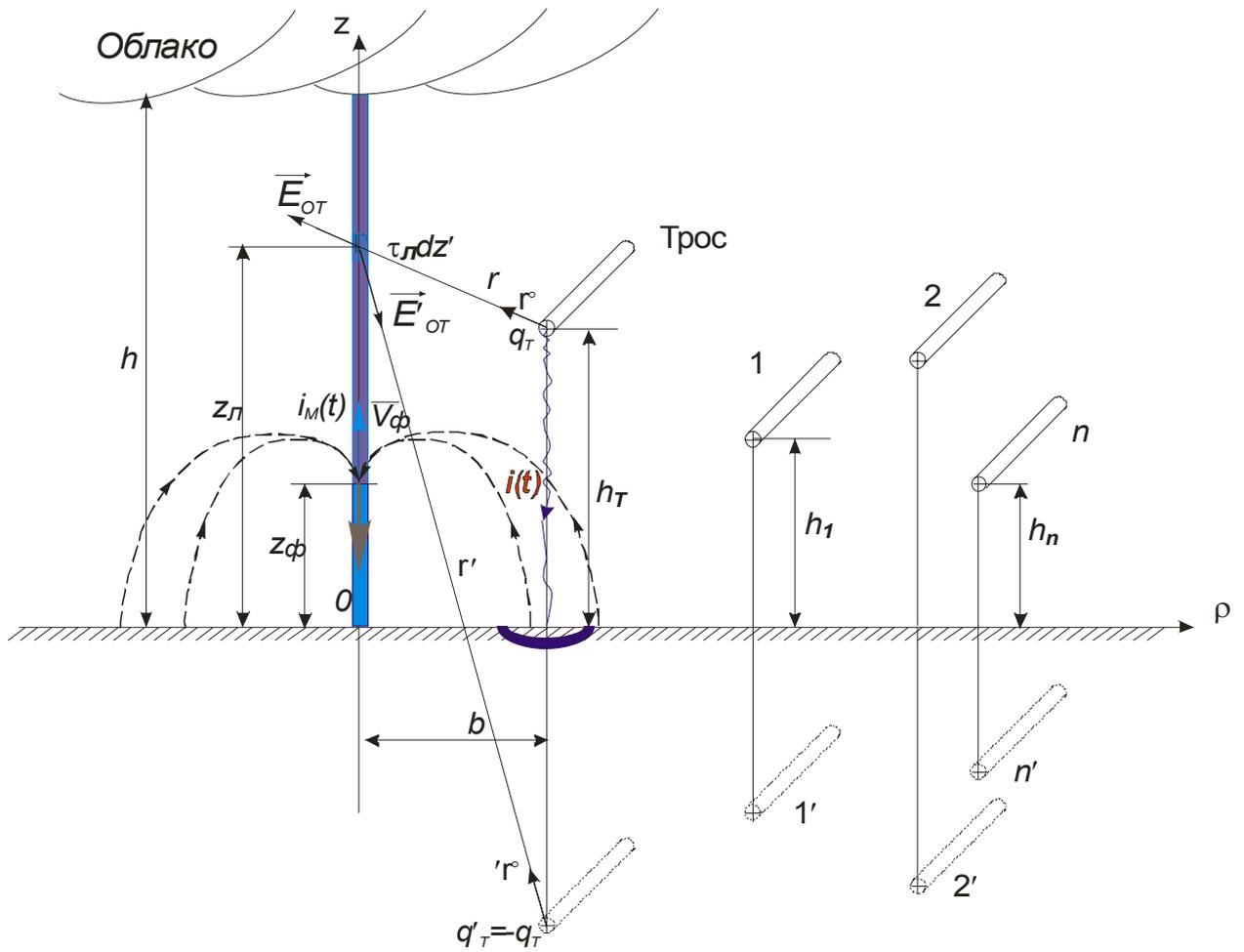


Рис. 1. Основные параметры системы провода–тросы и канала грозового разряда

а величина определяется при решении системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} 1 &= \alpha_{T1} \tilde{\tau}_T + \alpha_{T1} \tilde{\tau}_1 + \dots + \alpha_{Tn} \tilde{\tau}_n, \\ 0 &= \alpha_{1T} \tilde{\tau}_T + \alpha_{11} \tilde{\tau}_1 + \dots + \alpha_{1n} \tilde{\tau}_n, \\ &\dots \\ 0 &= \alpha_{nT} \tilde{\tau}_T + \alpha_{n1} \tilde{\tau}_1 + \dots + \alpha_{nn} \tilde{\tau}_n, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$\alpha_{TT}, \alpha_{1T}, \dots, \alpha_{nn}$  – потенциальные коэффициенты.

Дальнейшее рассмотрение методики определения  $i(t)$  выполним для уединенного троса (рис. 1) в двух вариантах: без учета и с учетом запаздывания сброса зарядов тросом относительно нейтрализации зарядов канала. И затем обобщим методику на систему провода–тросы. Без учета запаздывания имеем

$$\begin{aligned} \tilde{\tau}_T &= \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln 2h_T/r_T}, \\ \vec{E}_{OT} &= \frac{\tilde{\tau}_T \vec{r}_0}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{1}{r \ln 2h_T/r_T} \vec{r}_0, \quad r = \sqrt{b_T^2 + (z - h_T)^2}, \\ \vec{E}'_{OT} &= -\frac{1}{r' \ln 2h_T/r_T} \vec{r}'_0, \quad r' = \sqrt{b_T^2 + (z + h_T)^2}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\vec{V}_\Phi(t) (\vec{E}_{OT} + \vec{E}'_{OT}) = V_\Phi(t) \frac{1}{\ln 2h_T/r_T} \left[ \frac{z - h_T}{b_T^2 + (z - h_T)^2} - \frac{z + h_T}{b_T^2 + (z + h_T)^2} \right], \quad (5)$$

где  $r_T$  – радиус троса.

Задача о поле тока смещения как в лидерной стадии, так и в стадии главного разряда была решена в работе [4], поэтому подынтегральное выражение во втором слагаемом (2) считаем известным и вычисляем ток  $i(t)$ , обусловленный движением заряда  $\tau_c dz$ . Фиксируя момент наблюдения  $t$ , определяем положение фронта нейтрализации

$$z_\Phi(t) = \int_0^t V_\Phi(v) dv \quad (6)$$

и, полагая выполненным условие  $\text{div} \vec{V}_\Phi(t) = 0$ , интегрируем (2) по  $z$  от 0 до  $z_\Phi(t)$ . В итоге получаем

$$\begin{aligned} i(t) &= -\frac{\tau_L V_\Phi(t)}{\ln 2h_T/r_T} \ln \frac{\sqrt{b_T^2 + (z_\Phi + h_T)^2}}{\sqrt{b_T^2 + (z_\Phi - h_T)^2}} + \\ &+ \int_V (\vec{E}_{OT} + \vec{E}'_{OT}) \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} dV. \end{aligned} \quad (7)$$

В этом выражении  $\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{\delta}$  – плотность тока

смещения, обусловленного перемещением заряда в канале. Его составляющие по осям  $z$  и  $\rho$  (рис. 1) цилиндрических координат имеют вид [4]

$$\delta_z = -\frac{i_M}{4\pi} \left(1 - \frac{V_\phi^2}{c^2}\right) \left\{ \frac{z - z_\phi}{\left[\rho^2 + (z - z_\phi)^2\right]^{3/2}} - \frac{z + z_\phi}{\left[\rho^2 + (z + z_\phi)^2\right]^{3/2}} \right\};$$

$$\delta_\rho = -\frac{i_{MP}}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\left[\rho^2 + (z - z_\phi)^2\right]^{3/2}} - \frac{1}{\left[\rho^2 + (z + z_\phi)^2\right]^{3/2}} \right\},$$

где  $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ .

В [4] приводится уравнение для линий  $\vec{\delta}$ ; его решение и анализ полученных результатов выполнены в [5].

Таким образом, на основе приведенных формул для  $\delta_z$ ,  $\delta_\rho$  может быть вычислено второе слагаемое в (7), т.е. рассчитана форма импульса наведенного тока  $i(t)$ .

Ограничимся приближенной оценкой параметров импульса по первому слагаемому выражения (7), приняв во внимание следующее соображение: величина объемного интеграла в (7) будет определяться в основном цилиндрической областью поля вблизи троса, где напряженность  $\vec{E}_{OT}$  значительна. Однако в этой области плотность тока смещения допустимо считать постоянной по условию  $r_T \ll b$ . Получающийся приближенный (оценочный) результат для  $i(t)$  будет соответствовать формулам теоремы Шокли-Рамо [1, 3], учитывающим только ток переноса.

Итак, определяем параметры импульса наведенного тока  $i(t)$ , используя только первое слагаемое в (7). Предварительно заметим следующее: заряд лидерного канала может быть как положительным, так и отрицательным, тогда как скорость продвижения фронта  $V_\phi(t) = \frac{dz_\phi}{dt}$  всегда положи-

тельна:  $V_\phi(t) > 0$ . Поэтому при  $\tau_L < 0$  имеем, согласно формулам (1), (7), для принятых положительных направлений этих токов  $i_M(t) < 0$ ,  $i(t) > 0$ , т.е. в этом случае в заземлитель поступает положительный токовый импульс, что соответствует оттоку с троса в землю положительного наведенного заряда  $q_T > 0$ . При  $\tau_L > 0$  картина явления – обратная.

Максимальное значение наведенного тока находим обычным порядком, т.е. по уравнению

$$\frac{di}{dz_\phi} = 0, \text{ решение которого дает } z_\phi = h_T \text{ и соответ-$$

ственно

$$i_{MAX} = \frac{|i_M(h_T)|}{\ln \frac{2h_T}{r_T}} \ln \frac{\sqrt{b_T^2 + (2h_T)^2}}{b}, \quad (8)$$

где  $h_T$  – решение уравнения

$$h_T = \int_0^{h_T} V_\phi(v) dv. \quad (9)$$

Учитывая, что ток молнии  $i_M(t)$  при своем изменении по мере продвижения фронта нейтрализации от земли к облаку достигает максимального значения при  $z_\phi$  около сотен метров (ниже будет приведен конкретный числовой расчет), можем заключить, что импульс наведенного тока будет иметь существенно большую крутизну, нежели импульс тока молнии.

В качестве иллюстрации применения предложенной методики и оценки параметров ожидаемых импульсов наведенного тока выполним расчет  $i(t)$  при следующих исходных данных: радиус троса –  $5 \cdot 10^{-3}$  м; варианты высоты подвеса –  $h_{T1} = 10$  м,  $h_{T2} = 1$  м,  $h_{T3} = 0,2$  м; варианты расстояния до точки удара молнии –  $b_1 = 20$  м,  $b_2 = 100$  м; ток молнии задан в форме биэкспоненциального импульса, соответствующего 50 %-му току молнии, для которого, согласно [5], имеем  $i_{Mmax} \approx 37$  кА,  $V_{\phi max} = 0,31 \cdot 3 \cdot 10^8$  м/с,  $\tau_n = 4 \cdot 10^{-4}$  Кл/м. Форму этого импульса описывает выражение

$$|i_M(t)| = i_m \left( e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1} \right) = i_m \left( e^{-\eta t} - e^{-\xi t} \right), \quad (10)$$

где  $\tau_2 = 46,7$  мкс;  $\eta = \frac{1}{\tau_2} = 0,0214$  1/мкс;  $\tau_1 = 1,77$  мкс;

$$\xi = \frac{1}{\tau_1} = 0,565$$
 1/мкс;  $i_m = 43,77$  кА.

Максимальное значение тока имеем при  $t_m = 6,02$  мкс. Скорость продвижения фронта нейтрализации, м/с, определяется как

$$V_\phi(t) = \frac{i_M(t)}{\tau_L} = \frac{i_m}{\tau_L} \left( e^{-\eta t} - e^{-\xi t} \right). \quad (11)$$

Соответственно, по (6) получаем

$$z_\phi(t) = 1,094 \cdot 10^2 \left[ \frac{1}{\eta} (1 - e^{-\eta t}) - \frac{1}{\xi} (1 - e^{-\xi t}) \right],$$

$$z_\phi(t_m) \approx 430 \text{ м.}$$

Длительность процесса нейтрализации, т.е. длительность импульса наведенного тока, определяется заданной высотой облака  $h_0 = 2000$  м (рис. 1). Найденное значение этого параметра –  $t_M = 26,5$  мкс.

Расчеты кривой наведенного тока  $i(t)$  были выполнены по первому слагаемому выражения (7) и формулам (8) и (9). Полученные результаты иллюстрирует рис. 2 для значений  $b_1$  и  $b_2$ , указанных выше.

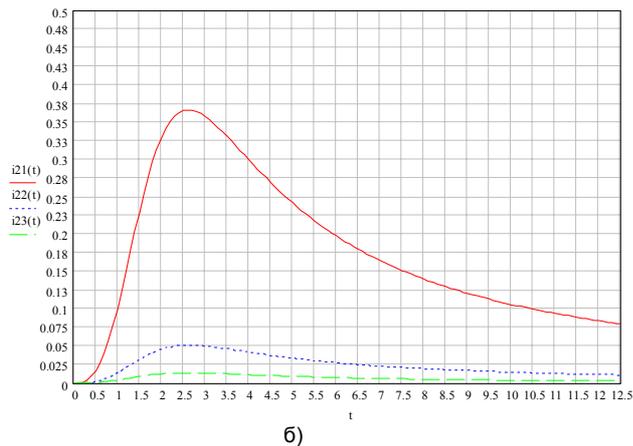
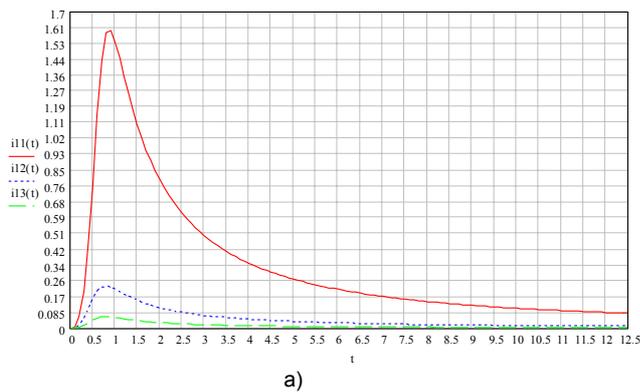


Рис. 2. Кривая наведенного тока  $i(t)$ , рассчитанная по первому слагаемому (7): а – при  $b_1 = 20$  м и различных вариантах высоты подвеса троса  $h_{T1..3}$ , приведенных выше; б – при  $b_2 = 20$  м и различных вариантах высоты подвеса троса  $h_{T1..3}$ , приведенных выше

Значение времени, за которое наведенный ток достигает максимума, вычисляется по формуле (9). Для заданных высот подвеса троса  $h_T$  имеем  $t_{01} = 0,62$  мкс,  $t_{02} = 0,22$  мкс,  $t_{03} = 0,11$  мкс.

Полагаем теперь, что составляющая наведенного тока  $di(t)$  в формуле (2) создается движением элементарного заряда  $dq(t - t_3)$ , где  $t_3$  – время запаздывания, обусловленное конечностью скорости распространения возмущений в поле. Считая эту скорость равной скорости света  $c$ , для заряда, находящегося в сечении с координатой  $z$ , получаем время запаздывания в виде

$$t_3 = \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + (z - h_T)^2} \quad (12)$$

и, соответственно, с учетом формул (2), (5)

$$di(t) = \tau_{fl} dz \vec{V}_\phi(t - t_3) (\vec{E}_{OT} + \vec{E}'_{OT}), \quad (13)$$

$$i(t) = -\frac{\tau_{fl}}{\ln \frac{2h_T}{r_T}} \int_0^{z_t} V_\phi \left( t - \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + (z - h_T)^2} \right) \times \left[ \frac{z - h_T}{b_T^2 + (z - h_T)^2} - \frac{z + h_T}{b_T^2 + (z + h_T)^2} \right] dz. \quad (14)$$

В выражении (14) момент наблюдения  $t$ , согласно формуле (6), фиксируется по координате фронта нейтрализации  $z_\phi(t)$  независимо от процесса сброса зарядов тросом. В формировании импульса наведенного тока в момент времени  $t$  участвуют лишь

заряды, для которых имеем  $t > t_3$ ; верхний предел в интеграле (14) вычисляется по уравнению

$$z_t = \int_0^{t - \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + (z_t - h_T)^2}} V_\phi(v) dv, \quad t \geq \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + h_T^2},$$

которое для тока молнии, заданного в форме (10), преобразуется к виду

$$z_t = \frac{i_m}{\tau_{fl}} \left\{ \frac{1}{\eta} \left[ 1 - \exp \left[ -\eta \left( t - \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + (z_t - h_T)^2} \right) \right] \right] \right\} - \frac{1}{c} \left[ 1 - \exp \left[ -\xi \left( t - \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + (z_t - h_T)^2} \right) \right] \right] \right\}, \quad (15)$$

а кривая  $i(t)$  начинается в точке  $t = t_3(0) = \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + h_T^2}$ . Поскольку из процесса формирования  $i(t)$  выпадает участок канала  $z_t \leq z \leq z_\phi(t)$ , получаемая кривая наведенного тока в системе отсчета  $t' = t - t_3(0) = t - \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + h_T^2}$  мажорируется найденной выше зависимостью  $i(t)$ , даваемой формулой (7). Результаты расчетов по (14), (15) приведены на рис. 3 для  $i(t') = i \left( t - \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + h_T^2} \right)$ .

Сравнение кривых  $i(t)$  и  $i(t')$  на рис. 2, 3 позволяет сделать вывод о том, что для оценочных расчетов импульсов наведенного тока допустимо использовать сравнительно простую формулу (7) (первое слагаемое), рассматривая данную зависимость с учетом сдвига во времени для переменной  $t' = t - \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + h_T^2}$ .

При наличии нескольких заземленных тросов (тросовые экраны [6], защитные тросы воздушных линий электропередачи и другие устройства с заземленными объектами иных типов) расчет наведенных токов проводится для каждого из них в отдельности; ток в заземлителе находится путем суммирования с учетом запаздывания  $t_{31}, t_{32}, \dots$  и т.д. Соответствующие расчетные соотношения запишем, полагая, что в системе (рис. 1) имеется  $m$  заземленных тросов и  $n - m$  проводов. Составляющая фиктивного электростатического поля, параллельная вектору скорости  $\vec{V}_\phi(t)$ , вычисляется при определении тока с  $k$ -го заземленного троса ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) по формуле

$$E_{0z}^{(k)} = \sum_{i=1}^n \frac{\tilde{\tau}_{0i}^{(k)}}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{z - h_i}{b_i^2 + (z - h_i)^2} - \frac{z + h_i}{b_i^2 + (z + h_i)^2} \right], \quad (16)$$

в которой плотности условных зарядов  $\tilde{\tau}_{0i}^{(k)}$  находятся при решении системы уравнений (3) для случая  $\varphi_k = 1, \varphi_{i \neq k} = 0$ .

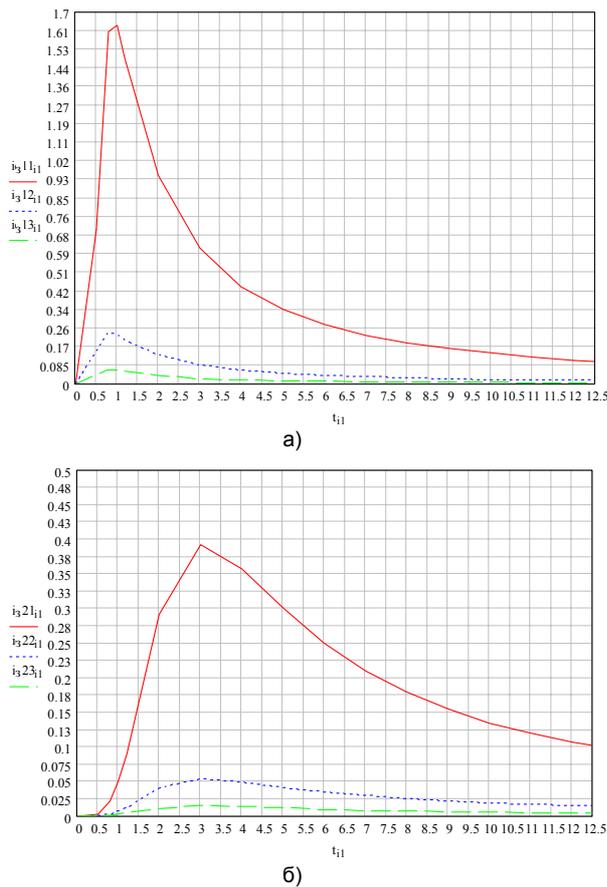


Рис. 3. Кривая наведенного тока  $i(t')$ , рассчитанная с учетом запаздывания: а –  $b_1 = 20$  м и различных вариантах высоты подвеса троса  $h_{T1..3}$ , приведенных выше; б – при  $b_2 = 20$  м и различных вариантах высоты подвеса троса  $h_{T1..3}$ , приведенных выше

Выполняя преобразования без учета запаздывания, получаем

$$\int_0^{Z_\phi(t)} E_{0Z}^{(k)} dz = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \tilde{\tau}_{0i}^{(k)} \ln \frac{\sqrt{b_i^2 + (z_\phi + h_i)^2}}{\sqrt{b_i^2 + (z_\phi - h_i)^2}} = -\varphi_0^{(k)}(Z_\phi), \quad (17)$$

где  $\varphi_0^{(k)}(Z_\phi)$  – потенциал фиктивного электростатического поля, созданного зарядами  $\tilde{\tau}_{0i}^{(k)}$  в точке  $Z = Z_\phi, \rho = 0$  (фронт волны нейтрализации).

Для тока  $i^{(k)}(t)$ , стекающего с  $k$ -го троса в заземлитель, согласно (7), имеем формулу

$$i^{(k)}(t) = -\frac{\tau_\pi V_\phi(t)}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \tilde{\tau}_{0i}^{(k)} \ln \frac{\sqrt{b_i^2 + (z_\phi + h_i)^2}}{\sqrt{b_i^2 + (z_\phi - h_i)^2}} = \quad (18)$$

$$= \tau_\pi V_\phi(t) \varphi_0^{(k)}[Z_\phi(t)].$$

Поскольку  $\varphi_0^{(k)}(Z_\phi)$  как электростатический потенциал не зависит от формы пути, по которому вычисляется, расчет по (18) допустимо проводить при любой конфигурации лидерного канала. Изменения формы последнего скажутся лишь на значе-

ниях  $Z_\phi, \rho_\phi$ , достигаемых фронтом к фиксированному моменту времени  $t$ .

Расчет по выражению (18) выполняется для всех заземленных тросов, найденные токи  $i^{(k)}(t), k = 1, 2, \dots, m$ , позволяют найти суммарный ток, протекающий в заземлителе:

$$i(t) = \sum_{k=1}^m i^{(k)} \left( t - \frac{1}{c} \sqrt{b_k^2 + h_k^2} \right). \quad (19)$$

В качестве иллюстрации применения изложенной методики рассчитаем наведенный ток, стекающий в заземлитель с защитных тросов ЛЭП-500 кВ при ударе молнии в землю в середине пролета линии. Расчет поясняет рис. 4; геометрические параметры системы провода–тросы соответствуют данным, взятым из справочника [7].

Для этой линии имеем:

- провод 3×АС 400/51:  $r_\pi = 13,8 \cdot 10^{-3}$  м, радиус расщепления  $s = 0,4$  м;
- тросы С-70:  $r_T = 5,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $d_T = 16,2$  м;
- в середине пролета  $h_\pi = 16,6$  м,  $h_T = 24,2$  м;
- расстояние от троса до места удара молнии:  $b_1 = 20$  м;
- параметры импульса соответствуют формуле (10).

При решении задачи последовательно выполняем следующие расчеты:

1. Для фазных проводов и тросов ЛЭП определяем потенциальные коэффициенты и решаем систему уравнений (3) для двух режимов:  $k = 1, \varphi_1 = 1, \varphi_2 = \varphi_3 = \dots = 0$  и  $k = 2, \varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1, \varphi_3 = \varphi_4 = \dots = 0$ . Получающиеся величины зарядов на проводах и тросах  $\tilde{\tau}_i^{(k)}$  являются для данной ЛЭП характеристическими в том смысле, что на их основе определяется наведенный ток при ударе молнии в любой точке срединной зоны линии, где высоты подвеса  $h_\pi, h_T$  имеют заданные выше значения.

Результаты расчетов приведены в таблице,

для безразмерных величин  $\tau_i^{*(k)} = \tilde{\tau}_i^{(k)} / 2\pi\epsilon_0$ , используемых в формулах (16)–(18).

**Относительные значения условных зарядов**

| $i$             | 1       | 2        | 3       | 4       | 5       | 6       |
|-----------------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| $\tau_i^{*(1)}$ | -0,119  | 0,00869  | 0,00941 | 0,00933 | 0,00941 | 0,00653 |
| $\tau_i^{*(2)}$ | 0,00869 | -0,11949 | 0,0024  | 0,00238 | 0,0024  | 0,00653 |
| $i$             | 6       | 7        | 8       | 9       | 10      | 11      |
| $\tau_i^{*(1)}$ | 0,00653 | 0,00647  | 0,00653 | 0,0024  | 0,00238 | 0,0024  |
| $\tau_i^{*(2)}$ | 0,00653 | 0,00647  | 0,00653 | 0,00941 | 0,00933 | 0,00941 |

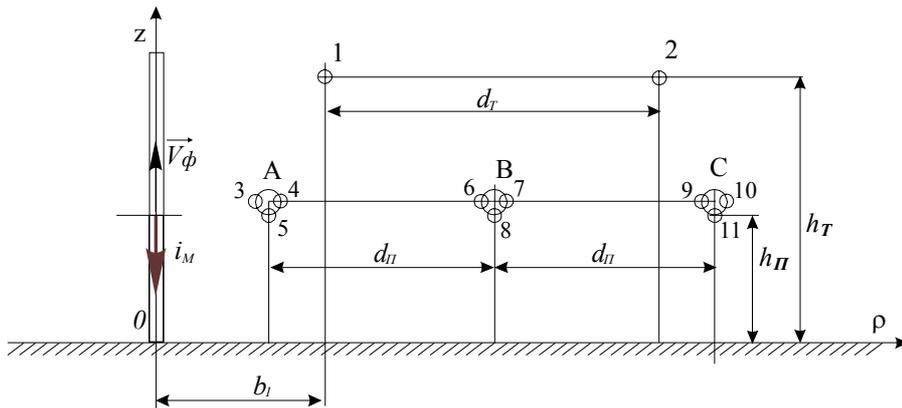


Рис. 4. Геометрические параметры системы провода-трос

2. Поскольку радиус расщепления  $s \ll \left[ b_l - \left( d_{\Pi} - d_{T/2} \right) \right]$ , при расчетах  $i^{(k)}(t)$  по выражению (18) допустимо использовать заряды фаз  $\tau_A^{*(k)} = \tau_3^{*(k)} + \tau_4^{*(k)} + \tau_5^{*(k)}$ ;  $\tau_B^{*(k)} = \tau_6^{*(k)} + \tau_7^{*(k)} + \tau_8^{*(k)}$ ;  $\tau_C^{*(k)} = \tau_9^{*(k)} + \tau_{10}^{*(k)} + \tau_{11}^{*(k)}$ . Согласно данным таблицы, имеем  $\tau_A^{*(1)} = 0,02815$ ,  $\tau_B^{*(1)} = 0,01952$ ,  $\tau_C^{*(1)} = 0,00719$ ;  $\tau_A^{*(2)} = 0,00719$ ,  $\tau_B^{*(2)} = 0,01952$ ,  $\tau_C^{*(2)} = 0,02815$ .

3. Выполняем расчет токов  $i^{(1)}(t)$ ,  $i^{(2)}(t)$ , стекающих с тросов в заземлитель. Согласно выражениям (17), (18), имеем

$$i^{(k)}(t) = -\tau_{\Pi} V_{\Phi}(t) \sum_i \tau_i^{*(k)} \ln \frac{\sqrt{b_i^2 + (z_{\Phi} + h_i)^2}}{\sqrt{b_i^2 + (z_{\Phi} - h_i)^2}}, \quad (20)$$

$i = 1, 2, A, B, C$ .

4. По формуле (19) определяем ток в заземлителе:

$$i(t) = i^{(1)} \left( t - \frac{1}{c} \sqrt{b_1^2 + h_1^2} \right) + i^{(2)} \left( t - \frac{1}{c} \sqrt{b_2^2 + h_2^2} \right), \quad (21)$$

$$t > \frac{1}{c} \sqrt{b_1^2 + h_1^2}.$$

Результаты расчетов, выполненные по методике, иллюстрирует рис. 5.

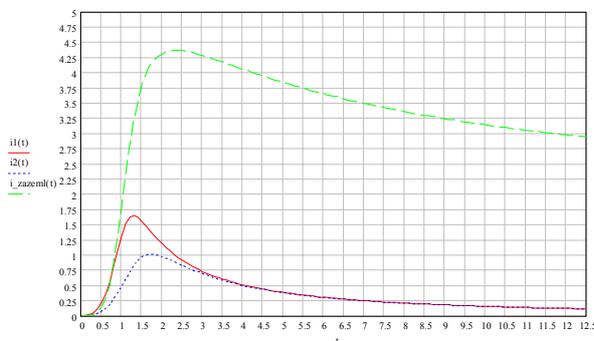


Рис. 5. Результаты расчета наведенного тока, стекающего в заземлитель с защитных тросов при ударе молнии в землю, в середине пролета линии ЛЭП-500 кВ:  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$  – токи, стекающие с тросов 1 и 2 (см. рис. 4) в заземлитель при ударе молнии;  $i_{zazeml}(t)$  – суммарный ток, протекающий в заземлителе

### Заключение

Предложенная методика расчета наведенного тока в заземлителе применима для любых заземленных объектов (опоры ЛЭП, оборудование и сооружения ОРУ, мачты молниеотводов и т.д.), если решена задача электростатики о вертикальной составляющей электрического поля объекта при единичном потенциале на нем.

Отличие формы лидерного канала от прямой не является принципиальным препятствием для расчетов изложенным методом.

Применение рассмотренного варианта теоремы Шокли-Рамо в тех случаях, когда для многопроводной системы выполняется расчет только интегральных характеристик, является предпочтительным, по сравнению с расчетом распределений зарядов через поле методом интегральных уравнений [8].

### Список литературы

1. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М.: Изд. АН СССР, 1948.
2. Фельд Я.Н. Наведение токов движущимися зарядами // Докл. АН СССР. – 1953. – Т. 93. – № 3 – С. 447–450.
3. Герштейн Г.М. Моделирование полей методом электростатической индукции. – М.: Наука, 1970.
4. Слышалов А.В. Распределение тока смещения при грозном разряде: Межвуз. сб. науч. тр. «Высоковольтная техника и электротехнология». Вып. 2. – Иваново, 1999.
5. Слышалов А.В. Разработка методов расчета механических сил и моментов, действующих на фазные провода и защитные тросы ЛЭП в поле лидера молнии: Дис... канд. техн. наук: 05.14.02; 05.14.12. – Иваново, 2001.
6. Барсуков А.И., Васильев А.В., Мисриханов М.Ш., Седунов В.Н., Токарский А.Ю. Применение тросовых экранов для снижения напряженности электрического поля ВЛ СВН.
7. Справочник по проектированию линий электропередачи / М.Б. Вязьменский, В.Х. Ишкин, К.П. Крюков и др.; Под ред. М.А. Реута и С.С. Рокотяна. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980.
8. Слышалов В.К., Киселева Ю.А. Расчет распределений зарядов, наводимых в системе параллельных проводов полем лидера молнии: Межвуз. сб. науч. тр. «Высоковольтная техника и электротехнология». Вып. 3. – Иваново, 2003. – С. 91–96.

Слышалов Владимир Константинович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры электрических систем,  
телефон (4932) 26-99-21,  
zav\_es@es.ispu.ru

Сорокин Александр Федорович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент, декан электроэнергетического факультета,  
телефон (4932) 26-99-23,  
deaneef@eef.ispu.ru

Слышалов Андрей Владимирович,  
ОАО «Ивэнерго»,  
Начальник отдела, кандидат технических наук,  
zav\_es@es.ispu.ru

Киселева Юлия Александровна,  
ООО «РЗА-сервис».  
ведущий инженер, кандидат технических наук,  
zav\_es@es.ispu.ru

Кандалов Юрий Владимирович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант,  
телефон (4932) 26-99-21,  
zav\_es@es.ispu.ru