

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-211-227

УДК 621.311

Определение уровня перенапряжений во вторичных цепях подстанций при распространении по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения

В. И. Глушко¹⁾, Е. А. Дерюгина¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Грозовой импульс напряжения, обусловленный набегающими с линии высокого напряжения на подстанцию волнами грозовых перенапряжений, вызывает ток в шинах, который вследствие магнитного влияния индуктирует во вторичных цепях перенапряжения. Перенапряжения в системе «провод – земля» рассматриваются как помехи, представляющие опасность в отношении возможности электрического повреждения устройств релейной защиты и автоматики подстанций. Используя обратное преобразование Лапласа, получено решение задачи магнитного влияния первичных цепей на вторичные цепи во временной области в зависимости от времени переходного процесса, который всегда возникает при распространении по шинам импульса напряжения. Выполнена оценка уровня перенапряжений в системе «провод – земля» для случая несрабатывания шинных нелинейных ограничителей перенапряжений и разрядников, когда грозовой импульс напряжения распространяется по шинам без деформации по их длине. Получены решения для перенапряжений во вторичных цепях, по которым можно оценить предельно повышенный, пониженный и средний повышенный уровни перенапряжений. Методом вычислительного эксперимента проведена оценка уровней перенапряжения для распределительных подстанций напряжением 110 и 220 кВ. Полученные результаты сопоставлены с нормируемыми значениями напряжения помех. Разработанный метод расчета импульсного магнитного влияния первичных цепей на вторичные цепи подстанций при распространении по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения для случая несрабатывания нелинейных ограничителей перенапряжений и разрядников на стадии проектирования и эксплуатации подстанций может использоваться как тестовый для оценки электрической стойкости устройств релейной защиты и автоматики от грозовых и коммутационных перенапряжений.

Ключевые слова: грозовой импульс напряжения, вторичные цепи, импульс магнитного влияния, заземление, уровень перенапряжения

Для цитирования: Глушко, В. И. Определение уровня перенапряжений во вторичных цепях подстанций при распространении по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения / В. И. Глушко, Е. А. Дерюгина // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 3. С. 211–227. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-211-227

Адрес для переписки

Дерюгина Елена Александровна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-63
power.st@bntu.by

Address for correspondence

Deryugina Elena A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-63
power.st@bntu.by

Determination of the Level of Overvoltage in the Secondary Circuits of Substations when Lightning Impulse Voltage is Distributed in High-Voltage Buses

V. I. Glushko¹⁾, E. A. Deryugina¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Lightning voltage impulse due to the waves of storm surge rolling out the high voltage line to a substation causes current to flow in the buses that, due to magnetic effect, induces overvoltage in the secondary circuit. Overvoltage in the system “wire – ground” is considered as obstructions which are hazard in relation to the possibility of electrical damage of the devices of relay protection and automation of substations. With the use of the inverse Laplace transformation, the solution of the problem the magnetic influence of the primary circuits to secondary circuits in the time domain depending on time of transition, which always occurs during the distribution of the voltage impulse in the buses, has been obtained. Estimation of the level of overvoltage in the system “wire – ground” for the case of failure of a bus nonlinear surges and arresters when lightning impulse of voltage is distributed on the buses along their length without deformation has been fulfilled. Solutions are obtained for overvoltage in the secondary circuits, according to which the levels of overvoltage can be estimated as “extremely stepped-up”, “lowered” and “averagely stepped-up” levels. With a method of computational experiment the levels of overvoltage for distribution substations with voltage 110 and 220 kV were assessed. The results are compared with the normalized values of the interference voltage. The suggested method of calculation of impulse magnetic influence of the primary circuits on the secondary circuits of substations while lightning impulse voltage is being distributed in high voltage buses for the case of failure of a nonlinear surge and arresters at the stage of design and operation of substations can be used as a test method for estimation of electrical durability of relay protection and automatic equipment from lightning and switching overvoltage.

Keywords: lightning impulse of voltage, secondary circuits, magnetic influence impulse, grounding, overvoltage level

For citation: Glushko V. I., Deryugina E. A. (2017) Determination of the Level of Overvoltage in the Secondary Circuits of Substations when Lightning Impulse Voltage is Distributed in High-Voltage Buses. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (3), 211–227. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-211-227 (in Russian)

Задача исследования

В статье рассматривается косоугольный грозовой импульс напряжения, обусловленный набегающими с линии высокого напряжения на подстанцию волнами грозowych перенапряжений. Импульс напряжения вызывает ток в шинах, который вследствие магнитного влияния индуктирует во вторичных цепях перенапряжения, принимаемых как источник импульсных помех. Оценивали максимальный уровень перенапряжений в системе «провод – земля» («жила – земля») для случая несрабатывания шинных нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) и разрядников, когда грозовой импульс напряжения распространяется по шинам без деформации по их длине. Перенапряжения в системе «провод – земля» рассматривали как помехи, представляющие опасность в отношении возможности элект-

рического повреждения устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА) подстанций. Электрическую составляющую влияния не учитывали.

На практике режим несрабатывания ОПН и разрядников чаще всего связан с повреждением заземляющего проводника (спуска) к их заземлению. В этом случае грозовая волна не отражается от заземлителя ОПН и разрядников, а распространяется по шинам без искажения на всей длине сближения первичных и вторичных цепей.

В [1] показано, что действие грозового импульса напряжения на линии электропередачи характеризуется протеканием непериодического переходного процесса, который приближенно может быть описан на основе высокочастотных характеристик линий с последующим приведением его во временную область путем обратного преобразования Лапласа. С целью упрощения выполняемой задачи такую процедуру переходного процесса принимали и для высоковольтных шин при использовании частотных (высокочастотных) характеристик линий (шин) по [2], где рассмотрено решение задачи магнитного влияния воздушных линий электропередачи высокого напряжения на протяженные проводящие коммуникации, представленное как магнитное влияние первичных цепей на вторичные цепи. В исследованиях при оценке уровня перенапряжения в качестве первичных цепей принимали высоковольтные шины открытых подстанций высокого напряжения, вторичными цепями – кабели УРЗА, проложенные вблизи земли (в лотках).

Решение задачи магнитного влияния первичных цепей на вторичные цепи в [2] получено в частотной области в зависимости от угловой частоты ω . В данной статье получено аналогичное решение во временной области в зависимости от времени переходного процесса t , который всегда возникает при распространении по шинам импульса напряжения.

При распространении по шинам грозового импульса напряжения магнитное влияние характеризуется распространением по вторичным цепям импульса продольной составляющей электрического поля $E_x(j\omega)$, которая согласно [2] определяется по формуле

$$E_x(j\omega) = -j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} I_{\pi} \left[\ln \frac{(h_{\pi} + z)^2 + y^2}{(h_{\pi} - z)^2 + y^2} + 4 \int_0^{\infty} \frac{e^{-v(h_{\pi} + z)}}{v + \sqrt{v^2 + k_3^2}} \cos vy \, dv \right], \quad (1)$$

где ω – угловая частота; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $k_3 = \sqrt{j\omega \frac{\mu_0}{\rho_3}}$ – волновое число

земли; ρ_3 – удельное сопротивление земли; I_{π} – ток в первичной цепи; h_{π} – высота подвеса первичной цепи (шин) над землей; z, y – координаты точки наблюдения на вторичной цепи.

Для принятой задачи рассмотрим случай расположения кабелей вторичных цепей вблизи земли в лотках ($z = 0$). Тогда решение для $E_x(j\omega)$ в соответствии с [2] представляется в виде

$$E_x(j\omega) = -j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} I_\Pi \ln \frac{\left(h_{\text{ш}} + \frac{2}{k_3}\right)^2 + y^2}{h_{\text{ш}}^2 + y^2}. \quad (2)$$

Решение (2) будем считать точным; оно представлено в частотной области и является изображением во временной области $E_x(t)$. При практических расчетах оригинал $E_x(t)$ целесообразно получить в явном виде, что достигается путем обратного преобразования Лапласа. Однако для логарифмической функции в (2) строгое обратное преобразование Лапласа в явном виде трудно выполнимо или просто невозможно. С учетом этого для представления $E_x(j\omega)$ (2) во временной области $E_x(t)$ требуется точное решение (2) заменить приближенным решением, допускающим получение обратного преобразования Лапласа в явном виде. Решение такой задачи представлено далее.

Приближенное решение для $E_x(j\omega)$

Рассмотрим случай прокладки кабелей вторичных цепей вблизи земли в лотках ($z = 0$). Тогда, учитывая соотношение $\cos vy = \frac{1}{2}(e^{jvy} + e^{-jvy})$, для (1) получим

$$E_x(j\omega) = -j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_\Pi \int_0^\infty \frac{e^{-vh_{\text{ш}}}}{v + \sqrt{v^2 + k_3^2}} (e^{jvy} + e^{-jvy}) dv. \quad (3)$$

Для упрощения вычисления интеграла в (3) в [2] получено приближение для трансцендентной функции

$$F(v, k_3) = \frac{1}{v + \sqrt{v^2 + k_3^2}} \cong \frac{1 - e^{-\frac{2v}{k_3}}}{2v}, \quad (4)$$

с помощью которого (3) представляется в виде

$$E_x(j\omega) = -j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} I_\Pi \left\{ \int_0^\infty \left[e^{-v\eta_1} - e^{-v\left(\eta_1 + \frac{2}{k_3}\right)} \right] \frac{dv}{v} + \int_0^\infty \left[e^{-v\eta_2} - e^{-v\left(\eta_2 + \frac{2}{k_3}\right)} \right] \frac{dv}{v} \right\}, \quad (5)$$

где $\eta_1 = h_{\text{ш}} + jy$; $\eta_2 = h_{\text{ш}} - jy$.

Для интегралов в (5) используем функциональное соотношение [3]

$$e^{ax} - e^{bx} = (a - b)x \exp\left[\frac{1}{2}(a + b)x\right] \prod_{n=1}^{\infty} \left[1 + \frac{(a - b)^2 x^2}{4n^2 \pi^2}\right]. \quad (6)$$

Введем замену $\eta = \begin{cases} h_{\text{ш}} + jy; \\ h_{\text{ш}} - jy, \end{cases}$ тогда в соответствии с (5) и (6) имеем:

$$x = v; a = -\eta; b = -\left(\eta + \frac{2}{k_3}\right); a - b = \frac{2}{k_3}; a + b = -2\left(\eta + \frac{1}{k_3}\right);$$

$$\prod_{n=1}^{\infty} \left[1 + \frac{(a-b)^2 x^2}{4n^2 \pi^2} \right] = \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} \right).$$

Сходимость $\prod_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} \right)$ устанавливается условием $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} = 0$.

Из интеграла в (5) следует, что его главное значение определяется в области нуля переменной v ($v \rightarrow 0$). С учетом этого $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} \equiv 0$, т. е. абсолютно сходится. Кроме того, при $v \rightarrow 0$ $\frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} = 0$. Тогда

$\prod_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{v^2}{n^2 k_3^2 \pi^2} \right) = 1$, и для $E_x(j\omega)$ по (5) получим

$$\begin{aligned} E_x(j\omega) &= -j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \left(\frac{1}{k_3 \eta_1 + 1} + \frac{1}{k_3 \eta_2 + 1} \right) = \\ &= -j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \left(\frac{\beta_1}{\sqrt{j\omega + \beta_1}} + \frac{\beta_2}{\sqrt{j\omega + \beta_2}} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{где } \beta_1 = \frac{\sqrt{\rho_3}}{\sqrt{\mu_0} \eta_1}; \beta_2 = \frac{\sqrt{\rho_3}}{\sqrt{\mu_0} \eta_2}.$$

Сопряженные комплексные числа $\eta_1 = h_{\text{ш}} + jy$ и $\eta_2 = h_{\text{ш}} - jy$ определяют расстояние между точками на шинах и точками наблюдения на кабелях вторичных цепей, поэтому при расчете $E_x(j\omega)$ их целесообразно представить модулями $|\eta_1|$ и $|\eta_2|$. Поскольку $|\eta_1| = |\eta_2| = \sqrt{h_{\text{ш}}^2 + y^2}$, то $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ и (7) принимает вид

$$E_x(j\omega) = -j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \frac{2}{k_3 \sqrt{h_{\text{ш}}^2 + y^2} + 1} = -j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \frac{2\beta}{\sqrt{j\omega + \beta}}, \quad (8)$$

$$\text{где } \beta = \frac{\sqrt{\rho_3}}{\sqrt{\mu_0} \sqrt{h_{\text{ш}}^2 + y^2}}.$$

Испытательный уровень помех устанавливается по их модулю, поэтому в дальнейшем будем рассматривать $E_x(j\omega)$ в (8) без знака «-». Сопоставим решение (8) с точным решением (2) для случая грозового косоугольного импульса напряжения с $\tau_{\phi} = 2$ мкс при расположении кабелей вторичных цепей вблизи ближайшей фазы линии ($y = 0$). Тогда для $E_x(j\omega)$ по (2) и (8) будем иметь:

$$E_x(j\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \ln \left(1 + \frac{2}{k_3 h_{ш}} \right); \quad (9)$$

$$E_x(j\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} I_n \frac{2}{k_3 h_{ш} + 1}. \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует, что для оценки приближения решения (8) к (2) достаточно рассмотреть неравенство

$$\ln \left(1 + \frac{2}{k_3 h_{ш}} \right) \approx \frac{2}{k_3 h_{ш} + 1}. \quad (11)$$

При преобразовании Лапласа заменяют $j\omega$ оператором p , поэтому в $k_3 \sqrt{j\omega} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega}$ можно заменить модулем $|\sqrt{j\omega}| = \sqrt{\omega}$. Частоту ω прием равной эквивалентной частоте при расчете грозových перенапряжений $\omega_3 = \frac{\pi}{2\tau_\phi} = \frac{\pi}{2\tau_0 \cdot 10^{-6}}$ (τ_0 – в секундах) [2, 4]. Тогда для (11) получим

$$F_1 = \ln \left(1 + \frac{\sqrt{2\rho_3 \tau_0}}{h_{ш}} \right) \approx F_2 = \frac{2\sqrt{\rho_3 \tau_0}}{1,4h_{ш} + \sqrt{\rho_3 \tau_0}}. \quad (12)$$

По [4] для набегающих на подстанцию грозových волн перенапряжений косоугольный импульс напряжения имеет фронт волны $\tau_\phi = 2$ мкс. Поэтому оценку приближения решения (8) к (2) выполним применительно к фронту $\tau_\phi = 2$ мкс = $\tau_0 \cdot 10^{-6}$ с ($\tau_0 = 2$ с). Результаты сопоставления F_1 и F_2 в процентах для исходных данных ($h_{ш} = 5,5$ (7; 10) м; $\rho_3 = 100$ (250; 500) Ом·м; $\tau_0 = 2$ с) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сопоставление функций F_1 и F_2
The mapping of the functions F_1 and F_2

ρ_3 , Ом·м	$h_{ш} = 5,5$ м			$h_{ш} = 7$ м			$h_{ш} = 10$ м		
	F_1	F_2	Δ , %	F_1	F_2	Δ , %	F_1	F_2	Δ , %
100	1,534	1,295	15,58	1,350	1,181	12,49	1,099	1,005	8,52
250	1,909	1,488	22,09	1,708	1,391	18,58	1,426	1,230	13,75
500	2,212	1,608	27,28	2,000	1,527	23,66	1,700	1,386	18,44

На практике удельное сопротивление земли ρ_3 определяется с погрешностью в среднем до 15 %. Поэтому указанные в табл. 1 погрешности допустимы, что вполне обуславливает правомерность замены точного решения (2) приближенным решением (8), которое позволяет осуществить преобразование $E_x(p) = E_x(t)$ в явном виде.

Заменяя $j\omega$ оператором p , представим (8) в операторном виде

$$E_x(p) = \frac{\mu_0}{\pi} I_{\pi} \frac{p\beta}{\sqrt{p} + \beta}. \quad (13)$$

Ток I_{π} в (13) определим по импульсу начального напряжения $u_n(t)$ и волновому сопротивлению шин $z_{\text{вш}}$; будем иметь $I_{\pi} = i_{\pi}(t) = \frac{u_n(t)}{z_{\text{вш}}}$ [5].

Начальное напряжение представим косоугольным импульсом, который во временной и частотной областях описывается выражениями:

$$\begin{cases} u(t) = U_m \frac{t}{\tau_{\phi}}, & 0 < t < \tau_{\phi}; \\ U(p) = \frac{U_m}{\tau_{\phi} p^2}, \end{cases} \quad (14)$$

где U_m – амплитуда начального напряжения.

С учетом (14) для (13) в операторном виде получим

$$E_x(p) = \frac{U_m}{z_{\text{вш}}} \frac{\mu_0}{\pi} \frac{\beta}{\tau_{\phi} p(\sqrt{p} + \beta)}. \quad (15)$$

В (15) при времени τ_{ϕ} в мкс ($\tau_{\phi} = \tau_0 \cdot 10^{-6}$ с) имеем $\frac{\mu_0}{\pi} \cdot \frac{1}{\tau_{\phi}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi \tau_0 \cdot 10^{-6}} =$

$\frac{0,4}{\tau_0}$. Тогда (15) принимает вид

$$E_x(p) = 0,4 \frac{U_m}{z_{\text{вш}}} \delta u(p), \quad (16)$$

где $\delta u(p) = \frac{\beta}{\tau_0 p(\sqrt{p} + \beta)}$ – импульс магнитного влияния первичных цепей

на вторичные цепи при распространении по шинам грозового импульса напряжения.

В $\delta u(p)$ входит функция $\varphi(p) = \frac{\beta}{p(\sqrt{p} + \beta)}$, оригинал которой равен [6]

$$\varphi(t) = 1 - e^{\beta^2 t} \operatorname{erfc}(\beta \sqrt{t}), \quad (17)$$

где $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\varepsilon^2} d\varepsilon = 1 - \operatorname{erf}(x)$ – дополнительный интеграл вероятностей;

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\varepsilon^2} d\varepsilon$ – интеграл вероятностей.

По (16) с учетом (17) для $\delta u(p)$ во временной области получим:

$$\delta u(t) \frac{1}{\tau_0} \left[1 - e^{x^2} \operatorname{erfc}(x) \right], \quad x = \beta \sqrt{t}; \quad 0 < t < \tau_\phi. \quad (18)$$

Для упрощения вычисления параметра $e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)$ используем аппроксимацию $\operatorname{erf}(x)$ рациональными функциями [6]

$$\operatorname{erf}(x) = 1 - (a_1 b + a_2 b^2 + a_3 b^3) e^{-x^2}, \quad (19)$$

где $b = \frac{1}{1 + px}$; $p = 0,47047$; $a_1 = 0,3480242$; $a_2 = -0,0958798$; $a_3 = 0,7478556$.

Из определения $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$, тогда с учетом (19) получаем аппроксимацию параметра $e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)$

$$e^{x^2} \operatorname{erfc}(x) = \frac{0,3480242}{1 + 0,47047x} - \frac{0,0958798}{(1 + 0,47047x)^2} + \frac{0,7478556}{(1 + 0,47047x)^3}. \quad (20)$$

При вычислении переменной $x = \beta \sqrt{t}$ в (18) принимается $\beta = \sqrt{\frac{\rho_3}{\mu_0(h_{\text{ш}}^2 + y^2)}} = \frac{\sqrt{\rho_3} \cdot 10^3}{\sqrt{0,4\pi} \sqrt{h_{\text{ш}}^2 + y^2}}$ (учитывается $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Импульс магнитного влияния $\delta u(t)$ по (18) при исходных данных ($h_{\text{ш}} = 5,5$ м; $y = 0$; $\tau = 2$ мкс; $t = 0 \dots \tau_\phi$ мкс; $\rho_3 = 50$ (100; 250; 500) Ом·м) представлен на рис. 1. При $y = 0$ определяется максимальная величина импульса $\delta u(t)$.

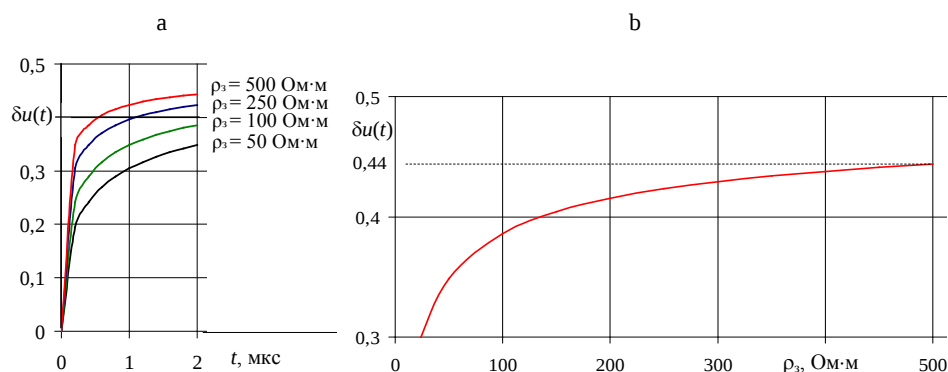


Рис. 1. Импульс магнитного влияния $\delta u(t)$

Fig. 1. Magnetic influence impulse $\delta u(t)$

Из (18) и рис. 1 следует, что при $\rho_3 \rightarrow 0$ $\delta u(t) \rightarrow 0$, а при $\rho_3 \rightarrow \infty$ $\delta u(t) \rightarrow 0,5$. Из этого предела вытекает важное практическое положение: в случае низкоомных грунтов уровень помех снижается, а при высокоомных грунтах – повышается. Подобный результат, описываемый зоной сте-

кания тока с заземлителя, получен в [7] при стекании импульсных токов с заземлителей в землю.

С учетом преобразования $\delta u(p) = \delta u(t)$ окончательно для решения $E_x(t)$ получим

$$E_x(t) = 0,4 \frac{U_m}{Z_{\text{вн}}} \delta u(t), \quad t > 0. \quad (21)$$

Импульс $E_x(t)$ представляет собой падающую волну, которая распространяется по вторичным цепям и вызывает напряжение по отношению к земле, рассматриваемое как источник импульсных помех в УРЗА. Скорость распространения импульса $E_x(t)$ в пределах длины параллельного сближения первичных и вторичных цепей $l_{\text{пв}}$ определяет грозовой импульс напряжения, который распространяется по шинам примерно со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Заметим, что вне длины сближения $l_{\text{пв}}$ для кабельных линий вторичных цепей импульс $E_x(t)$ распространяется со скоростью $v = 1/\sqrt{LC}$, где L, C – погонные индуктивность и емкость жилы и экрана.

Для оценки действия импульса $E_x(t)$ на вторичные цепи сопоставим длину волны импульса $E_x(t)$ $\lambda_{\text{и}}$ с характерной минимальной и максимальной длинами сближения $l_{\text{пв}} = 10 \dots 50$ м; будем иметь $\lambda_{\text{и}} = \tau_{\text{ф}} c = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8 = 600$ м $\gg 10 \dots 50$ м. Поэтому если совместить амплитуду импульса $E_x(t)$ при $t = \tau_{\text{ф}}$ с началом длины сближения $l_{\text{пв}}$ с учетом его монотонности на интервале определения $t = 0 \dots 2$ мкс, то в пределах длины сближения $l_{\text{пв}}$ величина импульса $E_x(t)$ приближенно будет постоянной и равна его амплитуде $E_x(\tau_{\text{ф}})$.

К такому выводу можно прийти, анализируя продолжительность импульса $E_x(t)$ в пределах длины сближения $l_{\text{пв}}$: $t_{\text{пв}} = \frac{l_{\text{пв}}}{c} = \frac{10 \dots 50}{3 \cdot 10^8} = 0,033 \dots 0,165$ мкс, что значительно меньше продолжительности импульса $E_x(t)$ $t_{\text{и}} = 2$ мкс. Очевидно, что при $t_{\text{пв}} \ll t_{\text{и}}$ в пределах сближения $l_{\text{пв}}$ величина импульса $E_x(t)$ действительно будет постоянной и примерно равной амплитуде $E_x(\tau_{\text{ф}})$. Из этого принципиального положения очевидно следствие: в пределах длины сближения $l_{\text{пв}}$ импульс $E_x(t)$ при $\delta u(t) = \delta u(\tau_{\text{ф}})$ приближенно принимает максимальную величину и имеет размерность В/м, а действие его на вторичные цепи характеризуется зависимостью

$$E_{\text{пв}}(\tau_{\text{ф}}) = E_x(\tau_{\text{ф}}) l_{\text{пв}}, \quad (22)$$

которая представляется прямоугольным конечным импульсом с крутым фронтом. Средняя погрешность приближения к (22) для $\rho_3 = 50$ (100; 250; 500) Ом·м при $l_{\text{пв}} = 50$ м составляет порядка $\Delta = 1,5$ %. При $l_{\text{пв}} < 50$ м и $\rho_3 > 500$ Ом·м погрешность уменьшается.

В дальнейшем импульс $E_{\text{пв}}(t) = E_{\text{пв}}(\tau_{\text{ф}})$ будем считать падающей волной, которая при $E_x(t) = E_x(\tau_{\text{ф}})$ с учетом (21) равна

$$E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_{\phi}) = 0,4 \frac{U_m}{Z_{вщ}} \delta u(t) l_{пв}, \quad t = \tau_{\phi}. \quad (23)$$

В общем случае на длине импульса $\delta u(t)$ $\lambda_{и}$ фиксируется целое число $n_{пв} = \frac{\lambda_{и}}{l_{пв}} = \frac{\tau_{\phi}}{t_{пв}}$ падающих волн $E_{пв}(t)$ с различными амплитудами. Однако с целью оценки максимального уровня перенапряжений в качестве расчетной принимается падающая волна с максимальной амплитудой по (23). Обоснование падающей волны $E_{пв}(\tau_{\phi})$ показано на рис. 2.

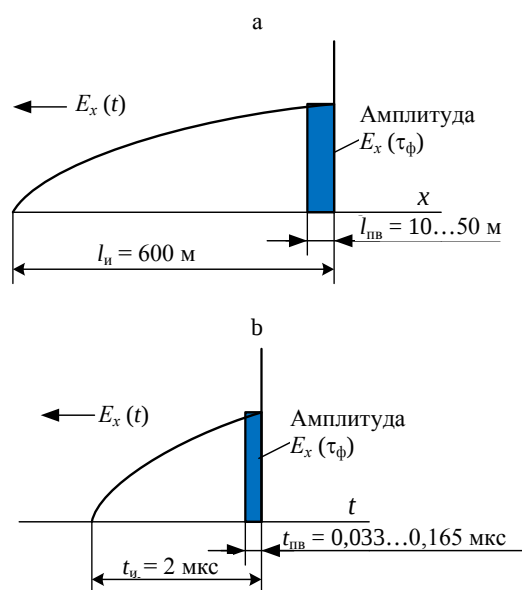


Рис. 2. К обоснованию падающей волны $E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_{\phi})$:
а – по длине импульса $E_x(t)$; б – по продолжительности импульса $E_x(t)$

Fig. 2. Towards the rationale of the incident wave $E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_{\phi})$:
а – according to the length of the impulse $E_x(t)$; б – according to the duration of the impulse $E_x(t)$

Замена $E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_{\phi})$ прямоугольным конечным импульсом полностью соответствует теории переходных процессов в цепях с распределенными параметрами, согласно которой при малой длине линии по сравнению с длиной волны даже в случае воздействующей синусоидальной ЭДС, имеющей частоту порядка десятков герц, за время пробега волны вдоль своей линии величина этой ЭДС может измениться лишь весьма незначительно, т. е. волны напряжения и токов приблизительно имеют прямоугольную форму [8]. Импульс $\delta u(t)$ по рис. 1 условно может быть представлен четвертью периода синусоиды, которая более близка к прямоугольной форме, чем четверть синусоиды. Поэтому рассмотренное обоснование падающей волны $E_{пв}(\tau_{\phi})$ вполне соответствует теории переходных процессов в линиях с распределенными параметрами.

Падающая волна $E_{пв}(\tau_\phi)$, как составная часть импульса $E_x(t)$, распространяясь по вторичным цепям, обуславливает импульсные помехи в УРЗА. Поскольку импульс $E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_\phi)$ определяется в момент времени $t = \tau_\phi$, то импульсные помехи имеют мгновенную величину $u(t)_{пер} = u(\tau_\phi)_{пер}$, что соответствует физической сущности импульсных помех.

Определение уровня перенапряжений во вторичных цепях

На подстанциях лотки с вторичными цепями, как правило, прокладываются параллельно и перпендикулярно шинам. Поэтому формирование падающей волны $E_{пв}(\tau_\phi)$ (23) происходит только на длине параллельно сближению первичных цепей с вторичными цепями $l_{пв}$ (в перпендикулярном направлении магнитное влияние считается нулевым). Для оценки максимального уровня перенапряжений рассмотрим случай, когда общестанционный пункт управления (ОПУ) расположен вблизи длины сближения $l_{пв}$, что позволяет не учитывать затухание волны $E_{пв}(\tau_\phi)$ по длине вторичной цепи. Считается, что в ОПУ жила кабеля вторичных цепей заземляется на сопротивление нагрузки z_n . При распространении по кабелю падающая волна $E_{пв}(\tau_\phi)$ отражается от нагрузки z_n , в результате чего на нагрузке появляется напряжение перенапряжений $u(t)_{пер}$, которое рассматривается как импульсная помеха для УРЗА.

Для процесса отражения волны прямоугольного конечного импульса $E_{пв}(\tau_\phi)$ от нагрузки z_n рассматриваются две ее равные части: $E_{пв1}(\tau_\phi) = E_{пв}(\tau_\phi)/2$ и $E_{пв2}(\tau_\phi) = E_{пв}(\tau_\phi)/2$. Отраженная волна равна $E'_{пв1}(\tau_\phi) = E_{пв1}(\tau_\phi) \frac{z_n - z_{вк}}{z_n + z_{вк}}$, где $z_{вк}$ – волновое сопротивление кабеля, равное волновому сопротивлению жилы ($z_{вк} = z_{вж}$). Отраженная волна $E'_{пв1}(\tau_\phi)$ накладывается на подающую волну $E_{пв2}(\tau_\phi)$, в результате чего при $E_{пв1}(\tau_\phi) = E_{пв2}(\tau_\phi)$ для суммарной волны будем иметь

$$E_{пв\Sigma}(\tau_\phi) = E_{пв1}(\tau_\phi) \left(\frac{z_n - z_{вк}}{z_n + z_{вк}} + 1 \right) = E_{пв1}(\tau_\phi) \frac{2z_n}{z_n + z_{вк}}. \quad (24)$$

Это выражение полностью совпадает с решением для отражения падающей волны в линиях электропередачи по [9], которое широко используется в электротехнике. Поскольку $E_{пв1}(\tau_\phi) = E_{пв}(\tau_\phi)/2$, то для перенапряжений $u(t)_{пер}$ получим решение

$$u(t)_{пер} = 0,4 \frac{U_m}{z_{вж}} \delta u(\tau_\phi) l_{пв} \frac{z_n}{z_n + z_{вк}}, \quad t = \tau_\phi, \quad (25)$$

где $\delta u(\tau_\phi)$ определяется по (18) при $t = \tau_\phi$.

Решение (25) справедливо только, когда сопротивление нагрузки z_n не зависит от частоты, т. е. сопротивление z_n является активным сопротивле-

нием. Это объясняется тем, что в случае зависимости нагрузки от частоты $z_n(p)$ для решения $u(t)_{\text{пер}}$ потребовалось бы использовать преобразование $u(t)_{\text{пер}} = 0,4 \frac{U_m}{z_{\text{вн}}} \cdot \frac{\beta l_{\text{пв}}}{\tau_0 p(\sqrt{p} + \beta)} \cdot \frac{z_n(p)}{z_n(p) + z_{\text{вк}}}$, что существенно усложнило бы задачу, рассматриваемую в статье. Именно поэтому прикладное применение решения возможно, когда вторичные цепи заземляются на активное сопротивление $R_{\text{зк}}$. В этом случае для решения (25) получим

$$u(t)_{\text{пер}} = 0,4 \frac{U_m}{z_{\text{вн}}} \delta u(\tau_{\text{ф}}) l_{\text{пв}} \alpha_{\text{сп}}, \quad t = \tau_{\text{ф}}, \quad (26)$$

где $\alpha_{\text{сп}} = \frac{R_{\text{зк}}}{R_{\text{зк}} + z_{\text{вк}}} = \frac{1}{1 + z_{\text{вк}}/R_{\text{зк}}}$ – коэффициент снижения перенапряжений.

При $R_{\text{зк}} = z_{\text{вк}}$ решение (26) принимает вид

$$u(t)_{\text{пер}} = 0,2 \frac{U_m}{z_{\text{вн}}} \delta u(\tau_{\text{ф}}) l_{\text{пв}}, \quad t = \tau_{\text{ф}}. \quad (27)$$

Заземление вторичных цепей на активное сопротивление $R_{\text{зк}}$ можно осуществить путем выполнения заземляющего устройства (ЗУ) в ОПУ из системы вертикальных заземлителей, желательно из глубинных составных заземлителей длиной до 30 м [10]. Считается, что сопротивление горизонтальных связей между ЗУ ОПУ и ЗУ подстанции $z_{\text{св}}$ вследствие высокочастотного спектра частот прямоугольного конечного импульса падающей волны $E_{\text{пв}}(\tau_{\text{ф}})$ имеет величину $z_{\text{св}} \gg R_{\text{зк}}$, что практически исключает стекание импульсных токов в землю через ЗУ подстанции.

Полученные решения (26) и (27) во временной области по физической сущности и структуре полностью соответствуют решениям для оценки влияния линий электропередачи на линии связи в частотной области, которые в общем случае с учетом $E_x(j\omega)$ по (1) представляются в виде $U(j\omega) = E_x(j\omega) l_{\text{пв}}$.

Решения (26) и (27) по уровню перенапряжений определяют:

- при $z_n > z_{\text{вк}}$ и $R_{\text{зк}} > z_{\text{вк}}$ – предельно повышенный уровень перенапряжений, который на практике может не рассматриваться;
- при $z_n < z_{\text{вк}}$ и $R_{\text{зк}} < z_{\text{вк}}$ – пониженный уровень перенапряжений, соответствующий решению (26);
- при $z_n = z_{\text{вк}}$ и $R_{\text{зк}} = z_{\text{вк}}$ – средний повышенный уровень перенапряжений, который соответствует решению (27).

Общие решения для перенапряжений во вторичных цепях

Рабочие решения (26) и (27) получены для случая размещения ОПУ вблизи длины сближения без учета затухания падающей волны $E_{\text{пв}}(\tau_{\text{ф}})$ по длине вторичных цепей. Для учета затухания волны $E_{\text{пв}}(\tau_{\text{ф}})$ представим вторич-

ные цепи длинной линией с погонными параметрами L , C , R , G – соответственно индуктивность, емкость, активное сопротивление и проводимость изоляции жил и экрана. На практике информационные цепи стараются выбирать в виде линии без искажений при $\frac{R}{L} = \frac{G}{C} = \delta$, для которой падающая волна напряжения сохраняет свою форму, но распространяется со скоростью $v = 1/\sqrt{LC}$ с затуханием амплитуды по экспоненте $e^{-x\delta\sqrt{LC}}$, где x – координата распространения волны $E_{пв}(\tau_\phi)$ от длины сближения $l_{пв}$ до удаленного ОПУ. Параметр $\delta\sqrt{LC}$ равен: $\frac{R}{L}\sqrt{LC} = R\sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{R}{z_{вк}}$, где $z_{вк} = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Падающая волна $E_{пв}(\tau_\phi)$ представляется прямоугольным импульсом с длиной $l_{пв}$ и амплитудой $0,4 \frac{U_m}{z_{вш}} \delta u(\tau_\phi)$. Форму такого импульса определяет длина импульса $l_{пв}$, поэтому при распространении падающей волны $E_{пв}(\tau_\phi)$ по вторичным цепям ее форма остается постоянной, а вторичные цепи рассматриваются как линии без искажений. Тогда для падающей волны $E_{пв}(\tau_\phi)$ будем иметь

$$E_{пв}(\tau_\phi) = 0,4 \frac{U_m}{z_{вш}} \delta u(\tau_\phi) l_{пв} e^{-\frac{xR}{z_{вк}}}. \quad (28)$$

С учетом (28) окончательно для рабочих решений (26) и (27) получим общие решения в виде:

- оценка пониженного уровня перенапряжений

$$u(t)_{пер} = 0,4 \frac{U_m}{z_{вш}} \delta u(\tau_\phi) l_{пв} \alpha_{сп} e^{-\frac{xR}{z_{вк}}}, \quad t = \tau_\phi; \quad (29)$$

- оценка среднего повышенного уровня перенапряжений

$$u(t)_{пер} = 0,2 \frac{U_m}{z_{вш}} \delta u(\tau_\phi) l_{пв} e^{-\frac{xR}{z_{вк}}}, \quad t = \tau_\phi. \quad (30)$$

Решения (26), (27) и (29), (30) получены при отражении падающей волны $E_{пв}(t)$ по (23) от нагрузки z_n в конце вторичных цепей в ОПУ без учета последующих отражений волн от нагрузки в начале вторичных цепей в месте установки ОПН и разрядников. Это допущение объясняется тем, что последующая падающая волна по величине меньше первой падающей волны по (23). Наиболее просто такое положение можно обосновать для самого тяжелого случая, когда в начале вторичная цепь изолирована от земли.

В данном случае отраженная – падающая волна $E'_{пв}(\tau_\phi) = \frac{E_{пв}(\tau_\phi)}{2} \cdot \frac{z_H - z_{вк}}{z_H + z_{вк}}$ отражается без перемены знака, с учетом чего вторая падающая волна будет равна $E_{пв}(t) = \frac{E_{пв}(\tau_\phi)}{2} \cdot \frac{z_H - z_{вк}}{z_H + z_{вк}}$, что меньше величины первой падающей волны $E_{пв}(t) = E_{пв}(\tau_\phi)$ по (23). Поскольку переходный процесс вызывается одной начальной падающей волной $E_{пв}(t)$, возможность наложения падающей волны и отраженных волн исключается. Следовательно, для оценки максимального уровня перенапряжений действительно нужно принимать первую падающую волну по (23), как и сделано в статье.

Результаты расчета уровня перенапряжений во вторичных цепях

Рассмотрим решения (26) и (27) применительно к набегающим грозовым волнам с линий на распределительные подстанции напряжением 110 и 220 кВ, которые на подходе к подстанциям по [4] имеют косугольный фронт и характеризуются кривой опасных волн. Кривая опасных волн с учетом вольт-секундной характеристики гирлянд изоляторов линии определяет область опасных волн для подстанции. При этом расчетный грозовой импульс напряжения имеет фронт $\tau_\phi = 2$ мкс и максимальную амплитуду U_m , равную импульсному разрядному напряжению при положительной полярности и предразрядном времени $\tau_\phi = 2$ мкс U_τ^+ , указанной в табл. 2.

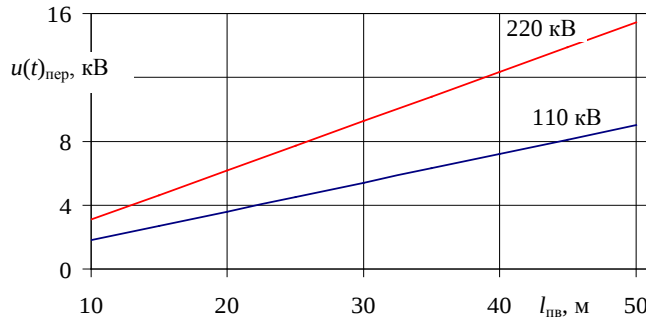
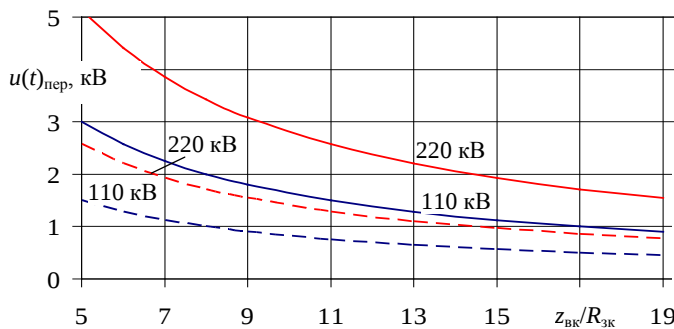
Таблица 2

Импульсное разрядное напряжение гирлянды на подстанциях
Impulse discharge voltage of the string in the substations

Номинальное напряжение подстанции $U_{ном}$, кВ	110	220
Амплитуда импульсного напряжения $U_m = U_\tau^+$, кВ	1050	1800

Решается следующая прикладная задача: оценка предельно возможного повышенного импульсного перенапряжения $u(t)_{пер}$ для случая несрабатывания шинных ОПН и разрядников, когда грозовой импульс напряжения с фронтом $\tau_\phi = 2$ мкс и амплитудой $U_m = U_\tau^+$ распространяется по шинам без деформации по их длине. Вычислительный эксперимент для решений (26) и (27) выполним применительно к подстанциям 110, 220 кВ при исходных данных: $h_{ш} = 5,5$ м; $y = 0$; $z_{вш} = 450$ Ом; $l_{пв} = 10\text{--}50$ м; $U_m = U_\tau^+ = 1050; 1800$ кВ; $\tau_\phi = 2$ мкс для земли со средним удельным сопротивлением $\rho_3 = 100$ Ом·м, по которой в мировой научной практике часто оцениваются электрические расчеты с учетом протекания токов через землю.

Результаты расчета $u(t)_{\text{пер}}$ представлены зависимостями $u(t)_{\text{пер}} = f(l_{\text{пв}})$ и $u(t)_{\text{пер}} = f\left(\frac{z_{\text{БК}}}{R_{\text{ЗК}}}\right)$, которые показаны на рис. 3, 4. Для зависимостей $u(t)_{\text{пер}} = f\left(\frac{z_{\text{БК}}}{R_{\text{ЗК}}}\right)$ приняты $l_{\text{пв}} = 25; 50$ м с учетом $\alpha_{\text{сп}} = \frac{1}{1 + z_{\text{БК}}/R_{\text{ЗК}}}$.

Рис. 3. Зависимости $u(t)_{\text{пер}} = f(l_{\text{пв}})$ Fig. 3. Dependences $u(t)_{\text{пер}} = f(l_{\text{пв}})$ Рис. 4. Зависимости $u(t)_{\text{пер}} = f(z_{\text{БК}}/R_{\text{ЗК}})$:— для $l_{\text{пв}} = 50$ м; - - - для $l_{\text{пв}} = 25$ мFig. 4. Dependences $u(t)_{\text{пер}} = f(z_{\text{БК}}/R_{\text{ЗК}})$:— for $l_{\text{пв}} = 50$ м; - - - for $l_{\text{пв}} = 25$ м

Рассмотрены подстанции 110, 220 кВ с длиной шин $l_{\text{пв}} = 10\text{--}50$ м. Очевидно, что для подстанции с $l_{\text{пв}} > 50$ м расчетные уровни перенапряжений будут выше указанных на рис. 3, 4.

По физической сущности перенапряжения $u(t)_{\text{пер}}$ происходят в системе «провод – земля», поэтому по классификации помех $u(t)_{\text{пер}}$ можно отнести к помехам общего типа, напряжение которых приложено между заземленным на конструкции УРЗА проводником рассматриваемой вторичной цепи и удаленной землей, под которой понимается земля с нулевым потенциалом, расположенная вне зоны растекания импульсного тока с ЗУ ОПУ. По общей помехе можно определять помехи дифференциального типа «провод – провод» («жила – жила»), напряжение которых приложено между любыми двумя проводниками рассматриваемой вторичной цепи.

Если перенапряжения $u(t)_{\text{пер}}$ по (26), (27) и (29), (30) считать помехами, то эти помехи представляют опасность в части возможного электрического повреждения УРЗА, т. е. являются опасными помехами. Помехи дифференциального типа «жила – жила» связаны с функционированием УРЗА и считаются мешающими помехами. Проблема мешающего влияния наиболее просто решается путем применения экранированных кабелей вторичных цепей.

По [10] выбор кабелей вторичных цепей производится отдельно для трансформаторов напряжения и трансформаторов тока:

- измерительные цепи от трансформаторов напряжения до панелей технических средств (ТС) должны выполняться кабелями с металлической оболочкой или с металлической оболочкой и броней;
- измерительные цепи от трансформаторов тока до панелей ТС следует выполнять экранированными контрольными кабелями, кабелями с оболочкой или кабелями с оболочкой и броней.

Для таких измерительных цепей устанавливаются нормируемые расчетные значения напряжения помех в точках подключения ТС:

- помехи, обусловленные прорывом грозовых волн с ВЛ на высоковольтные шины электроустановки: $u(t)_{\text{доп}} = 1,5 \text{ кВ}$;
- помехи, обусловленные коммутацией высоковольтного оборудования: $u(t)_{\text{доп}} = 1,5 \text{ кВ}$.

Приведенные нормы для грозовых и коммутационных помех $u(t)_{\text{доп}} = 1,5 \text{ кВ}$ разработаны ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект» совместно с его белорусским отделением еще до распада СССР. Опыт эксплуатации подстанций, выполненных с учетом указанных норм на средства УРЗА, до настоящего времени вполне положительный.

При сопоставлении расчетных величин перенапряжений во вторичных цепях по рис. 3 с нормированными величинами $u(t)_{\text{доп}} = 1,5 \text{ кВ}$ очевидно, что режим несрабатывания ОПН и разрядников представляет большую опасность в отношении возможного электрического повреждения элементов УРЗА. Для подстанций 110, 220 кВ снизить указанную опасность можно путем использования локального заземления вторичных цепей через сопротивление R_3 (рис. 4).

ВЫВОД

Разработан метод расчета импульсного магнитного влияния первичных цепей на вторичные цепи подстанций при распространении по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения для случая несрабатывания ограничителей перенапряжений и разрядников, который на стадии проектирования и эксплуатации подстанций может использоваться как тестовый метод для оценки электрической стойкости устройств релейной защиты и автоматики от грозовых и коммутационных перенапряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко, М. В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М. В. Костенко, Л. С. Перельман, Ю. П. Шкарин. М.: Энергия, 1973. 272 с.
2. Глушко, В. И. К решению классической задачи магнитного влияния воздушных линий электропередачи на протяженные проводящие коммуникации / В. И. Глушко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 2. С. 5–10.
3. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. М.: Наука, 1971. 1108 с.
4. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных линиях электропередачи высокого напряжения / М. В. Костенко и [и др.]. Л.: Наука, 1988. 302 с.
5. Глушко, В. И. Расчет импульсных помех во вторичных цепях подстанций высокого напряжения / В. И. Глушко // Электричество. 1989. № 4. С. 23–32.
6. Справочник по специальным функциям / под ред. А. Абрамовица [и др.]. М.: Наука, 1979. 832 с.
7. Герасимович, Д. А. Математическое моделирование импульсных характеристик вертикальных стержневых заземлителей / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 1. С. 9–16.
8. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники: в 2 т. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, 1981. Т. 2. 416 с.
9. Круг, К. А. Основы электротехники. Т. 2 / К. А. Круг. М.; Л.: Гос. энерг. изд-во, 1932. 949 с.
10. Методические указания по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций напряжением 35–750 кВ от электромагнитных влияний и грозовых воздействий: СТП 09110.47.104–08. Введ. 17.09.2010. Минск: ГПО «Белэнерго», 2010. 64 с.

Поступила 04.07.2016 Подписана в печать 06.09.2016 Опубликовано онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Kostenko M. V., Perelman L. S., Shkarin Yu. P. (1973) *Wave Processes and Electrical Interference in Multi-Wire Power Lines*. Moscow, Energiya Publ. 272 (in Russian).
2. Glushko V. (2013) To Solution of Classical Problem Pertaining to Magnetic Interference of Overhead Power Transmission Line on Extended Conducting Communications. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 5–10 (in Russian).
3. Gradshtein I. S., Ryzhik I. M. (1971) *Tables of Integrals, Sums, Series, and Products*. Moscow, Nauka Publ. 1108 (in Russian).
4. Kostenko M. V., Kadomskaya K. P., Levinstein M. L., Efremov I. A., Tikhodeev N. N. (1988) *Overvoltage and Overvoltage Protection to Overhead and Cable Transmission Lines with High Voltage*. Leningrad, Nauka Publ. 302 (in Russian).
5. Glushko V. I. (1989) Calculation of Impulse Noise in the Secondary Circuits of High-Voltage Substations. *Elektrichestvo [Electricity]*, (4), 23–32 (in Russian).
6. Abramovits M., Stigant I. (1964) *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*. Washington, National Bureau of Standards. 1060.
7. Gerasimovich D., Dziaruhina A. (2012) Mathematical Simulation of Transient Parameters of Vertical Grounding Electrodes. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 9–16 (in Russian).
8. Neyman L. R., Demirchyan K. S. (1981) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering*. Vol. 2. 3rd ed. Leningrad, Energoizdat Publ. 416 (in Russian).
9. Krug K. A. (1932) *Foundations of Electrical Engineering*. Vol. 2. Moscow-Leningrad, State Energy Publishing House. 949 (in Russian).
10. Enterprise Standard 09110.47.104–08 (2010). Guidelines for the Protection of Secondary Circuits of Power Stations and Substations of 35–750 kW from Electromagnetic Effects and Lightning Effects. Minsk, State Production Association “Belenergo”. 64 (in Russian).

Received: 4 July 2016

Accepted: 6 September 2016

Published online: 30 May 2017