

УДК 621.316.925

## Расчет импульсных волновых процессов в протяженных заземлителях и трубопроводах подземной прокладки

В.К. Слышалов<sup>1</sup>, Киселева Ю.А.<sup>1</sup>, Ю.В. Кандалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
Иваново, Российская Федерация

<sup>2</sup> Филиал ОАО «СО ЕЭС» Ивановское РДУ, Иваново, Российская Федерация  
E-mail: kandalov@ivrdu.so-ups.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Импульсные токи в заземлителях и трубопроводах, возникающие при разрядах атмосферного и статического электричества, в переходных режимах короткого замыкания в заземляемой цепи, при испытаниях оборудования с использованием магнитокумулятивных генераторов и в ряде других ситуаций, создают мощные электромагнитные и тепловые поля, представляющие значительный интерес в связи с проблемами электро- и теплофизики, грозозащиты, электромагнитной совместимости. На использовании слаботоковых импульсов базируются методы локационного определения мест повреждения в воздушных и кабельных электрических сетях.

**Материалы и методы:** Рассмотрен метод расчета распределений волн тока и напряжения в протяженных заземлителях и трубопроводах, проложенных в слабопроводящей среде, при воздействии импульсных напряжений и токов. Метод базируется на использовании частотных характеристик, получаемых при расчете электромагнитных полей заземлителей в режиме протекания синусоидального тока. Предлагается метод расчета импульсных параметров и волновых процессов в протяженных объектах.

**Результаты:** Предложена математическая модель волнового процесса в заземлителях и трубопроводах при воздействии импульсов тока или напряжения, позволяющая выполнить полноценный расчет как входных параметров и характеристик этих объектов в импульсном режиме, так и распределений тока и напряжения по длине, не прибегая к использованию каких-либо существенных упрощающих допущений.

**Выводы:** В применении к средам и объектам с нелинейными характеристиками (лидерный канал молнии при распространении волны главного разряда, коронирующий трос или провод ВЛЭП в импульсном режиме, заземлитель при искровом пробое грунта) предложенная математическая модель волнового процесса в заземлителях и трубопроводах при воздействии импульсов тока или напряжения может быть использована для получения достаточно надежных оценочных результатов, допускающих дальнейшее уточнение в ходе последующих итераций.

**Ключевые слова:** заземлитель, трубопровод, проводящая среда, импульсный ток, частотная характеристика, волновой процесс.

## Calculation of impact acceleration wave processes in extended earth lead and subsurface pipe lines

V.K. Slyshalov<sup>1</sup>, Yu.A. Kiseleva<sup>1</sup>, Yu.V. Kandalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC «UES» Ivanovo RDU, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: kandalov@ivrdu.so-ups.ru

### Abstract

**Background:** Pulse current in earth leads and pipe lines appearing on discharge of atmospheric and frictional electricity, in transit mode of short-circuit in groundable circuit, while testing equipment with the use of magnetic cumulation generator and in a number of other situations create powerful electromagnetic and thermal fields which are of great interest in connection with problems of electrophysics and thermophysics, lightning protector of electromagnetic compatibility. Methods of position fixing diagnostics of points of fault in aerial and cable power network are based on the usage of weak current impulses.

**Materials and Methods:** The method of current and voltage allocation frequencies calculation in extended earth leads and pipe lines run in low conducting medium exposed to impulsive voltage and current is discussed. This method is based on the usage of frequency response characteristics obtained when calculating electromagnetic fields of earth leads in mode of simple harmonic current flow. A method of impulse parameters and wave processes calculation in extended objects is offered.

**Results:** Mathematical model of wave process in earth leads and pipe lines exposed to current impulse and voltage allowing to perform adequate calculation of input parameters and characteristics of these objects in impulse mode as well as current and voltage distribution longways is offered without falling back on the usage of some other essential simplifying assumptions.

**Conclusions:** In reference to media and objects with non-linear characteristics (leader lightning channel during wave propagation of general discharge, coronated wire or wire of power transmission lines in pulse conditions, earth lead, during sparkover of ground) the suggested mathematical model of wave process in earth leads and pipe lines exposed to current impulse and voltage can be used to obtain quite reliable evaluation results supposing further clarification in the course of the following iterations.

**Key words:** earth lead, pipe line, conducting medium, pulse current, frequency response curve, wave process.

Импульсные токи в заземлителях и трубопроводах протекают при разрядах атмосферного и статического электричества, в переходных режимах короткого замыкания в заземляемой цепи, при испытаниях оборудования с использованием магнитокумулятивных генераторов [1] и в ряде других ситуаций, создавая мощные электромагнитные (ЭМ) и тепловые поля, представляющие, как и интегральные параметры, значительный интерес в связи с проблемами электро- и теплофизики, грозозащиты, электромагнитной совместимости. На использовании слаботочных импульсов базируются методы локационного определения мест повреждения в воздушных и кабельных электрических сетях [2].

Ниже предлагается метод расчета импульсных параметров и волновых процессов в протяженных объектах, длина которых в импульсном режиме оценивается по известному условию  $\ell \geq 0,7 \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}}$  [3], где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление грунта;  $\omega$  – расчетная угловая частота, определяемая по длительности фронта импульса  $\tau_{\text{ф}}$  как  $\omega = \frac{2\pi}{4\tau_{\text{ф}}}$ .

Нормированные значения  $\tau_{\text{ф}}$ , например, для тока молнии находятся в интервале 0,25–10 мкс (стандарт МЭК 61312-1 [4]), что дает ориентировочные величины для  $\omega - 10^5 - 10^7$  Гц. И, соответственно, при  $f \sim 10^6 \text{ с}^{-1}$ ,  $\rho = 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  имеем  $\ell \geq 3,5 \text{ м}$ , при  $\rho = 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$   $\ell \geq 16 \text{ м}$ . Для указанных значений длины объекта и аналогичных им величин для других удельных сопротивлений грунта электромагнитный процесс взаимодействия импульса со средой следует рассматривать как волновой. На практике в эту категорию попадает большинство естественных объектов, рекомендуемых к использованию ПУЭ (трубопроводы, арматура зданий, оболочки кабелей, рельсовые пути и т.д.), и ряд искусственных заземлителей, таких как балансиры ЛЭП и скважинные заземлители (далее все перечисленные объекты будем обозначать единым термином заземлители).

Краткий обзор концептуальных подходов и соответствующих им методов математического моделирования процессов в заземлителях выполнен в работе [3]. Там же предложен метод оценочных расчетов параметров заземлителей, базирующийся на аппроксимации заземлителя длинной линией, комплексные сопротивление и проводимость утечки которой вычисляются через волновое сопротивление и постоянную распространения плоской электромагнитной волны в проводящей среде, а конструктивные характеристики заземлителя учитываются путем введения в расчетные соотношения специального коэффициента. Метод [3] позволяет выполнить при некоторых дополнительных допущениях инженерный

расчет интегральных параметров вертикального и горизонтального уединенных заземлителей, проложенных в однородной среде, т.е. имеет сравнительно узкую область применения. Излагаемый ниже метод позволяет решить при достаточно строгой постановке задачу об электромагнитном поле и параметрах заземлителя, проложенного параллельно границе раздела реальных сред при синусоидальном или импульсном токе в нем.

**Постановка задачи.** Задача о распространении волн тока и напряжения вдоль заземлителя рассматривается для прямого объекта кругового или трубчатого сечения, проложенного параллельно плоской границе раздела немагнитных сред с различными проводящими и диэлектрическими свойствами (рис. 1).

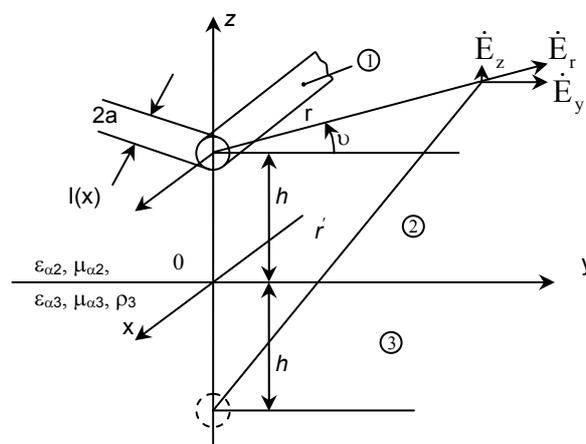


Рис. 1. Координатная система и характеристики заземлителя и сред

Согласно сложившейся терминологии [3], это горизонтальный заземлитель. При  $h \rightarrow \infty$  получаем задачу для вертикального заземлителя в однородной среде, при  $\varepsilon_{a2} = \varepsilon_0$ ,  $\rho_2 \rightarrow \infty$  приходим к задаче о волновом поле провода ВЛЭП вблизи поверхности земли, известные решения которой при синусоидальном токе в проводе [5, 6] должны получаться при указанном предельном переходе из решений общей задачи для заземлителя в этом режиме. Полагая, что в сечении  $x=0$  (вход заземлителя) задан закон изменения тока во времени  $i(0, t) = i(t)$ , и считая длину заземлителя  $\ell \rightarrow \infty$ , определим законы изменения тока  $i(x, t)$  и напряжения  $u(x, t)$  при  $x > 0$ ,  $t < \infty$ .

**Расчетные модели.** Структурными составляющими метода являются две математические модели, в первой из которых на основе расчета волнового процесса при синусоидальном токе определяются частотные характеристики заземлителя, а во второй при их совместном использовании со спектральной характеристикой импульса выполняется расчет временных и пространственных распределений тока и напряжения.

Методика расчета волнового поля заземлителя при синусоидальном токе подробно

рассмотрена в [7, 8]. Соответствующая задача для трубопровода решена в [9], поэтому ниже ограничимся кратким изложением главных расчетных моментов. В указанных работах на основе уравнений Максвелла определялись комплексные напряженности ЭМ поля в расчетных областях 1, 2 и 3 (рис. 1), причем для прямой волны использовалось допущение  $\frac{\partial}{\partial x} = -\gamma$  [5, 6],  $\gamma = \alpha + j\beta$  – постоянная распространения, единая для всех областей;  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты затухания и фазы. Физическими характеристиками сред являлись проницаемости  $\tilde{\epsilon}_{ai} = \epsilon_{ai} - j \frac{1}{\omega \rho_i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ),  $\mu_{ai} = \mu_0 \mu_i$ ; в качестве характеристики волнового процесса использован параметр  $m_i = \sqrt{\gamma^2 + k_i^2}$ ,  $k_i^2 = \omega^2 \tilde{\epsilon}_{ai} \mu_0$ ; для заземлителя было принято  $m_1^2 \approx k_1^2 \approx -j \frac{\omega \mu_0}{\rho_1}$ .

Ключевым моментом при расчете поля и последующем вычислении комплексов волнового и переходного сопротивлений  $Z_B$ ,  $Z_{\Pi}$  является определение постоянной распространения, осуществляемое для стержневого заземлителя путем численного решения уравнения [8]

$$\left(\frac{m_2}{k_2}\right)^2 \left[ \ln \frac{2h}{a} + 2(P_1 + jQ_1) \right] = 2 \left[ \frac{1}{k_2^2} (P + jQ) + (P_1 + jQ_1) \right] + \frac{\mu_1 J_0(k_1 a)}{a k_1 J_1(k_1 a)}, \quad (1)$$

где

$$P + jQ = \int_0^{\infty} \left( \sqrt{v^2 - m_2^2} - \sqrt{v^2 - \gamma^2} \right) e^{-2h\sqrt{v^2 - m_2^2}} dv;$$

$$P + jQ_1 = \int_0^{\infty} \left( \frac{1}{\sqrt{v^2 - \gamma^2}} \right) e^{-2h\sqrt{v^2 - m_2^2}} dv;$$

$J_0(k_1 a)$ ,  $J_1(k_1 a)$  – функции Бесселя первого рода.

Инженерный вариант (1) для случая прокладки заземлителя вблизи границы раздела грунт-воздух ( $\rho_3 \rightarrow \infty$ ) имеет вид

$$\left(\frac{\sqrt{2ha\gamma'm_2}}{2j}\right)^2 \ln\left(\frac{\sqrt{2ha\gamma'm_2}}{2j}\right)^2 = \frac{\gamma'}{2} k_1 h \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{J_0(k_1 a)}{J_1(k_1 a)}, \quad \gamma' = 1,781, \quad (2)$$

и дает значения  $m_2$  и, соответственно,  $\gamma = \sqrt{m_2^2 - k_2^2}$ , отличающиеся от результатов расчета по (1) не более чем на 5 %.

Уравнение для уединенного вертикального заземлителя получается из (1) при  $h \rightarrow \infty$  и приведено в [7, 8]. Расчет поля заземлителя трубчатого сечения рассмотрен в [7].

Аналогичная методика, базирующаяся на решении уравнения (2) была использована и при исследовании электромагнитного поля трубопровода подземной прокладки [9].

Расчет частотных характеристик составляющих волнового сопротивления для импульсов, у которых главная часть спектра ограничена частотами порядка  $10^1 - 10^8$  1/с, целесообразно выполнять, согласно [8], по формуле

$$Z_B(j\omega) = r_B(\omega) + jX_B(\omega) = \frac{\gamma \rho_2}{\pi} \ln \frac{1,123j}{\gamma \sqrt{2ha}}, \quad \omega \epsilon_{a2} \rho_{a2} \ll 1, \quad (3)$$

и формулам (18)–(20) из [9].

Зависимости  $r_B(\omega)$ ,  $X_B(\omega)$ ,  $\alpha(\omega)$ ,  $\beta(\omega)$  совместно со спектральной характеристикой импульса на входе заземлителя образуют блок базовой исходной информации в расчетной модели импульсного режима.

Методику расчета распределений  $i(x, t)$ ,  $u(x, t)$  в этом режиме изложим, рассматривая конкретную задачу о воздействии на заземлитель тока молнии. При расчете воспользуемся биэкспоненциальной формой представления импульса тока на входе заземлителя:

$$i(0, t) = i_m (e^{-\eta t} - e^{-\xi t}), \quad t \geq 0; \quad i(0, t) = 0, \quad t \leq 0, \quad (4)$$

которому соответствует следующая спектральная характеристика единичного тока:

$$I_0(j\omega) = \int_0^{+\infty} (e^{-\eta t} - e^{-\xi t}) e^{-j\omega t} dt = a(\omega) + j \cdot b(\omega),$$

где

$$a(\omega) = \frac{\eta}{\eta^2 + \omega^2} - \frac{\xi}{\xi^2 + \omega^2}; \quad (5)$$

$$b(\omega) = \frac{\omega}{\xi^2 + \omega^2} - \frac{\omega}{\eta^2 + \omega^2}.$$

Поскольку наряду с традиционной биэкспоненциальной формой представления тока молнии (4) в ряде задач является необходимым использование формы представления  $i(0, t)$  с нулевой начальной производной [20]

$$i(0, t) = i_m x(t)y(t) = i_m \frac{(t\xi)^n}{1 + (t\xi)^n} e^{-\eta t}, \quad (6)$$

в расчетах был рассмотрен вариант формул (5), соответствующих току (6):

$$I_0(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(t\xi)^n}{1 + (t\xi)^n} e^{-\eta t} e^{-j\omega t} dt = c(\omega) + j \cdot d(\omega),$$

где

$$c(\omega) = 2 \int_0^{\infty} \frac{(t\xi)^n}{(1 + t\xi)^n} e^{-\eta t} \cos \omega t dt;$$

$$d(\omega) = -2j \int_0^{\infty} \frac{(t\xi)^n}{(1 + t\xi)^n} e^{-\eta t} \sin \omega t dt.$$

Для оценки расчетных границ импульса в частотной области были использованы числовые данные исследования [10] для тока 50%-ной процентной вероятности. Имеем  $i_m = 43,77$  кА,  $\eta = 0,0214$  1/мкс,  $\xi = 0,565$  1/мкс. Ограничива-

ьясь интервалом частот  $|\omega| \leq |\omega_\infty| = 10^7$  1/с при выполнении проверочной процедуры численного восстановления импульса

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_\infty}^{+\omega_\infty} (a(\omega) + j \cdot b(\omega)) e^{j\omega t} d\omega \cong e^{-\eta t} - e^{-\xi t},$$

получаем исходную кривую тока на входе с погрешностью, не превышающей десятых долей процента. Поэтому все выполняемые ниже численные расчеты ограничиваются в частотной области указанным значением  $\omega \leq 10^7$  1/с.

В качестве конкретных целей расчета принимаем кривую напряжения на входе  $u(0, t)$  и зависимости  $i(x_C, t)$ , где  $x_C$  – заданные значения расстояния от входа заземлителя до сечения, в котором исследуются изменения тока во времени.

**Расчет напряжения на входе.** При единичном токе прямой волны искомое напряжение дает интеграл Фурье:

$$u_0(0, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} i_0(\omega) Z_B(\omega) e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (a(\omega) + j \cdot b(\omega))(r_B(\omega) + j \cdot x_B(\omega)) e^{j\omega t} d\omega, \quad (7)$$

при вычислении которого частотные характеристики  $r_B(\omega)$ ,  $x_B(\omega)$  аппроксимировались функциями

$$r_B(\omega) = r_{B0} + k_r \sqrt{\omega}, \quad x_B(\omega) = k_x \sqrt{\omega}. \quad (8)$$

Расчеты по (7) выполнялись численно; значения постоянных  $r_{B0}$ ,  $k_r$ ,  $k_x$  в формулах (8) взяты из [9] для трубопровода  $\varnothing 273$  мм,  $\Delta = 6$  мм, заглубление  $h = 1,5$  м.

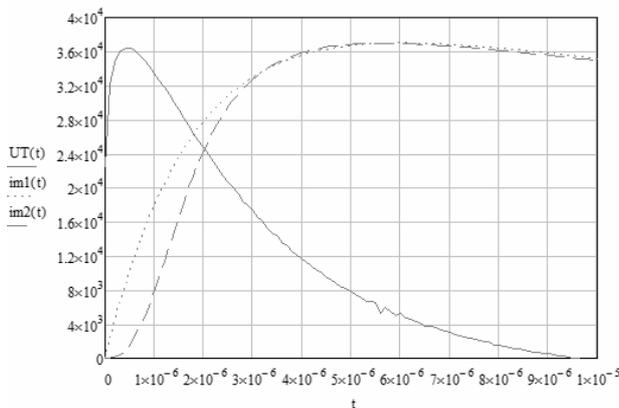


Рис. 2. Импульсы напряжения и тока на входе трубопровода

Численный расчет, как было установлено, допускает непосредственное использование информации базового блока для  $Z_B(j\omega)$ ,  $Z_B$  – волновое сопротивление, что исключает появление погрешностей, обусловленных аппроксимацией характеристик  $r_B(\omega)$ ,  $x_B(\omega)$ . Результаты расчета  $u_0(0, t)$  для импульса (4) при указанных выше значениях его параметров и аппроксимирующих выражениях (8) приведены на рис. 2 совместно с результатами расчета

для трубопровода. Значения напряжения на входе, определяемые по кривой  $u(0, t)$ , соответствуют данным других исследований, обобщенных в [3], и хорошо согласуются с экспериментальными зависимостями [13]<sup>1</sup>.

**Расчет распределений тока и напряжения.** Применение интеграла Фурье для получения временной зависимости  $i_0(x_C, t)$  в заданном сечении  $x = x_C$  имеет в решаемой задаче ту существенную особенность, что гармоники, составляющие спектр импульса на входе заземлителя, приходят в точку наблюдения с разным запаздыванием  $t_x = \frac{\beta(\omega)}{\omega} x_C$ , причем

начальный момент времени  $t_H$  для кривой тока определяется, в силу дисперсионных особенностей грунта, предельной частотой в спектре импульса  $\omega_\infty$  и вычисляется по формуле

$$t_H = \frac{\beta(\omega_\infty)}{\omega_\infty} x_C = \frac{x_C}{V(\omega_\infty)}. \quad (9)$$

Необходимо заметить, что предельная расчетная частота  $\omega_\infty$ , выбираемая, как описано выше, по условию восстановления импульса с заданной точностью, не должна превышать значения  $\omega_{max} \sim 10^8$  1/с [14], при котором еще допустимо считать параметры среды  $\epsilon_a$ ,  $\mu_a$ ,  $\rho$  не зависящими от  $\omega$ .

Для последующих моментов времени  $t > t_H$  наименьшая частота гармоник, пришедших в точку наблюдения,  $\omega_t \leq \omega_\infty$  находится как решение уравнения  $t = \frac{\beta(\omega_t)}{\omega_t} x_C$  и является

нижней границей частотного интервала гармоник, формирующих в сечении  $x = x_C$  импульс тока в момент времени  $t > t_H$ .

Расчетную формулу для мгновенного тока  $i_0(x_C, t)$  получаем, сводя исходный интеграл

$$i_0(x_C, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} i_0(\omega) e^{-\gamma(\omega)x_C} \cdot e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} (a(\omega) + j \cdot b(\omega)) e^{-\gamma(\omega)x_C} e^{j\omega t} d\omega$$

к алгебраической сумме косинус- и синус интегралов Фурье, вычисляемых в пределах  $\omega_t$ ,  $\omega_\infty$ :

$$i_0(x_C, t) = \frac{1}{\pi} \left\{ \int_{\omega_t}^{\omega_\infty} e^{-\alpha(\omega)x_C} a(\omega) \cos \omega \left( t - \frac{\beta(\omega)}{\omega} x_C \right) d\omega - \int_{\omega_t}^{\omega_\infty} e^{-\alpha(\omega)x_C} b(\omega) \sin \omega \left( t - \frac{\beta(\omega)}{\omega} x_C \right) d\omega \right\}, \quad (10)$$

<sup>1</sup> Приведенные материалы являются обобщением экспериментов В.З. Анненкова по исследованию импульсных режимов протяженных заземлителей  $l \sim 200$  м в слабопроводящем грунте.

где  $t \geq \frac{\beta(\omega_1)}{\omega_1} x_C$ .

При выполнении расчетов по (10) для импульса (4) зависимости  $\alpha(\omega)$ ,  $\beta(\omega)$  были аппроксимированы функциями

$$\alpha(\omega) = \alpha(0) + k_\alpha \sqrt{\omega} \approx k_\alpha \sqrt{\omega}, \quad \beta(\omega) = k_\beta \sqrt{\omega}.$$

Соответственно, начальное значение времени  $t_n$  и частота  $\omega_t$  вычислялись по формулам

$$t_n = \frac{k_\beta x_C}{\sqrt{\omega_\infty}}, \quad \omega_t = \left( \frac{k_\beta x_C}{t} \right)^2.$$

Результаты расчетов для вертикального железного заземлителя ( $a = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м при  $\rho_2 = 10^2$  Ом·м и  $\rho_2 = 10^3$  Ом·м,  $i_m = 43,77$  кА) приведены на рис. 3.

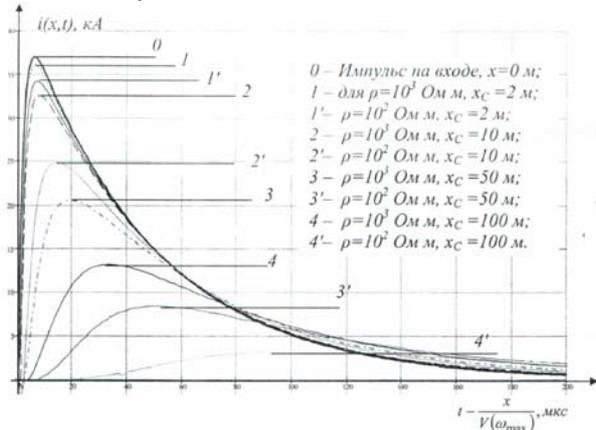


Рис. 3. Распределение тока по вертикальному заземлителю

По этим же кривым для фиксированных моментов времени могут быть получены распределения тока по длине заземлителя, позволяющие проследить эволюцию формы импульса по мере его распространения.

Расчет волнового процесса при воздействии на заземлитель импульсов напряжения заданной формы выполняется аналогично, с тем лишь отличием, что в выражении (7) используются спектральная характеристика напряжения на входе  $U(j\omega)$  и волновая проводимость  $Y_B(j\omega)$ , вычисляемая через волновое сопротивление

$$Y_B(j\omega) = g_B(\omega) - jb_B(\omega) = \{r_B(\omega) - jx_B(\omega)\} \cdot |Z_B(j\omega)|^{-2}.$$

Расчет зависимостей  $u(x_C, t)$  проводится по (10).

Возможности построения и реализации этой модели проиллюстрированы в диссертации [19] на примере прохождения по проводам и тросам ВЛЭП прямоугольных импульсов напряжения.

### Заключение

Предложенная математическая модель волнового процесса в заземлителях и трубо-

проводах при воздействии импульсов тока или напряжения позволяет выполнить полноценный расчет как входных параметров и характеристик этих объектов в импульсном режиме, так и распределений тока и напряжения по длине, не прибегая к использованию каких-либо существенных упрощающих допущений. Точность результатов, получаемых при моделировании, определяют два основных фактора: расчет частотных характеристик и процедура расчетного представления и последующего использования спектральной характеристики импульса на входе.

Частотные характеристики постоянной распространения и волнового сопротивления объектов определяются на основе решения уравнений Максвелла и, в принципе, могут быть рассчитаны с любой заданной точностью, если в расчете использовались точные же значения параметров и среды при условиях однородности и линейности последней. Эти условия, выполняющиеся в воздухе, воде и некоторых грунтах, могут грубо нарушаться в ряде заземляющих сред (например, перегнойные и глинистые грунты [15]), поэтому задача определения частотных характеристик, а именно зависимостей  $Z_B(j\omega)$ ,  $\gamma(j\omega)$ , должна рассматриваться в общем случае как самостоятельная и решаться с использованием соответствующей нелинейной модели грунта [16] или экспериментально.

Расчет спектральной характеристики импульса на входе, являясь по существу формальной процедурой перехода из временной в частотную область, позволяет, тем не менее, оценить по условию  $\omega_\infty \leq \omega_{max} = 10^8$  1/с степень соответствия модели параметрам импульса, задать расчетную границу спектра  $\omega_\infty$ , установить приемлемость допущения  $\omega_\infty \varepsilon_{ar} \ll 1$ . Дальнейший расчет импульса напряжения на входе по импульсу тока (или тока по напряжению) и расчет волн тока и напряжения, осуществляемые с использованием спектральной характеристики импульса и частотной объекта, являются наиболее трудоемкими вычислительными процедурами, математически реализуемыми как обратные косинус- и синуспреобразования Фурье. Выполненные расчеты показали вычислительную эффективность этой формы решения при исследовании эволюции импульсов тока и напряжения, распространяющихся по протяженным объектам, таким как фазные провода и защитные тросы воздушных линий электропередачи, нефте- и газопроводы.

В применении к средам и объектам с нелинейными характеристиками (лидерный канал молнии при распространении волны главного разряда, коронирующий трос или провод ВЛЭП в импульсном режиме, заземлитель при искровом пробое грунта) предложенная модель может быть использована для получения

достаточно надежных оценочных результатов, допускающих дальнейшее уточнение в ходе последующих итераций.

#### Список литературы

1. **Формирование** мощных импульсов тока на высокоомной нагрузке для моделирования молнии / Ю.В. Вилков, В.А. Золотов, А.С. Кравченко и др. // *Электричество*. – 2004. – № 8. – С. 2–6.
2. **Куликов А.Л.** Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП / под ред. М.Ш. Мисриханова. – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии государственной службы, 2006. – 315 с.
3. **Базуткин В.В., Борисов Р.К., Горшков А.В., Колечицкий Е.С.** Оценка параметров заземлителей при воздействии импульсных токов // *Электричество*. – 2002. – № 6. – С. 6–12.
4. **Электромагнитная совместимость** в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков, Б.К. Максимов, Р.К. Борисов и др. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
5. **Гринберг Г.А., Бонштедт Б.Э.** Основы точной теории волнового поля линии передачи // *ЖТФ*. – 1954. – Т. XXIV. – Вып.1. – С. 67–95.
6. **Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П.** Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
7. **Слышалов В.К., Голов П.В., Киселева Ю.А., Тимофеева И.В.** Полевая и цепная модели волновых процессов в протяженном заземлителе // *Вестник ИГЭУ*. – 2006. – Вып. 2. – С. 50–58.
8. **Слышалов В.К., Киселева Ю.А.** Электромагнитное поле протяженного заземлителя, проложенного параллельно границе раздела воздух-грунт // *Вестник ИГЭУ*. – 2005. – Вып. 1. – С. 62–69.
9. **Слышалов В.К., Кандалов Ю.В.** Электромагнитное поле и параметры подземных трубопроводов с антикоррозионным покрытием // *Вестник ИГЭУ*. – 2011. – Вып. 5. – С. 19–24.
10. **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. – 187 с.
11. **Анненков В.З.** Анализ распределения импульсов тока по протяженному заземлителю // *Электричество*. – 1982. – № 1. – С. 26–30.
12. **Карякин Р.Н., Добрынин В.К.** Входное сопротивление протяженного вертикального заземлителя в многослойной земле // *Электричество*. – 1975. – № 8.
13. **Бургсдорф В.В., Якобс А.И.** Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
14. **Стрэттон Дж.А.** Теория электромагнетизма. – М.; Л.: Гостехиздат, 1948. – 539 с.
15. **Анненков В.З.** Протяженные заземлители молнезащиты в грунтах с нелинейными вольт-амперными характеристиками // *Электричество*. – 2001. – № 7 – С. 22–29.
16. **Карякин Р.Н.** Входное сопротивление в протяженных вертикального заземлителя в многослойной земле // *Электричество*. – 1975. – № 8.
17. **Бейтмен Г., Эрдейн А.** Таблицы интегральных преобразований. Т. 1 / пер. с англ. Н.Я. Виленкина. – М.: Наука, 1969. – 343 с.
18. **Градштейн И.С., Рыжик И.М.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Изд. 4-е. – М.: Физматгиз, 1963. – 1100 с.
19. **Киселева Ю.А.** Совершенствование методов расчета протяженных заземлителей электроэнергетических объектов при синусоидальном и импульсном токах: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02; 05.14.12. – Иваново, 2006. – 162 с.

**20. Слышалов В.К., Киселева Ю.А., Кандалов Ю.В.** Методика оценки параметров наведенных токов, протекающих в заземлителях при грозовых разрядах // *Электричество*. – 2011. – № 8. – С. 29–33.

#### References

1. Vilkov, Yu.V., Zolotov, V.A., Kravchenko, A.S., Selemir, V.D., Yuryshev, A.S. *Elektrichestvo*, 2004, no. 8, pp. 2–6.
2. Kulikov, A.L. *Tsifrovoe distantsionnoe opredelenie povrezhdeniy LEP* [Digital teledetection of power transmission lines faults]. Nizhny Novgorod, Izdatel'stvo Volgo-Vyatskoy akademii gosudarstvennoy sluzhby, 2006. 315 p.
3. Bazutkin, V.V., Borisov, R.K., Gorshkov, A.V., Kolechitskiy, E.S. *Elektrichestvo*, 2002, no. 6, pp. 6–12.
4. D'yakov, A.F., Maksimov, B.K., Borisov, R.K. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike i elektrotekhnike* [Electromagnetic compatibility in electric power industry and electrical technology]. Moscow, Energoatomizdat, 2003. 768 p.
5. Grinberg, G.A., Bonshtedt, B.E. *Osnovy tochnoy teorii volnovogo polya linii peredachi* [Bases of exact theory of wave field of power transmission lines], *ZhTF*, 1954, vol. XXIV, issue 1, pp. 67–95.
6. Kostenko, M.V., Perel'man, L.S., Shkarin, Yu.P. *Volnovye protsessy i elektricheskie pomekhi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya* [Wave processes and electrical noise in multiwire high pressure transmission line]. Moscow, Energiya, 1973. 272 p.
7. Slyshalov, V.K., Golov, P.V., Kiseleva, Yu.A., Timofeeva, I.V. *Vestnik IGEU*, 2006, issue 2, pp. 50–58.
8. Slyshalov, V.K., Kiseleva, Yu.A. *Vestnik IGEU*, 2005, issue 1, pp. 62–69.
9. Slyshalov, V.K., Kandalov, Yu.V. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 19–24.
10. Slyshalov, A.V. *Razrabotka metodov rascheta mekhanicheskikh sil i momentov, deystvuyushchikh na faznye provoda i zashchitnye trosy LEP v pole lidera molnii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Calculation methods development of mechanical forces and moments influencing phase conductors and guard wires of power transmission lines in lighting leader field]. Ivanovo, 2001. 187 p.
11. Annenkov, V.Z. *Elektrichestvo*, 1982, no. 1, pp. 26–30.
12. Karyakin, R.N., Dobrynin, V.K. *Vkhodnoe soprotivlenie protyazhennogo vertikal'nogo zazemlityela v mnogosloynnoy zemle* [Input impedance of extended vertical earth lead in multilayer ground]. *Elektrichestvo*, 1975, no. 8.
13. Burgsdorf, V.V., Yakobs, A.I. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 400 p.
14. Stretton, Dzh.A. *Teoriya elektromagnitizma* [Theory of electromagnetics]. Moscow–Leningrad, Gostekhizdat, 1948. 539 p.
15. Annenkov, V.Z. *Elektrichestvo*, 2001, no. 7, pp. 22–29.
16. Karyakin, R.N. *Vkhodnoe soprotivlenie v protyazhennykh vertikal'nogo zazemlityela v mnogosloynnoy zemle* [Input impedance of extended vertical earth lead in multilayer ground]. *Elektrichestvo*, 1975, no. 8.
17. Beytmen, G., Erdeyn, A. *Tablitsy integral'nykh preobrazovaniy* [Integral transformations tables]. Moscow, Nauka, 1969, vol. 1. 343 p.
18. Gradshteyn, I.S., Ryzhik, I.M. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy* [Tables of integrals, sums, series and intersections]. Moscow, Fizmatgiz, 1963. 1100 p.
19. Kiseleva, Yu.A. *Sovershenstvovanie metodov rascheta protyazhennykh zazemlityelov elektroenergeticheskikh ob'ektov pri sinusoidal'nom i impul'snom tokakh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Calculation methods refining of extended earth leads of electric power objects under harmonic and impulse current]. Ivanovo, 2006. 162 p.
20. Slyshalov, V.K., Kiseleva, Yu.A., Kandalov, Yu.V. *Elektrichestvo*, 2011, no. 8, pp. 29–33.

*Слышалов Владимир Константинович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры электрических систем,  
телефон (4932) 38-01-26.

*Кандалов Юрий Владимирович,*  
Филиал ОАО «СО ЕЭС» Ивановское РДУ,  
кандидат технических наук, начальник отдела сопровождения рынка,  
телефоны: (4932) 34-99-25, 35-30-73,  
e-mail: kandalov@ivrdu.so-ups.ru