

DOI: 10.18721/JEST.26407

УДК 621.316.93

*С.Л. Шишигин, Д.С. Шишигин, И.Н. Смирнов*Вологодский государственный университет,
Вологда, Россия**РАСЧЕТ ГРОВОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ
В ЦЕПНЫХ СХЕМАХ С УЧЕТОМ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТА**

Удар молнии вызывает в воздушной линии волны перенапряжений, распространение которых представляет опасность для электрооборудования электрических подстанций. Для моделирования волновых процессов обычно используется теория длинных линий, однако для адекватного учета импульсной короны и сопротивления земли приходится дробить линию на элементы так, что альтернативный подход с использованием многозвенных цепных схем становится конкурентоспособным. Импульсная корона имеет нелинейную характеристику, поэтому расчеты волновых процессов производятся во временной области. Проблема в том, что сопротивление земли задано в частотной области (по формуле Карсона), поэтому сейчас его приходится моделировать сложными эквивалентными схемами. В работе получена дискретная во времени схема частотно-зависимого сопротивления земли, которая упрощает решение. Согласно рекомендациям СИ-ГРЭ расчеты заземлителей при импульсных воздействиях проводятся в модели грунта с частотно-зависимыми параметрами. Эта рекомендация применена к сопротивлению земли, что позволило обнаружить эффект уменьшения запаздывания распространения волны в высокоомном грунте, вызванный увеличением электропроводности грунта в первый момент времени прихода волны. Достоверность методики подтверждена сравнением с экспериментальными данными, расчетами частотным методом в модели длинной линии и расчетами в программе EMTP.

Ключевые слова: воздушная линия, грозовые перенапряжения, моделирование, теория заземлителей, импульсная корона, сопротивление земли, удельная проводимость, частотная зависимость.

Ссылка при цитировании:

Шишигин С.Л., Шишигин Д.С., Смирнов И.Н. Расчет грозовых перенапряжений воздушных линий в цепных схемах с учетом частотных свойств грунта // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. Т. 26, № 4. С. 87–99. DOI: 10.18721/JEST.26407

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

S.L. Shishigin, D.S. Shishigin, I.N. Smirnov

Vologda State University, Vologda, Russia

**CALCULATION OF LIGHTNING SURGES IN TRANSMISSION
LINES USING ELECTRIC CIRCUITS CONSIDERING SOIL
FREQUENCY CHARACTERISTICS**

A lightning strike causes voltage surges in a transmission line, the spread of which is dangerous for the electrical equipment of electrical substations. The transmission line theory is usually used to simulate wave processes, but for the adequate consideration of the impulse corona and the earth-return impedance, it is necessary to split the line into elements so that an alternative approach using multi-link electric circuits becomes competitive. The impulse corona has a nonlinear

characteristic, so calculations of wave processes are carried out in the time domain. The problem is that the earth-return impedance is defined in the frequency domain (according to the Carson formula), therefore at the moment it has to be simulated using complex equivalent circuits. This paper presents a time-discrete circuit of frequency-dependent earth-return impedance, which simplifies the solution. According to the recommendations of CIGRE, calculations of grounding systems for impulse effects are carried out in a soil model with frequency-dependent parameters. This recommendation was applied to the earth-return impedance, which allowed us to detect the effect of reducing the delay in wave propagation in high-resistance soil caused by an increase of the soil electrical conductivity at the first moment of the wave arrival. The reliability of the method is confirmed by comparison with experimental data, calculations by the Fourier method in the transmission line model, and calculations in the EMTP program.

Keywords: power line, electric surges, lightning protection, impulse, mathematical models, electric grounding, electric corona, electric impedance, electric conductivity, frequency dependence.

Citation:

S.L. Shishigin, D.S. Shishigin, I.N. Smirnov, Calculation of lightning surges in transmission lines using electric circuits considering soil frequency characteristics, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (04) (2020) 87–99, DOI: 10.18721/JEST.26407

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Удар молнии в провод воздушной линии (ВЛ), опору или грозозащитный трос с перекрытием изоляции создает волну перенапряжения, распространение которой представляет опасность для электрооборудования электрических подстанций (ПС).

Для выбора средств защиты от перенапряжений производится численное моделирование волновых процессов ВЛ и ПС. Стандартный подход основан на теории длинных линий, современное состояние которой (применительно к рассматриваемой задаче) отражено в работах [1–3]. Этот подход является безальтернативным для проектировщиков и многих исследователей благодаря возможностям программы EMTP. В то же время, учет импульсной короны и потерь в земле приводит к необходимости дробления линий на элементы малой длины [4], что дает основание для применения цепных схем с сосредоточенными параметрами. При большом числе звеньев цепные схемы позволяют моделировать распространение, запаздывание, отражение и преломление волн с достаточной точностью. Высокая трудоемкость расчетов остается сдерживающим фактором использования данной модели.

Пример эффективного использования многозвенных цепных схем с сосредоточенными параметрами дает теория заземлителей [5]. Она применима и для расчета волновых процессов ВЛ, поскольку проводник в воздухе можно рассматривать частным случаем проводника в земле.

Современная теория заземлителей подверглась существенным изменениям, связанным с переходом к частотно-зависимой модели земли [6, 7], согласно которой электропроводность грунта увеличивается при увеличении частоты, что потребовало пересчета высокочастотных и импульсных характеристик заземлителей [8, 9]. Сопротивление земли в петле «провод-земля» также зависит от частотных характеристик грунта [10].

Расчет волновых процессов ВЛ при наличии импульсной короны – нелинейная задача, решение которой производится во временной области. В то же время формулы, описывающие сопротивление земли, получены в частотной области.

Типовое решение данной проблемы заключается в замене частотно-зависимых сопротивлений эквивалентными схемами с близкими частотными характеристиками. В работе [1] это схемы 5-9 порядка, полученные предварительным расчетом. В программе EMTP (метод Марти) подобные схемы строятся автоматически в процессе решения. Включение схем высокого порядка в

каждый элемент ВЛ усложняет схему замещения. В теории заземлителей разработана альтернативная методика с использованием дискретных схем [5, 8].

Целью работы является исследование влияния частотных свойств электропроводности грунта на волновые процессы ВЛ, а также моделирование волновых процессов ВЛ на основе цепных схем с сосредоточенными параметрами.

Цепная модель тонкого проводника в земле и воздухе

Провода ВЛ и стержни заземлителей относятся к одному классу тонких проводников, поэтому могут рассматриваться совместно. Провод ВЛ – частный случай стержневого заземлителя с чисто емкостной проводимостью растекания тока (активная проводимость равна нулю).

Для формирования многозвенной цепной схемы проводники дробятся на элементы длиной $l < \lambda/10$, где λ – длина электромагнитной волны. Например, импульсу с длительностью фронта $T_1 = 0.1$ мкс соответствует эквивалентная частота $f = 1/4 T_1 = 2.5$ МГц. Длина волны в воздухе $\lambda = c/f = 120$ м, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Тогда провода ВЛ дробятся на элементы длиной не более 12 м.

Каждому элементу ставится в соответствие П–четыреполюсник с продольным сопротивлением, включающим внутреннее и внешнее индуктивное сопротивление проводника, и поперечной проводимостью, моделирующей растекание тока в земле или емкостные токи проводников в воздухе (рис. 1). Взаимные электромагнитные связи между четырехполюсниками учитываются взаимными сопротивлениями и проводимостями. Параметры схемы приведены в [5].

Для моделирования потерь в земле волнового канала «провод ВЛ–земля» в продольные ветви добавляется частотно–зависимое сопротивление земли $Z(j\omega)$. Для моделирования импульсной короны в поперечные ветви включается нелинейная емкость

$$\Delta C(u) = C_d(u) - C_0,$$

где C_0 – геометрическая емкость провода, $C_d(u)$ – динамическая емкость коронирующего провода на фронте импульса.

Динамическая емкость выбрана согласно [11, С. 78]

$$C_d(u) = 4/3 \cdot C_0 \cdot B \cdot \sqrt[3]{u/U_0}, \quad u > U_0, du/dt > 0, \tag{1}$$

где u – напряжение провода, U_0 – начальное напряжение коронного разряда, $B = 0.85$ при отрицательной полярности и $B = 1.02$ при положительной полярности.

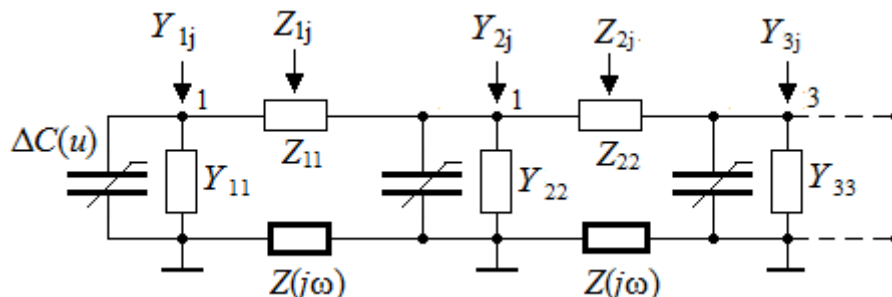


Рис. 1. Цепная модель тонкого проводника в земле и воздухе
Fig. 1. Circuit model of a thin-wire conductor in soil and air

Таким образом, модель заземлителя (рис. 1) применима для проводников ВЛ и ПС, расположенных как в земле, так и в воздухе.

Сопротивление земли в качестве обратного провода ВЛ

В однопроводной линии земля играет роль обратного провода, сопротивление которой с учетом поверхностного эффекта рассчитывается по формуле Карсона

$$Z(j\omega) = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-2h\lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0/\rho}} d\lambda,$$

где ω – угловая частота, h – высота подвеса провода, ρ – удельное сопротивление земли. Предполагается, что токи электрического смещения малы по сравнению с токами проводимости, т.е. $\omega\epsilon \ll \sigma$, где $\sigma = 1/\rho$. Это допущение, как принято считать, выполняется на частотах до 1 МГц, что справедливо для низкоомного грунта. В высокоомном грунте токи смещения уже значительно превышают токи проводимости для импульса с фронтом порядка 0.1 мкс, возникающего при обратном перекрытии изоляции опоры [12]. Тем не менее, формулу Карсона продолжают применять и в подобных случаях, включая программу ЕМТР.

Уточнение формулы Карсона с учетом токов электрического смещения началось практически сразу после ее появления (обзор в [3]). Вайс (Wise, 1933 г.) полагая, что формула Карсона справедлива для грунта с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = \epsilon_0$, выполнил формальную замену удельной проводимости грунта σ на $\sigma + j\omega\epsilon_0(\epsilon_r - 1)$. Зунде (Sunde, 1955 г.) заменил σ на $\sigma + j\omega\epsilon$ в формуле Карсона, что представляется более обоснованным. Будем придерживаться этого варианта, тем более что различие вариантов при характерном значении $\epsilon_r = 10$ несущественно.

Формула Карсона ранее считалась сложной для вычислений (вместо нее часто использовали формулу Рюденберга), а с позиции сегодняшнего дня ее недостаток в отсутствие физической интерпретации.

М.В. Костенко [13] (путем замены подынтегральной функции мажорирующей функцией) вычислил интеграл Карсона, что позволило установить его физический смысл. Плоскость нулевого потенциала, которая для идеально проводящей земли совпадает с ее поверхностью, в реальной земле (с конечной проводимостью) смещается на глубину

$$\Delta h(j\omega) = \frac{1}{p} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma}}, \quad \sigma = 1/\rho, \quad (2)$$

где p – коэффициент распространения плоской электромагнитной волны в проводящей среде, отсюда Δh – толщина скин-слоя (теперь это комплексная величина).

Тогда, для вычисления внешней индуктивности провода можно применить метод зеркальных изображений, увеличив высоту подвеса провода на величину Δh (2)

$$L(j\omega) = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h + \Delta h(j\omega))}{R} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{R} + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{\Delta h(j\omega)}{h} \right) \quad [\text{Гн/м}],$$

где h – высота подвеса провода, R – радиус провода.

Погонное сопротивление петли провод-земля

$$Z(j\omega) = Z_{внут} + Z_{внеш} + Z_{зем} = Z_{внут} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{R} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{\Delta h(j\omega)}{h} \right) \quad [\text{Ом/м}], \quad (3a)$$

где $Z_{внут}$ – внутреннее сопротивление провода, $Z_{внеш}$ – внешнее индуктивное сопротивление провода для идеально проводящей земли, $Z_{зем}$ – сопротивление земли (обратного провода ВЛ).

По аналогии с (3a) можно записать взаимное сопротивление петли “два провода – земля” (не прибегая к формуле Карсона), увеличив в известной формуле, полученной по методу зеркальных изображений, высоту подвеса проводов на Δh (2)

$$\begin{aligned} Z_{12}(j\omega) &= Z_{внеш} + Z_{зем} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_1 + h_2 + 2\Delta h(j\omega))^2 + d^2}}{\sqrt{(h_1 - h_2)^2 + d^2}} = \\ &= \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2}}{\sqrt{(h_1 - h_2)^2 + d^2}} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_1 + h_2 + 2\Delta h(j\omega))^2 + d^2}}{\sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2}}, \end{aligned} \quad (3б)$$

где h_1, h_2 – высота подвеса проводов, d – горизонтальное расстояние между проводами.

Таким образом, сопротивление земли по М.В. Костенко определяется проще, чем по Карсону, при высокой степени (погрешность 3%) совпадения с оригиналом (рис. 2). При сравнении с другой известной формулой сопротивления земли – формулой Рюденберга, формула М.В. Костенко точнее (рис. 2a).

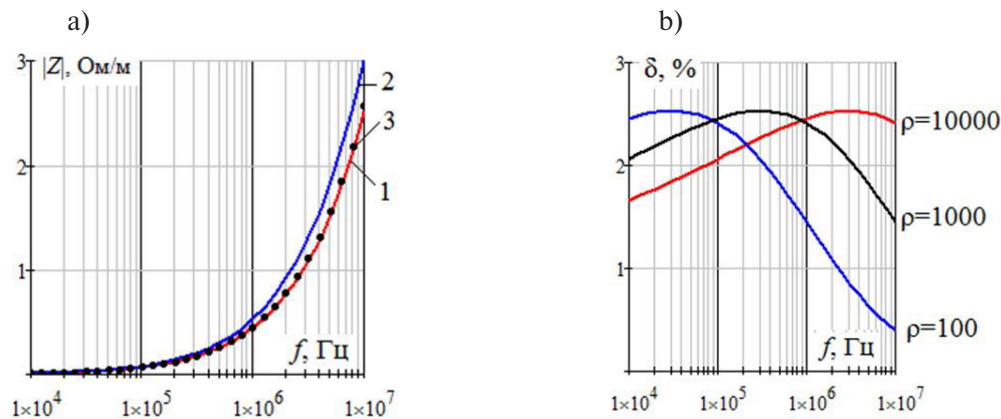


Рис. 2a. Частотная характеристика модуля сопротивления земли по формуле: 1 – Карсона, 2 – Рюденберга, 3 – М.В. Костенко; $h = 10$ м, $\rho = 10000$ Ом·м

Fig. 2a. Frequency response of the earth-return impedance module according to the formula: 1– Carson, 2–Rudenberg, 3– M.V. Kostenko; $h = 10$ m, $\rho = 10000$ $\Omega \cdot \text{m}$

Рис. 2б. Относительная погрешность модуля сопротивления земли по формуле М.В. Костенко по сравнению с формулой Карсона; $h = 10$ м, ρ [Ом·м]

Fig. 2b. Relative error of the earth-return impedance module according to M.V. Kostenko's formula in comparison with Carson's formula; $h = 10$ m, ρ [$\Omega \cdot \text{m}$]

Работа [13], к сожалению, малоизвестна. Значительно позже методика М.В. Костенко была открыта заново иностранными исследователями: С. Dubanton (1969 г.), С. Gary (1976 г.), А. Deri (1981 г.).

Частотные характеристики электропроводности грунта

Частотные характеристики удельной проводимости грунта $\sigma(\omega)$ и диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\omega)$ получены экспериментально многими исследователями (обзор в [8]).

Будем использовать частотную модель грунта Мессира, удобную для аналитических расчетов, и модель Алипио-Висакро, применение которой рекомендовано СИГРЭ.

В работе [8] оригинальная форма записи частотных функций $\sigma(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$ преобразована к более удобной форме комплексной удельной проводимости $\sigma(j\omega)$.

По Мессире

$$\sigma(j\omega) = \sigma_0 \left(1 + \sqrt{j\omega\varepsilon/\sigma_0}\right)^2, \quad \varepsilon = 8\varepsilon_0, \quad (4a)$$

где σ_0 – удельное сопротивление грунта на низкой частоте (100 Гц).

По Алипио-Висакро (рекомендация СИГРЭ)

$$\sigma(j\omega) = \sigma_0 \left(1 + j\omega\varepsilon/\sigma_0 + 2.37 \left(10^{-3}/\sigma_0\right)^{0.73-n} (j\omega\varepsilon/\sigma_0)^n\right), \quad n = 0.54, \quad \varepsilon = 12\varepsilon_0. \quad (4б)$$

При замене $\sigma = \sigma_0$ на $\sigma(j\omega)$ согласно (4) происходит переход от классической модели к частотно-зависимой модели грунта.

Тогда уровень плоскости нулевого потенциала вместо (2) равен

$$\Delta h(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma(j\omega)}}. \quad (5)$$

Собственное и взаимное сопротивление петли «провод-земля» получается в (3) после замены (2) на (5).

Метод дискретных схем

Метод дискретных схем – наиболее распространенный численный метод расчета переходных процессов в электрических цепях с сосредоточенными параметрами, включающих частотно-зависимые и нелинейные элементы.

Временной интервал дробится на N равных шагов длиной h . При малом шаге h индуктивности и емкости заменяются резисторами с источниками ЭДС и тока, учитывающими начальные условия каждого шага (рис. 3). В работах [5, 8] доказано, что к этим схемам сводится сопротивление и проводимость произвольного частотно-зависимого элемента, что существенно расширило область применения метода дискретных схем.

Покажем методику определения параметров дискретной схемы (рис. 3а) для сопротивления земли $Z(j\omega)$ (3).

Формальной заменой $j\omega$ на s переходим к операторному сопротивлению земли $Z(s)$. Дважды проинтегрировав $Z(s)$ в пространстве изображений и выполнив обратное преобразование Лапласа (численно в данной задаче), получаем переходное сопротивление $z(t)$ (оно численно равно на-

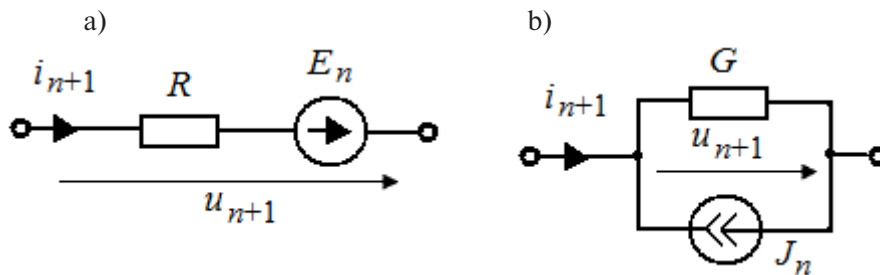


Рис. 3. Дискретная схема: а) индуктивности и произвольного частотно-зависимого сопротивления, б) емкости и произвольной частотно-зависимой проводимости на n -временном шаге

Fig. 3. Discrete circuit of: a) inductance and arbitrary frequency-dependent impedance, b) capacitance and arbitrary frequency-dependent conductivity at the n -time step

пряжению цепи при воздействии тока единичного наклона $i(t) = t$. Переходное сопротивление в узловых точках обозначим z_n .

Эту процедуру можно изобразить схематически

$$Z(j\omega) \Rightarrow Z(s) \Rightarrow z(t) = L^{-1} [Z(s) / s^2] \Rightarrow z_n, n = 0 \dots N.$$

Тогда параметры дискретной схемы сопротивления земли (рис. 3а)

$$R = \frac{z_1}{h}, E_n = \frac{1}{h} \sum_{m=1}^n (2z_{n-m+1} - z_{n-m} - z_{n-m+2}) i_m, n = 0 \dots N, z_0 = 0,$$

где $N + 1$ – число узлов, h – длина шага.

Таким образом, сопротивление земли (3) моделируется дискретной схемой (рис. 3а). В петле «провод-земля» эта схема включена последовательно с аналогичной схемой для внутреннего сопротивления провода, поэтому сопротивления и ЭДС складываются. В результате учет сопротивления земли не приводит к усложнению схемы замещения ВЛ.

Нелинейная емкость (рис. 1), моделирующая импульсную корону проводов ВЛ, рассчитывается в начале каждого шага по формуле (1) и принимается постоянной в пределах шага. Тогда она моделируется дискретной схемой (рис. 3б).

Волновые процессы в однопроводной линии

Рассчитаем волновые процессы в однопроводной полубесконечной ВЛ при воздействии коугольного импульса тока с фронтом 0.1 мкс. Место наблюдения выберем на расстоянии 3 км от начала ВЛ. Удельное сопротивление земли (на низкой частоте) $\rho = 10000$ Ом·м.

Вариант 1. Чисто активная модель земли $\sigma = 1/\rho = \text{const}$. Расчеты выполнены по программе ЕМТР и частотным методом (рис. 4, график 1), их результаты полностью совпадают.

Фронт волны сглаживается, волна запаздывает на 0.6 мкс (по сравнению с волной в воздухе), что позволяет определить эквивалентную (с тем же запаздыванием) частоту синусоидальной волны $f = 4.4$ МГц. На этой частоте токи смещения в разы превышают токи проводимости, т.е. нарушены ограничения формулы Карсона и ее применение необоснованно.

Вариант 2. Активно-емкостная модель земли с проводимостью $\sigma + j\omega\epsilon$ при $\sigma = \text{const}$, $\epsilon = \text{const}$. Расчеты выполнены частотным методом и методом дискретных схем (рис. 4, график 2), их результаты хорошо совпадают.

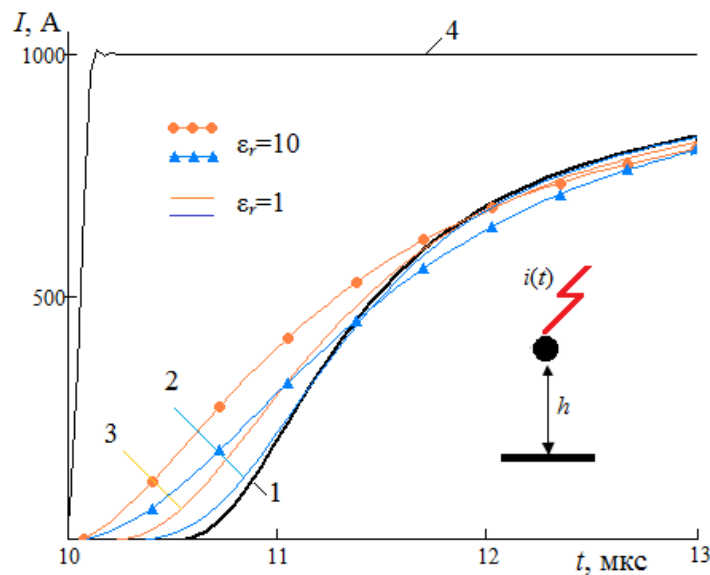


Рис. 4. Ток на расстоянии 3 км от начала полубесконечной однопроводной ВЛ для модели грунта: 1 – с чисто активной проводимостью $\sigma = 1/\rho = \text{const}$, 2 – с активно-емкостной проводимостью $\sigma + j\omega\epsilon$ ($\sigma = \text{const}$, $\epsilon = \text{const}$), 3 – с частотно-зависимыми параметрами (4а), 4 – без учета потерь в грунте; $\rho = 10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h = 10 \text{ м}$, радиус провода 1 см

Fig. 4. Current at a distance of 3 km from the beginning of a semi-infinite single-wire transmission line for the soil model: 1 – with purely active conductivity $\sigma = 1/\rho = \text{const}$, 2 – with active-capacitive conductivity $\sigma + j\omega\epsilon$ ($\sigma = \text{const}$, $\epsilon = \text{const}$), 3 – with frequency-dependent parameters (4a), 4 – without considering losses in the soil; $\rho = 10000 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$, $h = 10 \text{ m}$, the wire radius is 1 cm

С учетом токов смещения в грунте запаздывание волн уменьшается тем больше, чем выше диэлектрическая проницаемость грунта. Причина – увеличение электропроводности грунта – на эквивалентной частоте $f = 4.4 \text{ МГц}$ удельное сопротивление грунта $|\rho(j\omega)| = 3800 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $\epsilon_r = 1$ и $|\rho(j\omega)| = 410 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $\epsilon_r = 10$.

Вариант 3. Модель земли с частотно-зависимыми параметрами (4). Расчеты выполнены частотным методом и методом дискретных схем (рис. 4, график 3), их результаты хорошо совпадают.

Запаздывание волны уменьшается по сравнению с вариантом грунта 2, поскольку электропроводность грунта в этой модели выше. На эквивалентной частоте $f = 4.4 \text{ МГц}$ удельное сопротивление грунта $|\rho(j\omega)| = 1770 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $\epsilon_r = 1$ и $|\rho(j\omega)| = 310 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $\epsilon_r = 10$.

Таким образом, в первый момент времени прихода волны из-за высокой мгновенной проводимости грунта глубина скин-слоя значительно меньше, чем в установившемся режиме, поэтому значительная часть волны распространяется в воздухе. Далее проводимость снижается, глубина скин-слоя увеличивается и процессы запаздывания и затухания волны в грунте вновь проявляются в полной мере. При $\epsilon_r \gg 1$ запаздывание волны (по сравнению с волной в воздухе) равно нулю, как при идеально проводящей земле.

Полученные теоретические результаты могут дать объяснение экспериментальным данным, полученным при моделировании волновых процессов ВЛ на Кольском полуострове [14]. Удельное сопротивление грунта здесь обычно принимают $\rho = 5000\text{--}10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, однако при проведении расчетов наилучшее совпадение с экспериментом получено при $\rho = 300\text{--}700 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Причиной авторы [14] считают многослойность грунта с высокой проводимостью верхнего слоя. Другой вероятной причиной, как следует из данной работы, являются частотные свойства высокоомного грунта.

Сравнение с экспериментальными данными

В опытах С. Gary [15] в начало крайнего провода ВЛ вводится импульс напряжения

$$u(t) = U_m \left[0.988e^{-0.123t} - 1.064e^{-4.1t} \sin(12.3t + 70^\circ) \right], \text{ где } U_m = 850 \cdot 10^3, t [\text{мкс}]$$

и выполнены измерения напряжения на расстоянии 1, 3, 7, 10 км от начала ВЛ (рис. 5). Удельное сопротивление грунта по длине ВЛ, к сожалению, не измерялось (в расчетах авторы принимают $\rho = 100\text{--}1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Расчеты, выполненные при $\rho = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, хорошо согласуются с измерениями (рис. 5), что подтверждает достоверность разработанной методики. Погрешности на расстоянии 7 и 10 км могут быть снижены, если предположить, что удельное сопротивление грунта в конце линии больше, чем в начале.

Исследуем влияние разных факторов на затухание волны в линии на длине 10 км.

Без учета короны и потерь в земле максимум напряжения составляет 745 кВ (рис. 6, график 3). Затухание волны здесь обусловлено только сопротивлением проводов.

С учетом затухания волны в земле (без учета короны) максимум напряжения снижается с 745 кВ до 425 кВ (рис. 6, график 4). Затухание волны весьма значительное, несмотря на относительно небольшое удельное сопротивление грунта ($\rho = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Таким образом, при большой длине пробега затухание волн следует учитывать не только в высокоомном грунте.

Учет импульсной короны (без учета потерь в грунте) снижает максимум напряжения с 745 кВ до 375 кВ (рис. 6, график 5). Это снижение лишь немного больше, чем за счет потерь в земле.

С учетом короны и потерь в земле первоначальный максимум напряжения снижается с 745 кВ до 320 кВ (рис. 6, график 6). Кажется бы, снижение должно быть больше, учитывая сильное затухание волны от двух рассмотренных факторов по отдельности. Причина в том, что к моменту прихода волны в канале “провод-земля” напряжение провода, обусловленное уже пришедшей

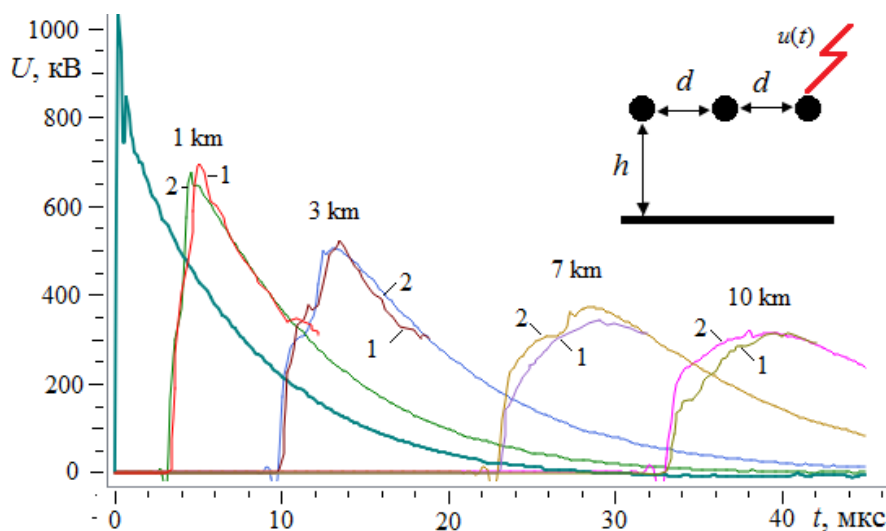


Рис. 5. Напряжение ВЛ: 1 – измерения С. Gary; 2 – расчет; $h = 12 \text{ м}$, $d = 4 \text{ м}$, радиус проводов $R = 13.2 \text{ мм}$, $\rho = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Fig. 5. Transmission line voltage: 1 – C. Gary measurements; 2 – calculation; $h = 12 \text{ m}$, $d = 4 \text{ m}$, wire radius $R = 13.2 \text{ mm}$, $\rho = 200 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$

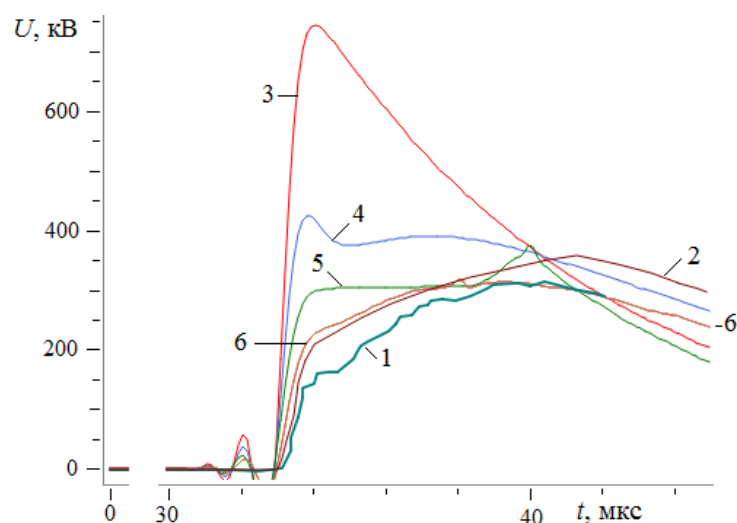


Рис. 6. Напряжение на расстоянии 10 км от начала ВЛ: 1 – измерения С. Gary; 2 – данные из документации к программе EMTP-RV; расчеты: 3 – потери только в проводах, 4 – с потерями в земле, но без короны, 5 – с короной положительной полярности, но без потерь в земле, 6 – с потерями в земле и на корону

Fig. 6. The voltage at a distance of 10 km from the beginning of the transmission line: 1 – measurement С. Gary; 2 – data from the documentation to the program EMTP-RV; calculations: 3 – losses only in wires, 4 – with losses in the ground, but without a corona, 5 – with corona of positive polarity, but no losses in the ground, 6 – with losses in the ground and with the corona

волной в воздухе, превышает напряжение начала коронного разряда, поэтому потери в земле и потери на корону действуют совместно, их нельзя рассматривать по отдельности.

Отметим, что результаты расчетов (рис. 6, график 6) согласуются с экспериментальными данными (рис. 6, график 1) не хуже, чем расчеты, выполненные в стандартной программе EMTP-RV (рис. 6, график 2).

Обсуждение результатов и выводы

Моделирование волновых процессов ВЛ и ПС при ударах молнии обычно производится методами теории длинных линий. В то же время для учета импульсной короны и потерь в земле провода ВЛ приходится дробить на элементы малой длины так, что моделирование ВЛ многозвенной цепной схемой – реальная альтернатива модели длинной линии.

Расчеты проводятся во временной области, поскольку импульсная корона имеет нелинейную характеристику. Проблема в том, что сопротивление земли, которое определяет затухание в волновом канале “провод-земля”, определено в частотной области (по формуле Карсона).

Существующий способ моделирования частотно-зависимого сопротивления во временной области сводится к построению эквивалентных схем высокого порядка. Включение подобной схемы в каждый элемент ВЛ существенно усложняет решение. Модификация формулы Карсона с учетом токов электрического смещения, переход к частотно-зависимой модели земли делает этот способ труднореализуемым. Предложенный способ моделирования частотно-зависимого сопротивления стандартной дискретной во времени схемой индуктивности, но с другими параметрами, упрощает расчеты и расширяет область применения метода дискретных схем.

М.В. Костенко установил физический смысл формулы Карсона – плоскость нулевого потенциала в земле с конечной проводимостью располагается на глубине $\Delta h(j\omega)$. Тогда внешняя индуктивность провода (собственная и взаимная) находится по методу зеркальных изображений для идеальной земли, если увеличить высоту подвеса провода на величину $\Delta h(j\omega)$.

Высокоомный грунт обладает ярко выраженными частотными свойствами, что проявляется в значительном увеличении электропроводности на высоких частотах или в первые моменты импульса. Переход к частотно-зависимой модели грунта – рекомендация СИГРЭ при расчете заземлителей в высокоомном грунте. В данной работе она распространена и на сопротивление земли в петле «провод-земля», что позволило установить новый эффект. Из-за более высокой электропроводности на фронте импульса волна проникает в грунт на меньшую глубину и движется с меньшим запаздыванием, чем принято считать при использовании классической модели грунта (с постоянным удельным сопротивлением).

Достоверность разработанной методики подтверждена сравнением с экспериментальными данными, расчетами частотным методом (по формулам длинной линии) и по программе ЕМТР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Ефимов Б.В., Гумерова Н.И.** Моделирование деформации грозовых волн в воздушных линиях с учетом совместного влияния конструкции опор, короны на проводах и потерь в земле // Труды КНЦ РАН. Энергетика. 2013. Вып. 7(17). С. 13–32.

[2] **Ефимов Б.В., Селиванов В.Н.** Волны перенапряжений на оборудовании подстанции при ударах молнии за пределами защищенного подхода // Труды КНЦ РАН. 2018. Т. 9. № 3-16. С. 7–23.

[3] **Ametani A., Miyamoto Y., Baba Y., Nagaoka N.** “Wave propagation on an overhead multiconductor in a high-frequency region”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 56, no. 6, 2014, pp. 1638–1648.

[4] **Anane Z., Bayadi A., Huang K.** Distortion Phenomena on Transmission Lines Using Corona Modeling ATP/EMTP. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 25, No. 2; 2018, pp. 383–389.

[5] **Шишигин С.Л.** Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Электричество. 2010. № 1. С. 16–23.

[6] CIGRE WG C4.33. “Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems,” CIGRE Technical Brochure, no. 781, Oct. 2019.

[7] **Alipio R., Visacro S.** Time-domain analysis of frequency-dependent electrical parameters of soil. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 2017, vol. 59, No. 3, pp. 873–878.

[8] **Шишигин С.Л., Черепанов А.В., Шишигин Д.С.** Моделирование заземлителя в грунте с частотно-зависимой удельной проводимостью // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т.24. № 3. С. 91–101.

[9] **Шишигин Д.С., Шишигин С.Л.** Шаговые алгоритмы расчета волновых процессов в задачах грозозащиты электрических подстанций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 75–84.

[10] **Conti A.D., Alipio R.** Lightning transients on branched distribution lines considering frequency-dependent ground parameters. 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2016, pp. 1–5.

[11] Техника высоких напряжений / Г.Н. Александров и др.; под ред. М.В. Костенко. – М.: Высш. шк., 1973. 528 с.

[12] **Ивонин В.В., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Карпов А.С., Климов А.А.** Экспериментальные исследования пробоя гирлянды изоляторов воздушных линий электропередачи // Труды КНЦ РАН. 2019. Т. 10. № 5-18. С. 120–125.

[13] **Костенко М.В.** Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле // Электричество. 1955. № 10. С. 29–34.

[14] **Ефимов Б.В., Гумерова Н.И., Стогова Я.А.** Анализ деформации грозовых волн при их распространении по ВЛ на расстояние более 100 км // Труды Кольского научного центра РАН. 2011. № 1 (4). С. 43–59.

[15] Gary C., Timotin A., Cristescu D. Prediction of surge propagation influenced by corona and skin effect. IEE Proc., Vol. 130, Pt. A, No. 5, 1983, pp. 264–272.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШИШИГИН Сергей Леонидович – профессор, Вологодский государственный университет, д-р техн. наук.
E-mail: ctod28@yandex.ru

ШИШИГИН Дмитрий Сергеевич – доцент, Вологодский государственный университет, канд. техн. наук.
E-mail: shishigind@yandex.ru

СМИРНОВ Иван Николаевич – аспирант, Вологодский государственный университет, без степени.
E-mail: ivan.smirnov18@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 13.10.2020

REFERENCES

- [1] **B.V. Yefimov, N.I. Gumerova**, Modelirovaniye deformatsii grozovykh voln v vozdushnykh liniyakh s uchetom sovmestnogo vliyaniya konstruktssii opor, korony na provodakh i poter v zemle [Modeling of lightning wave deformation in transmission lines, taking into account the combined effect of the structure of supports, corona on wires, and losses in the ground]. Trudy KNTs RAN. Energetika. 2013. Vyp. 7(17). pp. 13–32.
- [2] **B.V. Yefimov, V.N. Selivanov**, Volny perenapryazheniy na oborudovanii podstantsii pri udarakh molnii za predelami zashchishchennogo podkhoda [Surge waves on substation equipment in case of lightning strikes outside the protected side]. Trudy KNTs RAN. 2018. T. 9. № 3-16. pp. 7–23.
- [3] **A. Ametani, Y. Miyamoto, Y. Baba, N. Nagaoka**, “Wave propagation on an overhead multiconductor in a high-frequency region”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 56, no. 6, 2014, pp. 1638–1648.
- [4] **Z. Anane, A. Bayadi, K. Huang**, Distortion Phenomena on Transmission Lines Using Corona Modeling ATP/EMTP. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 25, No. 2; 2018, pp. 383–389.
- [5] **S.L. Shishigin**, Matematicheskiye modeli i metody rascheta zazemlyayushchikh ustroystv [Mathematical models and methods for calculating grounding systems]. Elektrichestvo. 2010. № 1. pp. 16–23.
- [6] CIGRE WG C4.33. “Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems,” CIGRE Technical Brochure, no.781, Oct. 2019.
- [7] **R. Alipio, S. Visacro**, Time-domain analysis of frequency-dependent electrical parameters of soil. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, 2017, vol. 59, No. 3, pp. 873–878.
- [8] **S.L. Shishigin, A.V. Cherepanov, D.S. Shishigin**, Modelirovaniye zazemlitelya v grunte s chastotno-zavisimoy udelnoy provodimostyu [Modeling of a ground conductor in the soil with frequency-dependent specific conductivity]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24. № 3. pp. 91–101.
- [9] **D.S. Shishigin, S.L. Shishigin**, Shagovyie algoritmy rascheta volnovykh protsessov v zadachakh grozozashchity elektricheskikh podstantsiy [Step algorithms for calculating wave processes in electrical substation lightning protection problems]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye. 2017. T. 10. № 2. pp. 75–84.

- [10] **A.D. Conti, R. Alipio**, Lightning transients on branched distribution lines considering frequency-dependent ground parameters. 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2016, pp. 1–5
- [11] *Tekhnika vysokikh napryazheniy [high-voltage engineering]*. G.N. Aleksandrov i dr.; pod red. M.V. Kostenko. – M.: Vyssh.shk., 1973. 528 p.
- [12] **V.V. Ivonin, A.N. Danilin, B.V. Yefimov, A.S. Karpov, A.A. Klimov**, Eksperimentalnyye issledovaniya proboya girlyandy izolyatorov vozduzhnykh liniy elektroperedachi [Experimental studies of breakdown of a garland of insulators of transmission lines]. Trudy KNTs RAN. 2019. T. 10. № 5-18. pp. 120–125.
- [13] **M.V. Kostenko**, Vzaimnyye soprotivleniya mezhdu vozduzhnymi liniyami s uchetom poverkhnostnogo effekta v zemle. [Mutual resistances between transmission lines taking into account the surface effect in the ground]. Elektrichestvo. 1955. № 10. pp. 29–34.
- [14] **B.V. Yefimov, N.I. Gumerova, Ya.A. Stogova**, Analiz deformatsii grozovykh voln pri ikh rasprostranenii po VL na rasstoyaniye boleye 100 km [Analysis of the deformation of lightning waves when they propagate along the transmission line at a distance of more than 100 km]. Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. 2011. № 1 (4). pp. 43–59.
- [15] **C. Gary, A. Timotin, D. Cristescu**, Prediction of surge propagation influenced by corona and skin effect. IEE Proc., Vol. 130, Pt. A, No. 5, 1983, pp. 264–272.

THE AUTHORS

SHISHIGIN Sergey L. – *Vologda State University*.
E-mail: ctod28@yandex.ru

SHISHIGIN Dmitriy S. – *Vologda State University*.
E-mail: shishigind@yandex.ru

SMIRNOV Ivan N. – *Vologda State University*.
E-mail: ivan.smirnov18@mail.ru

Received: 13.10.2020