



DOI: 10.18721/JEST.240308
УДК 621.316.99

С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин

Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЕМЛИТЕЛЯ В ГРУНТЕ С ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОЙ УДЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Удельная проводимость грунта зависит от частоты, что необходимо учитывать при расчете импульсных процессов в заземлителях при воздействии тока молнии. В настоящее время используется частотный метод, который не требует изменения стандартной модели заземлителя, но область его применения ограничена линейными задачами, и возникают трудности с удовлетворением принципа причинности. Разработана дискретная во времени модель заземлителя в грунте с произвольной частотно-зависимой комплексной удельной проводимостью, пригодная для расчетов импульсных переходных процессов стандартными методами во временной области. На численных примерах показано, что импульсы перенапряжения в заземлителях, расположенных в высокоомном грунте с частотно-зависимыми параметрами, существенно сглаживаются и ослабляются при воздействии импульсов тока с малым фронтом и малой длительностью.

Ключевые слова: удельная проводимость грунта, частотная зависимость, заземлитель, дискретная модель, импульсные процессы, метод дискретных схем, метод Влаха.

Ссылка при цитировании:

С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин. Моделирование заземлителя в грунте с частотно-зависимой удельной проводимостью // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 3. С. 91–101. DOI: 10.18721/JEST.240308.

S.L. Shishigin, A.V. Cherepanov, D.S. Shishigin

Vologda State University, Vologda, Russia

SIMULATION OF GROUNDING SYSTEM IN SOIL WITH FREQUENCY-DEPENDENT SPECIFIC CONDUCTIVITY

Specific conductivity of soil depends on frequency that must be taken into account in calculations of impulse processes in grounding systems under lightning current. The Fourier method currently does not require modification of the standard model of the grounding system, but the scope of its applications is limited by linear problems, and difficulties with the causality principle may arise. We have developed a time-discrete model of a grounding system in soil with arbitrary frequency-dependent complex specific conductivity, suitable for calculations of impulse transient processes using standard methods in time domain. It is shown on numerical examples that overvoltage impulses in grounding systems, which are located in high-resistance soil with frequency-dependent parameters, are significantly smoothed and attenuated under the influence of current impulses with short front and short duration.

Keywords: soil specific conductivity, frequency-dependence, grounding system, discrete model, impulse processes, discrete circuits method, Vlach method.

Citation:

S.L. Shishigin, A.V. Cherepanov, D.S. Shishigin, Simulation of grounding system in soil with frequency-dependent specific conductivity, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(03)(2018) 91–101, DOI: 10.18721/JEST.240308.

Введение

Расчеты заземлителей систем молниезащиты воздушных линий (ВЛ) и электрических подстанций (ПС) в настоящее время проводятся в моделях земли (грунта), электрические параметры которых не зависят от частоты. В действительности удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость грунта являются частотно-зависимыми параметрами, что установлено многими исследователями начиная с открытия частотных свойств электролитов П. Дебаем и Х. Фалькенхагеном (1928 г.) и работ К.С. Cole, Р.Н. Cole (1941 г.).

Согласно современным экспериментальным данным [1–3] удельная проводимость высокоомного грунта на частоте 1 МГц в несколько раз больше, чем на частоте 100 Гц, а относительная диэлектрическая проницаемость грунта на низких частотах составляет тысячи единиц (вместо привычных 5–30). Учет этих факторов в моделях грунта приводит к снижению на 30–100 % рассчитываемых значений сопротивления заземлителей [2–5] и перенапряжений ВЛ [6, 7] при втором и последующих импульсах тока молнии.

Таким образом, традиционная модель грунта с удельной проводимостью, измеренной на низкой частоте и принимаемой постоянной во всем частотном диапазоне тока молнии (25 кГц – 1 МГц) и импульсных помех на ПС (до нескольких МГц), не является адекватной: при ее использовании проектные решения для районов с высокоомным грунтом (скальный, мерзлый), характерным для многих регионов России, могут оказаться неэффективными.

Расчеты импульсных процессов в заземлителях обычно проводятся во временной области, но в грунте с частотно-зависимыми параметрами исследователи выбирают частотный метод [2–7]. Причина понятна: переход к модели грунта с частотно-зависимыми параметрами не требует изменения модели заземлителя и компьютерных программ. Однако область при-

менения частотного метода ограничена линейными задачами, что исключает как расчеты заземлителей с учетом нелинейности магнитной проницаемости стальных стержней и удельной проводимости грунта из-за разрядных процессов при больших токах, так и грозозащиту ВЛ и ПС с учетом нелинейных элементов.

Кроме того, при расчете заземлителей в грунте с частотно-зависимыми параметрами частотным методом происходит нарушение принципа причинности – при нулевом токе в начальный момент времени напряжение не равно нулю [8–11]. Причина – ограниченный частотный диапазон экспериментальных данных. Итерационные методики [9], экстраполяция экспериментальных данных [9, 10], подбор длительности наблюдения за переходным процессом [11] устраняют проблему, но увеличивают трудоемкость решения.

Таким образом, при переходе к моделям грунта с частотно-зависимыми параметрами расчеты импульсных процессов в заземлителях следует проводить во временной области, однако преградой на этом пути является отсутствие эффективных методик моделирования частотно-зависимых параметров во временной области.

Цель работы – предложить модель заземлителя в грунте с частотно-зависимыми электрическими параметрами для расчета импульсных процессов во временной области стандартными методами.

Физические процессы, определяющие частотные свойства электропроводности грунта

Частотные свойства электрических параметров грунта являются предметом изучения в электроразведке [12]. Проводимость грунта обусловлена наличием электролита (вода с растворенными солями). Ток в электролите представляет собой движение ионов, что приводит к перемещению вещества электролита. Под действием внешнего поля электролит поляризуется, возникает внутреннее электрическое поле, направленное встречно внешнему

полю, что препятствует протеканию тока и снижает проводимость. На низких частотах внешнее и внутреннее поля действуют синхронно, поэтому удельная проводимость σ_0 на низкой частоте – действительная величина.

С увеличением частоты начинает сказываться инерционность процессов диффузии – ионы не успевают переместиться вслед за внешним полем, поэтому процессы поляризации ослабевают, а удельная проводимость увеличивается по сравнению с σ_0 . При импульсном воздействии внутреннее поле запаздывает во времени. При гармоническом воздействии внутреннее поле отстает по фазе, соответственно в этом случае удельная проводимость – комплексная величина ($\sigma = \sigma_R + j\sigma_I$).

На частотах в сотни килогерц необходимо учитывать ток электрического смещения в грунте. Плотность полного тока

$$J = \sigma E + j\omega \varepsilon E,$$

где E – напряженность электрического поля.

Тогда комплексная удельная проводимость грунта

$$\sigma(j\omega) = \sigma + j\omega \varepsilon = \sigma_R + j\omega \varepsilon',$$

где $\varepsilon' = \varepsilon + \sigma_I/\omega$ – эквивалентная кажущаяся диэлектрическая проницаемость грунта.

Из полученного выражения становятся понятными огромные величины относительной диэлектрической проницаемости грунта с частотно-зависимыми параметрами – тысячи единиц [1–3] на низкой частоте. Они определяются мнимой частью комплексной удельной проводимости. С увеличением частоты эквивалентная диэлектрическая проницаемость уменьшается и (в мегагерцовом диапазоне) стремится к типовым значениям для грунта.

Частотные зависимости электропроводности грунта

Согласно модели Cole – Cole комплексная удельная проводимость электролита имеет вид

$$\sigma(j\omega) = \sigma_0 + \sigma_0 \frac{\gamma(j\omega\tau)^c}{1 + (1-\gamma)(j\omega\tau)^c}, \quad (1)$$

где σ_0 – удельная проводимость при низкой частоте; ω – угловая частота, τ – время релаксации электролита, γ – поляризуемость электролита, c – показатель степени (при $c = 1$ – модель Дебая).

В задачах электроразведки параметры формулы (1) определяются в ходе интерпретации данных индукционного зондирования земли [12]. С внедрением частотно-зависимых моделей грунта этот подход будет востребован и для расчета заземлителей, но в настоящее время измеряется только σ_0 .

Частотные зависимости удельной проводимости и диэлектрической проницаемости грунта в удобной для практического применения форме получены в работах Скота, Смита и Лонгмаера, Мессира, Висакро и Портела, Алипио и Висакро. Они приведены в обзоре [8] и продублированы в [11] с учетом изменений [2]. По результатам исследования [11] ограничимся двумя частотными зависимостями.

Согласно Мессиру, в частотном диапазоне 100 Гц – 1 МГц

$$\sigma(f) = \sigma_0 \left(1 + \sqrt{\frac{4\pi f \varepsilon_\infty}{\sigma_0}} \right); \quad \varepsilon_r(f) = \frac{\varepsilon_\infty}{\varepsilon_0} \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_0}{\pi f \varepsilon_\infty}} \right), \quad (2)$$

где σ_0 , См/м – удельная проводимость грунта на частоте 100 Гц; ε_∞ – диэлектрическая проницаемость на высокой частоте (далее используем обозначение ε). Эта модель получена достаточно давно, однако удобна в методическом плане для последующей реализации во временной области.

Согласно Алипио–Висакро [2], в частотном диапазоне 100 Гц – 4 МГц

$$\sigma(f) = \sigma_0 + Kf^\alpha;$$

$$\varepsilon_r(f) = \frac{\varepsilon_\infty}{\varepsilon_0} + \frac{\tan(\alpha\pi/2) \cdot 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0} Kf^{\alpha-1}; \quad (3)$$

$$K = \alpha_0 h(\alpha_0) \cdot 10^{-6\alpha}; \quad h(\alpha_0) = 1,26\sigma^{-0,73}; \quad \alpha = 0,54,$$

где σ_0 , мСм/м. Это современная модель грунта, частотный диапазон которой достаточен для решения задач молниезащиты и электромагнитной совместимости.

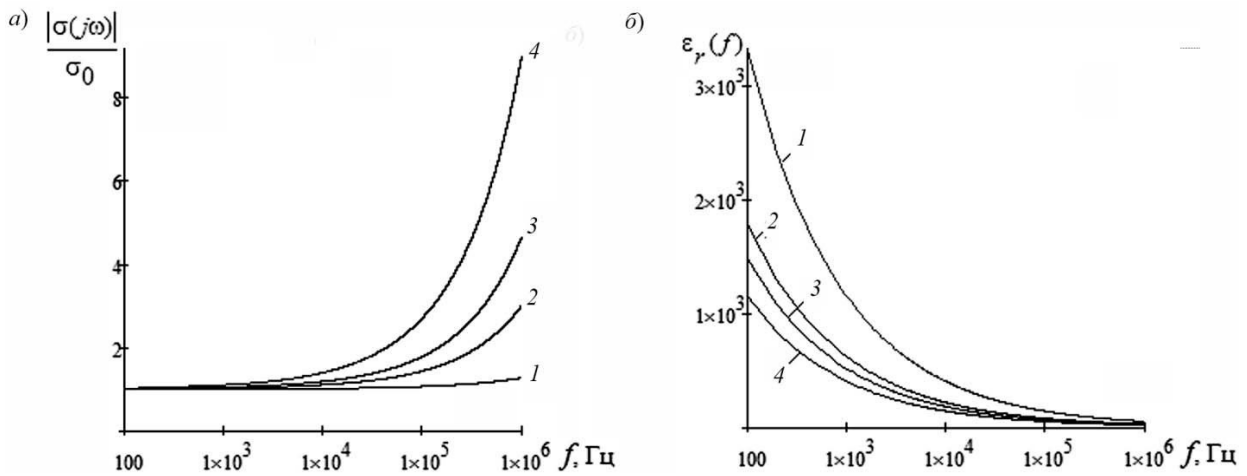


Рис. 1. Частотные зависимости модуля удельной проводимости (а) и относительной диэлектрической проницаемости грунта по модели Алипио–Висакро (б) при σ_0 , равном 10 (1), 1 (2), 0,5 (3) и 0,2 (4) мСм/м

Fig. 1. Frequency-dependence of module of specific conductivity (a) and soil specific permittivity according to the Alipio–Visacro model (b) when: 1 – $\sigma_0 = 10$ мСм/м; 2 – $\sigma_0 = 1$ мСм/м; 3 – $\sigma_0 = 0,5$ мСм/м; 4 – $\sigma_0 = 0,2$ мСм/м

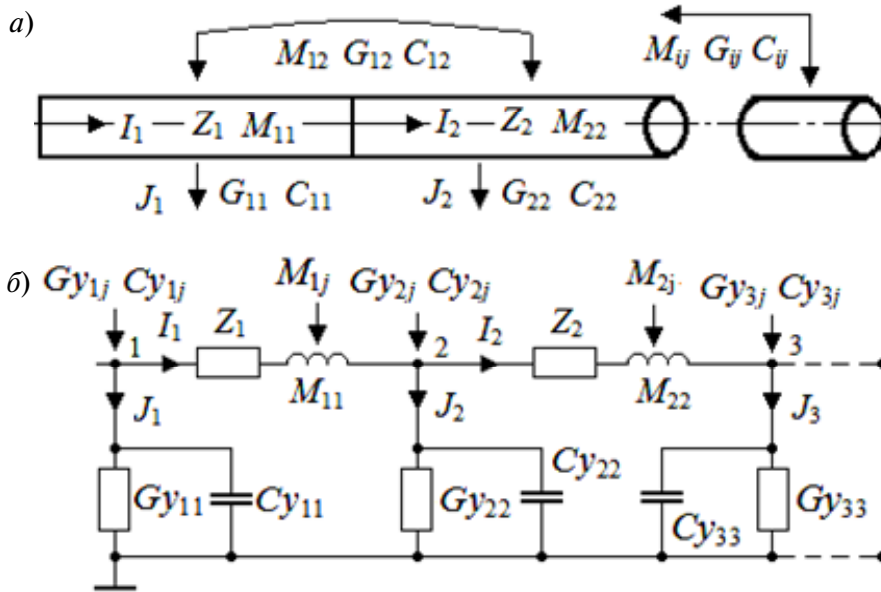


Рис. 2. Полевая (а) и цепная (б) модели заземлителя
Fig. 2. Grounding system field (a) and circuit (b) models

Согласно (3) удельная проводимость грунта на частотах в сотни килогерц может быть в несколько раз больше, чем на низких частотах (рис. 1, а), а кажущаяся относительная диэлектрическая проницаемость может достигать тысяч единиц на низких частотах (рис. 1, б).

Существующая модель заземлителя

Цепно-полевая модель заземлителя в грунте с постоянными удельной проводимостью и диэлектрической проницаемостью

(рис. 2), позволяющая рассчитать его полевые (распределение потенциала и напряженности) и цепные (токи и напряжения) параметры, разработана в [13]. Заземлитель дробится на элементы малой длины (рис. 2, а), что позволяет рассчитать их электромагнитные параметры – матрицы собственных и взаимных проводимостей растекания G , емкостей C , индуктивностей M в статическом приближе-

нии (аналитически). Полевой модели (рис. 2, *a*) ставится в соответствие цепная модель, состоящая из электро-магнитосвязанных П-четырёхполюсников (рис. 2, *б*). Матрицы G и C , определенные в средних точках элементов полевой модели, преобразованы в узловые матрицы G_y и C_y цепной модели.

При переходе к модели грунта с частотно-зависимыми параметрами элементы матриц G и C зависят от частоты. Эти изменения не приводят к изменению существующей модели заземлителя при условии, что расчеты импульсных процессов проводятся в частотной области. Однако ограничения и трудности частотного метода, описанные ранее, заставляют нас от него отказаться.

Расчет элементов матриц G и C в грунте с частотно-зависимыми параметрами во временной области и их схемные модели – предмет дальнейшего рассмотрения.

Методы расчета импульсных процессов во временной области

Метод дискретных схем – наиболее распространенный численный метод расчета переходных процессов во временной области, используемый, например, в программе ЕМТР.

Временной интервал разбивается на N равных шагов малой длины h . Индуктивности и емкости в цепной модели заземлителя (рис. 2, *б*) моделируются дискретными резистивными схемами с постоянными сопротивлениями и проводимостями и переменными источниками

ми ЭДС и тока, учитывающими начальные условия каждого шага (рис. 3). Расчет переходного процесса сводится к пошаговому расчету резистивных схем.

Метод Влахы [14] – численный вариант операторного метода, аналогичный методу дискретных схем, с той разницей, что параметры дискретных схем (см. рис. 3) – комплексные. Это более точный, но и более трудоемкий метод по сравнению с методом дискретных схем.

В обоих методах трудности вызывает учет частотно-зависимых сопротивлений и проводимостей. Среди известных методик расчеты на эквивалентной частоте тока молнии $f = 0,25T_1$, где T_1 – длительность фронта импульса, неточны. Замена сопротивления $z(j\omega)$ схемой замещения с близкими частотными свойствами существенно увеличивает число элементов в модели заземлителя и трудоемкость расчета. Замена частотной функции $\sigma(j\omega)$ на временную функцию $\sigma(t)$ в виде степенного ряда [15] пригодна для расчетов при нулевых начальных условиях, но ее нельзя применить в шаговых алгоритмах метода дискретных схем и метода Влахы.

Универсальная методика моделирования частотно-зависимого сопротивления $z(j\omega)$ во временной области дискретной схемой (рис. 3, *a*) разработана в работе [13]. Эта методика применима и для моделирования частотно-зависимой проводимости $y(j\omega)$ во временной области дискретной схемой (рис. 3, *б*).

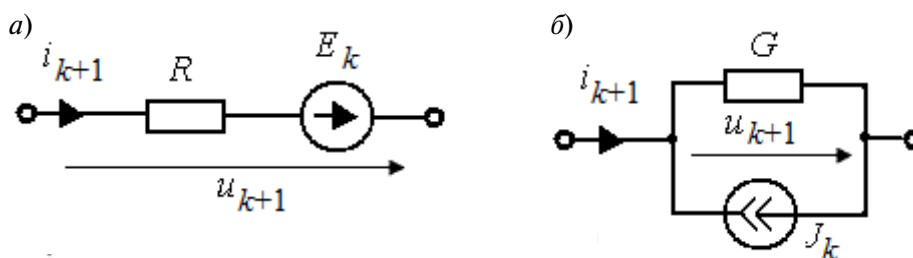


Рис. 3. Дискретная схема индуктивности (*a*) и емкости (*б*) на временном шаге k

Fig. 3. Discrete circuit of inductance (*a*) and capacitance (*б*) at time step k

Дискретная во времени модель заземлителя в грунте с частотно-зависимыми параметрами

Пусть задана комплексная проводимость $y(j\omega)$. Следуя [13], перейдем к ее операторному изображению $Y(s)$, дважды проинтегрируем в пространстве изображений и, перейдя к оригиналу, получим переходную проводимость $y(t) = L^{-1}[Y(s)/s^2]$. Величина $y(t)$ численно равна току переходного процесса при включении цепи под напряжение единичного наклона $u(t) = t$. Дискретная переходная проводимость каждого k -го шага

$$Y_k = \frac{y(kh+h) - y(kh)}{h}, \quad k = 0 - (N-1).$$

Тогда искомые параметры схемы (рис. 3, б) равны

$$G = Y_0; \quad J_0 = 0; \quad J_{k+1} = Y_0 u_{k+1} - \sum_{m=1}^k (Y_{k-m} - Y_{k-m+1}) u_m; \quad k = 0 - (N-1), \quad (4)$$

где G – проводимость; J_k – источник тока, задающий начальные условия k -го шага.

Таким образом, произвольная частотно-зависимая проводимость $y(j\omega)$ моделируется дискретной схемой (рис. 3, б) во временной области аналогично емкости.

Для реализации описанной методики удельная проводимость грунта должна быть записана в комплексной форме $\sigma(j\omega)$, как в модели Cole–Cole (1), в то время как зависимости (2), (3) этому условию не удовлетворяют.

Преобразуем модель Мессира (2):

$$\begin{aligned} \sigma(j\omega) &= \sigma(f) + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(f) = \\ &= \sigma_0 \left(1 + \sqrt{\frac{4\pi f \varepsilon}{\sigma_0}} \right) + j\omega\varepsilon_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_0}{\pi f \varepsilon}} \right), \end{aligned}$$

откуда

$$\sigma(j\omega) = \sigma_0 + j\omega\varepsilon + 2\sqrt{j\omega\varepsilon\sigma_0}, \quad (5)$$

где обозначения те же, что и в (2).

Сопоставляя (5) и (1), видим, что модель Мессира – частный случай модели Cole–Cole

при $c = 0,5$, $\eta = 1$, $\tau = 4\varepsilon/\sigma_0$, где обозначения те же, что в (1). Постоянная релаксации электролита τ здесь хорошо согласуется с постоянной времени RC цепи. Таким образом, комплексная форма записи (5) более компактна и «физична», чем оригинал (2).

Комплексная проводимость элемента заземлителя в грунте с удельной проводимостью (5) равна

$$Y(j\omega) = G + j\omega C + 2k_g \sqrt{j\omega\varepsilon\sigma_0}, \quad (6)$$

где первые два слагаемых определяют активно-емкостную проводимость заземлителя в классической модели грунта, третье слагаемое определяет увеличение проводимости с увеличением частоты. Например, для стержня длиной l , радиусом R в однородной среде

$$G = k_g \sigma_0; \quad C = k_g \varepsilon; \quad k_g = \frac{2\pi l}{\ln l / R}.$$

Элементу заземлителю с комплексной проводимостью (6) соответствует дискретная схема во временной области (рис. 4), состоящая из трех параллельных ветвей: 1) активной проводимости G ; 2) дискретной схемы (рис. 3, б) для моделирования емкости C ; 3) дискретной схемы (рис. 3, б) для моделирования третьего слагаемого (6), параметры которой найдем далее. Первые две ветви моделируют проводимость заземлителя в традиционной модели грунта, третья ветвь учитывает увеличение проводимости с увеличением частоты во временной области.

Таким образом, при переходе к модели грунта с частотно-зависимыми параметрами в дискретных схемах собственных и взаимных проводимостей элементов заземлителя появляется дополнительная параллельная ветвь (рис. 4), но поскольку проводимости и источники тока ветвей схемы суммируются, то дискретная модель заземлителя во временной области не усложняется.

Найдем параметры дискретной схемы (см. рис. 3, б) для третьего слагаемого формулы (6):

$$y(j\omega) = 2k_g \sqrt{j\omega\varepsilon\sigma_0}.$$

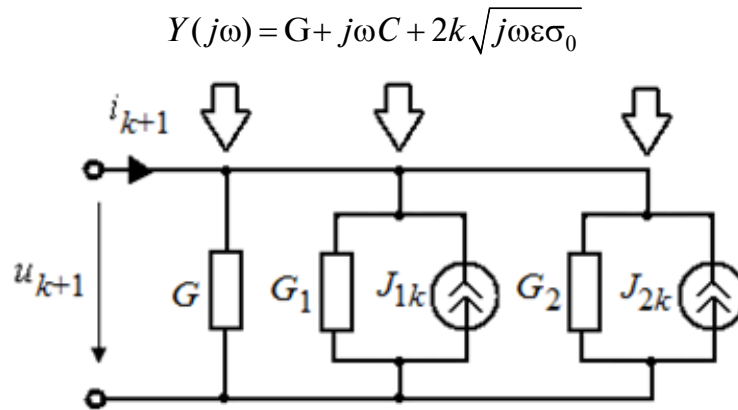


Рис. 4. Дискретная схема элемента заземлителя с частотно-зависимой проводимостью $Y(j\omega)$ на временном шаге k –

Fig. 4. Discrete circuit of the grounding system element with frequency-dependent conductance $Y(j\omega)$ at time step k

Перейдем к операторному изображению

$$y(s) = 2k_g \sqrt{s\varepsilon\sigma_0},$$

дважды проинтегрируем в пространстве изображений и, перейдя к оригиналу, получим переходную проводимость

$$y(t) = L^{-1} [y(s) / s^2] = 4k_g \sqrt{\frac{\varepsilon\sigma_0 t}{\pi}}.$$

Тогда дискретная переходная проводимость на шаге k

$$Y_k = \frac{y(kh+h) - y(kh)}{h} = 4k_g \sqrt{\frac{\varepsilon\sigma_0}{\pi h}} (\sqrt{k+1} - \sqrt{k}).$$

Она подставляется в формулы (4), которые определяют параметры дискретной схемы (рис. 3, б).

Дискретная переходная проводимость шага k по модели Алипио – Висакро (2) находится аналогично:

$$Y_k = k_g \cdot 1,46 \cdot 10^{-3} (\varepsilon\sigma_0)^{0,27} \frac{(k+1)^{0,46} - k^{0,46}}{h^{0,54}}.$$

Таким образом, параметры дискретных схем (рис. 3, б и 4) проводимостей (собственной и взаимной) элемента заземлителя в модели грунта по Мессирю и Алипио – Висакро получены. Аналогичные преобразования из час-

тотной во временную область могут быть выполнены для проводимости заземлителя в любой модели грунта с комплексной проводимостью $\sigma(j\omega)$, т. е. разработанная методика обладает общностью. Она не приводит к увеличению числа элементов цепной модели заземлителя (рис. 2, б) и трудоемкости расчета во временной области. Частотный метод, который в настоящее время считается безальтернативным для данного класса задач, таковым не является.

Результаты расчетов и верификация разработанной модели заземлителя

Найдем напряжение заземлителя (рис. 5) при воздействии импульсов тока разной длительности. Будем сопоставлять результаты в традиционной модели грунта ($\sigma = \sigma_0 = \text{const}$) и грунте с частотно-зависимой удельной проводимостью $\sigma(j\omega)$ по модели Алипио – Висакро. Расчеты выполним во временной и частотной области для верификации разработанной модели.

При переходе от модели $\sigma = \text{const}$ к модели $\sigma(j\omega)$ форма импульса напряжения заземлителя в высокоомном грунте существенно меняется (см. рис. 5). Причина в том, что в течение переходного процесса удельная проводимость уменьшается (увеличение времени эквива-

лентно уменьшению частоты, с ее снижением удельная проводимость становится меньше), поэтому фронт импульса напряжения существенно сглаживается, а точка максимума запаздывает во времени. Уровень снижения максимума напряжения зависит от длительности импульса тока.

При воздействии типичного импульса тока молнии с коротким фронтом и относительно длительным затуханием (в задаче выбран стандартный грозовой импульс) максимум импульса напряжения уменьшается на 30 % (рис. 5, а). С увеличением длительности импульса (при неизменном фронте) снижение будет меньше, а в пределе (для бесконечно длинного импульса) уменьшения максимума не происходит. Причина в том, что при сглаживании фронта импульса максимум напряжения смещается за фронт волны, но если ток к этому моменту затухает незначительно, то и снижение максимума напряжения мало.

При воздействии срезанного (короткого) импульса тока, который возникает при обратном перекрытии изоляции опоры ВЛ, происходит существенное снижение максимума напряжения (больше, чем в два раза в данной задаче), поскольку в момент максимума напряжения ток существенно затухает (рис. 5, б).

Аналогичные последствия для длинных и коротких импульсов вызывает импульсная корона проводов ВЛ. Таким образом, частотная зависимость удельной проводимости грунта – новый фактор, исключающий распространение волн с крутым фронтом в ВЛ при высокоомном грунте.

Расчеты, выполненные частотным методом и методом Влаха во временной области (см. рис. 5), хорошо согласуются (расхождение в пределах 5 %), что подтверждает достоверность разработанной дискретной во времени модели заземлителя в грунте с частотно-зависимыми параметрами.

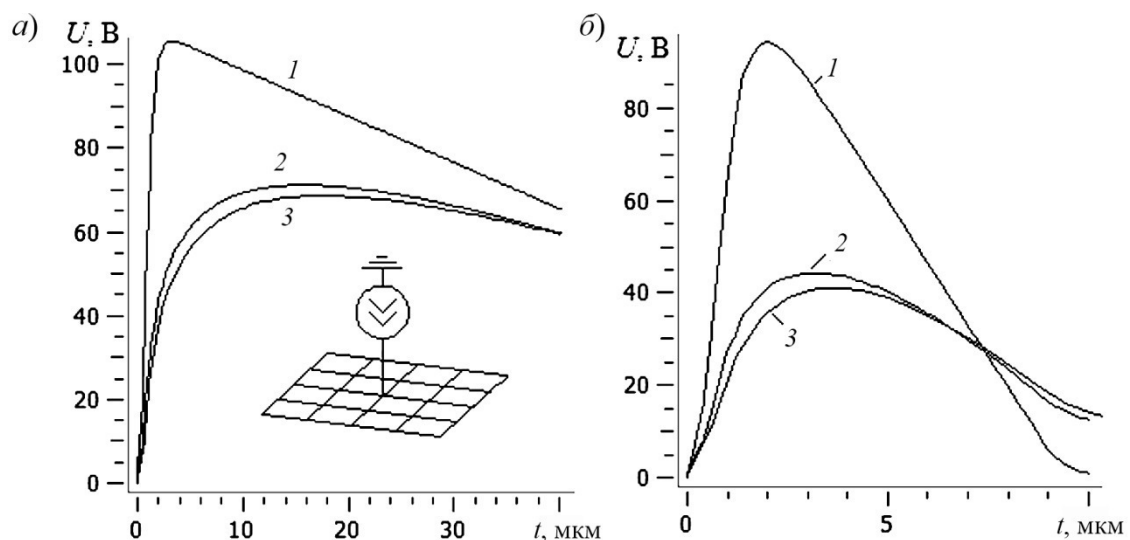


Рис. 5. Потенциал в центре заземлителя при вводе импульса тока амплитудой 1 А с линейным фронтом длительностью: 1,2/50 мкс (а) и 1/5 мкс (б), рассчитанный разными методами: 1 – при $\sigma = \sigma_0$; 2 – при $\sigma(j\omega)$ методом Влаха; 3 – при $\sigma(j\omega)$ частотным методом. Параметры заземлителя: 20×20 м; шаг сетки – 5 м; стержни стальные; $\mu_r = 200$, диаметр 20 мм; глубина погружения 1 м; параметры грунта – $\sigma_0 = 0,2$ мСм/м, $\epsilon_r = 10$

Fig. 5. Potential at the center of the grounding grid when input current impulse of 1 A amplitude with linear front of: 1,2/50 μ s (a) and 1/5 μ s (b), calculated: 1 – when $\sigma = \sigma_0$; 2 – when $\sigma(j\omega)$ using the Vlach method; 3 – when $\sigma(j\omega)$ using the Fourier method; grounding grid parameters: 20×20 m, grid step 5 m, steel rods, $\mu_r = 200$, diameter 20 mm, immersion depth 1 m; soil parameters: $\sigma_0 = 0,2$ mS/m, $\epsilon_r = 10$



Обсуждение результатов и выводы

1. Удельная проводимость грунта — комплексная величина, зависящая от частоты. Она возрастает в несколько раз с увеличением частоты от 100 Гц до 1 МГц в высокоомном грунте (скальный, вечномёрзлый), что следует учитывать при расчете заземлителей. Существующие проектные решения, полученные без учета этого фактора, могут быть неэффективными.

2. Переход к модели грунта с частотно-зависимыми параметрами не требует изменения существующей модели заземлителя при расчетах импульсных процессов частотным методом. Однако ограниченная область применения и трудности с удовлетворением принципа причинности заставляют от него отказаться.

3. Разработана дискретная (во времени) модель заземлителя в грунте с произвольной комплексной удельной проводимостью, позволяющая проводить расчеты импульсных процессов во временной области стандартным методом дискретных схем и методом Влада в точной постановке и без увеличения трудоемкости. Достоверность модели подтверждена сравнением с результатами расчета частотным методом.

4. Во временной области удельная проводимость максимальна в начале переходного процесса, далее она снижается и стремится к установившемуся значению σ_0 . Отсюда уменьшение напряжения заземлителя и сглаживание фронта импульса по сравнению с использованием классической модели грунта с постоянной удельной проводимостью.

5. Чем короче фронт и длительность импульса тока, тем больше снижение максимума напряжения заземлителя в данном грунте. Срезанные импульсы тока, вызванные обратными перекрытиями изоляции опор ВЛ, затухают в наибольшей степени. Этот новый эффект, подобный действию импульсной короны на проводах ВЛ, облегчает выбор средств защиты от грозовых перенапряжений.

6. Действующие нормативные документы по проектированию заземлителей, электромагнитной совместимости, грозозащите следует скорректировать с учетом современных данных о частотных свойствах электропроводности грунтов, оказывающие существенное влияние на параметры заземлителей в высокоомном грунте. В требования к компьютерным программам по расчету заземлителей следует включить расчеты в грунте с частотно-зависимыми параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Visacro S., Alipio R., Vale M.H.M., Pereira C.** The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency dependent soil resistivity and permittivity // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2011. Vol. 53. No. 2. P. 401–406.

2. **Alipio R., Visacro S.** Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2014. Vol. 56. No. 5. P. 1163–1171.

3. **Visacro S., Alipio R., Pereira C., Guimaraes M., Schroeder M.A.O.** Lightning response of grounding grids: Simulated and experimental results // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2015. Vol. 57. No. 1. P. 121–127.

4. **Alipio R., Visacro S.** Impulse efficiency of grounding electrodes: Effect of frequency-dependent

soil parameters // *IEEE Trans. Power Delivery*. 2014. Vol. 29. No. 2. P. 716–723.

5. **Akbari M., Sheshyekani K., Alemi M.R.** The effect of frequency dependence of soil electrical parameters on the lightning performance of grounding systems // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2013. Vol. 55. No. 4. P. 739–746.

6. **Silveira F.H., Visacro S., Alipio R., De Conti A.** Lightning-Induced Voltages Over Lossy Ground: The Effect of Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2014. Vol. 56. No. 5. P. 1129–1136.

7. **Akbari M., Sheshyekani K., Pirayesh A., Rachidi F., Paolone M., Borghetti A., Nucci C.A.** Evaluation of lightning electromagnetic fields and their induced voltages on overhead lines considering the frequency de-

pendence of soil electrical parameters // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2013. Vol. 55. No. 5. P. 1210–1219.

8. **Cavka D., Mora N., Rachidi F.** A comparison of frequency-dependent soil models: application to the analysis of grounding systems // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2014. Vol. 56. No. 2. P. 177–187.

9. **Luo S., Chen Z.** Iterative methods for extracting causal time-domain parameters // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 2005. Vol. 53. No.3. P. 969–976.

10. **Becerra J., Vega F., Rachidi F.** Extrapolation of a truncated spectrum with Hilbert transform for obtaining causal impulse responses // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2017. Vol. 59. No. 2. P. 454–460.

11. **Шишигин С.Л., Черепанов А.В., Шишигин Д.С.** Расчет заземлителей в грунте с частотно-зависимыми параметрами // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 6. С. 49–58.

12. **Матвеев Б.К.** *Электроразведка*. М.: Недра, 1990. 368 с.

13. **Шишигин С.Л.** Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // *Электротехническое*. 2010. № 1. С. 16–23.

14. **Влах И., Сингхал К.** *Машинные методы анализа и проектирования электронных схем*. М.: Радио и связь. 1988. 560 с.

15. **Alipio R., Visacro S.** Time-domain analysis of frequency-dependent electrical parameters of soil // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2017. Vol. 59. No. 3. P. 873–878.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШИШИГИН Сергей Леонидович — доктор технических наук заведующий кафедрой Вологодского государственного университета

E-mail: ctod28@yandex.ru

ЧЕРЕПАНОВ Алексей Викторович — аспирант Вологодского государственного университета

E-mail: alex1234_91@mail.ru

ШИШИГИН Дмитрий Сергеевич — кандидат технических наук преподаватель Вологодского государственного университета

E-mail: shishigind@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 09.08.2018

REFERENCES

[1] **Visacro S., Alipio R., Vale M.H.M., Pereira C.** The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency dependent soil resistivity and permittivity. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2011. Vol. 53. No. 2. P. 401–406.

[2] **Alipio R., Visacro S.** Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2014. Vol. 56. No. 5. P. 1163–1171.

[3] **Visacro S., Alipio R., Pereira C., Guimaraes M., Schroeder M.A.O.** Lightning response of grounding grids: Simulated and experimental results. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2015. Vol. 57. No. 1. P. 121–127.

[4] **Alipio R., Visacro S.** Impulse efficiency of grounding electrodes: Effect of frequency-dependent soil parameters. *IEEE Trans. Power Delivery*. 2014. Vol. 29. No. 2. P. 716–723.

[5] **Akbari M., Sheshyekani K., Alemi M.R.** The effect of frequency dependence of soil electrical parameters on the lightning performance of grounding systems. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2013. Vol. 55. No. 4. P. 739–746.

[6] **Silveira F.H., Visacro S., Alipio R., De Conti A.** Lightning-Induced Voltages Over Lossy Ground: The Effect of Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2014. Vol. 56. No. 5. P. 1129–1136.

[7] **Akbari M., Sheshyekani K., Pirayesh A., Rachidi F., Paolone M., Borghetti A., Nucci C.A.** Evaluation of lightning electromagnetic fields and their induced voltages on overhead lines considering the frequency dependence of soil electrical parameters. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2013. Vol. 55. No. 5. P. 1210–1219.

[8] **Cavka D., Mora N., Rachidi F.** A comparison of frequency-dependent soil models: application to the



analysis of grounding systems. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2014. Vol. 56. No. 2. P. 177–187.

[9] **Luo S., Chen Z.** Iterative methods for extracting causal time-domain parameters. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 2005. Vol. 53. No.3. P. 969–976.

[10] **Becerra J., Vega F., Rachidi F.** Extrapolation of a truncated spectrum with Hilbert transform for obtaining causal impulse responses. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2017. Vol. 59. No. 2. P. 454–460.

[11] **Shishigin S.L., Cherepanov A.V., Shishigin D.S.** Raschet zazemlitley v grunte s chastotno-zavisimymi parametrami [Grounding systems calculation in soil with frequency-dependent parameters]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2018. № 6. S. 49–58. (rus.)

[12] **Matveyev B.K.** Elektrorazvedka [Electrical exploration]. M.: Nedra, 1990. 368 s. (rus.)

[13] **Shishigin S.L.** Matematicheskiye modeli i metody rascheta zazemlyayushchikh ustroystv [Mathematical models and calculation methods of grounding devices]. *Elektrichestvo*. 2010. № 1. S. 16–23. (rus.)

[14] **Vlakh I., Singkhal K.** Mashinnyye metody analiza i proyektirovaniya elektronnykh skhem [Machine methods of analysis and electronic circuits design]. M.: Radio i svyaz. 1988. 560 s. (rus.)

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

THE AUTHORS

SHISHIGIN Sergei L. – *Vologda state university*

E-mail: ctod28@yandex.ru

CHEREPANOV Aleksei V. – *Vologda state university*

E-mail: alex1234_91@mail.ru

SHISHIGIN Dmitrii S. – *Vologda state university*

E-mail: shishigind@yandex.ru

Received: 09.08.2018