

С.Л. Шишигин, Д.С. Шишигин, И.Н. Смирнов

РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ МОЛНИЕЗАЩИТЫ С УЧЕТОМ ИОНИЗАЦИИ И ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТА

ВВЕДЕНИЕ

Ионизация и частотные свойства грунта – два взаимосвязанных фактора, существенно влияющих на импульсное сопротивление заземлителей в высокоомном грунте. Действительно, в экспериментальных исследованиях с заземлителями при ионизации высокоомного грунта наблюдалось снижение импульсного сопротивления более десяти раз [1]. Удельная проводимость высокоомного грунта возрастает в несколько раз с увеличением частоты от 100 Гц (в стационарном режиме) до 1 МГц (в импульсном режиме) [2]. Без учета этих факторов (как в настоящее время) трудно ожидать от проектировщиков оптимальных технико-экономических решений по защите ВЛ и ПС от последствий удара молнии.

Расчет простых заземлителей при ионизации грунта производится аналитически по формуле СИГРЭ или расчетным выражениям [3,4], однако они не учитывают частотные свойства высокоомного грунта.

При численных расчетах зона ионизации (в предположении идеальной проводимости) моделируется увеличением размеров заземлителя (радиуса и длины стержней) пропорционально стекающему току. В другом варианте размеры зоны ионизации, достигнув максимального значения на фронте импульса, не уменьшаются на спаде тока за счет энергии, запасенной на фронте импульса [1]. В альтернативной модели зона ионизации обладает конечной проводимостью, которая изменяется с запаздыванием во времени по сравнению с изменением тока [5]. Проблема в том, что существующие модели носят частный характер, поскольку дают хорошее совпадение с экспериментальными данными в одних задачах, но неточны в других.

Расчеты импульсных процессов в грунте с нелинейными и частотно-зависимыми характеристиками представляют значительные сложности. Расчеты проводятся во временной области (как и всех нелинейных задач), проблему вызывает моделирование частотно-зависимых сопротивлений заземлителя. Замена каждого частотно-зависимого сопротивления эквивалентной RLC– схемой, что делается в настоящее время, в несколько раз увеличивает число узлов цепной схемы заземлителя, поэтому позволяет решать только простейшие задачи.

Развитие моделей и методов расчета заземлителей в грунте с частотно-зависимыми и токо-зависимыми параметрами, подтверждение их адекватности при сравнении с известными экспериментальными данными, а также оценка влияния ионизации и частотных свойств высокоомного грунта на параметры заземлителей ВЛ и ПС – **цель настоящей работы.**

1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

1.1. ФОРМУЛА СИГРЭ

Сопротивление полусферического заземлителя при ионизации грунта может быть получено аналитически

$$R(I) = \frac{R_0}{\sqrt{I/I_c}}, I > I_c = \frac{\rho E_c}{2\pi R_0^2}, \quad (1)$$

где R_0 – стационарное сопротивление, I – ток заземлителя, I_c – критический ток (начала разряда) при критической напряженности электрического поля E_c , ρ – удельное сопротивление грунта.

Аналитические выражения получены и для стержневых заземлителей [3,4], но они значительно сложнее и не нашли широкого применения. Развитие получила следующая идея.

Сопротивление заземлителя в (1) зависит от стационарного сопротивления и тока, но в явном виде не зависит от типа заземлителя, т.е. формула (1) формально применима и к стержневому заземлителю, что приводит к формуле СИГРЭ

$$R(I) = \frac{R_0}{\sqrt{1+I/I_c}}, I_c = \frac{\rho E_c}{2\pi R_0^2}, I > \frac{E_c 2\pi a_0 l}{\rho}, \quad (2)$$

где единица – эмпирический поправочный коэффициент, a_0 – радиус стержня, l – длина стержня, R_0 – стационарное сопротивление стержня, I_c – критический ток полусферического заземлителя (со стационарным сопротивлением R_0).

1.2. ФОРМУЛА СИГРЭ В ВЫСОКООМНОМ ГРУНТЕ

Применение формулы СИГРЭ в высокоомном грунте, удельное сопротивление которого в начале переходного процесса существенно меньше, чем в установившемся режиме, приводит к завышенным значениям импульсного сопротивления. Использование мгновенного сопротивления $r(t)=u(t)/i(t)$ вместо стационарного сопротивления R_0 в (2) более обосновано.

Мгновенное сопротивление эквипотенциального заземлителя в грунте с частотно-зависимыми параметрами при воздействии стандартизированного импульса единичного наклона $i(t)=t$ равно [6]

$$r(t) = R_0 k(t), k(t) = \frac{1}{1 + 3.2(\varepsilon\rho/t)^{0.56}}, t > 0. \quad (3)$$

С учетом (3) модифицированный вариант формулы СИГРЭ, учитывающий частотные свойства грунта, имеет вид

$$R_f(t) = \frac{R_0 k(t)}{\sqrt{1 + I(t)/I_c}}, t > 0. \quad (4)$$

Таким образом, сопротивление заземлителя изменяется во времени как за счет изменения тока, так и электропроводности грунта.

1.3. ФОРМУЛА СИГРЭ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

В работе [5] запаздывание процессов ионизации грунта достигается за счет плавного изменения удельного сопротивления грунта при изменении тока. Тот же эффект достигается, если вместо удельного сопротивления оперировать сопротивлением заземлителя.

На фронте импульса зона ионизации расширяется, что приводит к уменьшению сопротивления заземлителя. Примем, что этот процесс происходит с запаздыванием

$$R(t) = R_f(t) + (R_0 - R_f(t))e^{-(t-t_0)/\tau_1}, \quad (5)$$

где $R_f(t)$ – определено в (4), τ_1 – постоянная времени, t_0 – время начала ионизации. Минимальное сопротивление R_{min} имеет место в момент времени $t_{min}=T$ при $\tau_1=0$ и $t_{min}>T$ при $\tau_1>0$, где T – длительность фронта импульса.

На спаде тока зона ионизации сужается, что приводит к увеличению сопротивления заземлителя. Примем, что этот процесс происходит с запаздыванием

$$R(t) = R_f(t) + (R_{min} - R_f(t))e^{-(t-t_{min})/\tau_2}, \quad (6)$$

где τ_2 – постоянная времени.

Формулы (4)-(6) составляют модифицированную формулу СИГРЭ, которая дает сопротивление заземлителя с учетом частотных свойств и запаздывания процессов ионизации грунта.

Постоянные времени в (5),(6) определим далее при сравнении с экспериментальными данными.

2. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

2.1. МОДЕЛЬ СТЕРЖНЕВОГО ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ ПРИ ИОНИЗАЦИИ ГРУНТА

Рассмотрим вертикальный стержень длиной l . Зона ионизации состоит из цилиндрического участка длиной l радиуса a и полусферического окончания радиуса a (рис.1а).

Пусть ток растекается равномерно по длине стержня. Тогда напряженность электрического поля на границе проводника

$$E(a) = \rho J = \frac{\rho I}{2\pi l a + 2\pi a^2} = \frac{\rho I}{2\pi a(l + a)}, \quad (7)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, I – стекающий ток.

Радиус зоны ионизации a определяется из условия $E(a) = E_c$, где $E(a)$ определено в (7), E_c – критическая напряженность.

Напряженность (7) совпадает с напряженностью на поверхности стержня радиусом a длиной $L = l + a$ (без полусферического окончания), что позволяет упростить модель.

Таким образом, зона ионизации грунта моделируется стержнем увеличенного радиуса

a и увеличенной длины: $L = l + a$ для вертикального стержня с нулевой глубиной погружения и $L = l + 2a$ для одиночного стержня в остальных случаях.

При численных расчетах стержни дробятся на элементы малой длины, стекающие токи которых различны, что приводит к разным радиусам элементов (рис.1b).

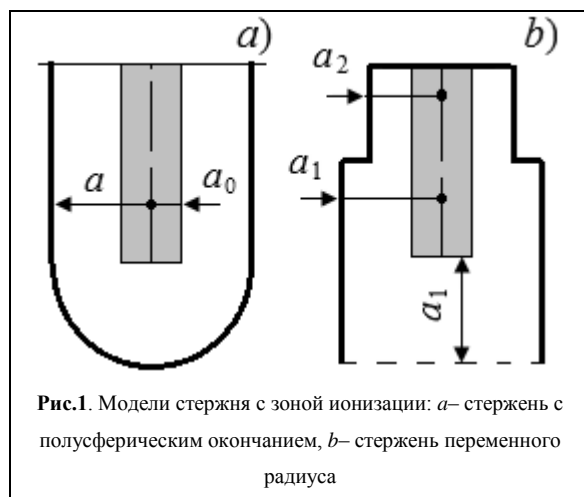


Рис.1. Модели стержня с зоной ионизации: а– стержень с полусферическим окончанием, б– стержень переменного радиуса

2.2. ЦЕПНАЯ МОДЕЛЬ ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ ПРИ ИОНИЗАЦИИ ГРУНТА

Каждый элемент стержня (рис.1b) моделируется П-четырёхполосником, что приводит к многозвенной цепной схеме (рис.2), где Z – вектор внутренних сопротивлений элементов, M – матрица внешнего индуктивного

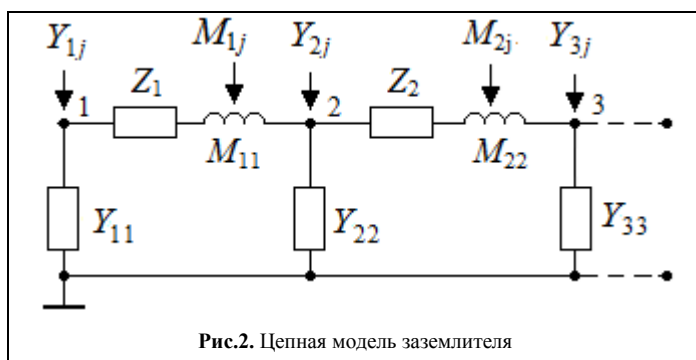


Рис.2. Цепная модель заземлителя

сопротивления, $Y = R^{-1}$ – матрица проводимости растекания (получается обращением матрицы сопротивлений растекания тока) [7]. В грунте с частотно-зависимыми параметрами элементы матрицы R зависят от частоты.

Проблема в том, что стандартные формулы расчета сопротивлений заземлителей получены в модели тонкого стержня, которая не является адекватной при ионизации грунта, поскольку эквивалентный радиус стержня уже соизмерим с его длиной. Для

расчета собственных сопротивлений стержней мы будем опираться на метод интегральных уравнений

$$R = \frac{\rho}{2\pi l a} 2 \int_0^{0.5l} \frac{a}{\pi \sqrt{4a^2 + x^2}} K(k) dx,$$

где $K(k)$ – эллиптический интеграл первого рода, k – модуль эллиптических интегралов.

Взаимные сопротивления стержней, как показали расчеты, могут быть найдены по стандартным формулам для тонкого проводника без заметной потери точности.

2.3. ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЧАСТОТНО И ТОКО-ЗАВИСИМОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Расчет переходных процессов в цепной схеме (рис.2) производится методом дискретных схем, параметры которых (рис.3) получают интегрированием дифференциальных уравнений индуктивностей и емкостей по формуле трапеций

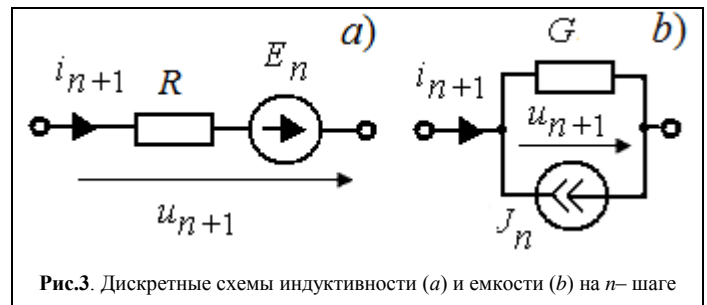


Рис.3. Дискретные схемы индуктивности (a) и емкости (b) на n - шаге

$$u = L \frac{di}{dt} \Rightarrow \frac{u_{n+1} + u_n}{2} = L \frac{i_{n+1} - i_n}{h} \Rightarrow u_{n+1} = \frac{2L}{h} i_{n+1} - \left(u_n + \frac{2L}{h} i_n \right) = R i_{n+1} - E_n,$$

$$i = C \frac{du}{dt} \Rightarrow \frac{i_{n+1} + i_n}{2} = C \frac{u_{n+1} - u_n}{h} \Rightarrow i_{n+1} = \frac{2C}{h} u_{n+1} - \left(i_n + \frac{2C}{h} u_n \right) = G_0 u_{n+1} - J_n,$$

где n – номер шага длиной h .

Проводимость заземлителя в грунте с частотно-зависимыми параметрами $Y(j\omega)$ моделируется дискретной схемой (рис.3b) с параметрами [7,8]

$$G = G_0, J_n = \sum_{m=1}^n (G_{n-m} - G_{n-m+1}) u_m, \quad (8)$$

где G_n – дискретная переходная проводимость n – шага (численно равна току при включении цепи под единичное постоянное напряжение в момент времени t_n).

Определение G_n происходит в следующей последовательности

$$Y(j\omega) \rightarrow Y(s) \rightarrow y(t) = L^{-1} \left[Y(s) / s^2 \right] \rightarrow G_0 = \frac{y(h)}{h}, G_n = \frac{y(t_{n+1}) - y(t_n)}{h}. \quad (9)$$

При ионизации грунта дискретные проводимости становятся нелинейными функциями тока, поэтому рассмотренная методика подлежит корректировке.

Будем аппроксимировать нелинейную зависимость $G(i)$ кусочно-постоянной функцией $G_n = \text{const}$. Задача становится линейной на каждом шаге, что дает основание для использования (8) с изменениями

$$G = G_0(i_n), J_n = \sum_{m=1}^n [G_{n-m}(i_{m-1}) - G_{n-m+1}(i_{m-1})] u_m. \quad (10)$$

Таким образом, ток каждого временного узла зависит от приложенного напряжения, дискретных проводимостей, учитывающих частотные свойства грунта, и токов, определяющих изменение радиуса зоны ионизации, во все предыдущие моменты времени.

2.4. УЧЕТ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ИОНИЗАЦИИ ГРУНТА

Запаздывание процессов ионизации грунта будем моделировать запаздыванием изменения радиуса зоны ионизации (эквивалентного радиуса заземлителя).

Радиус зоны ионизации на фронте импульса тока

$$a' = a + (a_0 - a) e^{-(t-t_0)/\tau_1}, \quad (11)$$

где τ_1 – постоянная времени, t_0 – время начала ионизации, a_0 – радиус стержня, a – радиус зоны ионизации без учета запаздывания.

Максимальный радиус зоны ионизации a_{\max} имеет место в момент максимума тока при $\tau_1=0$ или позднее при $\tau_1>0$. Этот момент времени обозначим t_{\max} .

Радиус зоны ионизации на спаде тока

$$a' = a + (a_{\max} - a) e^{-(t-t_{\max})/\tau_2}, \quad (12)$$

где τ_2 – постоянная времени.

При $\tau_2=0$ имеем стандартный вариант реализации модели заземлителя увеличенных размеров, когда радиус уменьшается пропорционально току. При $\tau_2=\infty$ максимальный радиус зоны ионизации не уменьшается на спаде тока, аналогично работе [1]. В остальных случаях имеем линейную комбинацию двух крайних вариантов.

Постоянные времени τ_1 и τ_2 в (11), (12) найдем далее при сравнении с экспериментальными данными.

3. РЕШЕНИЕ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Выполним решение задач по расчету заземлителей в ионизированном грунте, для которых известны экспериментальные данные.

Расчеты проводим аналитически – по модифицированной формуле СИГРЭ (эти результаты будут отображены на графиках) и численно – по модели заземлителя увеличенных размеров методом дискретных схем в компьютерной программе ZYM [7].

Будем описывать заземлитель импульсным сопротивлением – отношением максимума напряжения к максимуму тока импульса $Z = \max u(t) / \max i(t)$ и мгновенным сопротивлением $r(t) = u(t) / i(t)$.

Задача 1. А.Н. Данилин [9]. В сферический заземлитель диаметром $d=140$ мм, погруженный наполовину в грунт с удельным сопротивлением $\rho=1200$ Ом·м, вводятся импульсы напряжения до 300 кВ с фронтом менее 1 мкс (рис.4).

Расчеты по модифицированной формуле СИГРЭ с параметрами (Таблица) хорошо согласуются с экспериментом (рис.4).

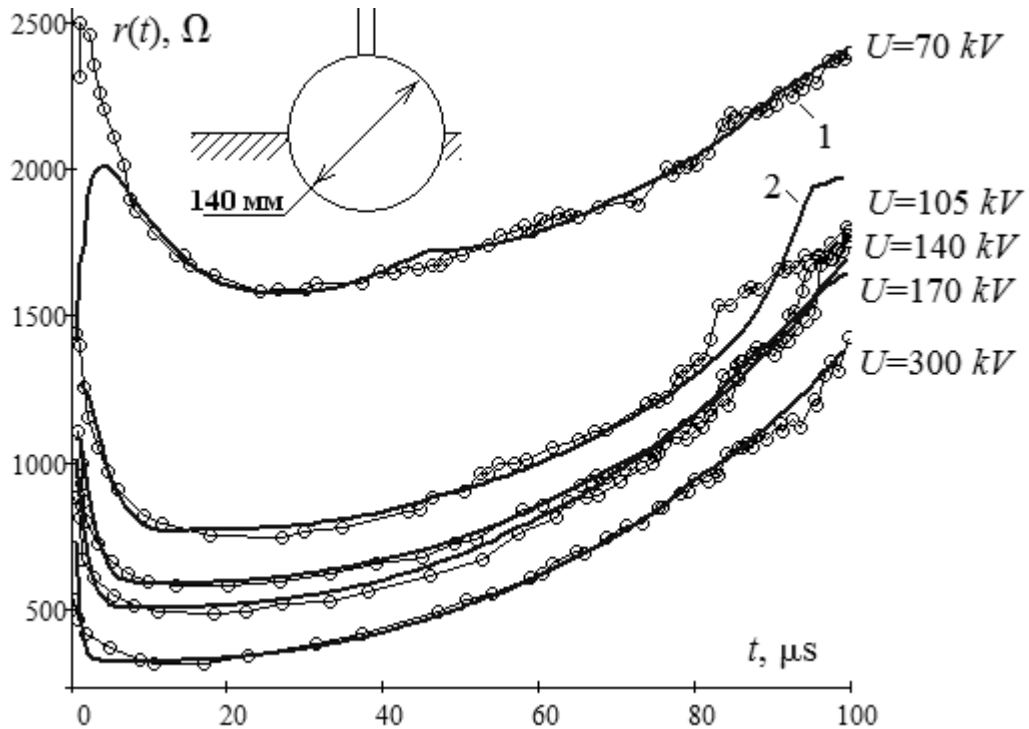


Рис.4. Сопротивление полусферического заземлителя при импульсах напряжения амплитудой U : 1– эксперимент [9], 2– расчет

Задача 2, А.Н. Данилин [9]. Вертикальный стержень диаметром $d=3.5$ мм, длиной $l=150$ мм расположен в грунте с удельным сопротивлением $\rho=1200$ Ом·м. В стержень вводится импульс напряжения амплитудой 300 кВ.

Стационарное сопротивление заземлителя равно

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} [\ln(4l/d) - 0.307] = 6160 \text{ Ом.}$$

Расчеты с параметрами (Таблица) хорошо согласуются с экспериментом за исключением начальных точек (рис.5). Причина – шунтирующая емкость шин и генератора, которая способна существенно снизить перенапряжение в начальный момент времени при коротких импульсах (в экспериментах фронт импульса менее 1 мкс).

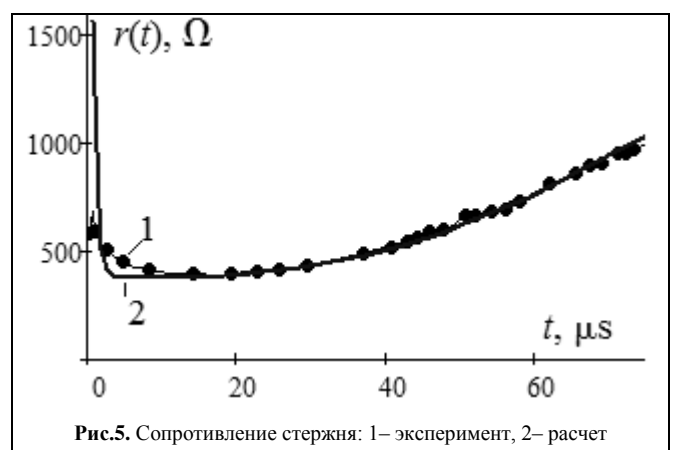


Рис.5. Сопротивление стержня: 1– эксперимент, 2– расчет

Задача 3, S. Sekioka [1]. Вертикальный стержень длиной $l=1.5$ м, радиусом $a=7$ мм имеет стационарное сопротивление $R_0=610$ Ом, откуда удельное сопротивление грунта на низкой частоте $\rho=1000$ Ом·м. Критическая напряженность равна $E_c=300$ кВ/м.

Частотные свойства грунта проявляются в снижении удельного сопротивления в начальные моменты времени, поэтому импульсное сопротивление заземлителя при малом токе (335 Ом) существенно меньше стационарного сопротивления (610 Ом). Этот эффект корректно учитывается в модифицированной формуле СИГРЭ, что подтверждается совпадением результатов расчета импульсного сопротивления стержня с экспериментом (рис.6).

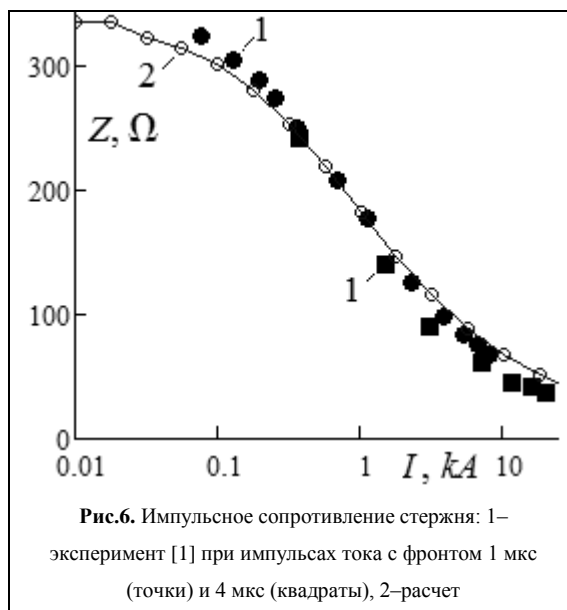


Рис.6. Импульсное сопротивление стержня: 1– эксперимент [1] при импульсах тока с фронтом 1 мкс (точки) и 4 мкс (квадраты), 2–расчет

Таблица. Результаты расчетов заземлителей

Задача	ρ , Ом·м	U_m , кВ	E_c , кВ/м	R_0 , Ом	Z , Ом	$\alpha = Z/R_0$	τ_1 , мкс	τ_2 , мкс		
Сферический заземлитель										
1	1200	300	400	2730	316	0.116	0.5	110		
	1200	170	380	2730	485	0.178	1	90		
	1200	140	360	2730	576	0.211	1.5	85		
	1200	110	350	2730	745	0.273	2.5	75		
	1200	70	400	2730	1580	0.58	12	0		
Стержневой заземлитель										
2	1200	300	450	6160	400	0.064	1	2*	100	50*

*– результаты численных расчетов.

3.3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕШЕНИЯ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ

Проанализируем результаты расчета заземлителей в высокоомном грунте (Таблица), а также не вошедшие в статью (но рассматриваемые в докладе) задачи (Bellaschi, Geri, Sekioka, Данилина, исследователей из Сарова) в низкоомном грунте.

Критическая напряженность грунта является основным параметром, определяющим ионизацию грунта. Выбор $E_c=300-400$ кВ/м согласно [11] и рекомендациям СИГРЭ согласуется с экспериментальными данными (Таблица).

Постоянная времени τ_1 (5), (11) определяет запаздывание процесса ионизации грунта, аналогично модели Liew [5]. Наблюдается, корреляция между постоянной времени τ_1 и напряжением импульса – с увеличением напряжения постоянная τ_1 уменьшается, а при $U>300$ кВ близка к нулю. При проектировании заземлителей ПС и ВЛ (с

нормативными токами молнии 100-200 кА) напряжение заземлителя существенно превышает 300 кВ, тогда можно принять $\tau_1=0$.

Постоянная τ_2 (6), (12) определяет длительность восстановления исходной электропроводности грунта в зоне ионизации после прекращения тока. Наблюдается корреляция между постоянной τ_2 и импульсным коэффициентом $\alpha = Z/R_0$ (отношение импульсного сопротивления к стационарному сопротивлению). При малом импульсном коэффициенте, что означает достаточно большие запасы энергии в искровых каналах для поддержания разрядных процессов на спаде импульса, величина постоянной τ_2 составляет десятки и сотни мкс. Вариант с $\tau_2=\infty$ [1] адекватен в данном случае. При большом импульсном коэффициенте $\alpha > 0.5$, что свидетельствует о малых запасах энергии, постоянная τ_2 близка к нулю. В практических задачах двукратное снижение сопротивления из-за ионизации грунта возникает редко, поэтому в большинстве случаев $\alpha > 0.5$ и можно принять $\tau_2=0$.

Таким образом, стандартный вариант реализации модели заземлителя увеличенных размеров при $\tau_1=0$, $\tau_2=0$, когда изменение размеров заземлителя пропорционально току, можно рекомендовать при проектировании заземлителей ВЛ и ПС.

4. РЕШЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Задача 1. В угол заземляющего контура размером 50x50 м с глубиной погружения 1 м вводится импульс тока с амплитудой 100 кА и линейным фронтом длительностью 10/350 мкс. Выясним, как влияет ионизация и частотные свойства грунта на перенапряжение заземлителя в грунтах с разным удельным сопротивлением.

Для заземлителя в грунте с удельным сопротивлением $\rho=2000$ Ом·м рассчитаны входные напряжения без учета и с учетом частотных свойств и ионизации грунта в течение всего периода наблюдений (рис.7а). Для количественной оценки влияния каждого фактора в снижение перенапряжений (по отдельности и совместно) построены графики относительных величин для момента времени $t=10$ мкс (рис.7б).

Установлено (рис.7б), что ионизация грунта является основным фактором снижения перенапряжений при $\rho < 2000$ Ом·м. При $\rho > 2000$ Ом·м уже частотные свойства грунта становятся главным фактором снижения перенапряжений. Совместный учет частотных свойств и ионизации грунта приводит к двукратному и более снижению перенапряжения при $\rho > 4000$ Ом·м.

Таким образом, с учетом ионизации и частотных свойств грунта уровень перенапряжений снижается и тем больше, чем выше удельное сопротивление грунта. Типовой подход к решению данной задачи в высокоомном грунте ($\rho > 1000$ Ом·м) без учета этих двух факторов недопустим.

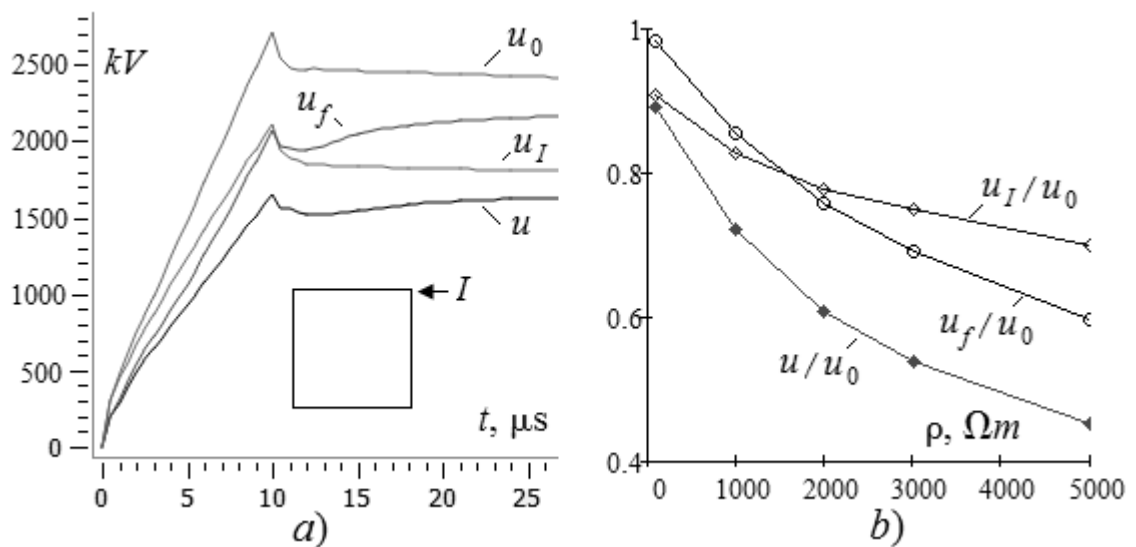


Рис.7. Напряжение заземлителя: u_0 – без учета частотных свойств и ионизации грунта, u_f – с учетом частотных свойств грунта, u_I – с учетом ионизации грунта, u – с учетом частотных свойств и ионизации грунта при а) $\rho=2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, б) $\rho=\text{var}$, $E_c=300 \text{ кВ/м}$

Задача 2. В угол заземляющей сетки (рис.8), расположенной на глубине 1 м в грунте с удельным сопротивлением $\rho=2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, вводится импульс тока амплитудой 100 кА с линейным фронтом длительностью 10/350 мкс. Выясним, как влияет ионизация и частотные свойства грунта на перенапряжение сеток разных размеров.

С увеличением размеров заземлителя плотность стекающего тока уменьшается, что существенно снижает влияние ионизации грунта на напряжение заземлителя (рис.8). Для сетки 100x100 м снижение напряжения – менее 5%, для сетки 50x50 м – 10%. В первом случае ионизация грунта практически не влияет на параметры заземлителя, во втором случае и для заземлителей меньших размеров ионизацию грунта следует учитывать при проектировании заземлителей. Снижение напряжения за счет частотных свойств грунта является существенным (20-25%) независимо от размеров заземлителя.

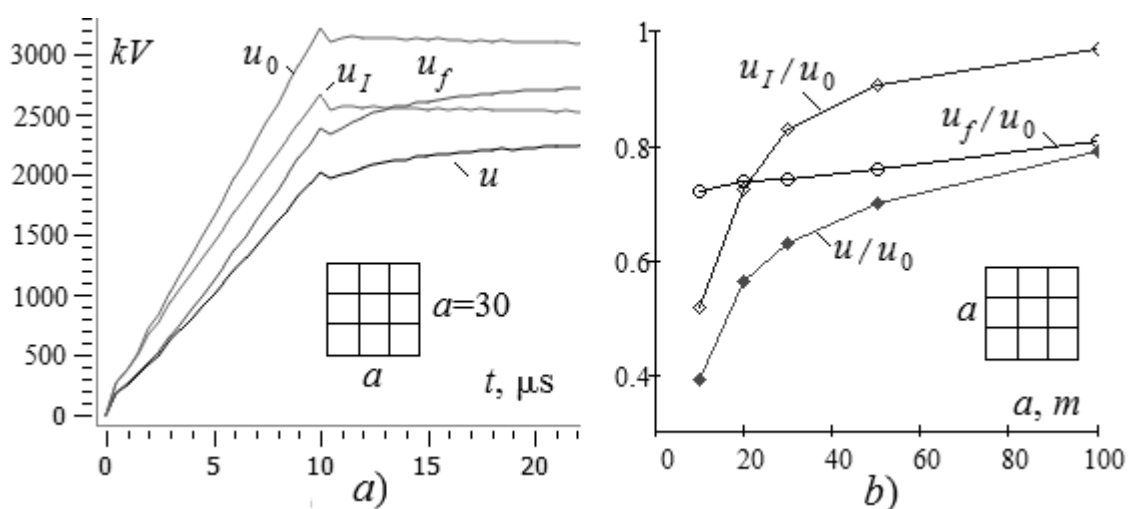


Рис.8. Напряжение заземлителя: u_0 – без учета частотных свойств и ионизации грунта, u_f – с учетом частотных свойств грунта, u_I – с учетом ионизации грунта, u – с учетом частотных свойств и ионизации грунта; в функции: а) времени, б) размера сетки при $t=10 \text{ мкс}$; $E_c=300 \text{ кВ/м}$, размер ячейки 10 м

Задача 3. В опору ВЛ вводится импульс тока амплитудой 100 кА с линейным фронтом длительностью 10/350 мкс (рис.9а). Заземлитель опоры представлен фундаментами и четырьмя горизонтальными стержнями диаметром 20 мм, длиной 20 м, заглубленными на 1 м. Выясним, как влияет ионизация и частотные свойства грунта на перенапряжение опоры с грозозащитным тросом и без него при удельном сопротивлении грунта $\rho=1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Для опоры без троса снижение напряжения в конце фронта импульса составляет: $u_f / u_0=0.85$ – за счет частотных свойств грунта, $u_I / u_0=0.68$ – за счет ионизации грунта, $u / u_0=0.6$ – за счет частотных свойств и ионизации грунта совместно (рис.9b).

При наличии грозозащитного троса 20% тока молнии ответвляется в соседние опоры (в расчетной модели по три опоры с каждой стороны через 300 м). Влияние частотных свойств и ионизации грунта несколько уменьшается (по сравнению с опорой без троса), но остается существенным: $u_f / u_0=0.89$, $u_I / u_0=0.76$, $u / u_0=0.69$ (рис.9c).

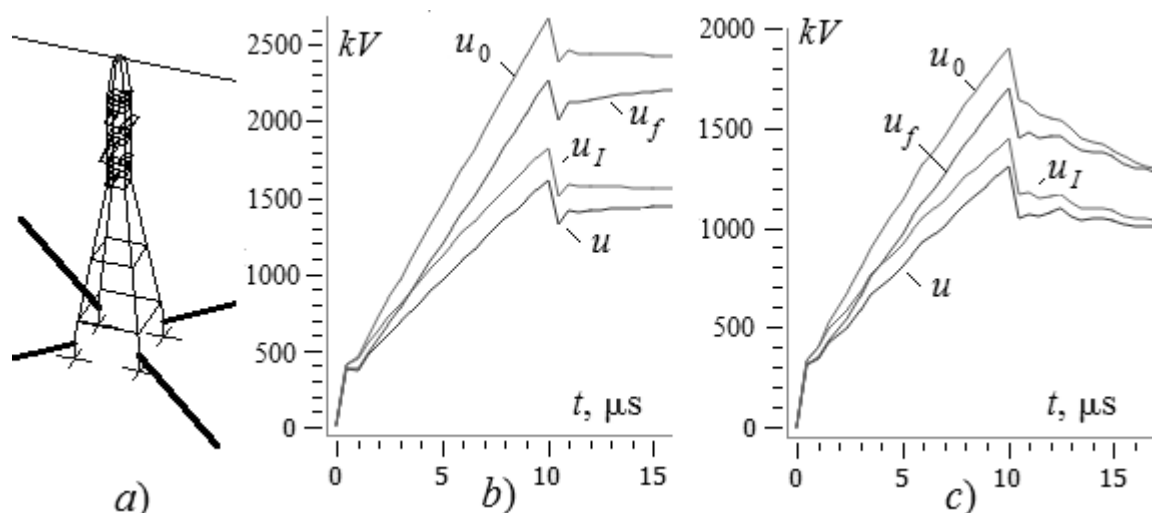


Рис.9. Расчетная модель (а) и напряжение опоры без троса (b), напряжение опоры с тросом (с): u_f – с учетом частотных свойств грунта, u_I – с учетом ионизации грунта, u – с учетом частотных свойств и ионизации грунта; $E_c=300 \text{ кВ/м}$

ВЫВОДЫ

Современный подход к расчету заземлителей молниезащиты предполагает учет частотных и нелинейных характеристик грунта, заданных одновременно.

Для инженерных расчетов простых заземлителей в ионизированном грунте применяется формула СИГРЭ, модифицированный вариант которой применим для заземлителей в высокоомном грунте.

При численных расчетах ионизация грунта моделируется увеличением размеров заземлителей (радиуса и длины стержней). Развитие данной модели заключается в учете запаздывания ионизационных процессов и повышении точности расчета проводников большого диаметра.

Выполнен расчет типовых заземлителей ВЛ и ПС. Определены уровни снижения перенапряжений при учете частотных свойств и ионизации грунта. Показано, что с этими факторами следует считаться при проектировании заземлителей в высокоомном грунте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sekioka S., Lorentzou M. I., Philippakou M. P., Prousalidis J. M. Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization. *IEEE Trans. Power Del.*, 2006, vol. 21, no. 1, P. 194–201.
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. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. М.: Энергия, 1978. – 224 с.
4. Анненков В. З. Искрообразование в земле вокруг заземлителей молниезащиты // *Электричество*. 1993. № 12. С.15-20.
5. Liew A. C., Darveniza M. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1974. Vol. 121, No. 2. P. 123–135.
6. Шишигин С.Л., Черепанов А.В., Шишигин Д.С. Импульсный метод измерения сопротивления заземлителей // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2019. Т. 25, № 2. С. 30–41.
7. Шишигин С.Л., Шишигин Д.С. Расчет заземлителей (монография).– Вологда: ВоГУ, 2020. – 219 с.
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. Данилин А.Н., Ивонин В.В. Экспериментальные исследования импульсных характеристик сосредоточенных заземлителей // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2014. № 3 (22). С. 27-32.
10. Данилин А.Н., Ивонин В.В. Зондовые измерения процессов растекания импульсных токов в увлажненном грунте // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2014. № 7 (26). С. 31-35.
11. Mousa A. M. The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes. *IEEE Trans. Power Delivery*, 1994, vol. 9, no. 3, P. 1669-1677.