

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst681998>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© И.М. Карпова

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ СВОЙСТВ ГРУНТА

Цель. Разработка модели расчета сопротивления заземлителей с учетом нелинейных свойств грунта при различных внешних воздействиях, в том числе ударах молнии.

Материалы и методы. Для построения модели использован пакет ELCUT 6.5, позволяющий реализовать связанную нестационарную модель растекания тока и теплопередачи. Рассмотрено применение модели для решения трех задач исследования сопротивления одиночного вертикального заземлителя – в однородном грунте при действии грозового импульса, с учетом фундамента опор в неоднородном грунте и с учетом влияния температуры и влажности в однослойном грунте.

Результаты. Разработанная модель позволяет учесть все влияющие на удельное сопротивление грунта факторы и рассчитать значения сопротивления заземляющего устройства с их учетом. Результаты моделирования получили подтверждение при сопоставлении с работами других авторов.

Ключевые слова: система грозозащиты; заземляющее устройство; сопротивление растеканию тока; моделирование; ELCUT.

Как цитировать:

Карпова И.М. Исследование сопротивления заземлителей с учетом нелинейности свойств грунта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 230–245. doi: 10.17816/transsyst681998

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© **I.M. Karpova**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

GROUNDING RESISTANCE: A STUDY BASED ON NONLINEARITY OF SOIL PROPERTIES

AIM. To develop a model to calculate the resistance of ground electrodes based on nonlinear soil properties under various external influences, including lightning strikes.

MATERIALS AND METHODS. ELCUT 6.5 software was used to build the model as it allows to implement a coupled, non-stationary current spreading and heat transfer model. The authors discuss the use of the model to solve three problems of the resistance of a single vertical ground electrode; in homogeneous soil under the influence of a lightning impulse, tower footing in heterogeneous soil, and temperature and humidity in single-layer soil.

RESULTS. The developed model allows to consider all factors influencing the specific soil resistance and calculate the resistance of the grounding device based on them. Modeling outputs were confirmed by comparing with the papers of other authors.

Keywords: lightning protection system; grounding device; current spreading resistance; modeling; ELCUT.

To cite this paper:

Karpova IM. Grounding Resistance: A Study Based on Nonlinearity of Soil Properties. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):230–245. doi: 10.17816/transsyst681998

ВВЕДЕНИЕ

Заземляющие устройства (ЗУ) являются одним из важнейших элементов энергетических систем и оборудования высокого напряжения. Правильно выбранное заземляющее устройство обеспечивает надежность работы электрооборудования не только в номинальном режиме, но и обеспечивает защиту при аварийных режимах, в частности, от грозовых перенапряжений.

В задачах грозозащиты величина сопротивления заземлителей опор линий электропередачи в значительной мере определяет надежность работы энергосистемы [1, 2]. Это связано с тем, что в силу своей протяженности воздушные линии электропередачи наиболее часто подвергаются воздействию атмосферных перенапряжений.

Основными источниками грозовых перенапряжений на изоляции линии являются попадание прямых разрядов в фазный провод, в опору или трос вблизи опоры, а также индуктированные перенапряжения вследствие удара молнии в землю вблизи линии [3]. Индуктированные перенапряжения на проводах линии могут достигать опасных значений лишь в линиях классов 6–35 кВ и в данной работе рассматриваться не будут.

Импульсный ток, образованный в результате прямого удара молнии в заземленную опору линии, создает падение напряжения в сопротивлении заземления, которое полностью приложено к изоляции и представляет для нее наибольшую опасность. Величина падения напряжения помимо параметров разряда молнии определяется значением сопротивления заземления.

Удар молнии в вершину опоры линии или в трос вблизи опоры также является источником перенапряжения, которое может привести к отключению линии. Согласно [3] потенциал на вершине опоры определяется падением напряжения на сопротивлении заземления u_R , падением напряжения на теле опоры u_Z , а также наведенной составляющей напряжения из-за электромагнитной индукции между телом опоры и каналом молнии $u_{\text{оп-м}}$:

$$u_{\text{оп}} = u_R + u_Z + u_{\text{оп-м}}. \quad (1)$$

Напряжение на гирлянде равно разности напряжений на опоре и фазном проводе. Обратное перекрытие изоляции произойдет, если напряжение на гирлянде превысит ее импульсную прочность,

определяемую вольт-секундной характеристикой гирлянды. Результаты, опубликованные в работах [4, 5], показывают, что наиболее значимый вклад в формирование напряжения на гирлянде изоляции вносит падение напряжения на сопротивлении заземления. Соответственно вероятность обратного перекрытия при фиксированных параметрах молниевых разрядов в значительной степени определяется электромагнитными параметрами ЗУ опоры.

Волны перенапряжений, сформировавшиеся на проводах линии в результате обратных перекрытий или прорывов молнии мимо грозозащитных тросов, при набегании на подстанцию могут представлять большую опасность для установленного там высоковольтного оборудования. При организации грозозащиты подстанции с помощью нелинейного ограничителя перенапряжения эффективность действия последнего также определяется электромагнитными параметрами ЗУ.

В работе [6] экспериментальным и расчетным путем показано существенное увеличение остающегося напряжения на оборудовании по сравнению с паспортными данными за счет влияния импеданса цепи заземления. Этот процесс сопровождается формированием волны напряжения с высокой крутизной нарастания, что представляет опасность для некоторых широко применяемых типов внутренней изоляции высоковольтного оборудования.

В частности, действие импульса напряжения с высокой крутизной на маслонаполненное оборудование вызывает пробой масляного промежутка, который оставляет необратимый след на твердой изоляции, приводящий впоследствии, под действием рабочих напряжений, к развитию скользящих или ползущих разрядов.

Сопротивление ЗУ состоит из сопротивления заземляющих элементов (стержневых заземлителей, горизонтальных полос и т.д.) и сопротивления растеканию тока, причем последнее, определяемое удельным сопротивлением грунта, играет решающую роль.

В частности, в районах Крайнего Севера, на Кольском полуострове традиционные мероприятия по молниезащите высоковольтных линий и подстанций 35–150 кВ не обеспечивают необходимую величину показателя надежности в связи с низкой проводимостью грунта. Для решения этой проблемы применяют особые схемы защиты, связанные с отказом от грозозащитных тросов, установкой дополнительных защитных аппаратов (ОПН) и использованием современных защитных средств (например, мультикамерных разрядников) [7].

Определяющее влияние заземляющих устройств на формирование схем молниезащиты высоковольтных объектов требует подробного исследования процессов растекания тока от заземлителей. При этом необходимо обеспечить возможность отслеживать изменение свойств заземлителей в режиме реального времени и оценивать влияние параметров грунтов и конструкции заземлителей. Эта задача может быть решена посредством компьютерного моделирования.

При исследовании параметров заземлителей большое распространение получили модели, построенные на детализированных схемах замещения протяженных заземлителей [8–11]. При довольно коротких грозовых импульсах тока систему заземлителя можно рассматривать как цепь с распределенными параметрами, среди которых наиболее важное значение имеют удельные проводимость, индуктивность и емкость. Влияние емкости (емкость электрода относительно нулевого потенциала) заметно лишь при высоких значениях удельного сопротивления грунта и кратковременных процессах. Для грунтов с удельным сопротивлением менее 1000 Ом·м даже при микросекундных импульсах емкостные токи пренебрежимо малы по сравнению с токами проводимости. В этом случае схема замещения будет содержать только индуктивности и проводимости. Если длительность фронта импульса тока больше длительности переходного процесса в заземлителе, то к моменту максимума тока молнии переходный процесс в заземлителе практически заканчивается. Заземлители, удовлетворяющие этому условию, можно рассматривать как сосредоточенные и характеризовать их стационарным значением сопротивления растекания.

Использование эквивалентных цепных схем замещения позволяет учесть в моделях не только неоднородную слоистую структуру грунта, но и его нелинейные свойства, вызванные ионизацией вблизи электрода вследствие достаточно сильного электрического поля. Вместе с тем, формирование подробной модели грунта приводит к существенному усложнению топологии цепной модели заземлителя, затрудняющему процедуру решения. Кроме того, использование различных упрощений и идеализаций при описании процесса ионизации, обеспечивая хорошее совпадение с экспериментальными данными в одних задачах, дает значительные неточности в других [11].

В связи с этим более предпочтительным является построение полевой модели заземлителя.

Появление профессиональных программных комплексов таких как ANSYS, COMSOL MULTIPHYSICS, FEMM, ELCUT, позволяющих решать электромагнитные, тепловые, механические и другие задачи, а также проводить решение связанных задач из разных областей физики существенно упростили процесс разработки модели.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Основными факторами, влияющими на величину удельного электрического сопротивления грунта, являются:

- Влажность грунта: как правило, чем больше влажность, тем ниже удельное сопротивление грунта.
- Температура: чем ниже температура, тем выше удельное сопротивление грунта.
- Состав и размер фракций грунта: чем больше фракция, тем выше удельное сопротивление грунта.
- Концентрации солей, щелочей и кислот: чем выше концентрация соли в почве, тем ниже удельное сопротивление грунта.

В зависимости от этих факторов удельное сопротивление грунтов изменяется в очень широких пределах.

Согласно [12] даже для однородных сред пределы изменения удельных сопротивлений составляют 100–1500 Ом·м для песчаных грунтов, 2000–10000 Ом·м для скальных пород (сланцы, гранит). Относительная диэлектрическая проницаемость сухого песка составляет $\epsilon_r = 2,5$, для гранита $\epsilon_r = 4,5 - 9$.

Результаты исследований, приведенные в работе [13], показали, что для однородных грунтов наиболее важными факторами, влияющими на величину удельного сопротивления, являются влажность и температура, а при проектировании заземляющих устройств необходимо учитывать слоистость грунтов, пористость и климатическую зону, в которой предполагается разместить ЗУ. В течение года наиболее резкие колебания удельного сопротивления наблюдаются в верхних слоях земли, которые зимой промерзают, а летом высыхают. Из данных измерений следует, что при понижении температуры воздуха от 0 до -10°C удельное сопротивление грунта на глубине 0,3 м увеличивается в 10 раз, а на глубине 0,5 м – в 3 раза. Использование для расчета заземляющих устройств упрощенных методик приводит к существенным отклонениям расчетных значений сопротивлений от экспериментальных.

Следовательно, для повышения точности расчет сопротивления заземлителей необходимо выполнять с учетом многослойности грунта, изменений погодных условий и уровня залегания грунтовых вод. При построении компьютерной модели заземлителя это означает использование нелинейных характеристик для описания свойств грунтов.

Осевая симметрия, характерная для процессов растекания тока в вертикальном стержневом заземлителе, позволяет выполнить моделирование в пакете ELCUT 6.5. Следует отметить, что несмотря на ряд преимуществ ELCUT по сравнению с более мощными пакетами, среди которых высокая скорость решения и нетребовательность к ресурсам компьютера, основным его недостатком является неспособность моделировать трехмерные объекты, тогда как наличие осевой симметрии сводит трехмерную задачу к двумерной.

Процесс растекания токов был описан как задача нестационарного электрического поля. В этой постановке источники поля (напряжения или токи) могут быть произвольными функциями времени, а электрические свойства материалов могут зависеть от напряженности электрического поля.

Уравнение для электрического потенциала U имеет вид:

$$-\nabla \cdot (\gamma(E) \cdot \nabla U) - \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot (\epsilon(E) \cdot \nabla U) = 0, \quad (2)$$

где электропроводность γ и диэлектрическая проницаемость ϵ могут зависеть от напряженности электрического поля E , ∇ обозначает оператор Набла.

Напряженность электрического поля определяется пространственным распределением потенциала:

$$\vec{E} = -\nabla U,$$

плотность тока проводимости законом Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j}_{\text{пр}} = \gamma \vec{E},$$

плотность тока смещения

$$\vec{j}_{\text{см}} = \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \vec{E}).$$

При выполнении расчетов с помощью встроенного калькулятора можно рассчитать удельную мощность Джоулевых потерь, определяемых плотностью тока проводимости

$$q = \vec{j}_{\text{пр}} \cdot \vec{E}$$

и передать их в задачу нестационарной теплопередачи, представленной уравнением теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) = q, \quad (3)$$

где c – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала, λ – коэффициент теплопроводности, T – температура, t – время.

Расчетная область задачи, описанной дифференциальными уравнениями в частных производных (2) и (3), должна иметь конечные размеры, которые выбираются таким образом, чтобы не оказывать значительного влияния на результат. Схема геометрии расчетной области, построенная в цилиндрической системе координат (z, r) , приведена на Рис. 1. Следует отметить, что ось вращения в ELCUT всегда расположена горизонтально.

Электропроводность грунта является определяющей характеристикой данного исследования. Сопротивление растеканию тока с заземлителя в землю формируется всей областью растекания от поверхности заземлителя до зоны, в которой электрический потенциал практически равен нулю. Сам заземлитель в силу высокой по сравнению с грунтом проводимостью в расчет не включается.

На всех внешних границах расчетной области задаются граничные условия.

Для уравнения растекания тока (2) в качестве внешнего воздействия на поверхности заземлителя задается временная зависимость потенциала, которая при имитации грозового импульса имеет вид

$$U(t) = U_m \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_{\text{ф}}}} - e^{-\frac{t}{T_{\text{и}}}} \right),$$

где U_m – определяет наибольшее значение напряжения, $T_{\text{ф}}$ и $T_{\text{и}}$ – длительность фронта и длительность импульса соответственно.

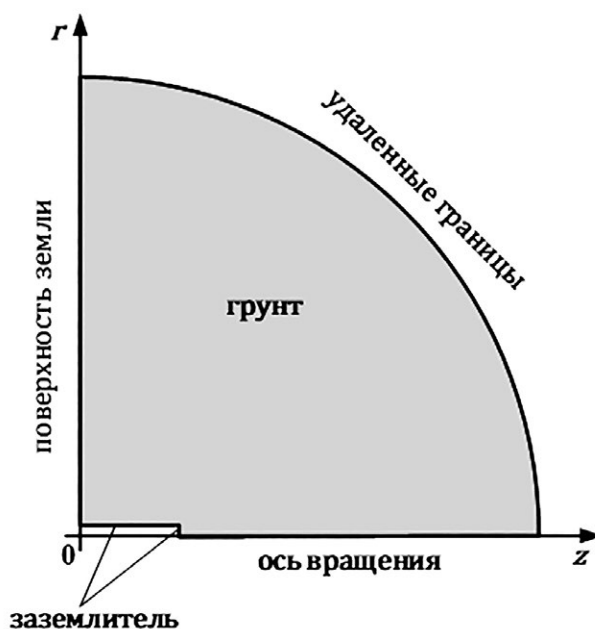


Рис. 1. Геометрия расчетной модели

Fig. 1. The calculation model geometry

Для внешних воздействий другой формы могут быть использованы любые временные зависимости.

На удаленной границе расчетной области задается нулевой потенциал, на поверхности земли и оси вращения – равенство нулю нормальной компоненты плотности тока.

Для нестационарного уравнения теплопроводности (3) на всех границах кроме поверхности земли задается равный нулю тепловой поток через границу, на поверхности земли – условие конвекции, параметрами которого являются коэффициент теплоотдачи с поверхности α и температура окружающей среды T_0 :

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0),$$

$\frac{\partial T}{\partial n}$ описывает нормальную компоненту плотности теплового потока, T – температуру, которую удобнее задавать в градусах Цельсия.

Температура окружающей среды и начальное значение температуры во всех точках расчетной области принимались равными. Базовое значение соответствовало 0°C , отдельные расчеты были проведены для $+10^\circ\text{C}$ и для -10°C .

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Моделирование одиночного вертикального заземлителя в однородном грунте при действии грозового импульса. Основной задачей этого исследования являлось подтверждение достоверности получаемых по описанной модели результатов. Постановка такой задачи не требовала рассмотрения тепловых процессов в грунте и ограничивалась лишь уравнением (2) с соответствующими граничными условиями.

Было проведено моделирование вертикального заземлителя длиной 5 м в грунте с удельным сопротивлением 500 Ом·м (проводимостью 0,002 См/м) при изменении относительной диэлектрической проницаемости грунта в диапазоне от 1 до 25. Параметры грозового импульса соответствовали работе [14]:

$$U_m = 200 \text{ кВ}, T_{\phi} = 0,5 \text{ мкс}, T_{\text{и}} = 67 \text{ мкс}.$$

Для каждого рассчитанного варианта посредством интегрального калькулятора ELCUT был вычислен ток, стекающий с заземлителя. На Рис. 2 отражены результаты проведенных расчетов.

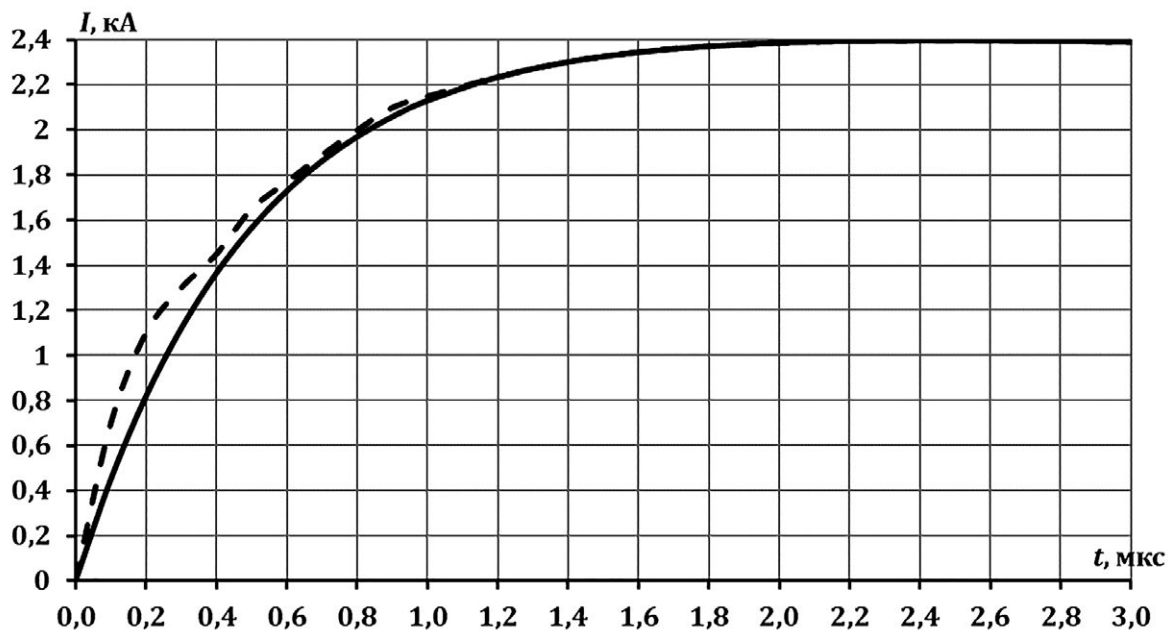


Рис. 2. Изменение во времени тока с вертикального заземлителя длиной 5 м, при грозовом импульсе напряжения и разных значениях диэлектрической проницаемости грунта: сплошная линия $\epsilon_r = 1$, пунктирная – $\epsilon_r = 25$

Fig. 2. Time variation of the current from a vertical grounding conductor with a length of 5 m, with a lightning voltage pulse and different values of soil permittivity: solid line $\epsilon_r = 1$, dotted line – $\epsilon_r = 25$

Полученные в исследовании результаты были сопоставлены с данными, опубликованными в работе [14]. В ней было рассмотрено моделирование волновых процессов вертикального электрода в программной среде COMSOL MULTIPHYSICS с такими же исходными данными. Интерес к этой работе был вызван тем, что результаты компьютерного моделирования в ней были подтверждены результатами натурного эксперимента.

Полученные с помощью модели ELCUT результаты соответствуют данным работы [14], расхождение не превышает 2%.

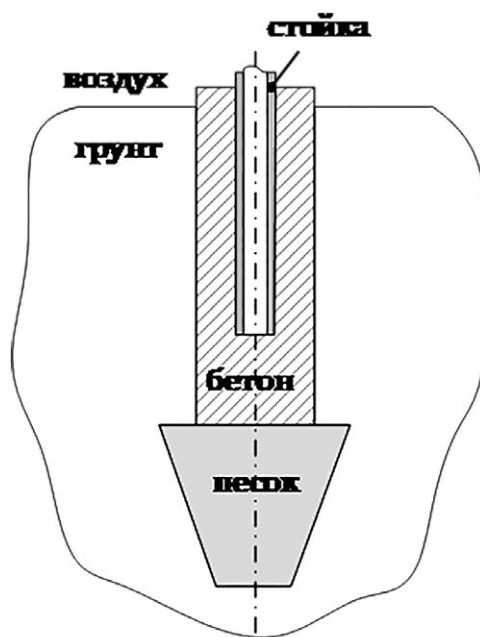
Приведенные на Рис. 2 зависимости показывают, что увеличение диэлектрической проницаемости грунта ведет к возникновению волновых процессов в заземлителе. Появление колебательной высокочастотной составляющей в временной зависимости тока при $\epsilon_r = 25$ связано с увеличением доли тока смещения. Однако при малых сопротивлениях этот процесс выражен довольно слабо, и задача может быть рассмотрена как квазистационарная.

Моделирование сопротивления заземления фундамента опор в неоднородном грунте. Описанная модель растекания токов ELCUT была применена для анализа влияния на сопротивление заземления слоистых грунтов. Такие исследования были проведены применительно к заземлителям различного конструктивного исполнения на основе фундаментов опор, описанных в [15, 16]. В качестве внешнего воздействия при решении этих задач использовалось синусоидальное напряжение различной частоты (от 50 до 5000 Гц). Для сопоставления с результатами работы [15] в геометрии задачи была воспроизведена сложная структура фундамента опоры, включающая в себя помимо грунта опорную стойку, бетонное основание самого заземлителя и песчаную подушку (Рис. 3). В Табл. 1 приведены для сопоставления расчетные значения сопротивлений при различных исходных данных, найденные с помощью модели ELCUT и приведенные в работе [15]. Расхождение между результатами не превышает 5%.

Аналогичные результаты были получены и при моделировании заземлителя, выполненного на основе железобетонного грибовидного подножника башенной опоры, рассмотренного в работе [16]. Было исследовано сопротивление заземлителя в двухслойном грунте в зависимости от отношения удельных сопротивлений слоев ρ_1/ρ_2 при изменении положения границы раздела. Характер полученных зависимостей полностью соответствует результатам [16].

Таблица 1. Расчетные значения сопротивлений при частоте 50 Гц**Table 1.** Calculated resistance values at a frequency of 50 Hz

Удельное сопротивление бетона	Удельное сопротивление грунта			
	100	500	100	500
	Расчетные сопротивления заземлителя			
	По модели [15]		По модели ELCUT	
10	68,27	336,72	65,13	331,21
50	72,35	341,36	70,18	336,76

**Рис. 3.** Структура фундамента опоры из работы [15]**Fig. 3.** The structure of the support foundation from [15]

Таким образом, разработанная модель доказала свою применимость и для неоднородных грунтов.

Влияние температуры и влажности однослойного грунта на сопротивление заземлителя. В данном исследовании использована связанная модель ELCUT, включающая в себя модули растекания токов (2) и нестационарной теплопередачи (3) совместно с соответствующими граничными условиями. Задача была решена для однослойного грунта с нелинейными свойствами, вызванными влиянием температуры. В качестве внешнего воздействия рассматривалось синусоидальное напряжение промышленной частоты, позволяющее при определенных временных параметрах оценить влияние температуры.

При проведении расчетов в модуле растекания токов следует указать необходимость учета зависимости электропроводности от температуры и ввести зависимость $\gamma(T)$ посредством таблицы. Табличное представление является удобным, так как позволяет использовать экспериментальные данные без какой-либо дополнительной обработки в виде аналитической аппроксимации.

Поскольку наибольшие трудности возникают при сооружении заземлителей в песчаных грунтах, расчеты были проведены с ориентиром на диапазон удельных сопротивлений 100–1500 Ом·м, характерных для данного типа почв [12].

Результаты моделирования показали, что для большинства рассмотренных грунтов даже 30%-го содержания влаги оказывается достаточно для выхода на нижние предельные значения удельных сопротивлений. В частности, для песчаного грунта повышение влажности с 5% до 30% привело к уменьшению удельного сопротивления с 1500 Ом·м до 65 Ом·м.

Следует отметить, что с увеличением влажности грунта возрастает значение его относительной диэлектрической проницаемости, что также может быть учтено в рамках описанной модели.

Разработанная модель позволяет рассчитать значения сопротивления ЗУ для различных видов грунтов с учетом влияния влажности и температуры, что, в свою очередь, позволяет выбрать схемы грозозащиты энергосистемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заземление опор линий электропередач оказывает значительное влияние на формирование схем молниезащиты высоковольтных объектов. При этом сопротивление растеканию тока, связанное с удельным сопротивлением грунта, играет решающую роль. На величину сопротивления грунта существенное влияние оказывают его структура, влажность и температура.

Разработанная модель позволяет учесть все влияющие на удельное сопротивление грунта факторы и рассчитать значения сопротивления заземляющего устройства с их учетом.

Результаты моделирования получили подтверждение при сопоставлении с работами других авторов.

Использование для моделирования пакета ELCUT позволяет значительно снизить требования к вычислительным ресурсам

по сравнению с универсальными программными комплексами ANSYS и COMSOL MULTIPHYSICS.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The author state that this article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куклин Д.В. Некоторые проблемы грозозащитных заземлений для объектов энергетики // Вестник Кольского научного центра РАН. 2021. Т. 13. № 3. С. 7-12. doi: 10.37614/2307-5228.2021.13.3.001
2. Шишигин С.Л., Шишигин Д.С., Смирнов И.Н. Расчет числа грозовых отключений воздушной линии 110 кВ // Электричество. 2023. № 9. С. 22-30. doi: 10.24160/0013-5380-2023-2-27-36
3. Гумерова Н.И., Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Молниезащита электрических сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. EDN: QMLXYX
4. Гулов А.М., Колычев А.В. Модель опоры воздушной линии электропередачи в задачах молниезащиты // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 31-42. doi: 10.18721/JEST.29302
5. Куклин Д.В., Селиванов В.Н. Численный анализ влияния параметров опоры ЛЭП на уровень перенапряжений при прямом ударе молнии // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 3 (22). С. 46-53. EDN: UXRZMH
6. Адамьян Ю.Э., Бочаров Ю.Н., Коровкин Н.В., и др. Влияние характеристик заземляющего устройства на эффективность работы нелинейных ограничителей перенапряжений // Электротехника. 2018. № 11. С. 73-78. EDN: KVRKX
7. Халилов Ф., Котляров Э. Вопросы молниезащиты ВЛ 35-150 кВ в районах крайнего севера // Электроэнергия. Передача и распределение. 2015. № 4 (31). С. 60-63. EDN: UGBABV
8. Боронин В.Н., Коровкин Н.В., Кривошеев С.И., и др. Математическое моделирование заземляющих устройств при действии импульсных токов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2013. № 6. С. 80-89. EDN: RPXHFR
9. Ивонин В.В., Данилин А.Н. Нелинейные процессы в грунтах при стекании импульсных токов с заземлителей // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 357-360. EDN: ZNHCPR
10. Вендин С.В., Соловьёв С.В., Килин С.В., Яковлев А.О. Моделирование и анализ молниезащиты при нештатной ситуации удара молнии на электрической подстанции // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68, N 3(44). С. 37-47. doi: 10.22314/2658-4859-2021-68-3-37-47

11. Шишигин С.Л., Шишигин Д.С., Смирнов И.Н. Расчет заземлителей с учетом ионизации и частотных свойств грунта // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2022. № 6. С. 46-63. EDN: QRBLNH doi: 10.31857/S0002331022060024
12. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. Санкт-Петербург: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.
13. Веденеева Л.М., Чудинов А.В. Исследование влияния основных свойств грунта на сопротивление заземляющих устройств // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16, № 1. С. 89-100. doi: 10.15593/2224-9923/2017.1.10
14. Кривошеев С.И., Колодкин И.С., Магазинов С.Г., и др. Моделирование волновых процессов в вертикальном заземлителе при грозovом воздействии // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 27-38. doi: 10.18721/JEST.27303
15. Лебедев В.Д. Компьютерное моделирование и исследование характеристик одиночных естественных заземлителей // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2011. № 1. С. 27-32. EDN: PFJWUN
16. Шишигин С.Л., Новикова А.Н. Расчет сопротивления заземления фундаментов опор ВЛ из железобетонных грибовидных подножников в неоднородном грунте // Известия НИИ постоянного тока. 2011. № 1 (65). С. 164-173. Дата обращения 30.04.2025. EDN: PAFZIL

REFERENCES

1. Kuklin DV. Some problems of lightning protection grounding for energy facilities. *Bulletin of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021;13(3):7-12. doi: 10.37614/2307-5228.2021.13.3.001
2. Shishigin SL, Shishigin DS, Smirnov IN. Calculation of the number of lightning outages of a 110 kV overhead line. *Electricity*. 2023;9:22-30. doi: 10.24160/0013-5380-2023-2-27-36
3. Gumerova NI, Kolychev AV, Khalilov FK. Lightning protection of medium, high and ultra-high voltage electric networks (study guide). SPb: Publishing house of Polytechnic University; 2011. EDN: QMLXYX
4. Gulov AM, Kolychev AV. Model of overhead power line support in lightning protection problems. *Global energy*. 2023;29(3):31-42. doi: 10.18721/JEST.29302
5. Kuklin DV, Selivanov VN Numerical Analysis of the Influence of Power Transmission Line Support Parameters on the Overvoltage Level during a Direct Lightning Strike. *Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;3(22):46-53. EDN: UXRZMH
6. Adamyan YuE, Bocharov YuN, Korovkin NV, et al. Influence of Grounding Device Characteristics on the Efficiency of Nonlinear Surge Arresters. *Electrical Engineering*. 2018;11:73-78. EDN: KVERYKX

7. Khalilov F, Kotlyarov E. Lightning protection issues for 35-150 kV overhead power lines in the far north. *Electric power. Transmission and distribution*. 2015;4(31):60-63. EDN: UGBABV
8. Boronin VN, Korovkin NV, Krivosheev SI, et al. Mathematical modeling of grounding devices under the action of pulsed currents. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power engineering*. 2013;6:80-89. EDN: RPXHFR
9. Ivonin VV, Danilin AN. Nonlinear processes in soils during pulse current flow from ground electrodes. *Proceedings of the Fersman scientific session of the GI KSC RAS*. 2017;14:357-360. EDN: ZNHCPR
10. Vendin SV, Soloviev SV, Kilin SV, Yakovlev AO. Modeling and analysis of lightning protection in case of an emergency lightning strike at an electrical substation. *Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex*. 2021;68(3(44)):37-47. doi: 10.22314/2658-4859-2021-68-3-37-47
11. Shishigin SL, Shishigin DS, Smirnov IN. Calculation of grounding devices taking into account ionization and frequency properties of the soil. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2022;6:46-63. EDN: QRBLNH doi: 10.31857/S0002331022060024
12. Guide to protecting 6-1150 kV electrical networks from lightning and internal overvoltages. St. Petersburg: PEIPK Mintopenergo RF; 1999.
13. Vedeneva LM, Chudinov AV. Study of the influence of the main properties of soil on the resistance of grounding devices. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas and Mining*. 2017;16(1):89-100. doi: 10.15593/2224-9923/2017.1.10
14. Krivosheev SI, Kolodkin IS, Magazinov SG, et al. Modeling of wave processes in a vertical ground electrode under lightning influence. *Materials Science. Power Engineering*. 2021;27(3):27-38. doi: 10.18721/JEST.27303
15. Lebedev VD. Computer modeling and study of the characteristics of single natural ground electrodes. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2011;1:27-32. EDN: PFJWUN
16. Shishigin SL, Novikova AN. Calculation of grounding resistance of foundations of overhead power line supports made of reinforced concrete mushroom-shaped footings in heterogeneous soil. *Bulletin of the Research Institute of Direct Current*. 2011;1(65):164-173. EDN: PAFZIL

Сведения об авторе:

Карпова Ирина Михайловна, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 7820-7708; ORCID: 0000-0002-1197-0753;
E-mail: legiero@mail.ru

Information about the author:

Irina M. Karpova, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
eLibrary SPIN: 7820-7708; ORCID: 0000-0002-1197-0753;
E-mail: legiero@mail.ru