УДК 621.316.99
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-170-4-21-27

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОЙ СМЕСИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

И.А. Павлович,
ст. преподаватель каф. практической подготовки студентов БГАТУ

Исследование посвящено разработке и применению эффективных грунтозамещающих композиций (гидрогель-графит) для заземляющих устройств в высокоомных грунтах. Разработана математическая модель, позволяющая оптимизировать состав смесей. Экспериментально подтверждено снижение сопротивления на 40-60 % и стабилизация электрофизических параметров заземления. Результаты показывают уменьшение сезонных колебаний в 2-3 раза.

Ключевые слова: заземляющие устройства, удельное сопротивление грунта, гидрогель, графит, электрофизические свойства, математическое моделирование, оптимизация.

The research is focused on developing and utilizing effective soil substitute compositions (hydrogel-graphite) for grounding devices in high-resistance soils. The mathematical model was created to improve the composition of mixtures. An experimental confirmation of a 40-60% decrease in resistance and stabilization of the electrophysical parameters of the grounding was obtained. The results show a decrease in seasonal fluctuations by 2-3 times.

Key words: grounding devices, soil resistivity, hydrogel, graphite, electrophysical properties, mathematical modeling, optimization.

Введение

Заземляющие устройства электроустановок должны обеспечивать безопасность людей и животных, защиту электрооборудования любого напряжения, а также надежность работы в различных эксплуатационных режимах, включая защиту от атмосферных перенапряжений (грозозащиту). При этом они должны соответствовать нормативным требованиям к электрофизическим параметрам на протяжении всего срока службы электроустановки. Однако на грунтах с высоким удельным сопротивлением и низкой влажностью достижение и стабильность этих условий становится сложной технической задачей [1].

Значительное влияние на электрофизические параметры заземления оказывает удельное сопротивление грунта [2]. Оно зависит от множества факторов, включая температуру, влажность, тип грунта, его плотность и структуру [3]. Наибольшее влияние оказывают температура [4] и влажность [5], так как они напрямую связаны с климатическими условиями. Исследования показывают, что при снижении температуры с 0°С до –10°С удельное сопротивление грунта на глубине 0,3 м увеличивается в 10 раз, а на глубине 0,5 м – в 3 раза. Это связано с дифференцированным промерзанием грунтовых слоев, где поверхностные слои более подвержены температурным колебаниям [6]. В свою очередь, увеличение влажности грунта приводит к уменьшению его удельного сопротивления, то есть увеличивает его электрическую проводимость.

Структура грунта, особенно в местах с высоким уровнем грунтовых вод, определяется его пористостью, влагоемкостью и капиллярными свойствами [7]. Однако глубина залегания грунтовых вод варьируется по площади [8], что затрудняет обеспечение равномерной влажности по всей длине заземлителя. Поэтому при проектировании заземляющих устройств необходимо учитывать особенности грунтовых условий и местности для обеспечения оптимального контакта заземлителя с грунтом и закладывать запас площади переходного контакта земля-грунт [9].

Актуальность данной работы заключается в разработке метода обработки грунта, который позволяет снизить удельное сопротивление и стабилизировать влажность в околоэлектродной зоне за счет применения специальных грунтозамещающих композиционных смесей (ГКС) [10]. Использование таких смесей способствует уменьшению сопротивления заземляющих устройств и уменьшению коэффициента сезонности [11]. Это также позволяет сократить капитальные затраты на монтаж за счет уменьшения металлоемкости конструкции, площади, отводимой под заземление, и объема земляных работ.

Проблемы надежности работы заземляющих устройств и обеспечения электробезопасности освещались в работах А.И. Якобса, Л.М. Веденеевой, А.В. Чудинова, Д.Е. Кучеренко, Д.Н. Грищенко, В.А. Михайловой, В.Г. Андруша, А.И. Федорчука, М.А. Короткевич.

Целью данной статьи является разработка и экспериментальное обоснование применения грунтозамещающей композиционной смеси для повышения эффективности работы и снижения затрат на сооружение заземляющих устройств.

Основная часть

На практике применяют различные методы снижения сопротивления заземления, каждый из которых имеет свои особенности. Стабилизация влажности грунта через искусственное увлажнение или дренаж минимизирует сезонные колебания [11], а глубинные заземлители меньше зависят от температурных изменений благодаря установке, ниже зоны промерзания [9; 12].

Эффективным решением является увеличение числа электродов [13] и химическая обработка грунта, хотя последняя требует регулярного обновления из-за вымывания солей [14-16]. Заземлители в бетонной оболочке обладают повышенной проводимостью и коррозионной стойкостью, но нуждаются в точном расчете состава [17]. Наиболее перспективны грунтозамещающие композиционные смеси с проводящими компонентами, обеспечивающие стабильность параметров при температурных колебаниях [6; 13,14; 18-19]. Однако такие смеси могут влиять на природные свойства грунта [20, 21], их эффективность зависит от влажности и требует мониторинга [22, 23], а применение связано с дополнительными затратами, что требует экономического обоснования.

Методика проведения исследований

Конструктивные особенности заземляющих устройств (ЗУ) определяют методы расчета их параметров [24]. Электролитические заземлители характеризуются электрофизическими процессами в пористых средах, где проводимость зависит от объема природного и искусственного электролита, а также пористости грунта [25].

Растекание тока в грунте обусловлено ионной проводимостью электролита [26], однако существующие модели не учитывают структурно-фазовые изменения грунта при эксплуатации [27, 28]. Традиционные методы расчета сопротивления ЗУ не адаптированы для ГКС, в которых удельное сопротивление зависит от насыщения электролитом [7].

Согласно теории перколяции, электролит в ГКС заполняет поры почвы, формируя непрерывные токопроводящие пути между слоями [28]. При воздействии высокочастотных токов заземляющий стержень характеризуется распределенной эквивалентной схемой, включающей последовательные элементы R и L, шунтированные C (рис. 1).

Формулы для определения этих параметров имеют следующий вид [29]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l}\log\frac{2l}{r}, \quad (1)$$

где R – сопротивление грунта, Ом;
ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;
l – длина электрода, м;
r – радиус электрода, м;

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\log\frac{2l}{r}}, \quad (2)$$

где C – емкость грунта, Ф;
ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;
ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость грунта, Ф/м;

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\log\frac{2l}{r}, \quad (3)$$

где L – индуктивность грунта, Гн;
μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

На рисунке 1 представлены эквивалентные схемы для разных частотных диапазонов (рис. 1а – для частот ниже 100 кГц; рис. 1б – для более высоких частот). Граничная частота 100 кГц обусловлена изменением характера реакции сопротивления заземления, которое на высоких частотах становится распределенным с резонансными пиками.

Импеданс системы заземления описывается следующими уравнениями, выведенными на основе представленных эквивалентных схем:

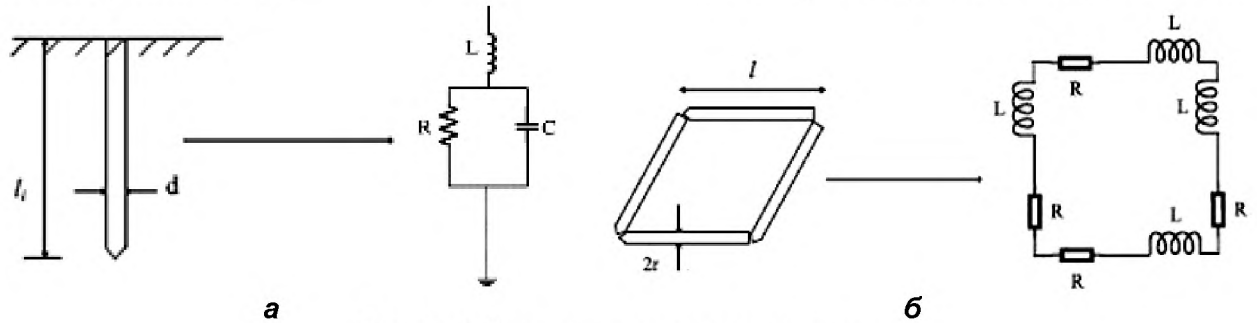
$$Z = j\omega L + \frac{R\cdot\frac{1}{j\omega C}}{R+\frac{1}{j\omega C}}, \quad (4)$$

где Z – импеданс системы заземления, Ом;
$j\omega$ – комплексная угловая частота, рад/с;
ω – угловая частота, рад/с.

$$Z = \frac{R}{1+(\omega RC)^2} + j\left(\omega L - \frac{\omega R^2 C}{1+(\omega RC)^2}\right); \quad (5)$$

$$|Z|\sin\phi = \omega L - \frac{\omega R^2 C}{1+(\omega RC)^2}. \quad (6)$$

Таким образом, при очень низкой частоте или



а б

Рисунок 1. Эквивалентная схема заземления

постоянном токе импеданс заземления равен сопротивлению R

$$Z_0=R_0 . \quad (7)$$

На резонансной частоте доминирует только действительная составляющая импеданса ($\omega\neq0$)

$$Z=\frac{R}{1+(\omega RC)^2} . \quad (8)$$

При этом резонансная частота возникает, когда мнимая составляющая импеданса равна нулю

$$\omega_r=\frac{1}{\sqrt{LC-(RC)^2}} ; \quad (9)$$

$$f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC-(RC)^2}} . \quad (10)$$

Как показано в исследованиях [30, 31], модель Коула-Коула эффективно описывает комплексное удельное сопротивление грунта, учитывая частотную зависимость его диэлектрической проницаемости. Этот подход позволяет точно моделировать электромагнитные процессы в широком частотном диапазоне, объединяя анализ проводимости и диэлектрических свойств.

Данные выводы подчеркивают, что при проектировании заземления систем электроснабжения с промышленной частотой тока 50 Гц достаточно учитывать только проводимость грунта, что упрощает моделирование [30, 31].

Проведенные эксперименты по определению зависимости удельного сопротивления ГКС от влажности при различной температуре, результаты которых представлены на рисунке 2, выявили критическое влияние влажности на сопротивление грунта, особенно в диапазоне -5°C ... -3°C, где наблюдается характерный перегиб на кривой, связанный с фазовым переходом воды [11]. Как указано в источнике [10], зола требует в 2,5 раза большего объема для достижения аналогичного эффекта.

Эти данные подчеркивают необходимость комплексного учета влажностных и температурных факторов, а также состава грунта при проектировании. На рисунке 3 показана зависимость удельного сопротивления смеси от количества внесенного графита, а

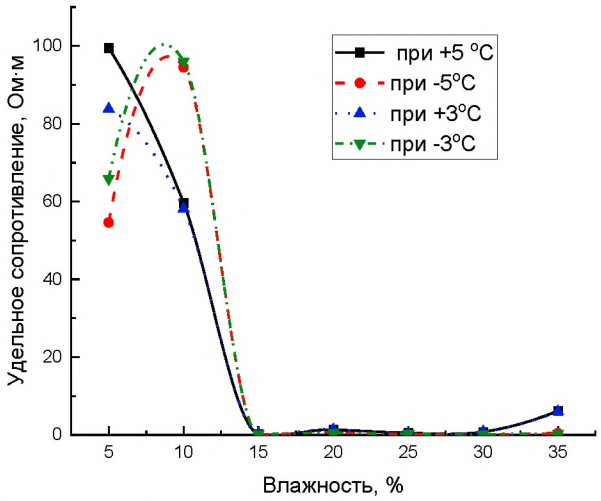


Рисунок 2. Зависимости удельного сопротивления смеси от влажности при различных температурах

также результаты математического моделирования экспериментальных и аналитических функций.

Зависимость удельного сопротивления ГКС от объема внесения графита описывается следующей формулой:

$$y = A2 + \frac{(A1-A2)}{(1 + \exp((x-x0)/dx))} . \quad (12)$$

Определим коэффициенты $A1$=374,78305 ± ± 1,37826 и $A2$=1,49554 ± 0,73221 для данного уравнения. Однако это уравнение слишком громоздкое для его использования при расчетах.

На основании анализа экспериментальных данных установлено, что зависимость $\rho(C)$ носит экспоненциальный характер

$$\rho(C) = \rho_0 \cdot e^{(-k \cdot C)} , \quad (13)$$

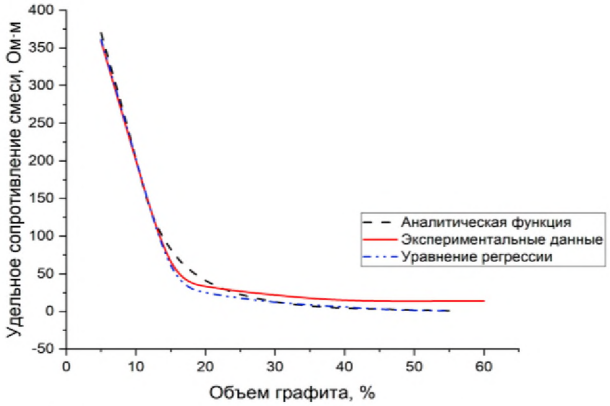
где $\rho(C)$ – удельное сопротивление смеси при содержании графита, Ом·м;

ρ_0 – 50 Ом·м – сопротивление исходного грунта;

k – коэффициент эффективности графита;

C – массовая доля графита, %;

Определим коэффициент эффективности графита k в данной смеси. Для этого проведем расчет при массовой доле графита C=15% (ρ=18 Ом·м)



Model	Boltzmann
Equation	y = A2 + (A1-A2)/(1 + exp((x-x0)/dx))
Plot	Удельное сопротивление смеси, Ом·м
A1	374,78305 ± 1,37826
A2	1,49554 ± 0,73221
x0	10,27241 ± 0,01766
dx	1,2136 ± 0,05122
Reduced Chi-Sqr	1,03586
R-Square (COD)	0,99999
Adj. R-Square	0,99996

Рисунок 3. Анализ функции зависимости удельного сопротивления ГКС от объема внесения графита

$$18 = 50 \cdot e^{(-k \cdot 15)}$$

$$k = -\ln(18/50)/15 \approx 0,068^{-1}$$

Окончательный вид формы, показывающей зависимость сопротивления от количества графита

$$\rho(C) = 50 \cdot e^{(-0.068 \cdot C)}$$

Исследования, проведенные в работе [10], подтверждают эффективность углеродных добавок (графита ГЛС и древесной золы до 45% массы) для модификации грунтов заземляющих контуров. При 0°С замерзание влаги вызывает рост удельной проводимости (рис. 4а), однако графитовая добавка обеспечивает электронную проводимость, компенсируя этот эффект (рис. 4б).

Экспериментальные исследования [11] выявили принципиальные различия в поведении материалов: в естественном грунте ледяные линзы и прослойки (рис. 4а) существенно увеличивают сопротивление, создавая барьеры для тока, тогда как разработанная смесь демонстрирует уникальную температурную зависимость (рис. 4б). При нагреве смеси наблюдается кратковременный рост сопротивления, связанный с фазовым переходом влаги, после чего значение стабилизируется около 5 Ом·м. Полученные данные свидетельствуют о значительном снижении температурного влияния на удельное сопротивление в приэлектродной зоне, что подтверждается графическими зависимостями (рис. 4б) и имеет важное практическое значение для проектирования заземляющих устройств.

Проведенные нами исследования позволяют описать уменьшение удельного сопротивления грунта в месте монтажа заземляющего устройства, как величину, зависящую от изменения удельного сопротивления грунта, на основе экспериментальных данных, следующим выражением (14):

$$\rho_{экв} = \rho_з \cdot 0,98^{\frac{d_{смеси}}{d_з}} \cdot \left(\frac{\rho_{смеси}}{\rho_з}\right)^{\frac{1}{3\pi}}, \qquad (14)$$

где $\rho_{экв}$ – искомое расчетное удельное сопротивление, Ом · м;

$\rho_з$ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

$d_{смеси}$ – диаметр области вокруг электрода, заполненной смесью, м;

$d_з$ – диаметр заземлителя, м;

$\rho_{смеси}$ – удельное сопротивление смеси, Ом·м;

$$d_{смеси} = \sqrt{\frac{V_{смеси}}{l}}, \qquad (15)$$

где $V_{смеси}$ – объем вносимой смеси, м^3;

l – длина электрода заземления, м.

Экспериментальная проверка разработанной модели на образцах с различным составом ГКС показала преимущество разработанной формулы (14) в точности описания влияния смеси на сопротивление заземления. Для подтверждения результатов была применена расчетная методика [32], учитывающая сопротивление глубинного заземлителя без компенсирующей смеси и коэффициент сезонности для Минской области [1].

С учетом того, что измеренное удельное сопротивление грунта составляет 526 Ом·м. и подставив в выражение величины, получим: $R_В$=146,4. Полученное значение подтверждается экспериментом, описанным выше, в котором среднее значение сопротивления глубинного заземлителя составляет 152,6 Ом.

Для оценки эффективности ГКС применим расчетную формулу из исследования [33], позволяющую определить сопротивление глубинного заземлителя с учетом оптимизированных электрофизических характеристик.

$$d_{смеси} = \sqrt{\frac{0,02}{3}} + 0,012 = 0,082 + 0,012 = 0,094 \text{ м.}$$

$$\rho_{экв} = 526 \cdot 0,98^{\frac{0,1}{0,012}} \cdot \left(\frac{50}{526}\right)^{\left(\frac{1}{3\pi}\right)} = 349,75 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Полученное при расчетах формулы (3) из работы [33] значение 66,5 близко к экспериментальным, составившим 69,0 Ом.

Определенный интерес представляет обратный расчет «мнимого» диаметра заземлителя при использовании ГКС. Полученные данные покажут эффективность применения смеси совместно с глубинным заземлителем. Для этого из формулы (14) выразим значение $d_з$, эффективный диаметр такого заземлителя:

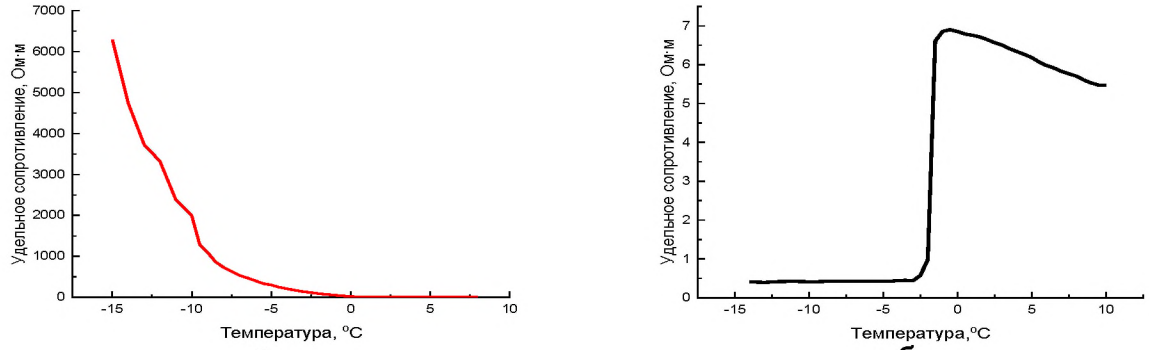


Рисунок 4. Зависимость удельного сопротивления грунта (а) и экспериментальной смеси (ГКС) (б) от температуры при влажности 35 %

$$d_з = \frac{2 \cdot l_в}{e^b}; \quad (16)$$

$$b = \frac{R_В - \frac{\varphi \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot l_в} \cdot \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l_в}{4 \cdot t - l_в}}{\frac{\varphi \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot l_в}}, \quad (17)$$

где $R_В$ – сопротивление вертикального заземлителя, Ом;

φ – экспериментальный коэффициент сезонности для смеси;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

$l_в$ – длина вертикального заземлителя, м;

t – расстояние до середины длины вертикального стержня от поверхности грунта, м.

Подстановка в данное выражение значения Rв, полученного при расчете формул (15) и (16) из работы [33], показывает, что эффективная зона влияния увеличивается с 0,05 м до 0,95 м. Это связано с формированием стабильной влагонасыщенной зоны, которая снижает переходное сопротивление [33]. Традиционные методы расчета в этом случае будут недостаточно точными из-за нелинейного характера изменения сопротивления под влиянием внешних факторов.

Для более точного анализа был применен метод электроимпедансной томографии с использованием конечно-элементного моделирования (31 757 треугольных элементов). Детализированная сетка (рис. 5) позволила точно смоделировать распределение потенциалов в заземляющей системе 3×3 площадью 18×18 м.

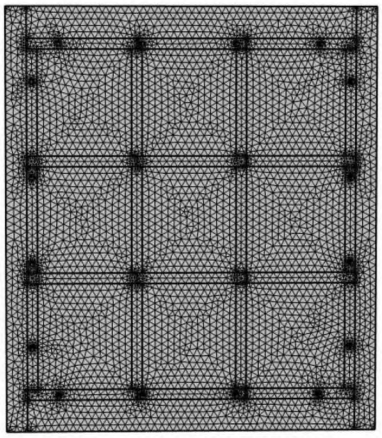


Рисунок 5. Принципиальная схема сегментации модели сетки заземления

В двумерном квазистатическом поле граничная задача поля сетки заземления может быть эквивалентна вариационной задаче. Общая площадь S поля преобразуется в сумму площадей разделенных треугольных единиц, а граничная задача может быть записана следующим образом:

$$F(\varphi) = \int_s \frac{1}{2}\sigma\left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2\right]dxdy =$$

$$= \sum_{n=1}^{n_o}\int_{s_n}\frac{1}{2}\sigma\int_s\frac{1}{2}\sigma\left[\left(\frac{\partial\varphi_n}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi_n}{\partial x}\right)^2\right]dxdy \quad (18)$$

где σ – электропроводность среды, Ом·м;

φ – распределение электрического потенциала, В;

n_o – общее число дискретных элементов;

s_n – площадь n-го элемента, м^2.

Матрицы локальных коэффициентов объединяются в глобальную матрицу K [34], формируя систему уравнений МКЭ: $K\varphi = 0$.

При моделировании заземляющей сети:

1. Входной/выходной ток I прикладывается к узлам m и n.

2. Опорный узел (φ=0) выбирается для устранения неопределенности.

3. Остальные узлы остаются свободными.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & 0 & \cdots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & 0 & \cdots & K_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ K_{m1} & K_{m2} & \cdots & 0 & \cdots & K_{mN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & 0 & \cdots & K_{nN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ K_{l1} & K_{l2} & \cdots & 1 & \cdots & K_{lN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ K_{N1} & K_{N2} & \cdots & 0 & \cdots & K_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_m \\ \vdots \\ \varphi_n \\ \vdots \\ \varphi_l \\ \vdots \\ \varphi_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ I \\ \vdots \\ -I \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Для решения системы уравнений применяется метод исключения Гаусса, позволяющий определить узловые потенциалы.

Параметры рассчитываются по уравнениям (1) для сопротивления и (2) – для индуктивности. Эквивалент вертикального и горизонтального элементов заземлителя, модель ячейки (рис. 1), сопротивление заземляющего устройства и емкость относительно земли определяются по формулам (1) и (2) соответственно, причем индуктивность и емкость при переходных процессах пренебрежимо малы, как показано ранее. Поэтому ключевым параметром, влияющим на расчеты, является удельное сопротивление почвы (ρ), характеризующее ее проводимость

$$R_i = \frac{\rho}{l_i}\left(\ln\frac{\varepsilon_r l_i}{d} - 1\right), \quad (20)$$

где l_i – общая длина заземляющего стержня, м;

$\varepsilon_т$ – относительная проницаемость твердого тела, Ф/м.

d – диаметр заземляющего стержня, м;

В результате расчета получаем значение, равное 64,6, что близко к значению, полученному при расчете по формуле (3), предложенной в источнике [34].

Заключение

Проведенные исследования выявили влияние состава ГКС на их удельное сопротивление. Установлено, что гидрогель стабилизирует влажность, нормализуя электрофизические свойства грунта и снижая сопротивление заземления. На основе полученных данных выведены зависимости сопротивления от температуры, влажности и содержания компонентов, что позволяет оптимизировать состав смесей для различных условий.

Разработана методика расчета сопротивления заземляющих устройств с применением ГКС.

Создана математическая модель оптимизации параметров заземления с учетом характеристик ГКС. Полученные результаты подтверждают перспективность применения таких смесей для повышения эффективности систем заземления в различных климатических условиях. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение добавок ингибиторов коррозии и гидросорбов для оптимизации состава ГКС.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Грант № Т25УЗБ-024).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний: ТКП 339-2022 (33240). – Введ. 20.12.2022. – Минск: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2022. – 593 с.

2. IEEE Std 142 -2007 IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. – Approved 7 June, 2007. – 225 p.

3. Веденеева, Л.М. Исследование влияния основных свойств грунта на сопротивление заземляющих устройств / Л.М. Веденеева, А.В. Чудинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 89-100.

4. Unde, M.G. Grounding grid performance of substation in two layer soil – a parametric analysis / M.G. Unde, B.E. Kushare // International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies. – 2012. – Vol. 1, № 2. – P. 69-76.

5. Coelho Vilson, L. The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems / L. Coelho Vilson, A. Piantini, A.D. Almaguer Hugo [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2015. – Vol. 118. – P. 76-82.

6. Зайцева, Н.М. Определение температуры грунта на глубине заземлителей / Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова, М.Я. Клецель // Электричество. – 2011. – № 7. – С. 19-24.

7. Веденеева, Л.М. Исследование влияния влажности и пористости грунтов на величину их проводимости / Л.М. Веденеева, А.В. Чудинов // Вестник ПНИПУ. Безопасность и управление рисками. – 2016. – № 5. – С. 119-130.

8. Леонович, И.И. Глубина промерзания грунтов – важнейший фактор водно-теплового режима земляного полотна / И.И. Леонович, Н.П. Вырко // Строительная наука и техника. – 2011. – № 5. – С. 27-35.

9. Ротанова, Н.М. Глубинная электропроводность Земли / Н.М. Ротанова, А.Н. Пушков. – М.: Наука, 1982. – 296 с.

10. Павлович, И.А. Способ внесения смесей для оптимизации заземления при монтаже вертикальных составных заземлителей / И.А. Павлович, С.М. Барайшук, М. Муродов, М. Набиев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2024. – Т. 67, № 6. – С. 475-487.

11. Dependence of Soil Parameters on Frequency: Experimental Results, Predictive Formula, and Impact on Grounding Impulse Response / S. Visacro [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – Vol. 27, №. 2. – P. 927-935.

12. Nettleton, L.L. Geophysical Prospecting for Oil / L.L. Nettleton. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1940. – 444 p.

13. Alipio, R. Frequency dependence of soil parameters: effect on the lightning response of grounding electrodes / R. Alipio, M.H.M. Vale, C. Visacro // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. – Vol. 55, № 1. – P. 132-139.

14. Akbari, M.A.M. Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters and Its Effect on the Lightning Performance of Grounding Systems / M.A.M. Akbari, A. Shayegani, M. Mirzaie // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. – Vol. 55, № 4. – 739-746.

15. Kavka, D. Comparison of Frequency-Dependent Soil Models: Application to the Analysis of Grounding Systems / D. Kavka // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2014. – P. 1-11.

16. Visacro, S. Lightning Response of Grounding Grids: Simulated and Experimental Results / S. Visacro, R. Alipio, A. Schroeder // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2015. – Vol. 57, № 1. – P. 1-7.

17. Androvitsaneas, V.P. Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds / V.P. Androvitsaneas, I.F. Gonos, I.A Stathopulos // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 139. – P. 109-115.

18. El-Shamy, A. M. Effect of moisture contents of bentonitic clay on the corrosion behavior of steel pipelines / A.M. El-Shamy, M.F. Shehata, A.I. M. Ismail // Applied Clay Science. – 2015. – Vol. 114. – P. 461-466.

19. Yutthagowith, P. Design of Counterpoise Grounding Electrodes for Transmission Towers in High Soil Resistivity Area / P. Yutthagowith, A. Kunakorn // 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2018). – Rzeszow, Poland, 2018. – P. 1-5.

20. Kulin, D. Numerical analysis of electromagnetic effects in measurements of partially dependent soil elec-

trical properties / D. Kulin // Progress in Electromagnetics Research M. – 2019. – Vol. 79. – P. 179-189.

21. Characterization of frequency-dependent electrical properties of sandy soil with variable grain size and water content / Z.G. Dasios [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2019. – Vol. 26, № 5. – P. 1629-1636.

22. EMT-compatible wideband model of grounding electrodes buried in frequency-dependent soil / B. Salari [et al.] // International Conference on Power Systems Transients (IPST2019). – 2019.

23. IEEE Xplore Digital Library. – URL: https://ieeexplore.ieee.org (date of access: 05.05.2025).

24. Методические указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 35–750 кВ. – Минск: ГПО «Белэнерго», 2007. – 75 с.

25. Ichwan, B. Coconut husk biochar application on increasing growth and yield of maize plant / B. Ichwan // Systematic Reviews in Pharmacy. – 2020. – Vol. 11, № 2. – P. 187-192.

26. Eduful, G. Palm kernel oil cake as an alternative to earth resistance-reducing agent / G. Eduful, J.E. Cole // IEEE Conference Publications. – 2009. – P. 1-4.

27. Kostic, M. B. Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud / M.B. Kostic [et al.] // IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution. – 1999. – Vol. 146, № 1. – P. 1-6.

28. Буданов, П.Ф. Модель перколяции проводимости процесса электролитическиого заземления / П.Ф. Буданов, А.М. Чернюк // Озброєння і військова техніка. – 2012. – Вип. 2 (30) – С. 8-17.

29. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP / W.H. Pelton [et al.] // Geophysics. – 1978. – Vol. 43, № 3. – P. 588-609.

30. Han, Y.A. Unified inversion scheme to process multifrequency measurements of various dispersive electromagnetic properties / Y. Han, S. Misra // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. – 151. – P. 23-39.

31. García-Fiscal, S. Sensitivity of galvanic and inductive Induced Polarization methods to the Cole-Cole parameters / S. García-Fiscal, C. Flores // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 158. – P. 1-10.

32. Временные руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 3 – 750 кВ. – М.: Энергосетьпроект, 1979. – 102 с.

33. Павлович, И.А. Методики расчета сопротивления заземляющего устройства, выполненного с применением грунтозамещающей смеси, для оптимизации электрофизических параметров грунта / И.А. Павлович, В.М. Барайшук, В.В. Богданович // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2023. – № 4 (106). – С. 146-157.

34. Research on grounding grid electrical impedance tomography algorithm based on Tikhonov and TV hybrid regularization / X. Yan [et al.] // Chinese Journal of Scientific Instruments. – 2021. – Vol. 42. – P. 160-171.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 19.06.2025

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).
Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.
Стоимость подписки на 2-е полугодие 2025 года: для индивидуальных подписчиков - 49,62 руб., ведомственная подписка - 52,71 руб.