

УДК 621.316.99

Технико-экономическое обоснование применения специальных смесей для оптимизации электрофизических параметров грунтов при монтаже контуров заземления в Республике Беларусь

И. А. Павлович

С. М. Барайшук, кандидат физико-математических наук, доцент

Я. Л. Кленицкий

*Учреждение науки «Белорусский государственный аграрный
технический университет», г. Минск*

E-mail: bear_s@rambler.ru

Реферат. В статье предложено решение проблемы выполнения нормативных требований к заземляющим устройствам в условиях высокого удельного сопротивления грунта и сезонных колебаний, характерных в том числе для Республики Беларусь. Особое внимание уделено применению специальных грунтозамещающих смесей, в состав которых входят графит, зола и гидрогель. Эти компоненты способствуют снижению и стабильной поддержке электрофизических параметров грунта, что особенно актуально при монтаже контуров заземления в промерзающих и вечномёрзлых почвах. Предложен комплексный подход к оптимизации состава смеси, что позволяет добиться значительного уменьшения сопротивления контура заземления, снижения сезонных изменений сопротивления и повышения его долговечности. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих эффективность смесей с содержанием графита (15–18%) и золы (до 45%). Разработана математическая модель, описывающая зависимость удельного сопротивления от состава смеси и влажности. Математическое моделирование выявило оптимальные соотношения компонентов: содержание графита — 25–30%, гидрогеля — 1,0–1,2%, зольной составляющей — 15–20%. Достигнутый таким образом практический минимум удельного сопротивления грунта обеспечивает стабильную и эффективную работу заземляющих устройств. Такое техническое решение позволяет до 25% уменьшить объем работ по строительству контура заземления на 30% (для данного примера), уменьшить объем земляных работ и площадь земли, занятой контуром заземления. Экономическая оценка также показывает преимущества использования подобных смесей — сокращаются затраты на техническое обслуживание, а чистый дисконтируемый доход и срок окупаемости системы до 5 лет позволяют быстро вернуть инвестиции и повысить надежность электроустановок. Полученные результаты могут применяться при проектировании и эксплуатации заземляющих устройств в различных климатических зонах, а разработанная методика может быть использована для дальнейшей оптимизации состава грунтозамещающих смесей для повышения эффективности и безопасности электроснабжения.

Ключевые слова: заземляющее устройство, грунтозамещающие смеси, удельное сопротивление, графит, гидрогель, экономическая эффективность, математическая модель.

Введение. Заземляющее устройство должно обеспечивать безопасность людей и животных, защиту электроустановок любого напряжения и грозозащиту, сохраняя нормативные параметры в течение срока службы.

Особую сложность представляет проектирование на грунтах с высоким удельным сопротивлением и низкой влажностью [1].

Превышение сопротивления контура заземления нормативных значений, приве-

денных в нормативных документах, может привести к поражению током, повреждению оборудования, частотно-регулируемых приводов [2] и средств автоматизации. Для предотвращения этого применяют искусственное снижение сопротивления, увеличивая размеры контура.

Нами предложен способ использования композиционных смесей для заземлителей, в том числе глубинных, позволяющих снизить и стабилизировать сопротивление за счет равномерного распределения влажности и проводящих веществ вдоль электрода. Решение особенно эффективно при перепадах температур и в вечномёрзлых грунтах, а также для неглубоких заземлителей в промерзающих слоях [3].

Цель исследований. Целью представленной работы является анализ результатов моделирования оптимального состава смеси и обоснование, с использованием его результатов, экономической эффективности применения грунтозамещающей смеси для обратной засыпки в околоэлектродном пространстве контура заземления. В работе планируется показать преимущества применения таких смесей при строительстве контура заземления в сравнении с традиционными технологиями.

Условия, материалы и методы. Грунтозамещающие смеси — перспективный метод снижения удельного сопротивления грунта. Они представляют собой композиции проводящих материалов (глины, углеродные добавки — зола, графит, коксовая мелочь, металлические частицы), которые улучшают электропроводность грунта, стабилизируя его параметры при сезонных изменениях влажности [4].

Эффективность смесей зависит от состава и условий эксплуатации. Например, зола (до 45 %) и мелкодисперсный графит (15–18 %) дают сопоставимое снижение сопротивления, что позволяет оптимизировать затраты. Однако долговечность зависит от влажности, подвижности грунтов и вод, что требует периодического мониторинга [5].

Применение таких методов оптимизации электрофизических параметров заземляющих устройств требует соблюдения технологии и оценки экономической целесообразности, учитывая доступность материалов [1].

Для анализа влияния компонентов смеси (графита C , гидрогеля H и влажности W) на удельное сопротивление ρ (Ом·м) на основе данных, представленных в [6, 7, 8], требуется выделить ключевые зависимости, описывающие влияние состава смеси на ее удельное сопротивление.

C — концентрация углеродсодержащего компонента, снижающая удельное сопротивление.

H — концентрация гидрогеля, стабилизирующая влажность, влияя на проводимость.

W — относительная влажность, критический фактор для проводимости грунта.

Объединяя все факторы, можно записать:

$$\rho(C, H, W) = \rho_0 \cdot e^{-k \cdot C} \cdot H^{-a} \cdot e^{-A_2 \cdot W}. \quad (1)$$

На основе уравнения второго порядка составляем уравнение регрессии в общем виде:

$$\rho = b_0 + b_1 C + b_2 H + b_3 W + b_{11} C^2 + b_{22} H^2 + b_{33} W^2 + b_{12} CH + b_{13} CW + b_{23} HW. \quad (2)$$

Далее исключим незначительные коэффициенты, и уравнение регрессии примет вид:

$$\rho = 1,10 - 0,45C - 0,60H - 1,2W + 0,25HW. \quad (3)$$

Представим данные моделирования в виде поверхности отклика (рис. 1).

На данном рисунке хорошо прослеживается точка минимума функции. Теоретический минимум ρ достигается при $C=30\%$, $H=1,2\%$, $W=25\%$. Практический минимум ρ (без экстремальных значений): $C=25-30\%$, $H=1,0-1,2\%$, $W=15-20\%$.

Для математического описания этих зависимостей предложена комплексная модель, объединяющая экспоненциальную

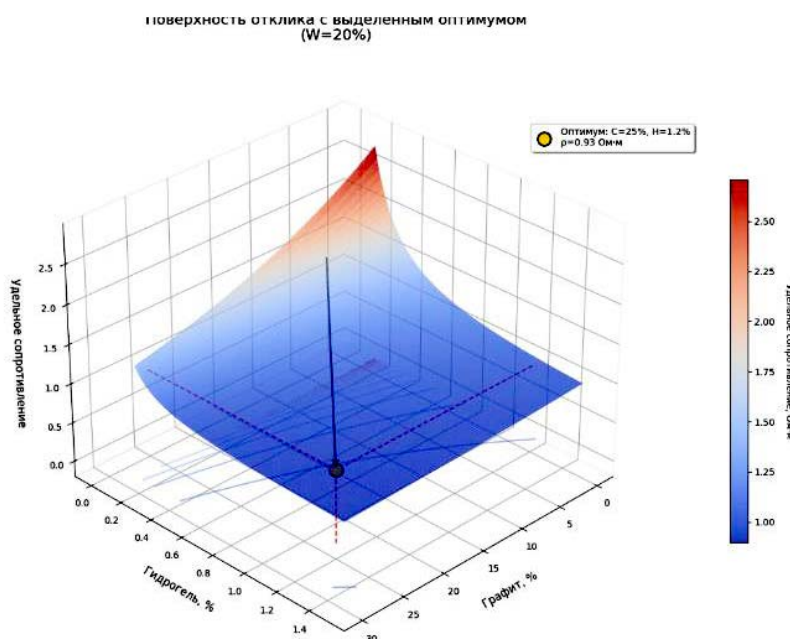


Рис. 1. Поверхность отклика

зависимость от содержания графита, степенную зависимость от содержания гидрогеля. Основное уравнение модели выводится последовательно на основании экспериментальных данных получено:

$$\rho_{\text{смеси}}(C, H) = \rho_0 \cdot e^{-0.068C} \cdot (1 + 1.25H)^{-0.85}, \quad (4)$$

где C — содержание графита (%),

H — содержание гидрогеля (%).

Для учета объемного замещения вводится коэффициент замещения $\xi = V_{\text{смеси}}/V_{\text{общ}}$:

$$\rho_{\text{эфф}} = \rho \cdot \left[1 + \xi \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{смеси}}} - 1 \right) \right]^{-1}. \quad (5)$$

Модификация для тонкого слоя:

Для околоэлектродной зоны ($\xi \ll 1$) получена аппроксимация:

$$\left(\frac{\rho_{\text{смеси}}}{\rho} \right)^{\frac{1}{3\pi}} \approx 1 + \frac{1}{3\pi} + \ln \left(\frac{\rho_{\text{смеси}}}{\rho} \right). \quad (6)$$

Проведенные нами исследования дают возможность эмпирически описать снижение сопротивления заземляющего устройства как величину, зависящую от изменения удельного сопротивления грунта:

$$\rho_{\text{экв}} = \rho_3 \cdot 0,98^{\frac{d_{\text{смеси}}}{d_3}} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{смеси}}}{\rho_3} \right)^{\frac{1}{3\pi}}, \quad \text{Ом} \quad (7)$$

$\rho_{\text{экв}}$ — искомое расчетное удельное сопротивление, Ом · м;

ρ_3 — удельное сопротивление грунта, Ом · м;

$d_{\text{экв}}$ — эквивалентный диаметр заземли-

теля, $d_{\text{смеси}} = \sqrt{\frac{V_{\text{смеси}}}{l}}$ м;

d_3 — диаметр заземлителя, м;

$\rho_{\text{смеси}}$ — удельное сопротивление смеси, Ом · м.

Данное уравнение проверено на образцах с различным содержанием компонентов и, соответственно, удельным сопротивлением. Сравнивая ее с представленной в работе [10] для коксовой мелочи, видно, что она более точно описывает влияние замены грунта на общее сопротивление заземляющего устройства.

Результаты и обсуждение. Для электроустановок напряжением до 1000 В ток однополюсного замыкания на землю не превышает 10А, т.к. даже при самом плохом состоянии изоляции и значительной ее емкости сопротивление фазы относительно

земли не бывает менее 100 Ом. Нормативное значение сопротивления защитного заземления (согласно ТКП 339–2022 [1] и ТКП 181–2023) не должно превышать значений, приведенных в таблице в этих ТНПА.

Проведем расчет контура заземления, исходя из наиболее допустимого сопротивления заземляющего устройства 4 Ом. Вначале приведем расчет без замены грунта в околоэлектродном пространстве.

Рассчитываем сопротивление растеканию вертикального заземлителя по формуле (3) из работы [9].

В расчете будем использовать следующие параметры ЗУ для вертикального глубинного электрода:

- удельное сопротивление грунта — $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- глубинный вертикальный заземлитель, состоящий из электродов длиной 1,5 м, соединенных между собой при помощи втулки и наконечника. Общая длина электрода — $l_B = 3 \text{ м}$, наружный диаметр электрода — $d_B = 16 \text{ мм}$, наружный диаметр втулки и наконечника — $d = 22 \text{ мм}$;
- расстояние от поверхности грунта до середины длины вертикального стержня равно $t = 2,3 \text{ м}$;

Рассчитываем сопротивление растеканию вертикального заземлителя:

$$R_6 = \frac{500}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,016} + 0,5 \ln \frac{4 \cdot 2 + 1}{4 \cdot 2 - 1} \right) = 160,6 \text{ Ом}. \quad (8)$$

Рассчитываем приближенное (минимальное) количество вертикальных стержней по формуле (9) [19]:

$$n' = \frac{R_6}{R_U} = \frac{160,6}{4} = 40,1 \approx 40 \text{ шт.} \quad (9)$$

Полученное число стержней n' округляем до ближайшего большего четного значения n .

За конфигурацию группового заземлителя принимаем контур.

Определяем соответствующую длину горизонтальной полосы l_z по формуле (10) [11], причем расстояние между вертикаль-

ными электродами кратно одной длине вертикального электрода $a = 3 \text{ м}$:

$$l_z = 1,05 \cdot a(n - 1) = 1,05 \cdot 3(40 - 1) = 123 \text{ м}. \quad (10)$$

Получим сопротивление горизонтального полосового заземлителя:

$$R_z = \frac{500}{2 \cdot 3,14 \cdot 123} \cdot \ln \frac{2 \cdot 123^2}{0,04 \cdot 0,52} = 9,2 \text{ Ом}. \quad (11)$$

Рассчитываем эквивалентное сопротивление растеканию тока группового заземлителя по формуле:

$$R_{zp} = \frac{R_6 \cdot R_z}{R_6 \cdot \eta_z + R_z \cdot \eta_6 \cdot n}, \text{ Ом}. \quad (12)$$

С учетом коэффициентов использования вертикальных стержней η^6 и коэффициента использования горизонтальной полосы η^z , с учетом числа вертикальных стержней n и отношения k расстояния между стержнями a к их длине l_6 получим: $R_{zp} = 3,99 \text{ Ом}$.

Получим, защитное заземление представляет собой защитный контур, состоящий из 40 вертикальных глубинных электродов, установленных на расстоянии 3 м, соединенных между собой горизонтальной полосой, смонтированной на глубине 0,5 м.

При применении околоэлектродных смесей необходимо использовать эквивалентное значение удельного сопротивления грунта с учетом замещения. Для определения эквивалентного удельного сопротивления грунта с учетом замещения части грунта смесью используем уравнения, полученные в [10] на основе экспериментальных данных для однослойного грунта:

$$\rho_{\text{экв}} = \rho_3 \cdot 0,98^{\frac{d_{\text{смеси}}}{d_3}} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{смеси}}}{\rho_3} \right)^{\frac{1}{3\pi}}. \quad (13)$$

Рассчитав эквивалентный диаметр вертикального заземлителя, определяем сопротивление растеканию одиночного вертикального заземлителя: $R_6 = 100,8 \text{ Ом}$.

Как и в первом случае рассчитывается приближенное (минимальное) количество вертикальных стержней:

$$n' = \frac{R_{\text{с}}}{R_U} = \frac{110,8}{4} = 27,7 \approx 28 \text{ шт.}$$

Определяем соответствующую длину горизонтальной полосы: $l_{\text{г}} = 1,05 \cdot a(n - 1) = 1,05 \cdot 3(12 - 1) = 85,8 \text{ м.}$

При этом сопротивление горизонтального заземлителя будет равным: $R_{\text{г}} = 15,4 \text{ Ом.}$ Расчет эквивалентного сопротивления растеканию тока группового заземлителя выполняем аналогично, однако коэффициенты использования вертикальных стержней $\eta^{\text{в}}$ и горизонтальной полосы $\eta^{\text{г}}$ определяем с учетом изменившегося числа вертикальных стержней n [11]. Полученное сопротивление растеканию тока группового заземлителя, $R_{\text{г}} = 3,98 \text{ Ом,}$ находится в допустимых пределах, $0,8R_U \leq R_{\text{г}} \leq R_U$ [11].

Из расчетов следует, что при использовании стабилизирующей смеси в качестве засыпки для замены грунта в околоэлектродном пространстве значение сопротивления растеканию ЗУ ниже нормируемого достигается при использовании значительно меньшего количества вертикальных электродов. Можно говорить об упрощении монтажа контура заземления, состоящего только из 28 электродов.

Произведем расчет чистого дисконтируемого дохода и срока окупаемости данного контура заземления при использовании грунтозамещающей смеси.

Капитальные затраты на материалы и монтаж контура заземления составляют 7462 белорусских рублей.

Эксплуатационные затраты на ежегодное техническое обслуживание — 200 руб./год

Выгоды при снижении потерь электроэнергии — 500 белорусских руб./год; снижение рисков аварий — 1 000 белорусских руб./год; снижение штрафов за несоблюдение нормативов — 300 белорусских руб./год, увеличение срока службы оборудования — 200 руб./год; срок службы контура заземления — 15 лет, ставка дисконтирования (r) — 11,5 %.

Годовой денежный поток (CF) рассчитывается как разница между выгодами и эксплуатационными затратами:

$$CF = \text{Выгоды} - \text{Эксплуатационные затраты}, \quad (14)$$

$$CF = (500 + 1000 + 300 + 200) - 200 = 1800 \text{ руб./год.}$$

Расчет чистого дисконтированного дохода:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (15)$$

где CF_0 — стоимость монтажа контура заземления, руб.;

CF_t — годовой денежный поток (по годам);

r — ставка дисконтирования;

n — срок службы, лет;

$$\text{ЧДД} = -7462 + \sum_{t=1}^{15} \frac{1800}{(1+0,115)^t}.$$

Сначала найдем сумму дисконтированных денежных потоков:

$$\sum_{t=1}^{15} \frac{1800}{(1+0,115)^t} = 1800 \cdot \frac{1-(1+0,115)^{-15}}{0,115} = 12371,4.$$

Теперь рассчитаем ЧДД:

$$\text{ЧДД} = -7462 + 12\,371,4 = 5012 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости — это время, за которое суммарные денежные потоки покроют начальные затраты.

$$\text{Срок окупаемости} = \frac{CF_0}{CF_t}$$

$$\text{Срок окупаемости} = \frac{7462}{1800} \approx 4,15 \text{ года}$$

По результатам расчетов получено, что чистый дисконтированный доход составит 5012 белорусских руб. Таким образом, монтаж контура заземления с применением предложенной смеси для оптимизации заземления и стоимость технического обслуживания такого контура окупятся менее чем за 4,2 года. Стоит отдельно отметить, что в условиях недостатка рабочих кадров уменьшается объем работ до 25 % при до-

стижении тех же технических характеристик, что уменьшает нагрузку на работников и увеличивает их эффективность труда. И, для данного примера на 30 % уменьшается площадь, отведенная под монтаж контура заземления, что может быть особенно важно в условиях плотной застройки или при монтаже контура заземления взамен утратившего свою работоспособность при ограниченной доступности почвы для проведения земляных работ.

Выводы. Проведен анализ экономической и технической эффективности применения грунтозамещающей смеси для обратной засыпки в околоэлектродном пространстве контура заземления. Установлено, что использование смеси позволяет существенно снизить стоимость заземляющего устройства за счет уменьшения металлоем-

кости конструкции и упрощения монтажных работ. Монтаж заземляющего устройства с применением смеси требует меньших трудозатрат и времени по сравнению с традиционными методами, что повышает производительность работ.

Расчеты экономической эффективности показали, что проект с использованием грунтозамещающей смеси является рентабельным, с положительным чистым дисконтированным доходом и коротким сроком окупаемости. Применение смеси также способствует снижению потерь электроэнергии за счет уменьшения утечек тока, улучшения стабильности работы оборудования и снижения электромагнитных помех.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ T25УЗБ-024.

Литература

1. Грибанов А. Бипронтм для заземления в высокоомных грунтах // Экспозиция Нефть Газ. 2017. № 2 (55). С. 136–137.
2. Кахоцкий М. И., Барайшук С. М., Павлович И. А. Применение золы в качестве компонента засыпки при монтаже заземлителей // Энергосбережение — важнейшее условие инновационного развития АПК: мат. междунар. научно-технич. конф., Минск, 21–22 декабря 2021 г. Минск: БГАТУ, 2021. С. 353–356.
3. Павлович И. А., Барайшук С. М. Снижение электрического сопротивления заземляющих устройств применением грунтозамещающей смеси на основе графита и гидрогеля для стабилизации электрофизических параметров грунта // Энергетика. 2023. Т. 66, № 4. С. 322–332.
4. Павлович И. А., Барайшук С. М., Богданович В. В. Методики расчета сопротивления заземляющего устройства, выполненного с применением грунтозамещающей смеси, для оптимизации электрофизических параметров грунта // Вестник Фонда фундаментальных исследований. 2023. № 4. С. 146–157.
5. Прищепов М. А., Прищепова Е. М., Дайнеко В. А. Энергоэффективный частотно-регулируемый асинхронный электропривод в сельском хозяйстве. Минск: БГАТУ, 2022. 312 с.
6. Смирнов О. В., Сухачев И. С. О некоторых особенностях устройства заземления и расчета молниезащиты // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2014. № 2. С. 102–106.
7. СН 4.04.03–2020 Молниезащита зданий, сооружений и инженерных коммуникаций. Введен 21.04.2021. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. 161 с.
8. Способ снижения сезонных изменений сопротивления заземляющих устройств / С. М. Барайшук, И. А. Павлович, М. Х. Муродов и др. // Агропанорама. 2023. № 6(160). С. 19–25.
9. ТКП 339–2022 (33240) Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловых и аккумуляторных, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний. Введен 20.12.2022. Минск: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2022. 593 с.
10. Development of low resistivity material for grounding resistance reduction / E. Al-Ammar, Y. Khan, N. Malik, N. Wani et al. // IEEE International Energy Conference. 2010. P. 700–703.

11. Pavlovich I., Baraishuk S., Skripko A. Ensuring the reliability of energy systems with the application of a new method of decreasing seasonal variations of ground resistance // Energy Systems Research. 2023. Vol. 6, № 1. P. 37–40.

TECHNICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION FOR THE USE OF SPECIAL MIXTURES TO OPTIMIZE THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF SOILS DURING THE INSTALLATION OF GROUNDING CIRCUITS IN THE REPUBLIC OF BELARUS

I. A. Pavlovich, C. M. Barayshuk, Ya. L. Klenitsky
Belarusian State Agrarian Technical University

Abstract. This article addresses the challenge of meeting regulatory requirements for grounding systems under conditions of high soil resistivity and seasonal variations, which are characteristic, among other places, of the Republic of Belarus. Special attention is given to the use of specialized soil-replacement mixtures composed of graphite, ash, and hydrogel. These components contribute to reducing and maintaining stable electrophysical parameters of the soil, which is particularly important when installing grounding contours in frozen and permafrost soils. A comprehensive approach to optimizing the mixture composition is proposed, enabling a significant reduction in the resistance of the grounding contour, decreasing seasonal variations in resistance, and enhancing its durability. Experimental research results are presented, confirming the effectiveness of mixtures containing graphite (15–18 %) and ash (up to 45 %). A mathematical model has been developed to describe the dependence of specific resistance on the mixture composition and moisture content. Mathematical modeling identified the optimal component ratios as follows: graphite content 25–30 %, hydrogel 1,0–1,2 %, and ash component 15–20 %. The practical minimum soil resistivity achieved in this way ensures stable and efficient operation of grounding devices. This technical solution allows reducing the amount of work required for grounding contour construction by up to 25 %, as well as decreasing earthworks and the land area occupied by the grounding contour by 30 % (in the presented example). Economic analysis further demonstrates the advantages of using these mixtures — maintenance costs are lowered, and the net discounted income along with a payback period of up to five years facilitates quick investment recovery while enhancing the reliability of electrical installations. The obtained results can be applied in the design and operation of grounding systems across various climatic zones. Additionally, the developed methodology may be used for further optimizing soil-replacement mixtures to increase the efficiency and safety of power supply systems.

Keywords: grounding device, soil-replacing mixtures, specific resistance, graphite, hydrogel, economic efficiency, mathematical model.

УДК 631.333.53: 631.862.1

Определение аэродинамических свойств пеллет органического удобрения

А. В. Пасин, доктор технических наук, профессор

Р. В. Кошелев, кандидат технических наук, доцент

А. В. Никулин, кандидат технических наук

С. М. Назаров

А. А. Костерин

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет имени Л. Я. Флорентьева»

E-mail: emtp.ngsha@yandex.ru

Реферат. Органические удобрения играют ключевую роль в современном сельском хозяйстве, способствуя повышению плодородия почвы и улучшению качества выращиваемых культур. Одним из перспективных видов органических удобрений является «Комплекс-Био». Это удобрение представляет