

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-322-332>

УДК 621.316.99

Снижение электрического сопротивления заземляющих устройств применением грунтозамещающей смеси на основе графита и гидрогеля для стабилизации электрофизических параметров грунта

И. А. Павлович¹⁾, С. М. Барайшук¹⁾

¹⁾Белорусский государственный аграрный технический университет
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат: В статье рассмотрены факторы, влияющие на электрическое сопротивление растекания тока заземляющего устройства; электрофизические параметры грунта, влияющие на его удельное сопротивление, и учет таких параметров при проектировании заземляющих устройств. Показано, что удержание влаги в околоэлектродном пространстве заземлителя, а также поддержание ее на определенном уровне способствуют улучшению качества и надежности работы заземления. Установлена связь между способностью удерживать влагу и величиной сезонных колебаний электрического сопротивления грунта, а также коэффициентом сезонности, учитывающим изменения при разных климатических условиях окружающей среды. Рассмотрены вопросы применения различных способов снижения удельного сопротивления грунта при монтаже заземляющих устройств. Одним из основных способов снижения сопротивления заземления является применение растворов различных минеральных солей. Этот метод не оптимален, так как ускоряет коррозионные процессы в материалах электродов заземления. Также рассмотрены и другие способы снижения сопротивления контура заземления. В частности, авторами предложен метод уменьшения сопротивления заземляющего устройства на основе метода частичной замены грунта в околоэлектродной области на смесь с более низким удельным сопротивлением на основе графита и гидрогеля, способной собирать влагу. Данный тип смеси является экологически безопасным при применении и не агрессивным к материалу заземляющего контура. Принцип работы смеси основан на том, что гидрогель позволяет стабилизировать влажность в месте закладки контура, а графит повышает общую проводимость смеси. В работе представлены результаты лабораторных исследований, которые проводились согласно ГОСТ 9.602–2016. Для этого контрольные образцы помещались в емкости из непроводящего материала (оргстекло) и осуществлялись измерения зависимости удельного сопротивления от влажности, температуры, удельного содержания графита и гидрогеля. В статье приведены графики зависимостей удельного сопротивления смеси от влажности, температуры, количественного содержания гидрогеля. Из полученных результатов можно сделать вывод о возможности применения смеси в энергетике для повышения надежности работы электроустановок и обеспечения электробезопасности.

Ключевые слова: заземление, грунтозамещающая смесь, коэффициент сезонности, графит, гидрогель, влажность, электролитический заземлитель

Для цитирования: Павлович, И. А. Снижение электрического сопротивления заземляющих устройств применением грунтозамещающей смеси на основе графита и гидрогеля для стабилизации электрофизических параметров грунта / И. А. Павлович, С. М. Барайшук // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 322–332. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-322-332>

Адрес для переписки

Барайшук Сергей Михайлович
УО «Белорусский государственный аграрный
технический университет»
просп. Независимости, 99,
223023, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 775-76-37
bear_s@rambler.ru

Address for correspondence

Baraishuk Siarhei M.
Belarusian State Agrarian
Technical University
99, Nezavisimosty Ave.,
223023, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 775-76-37
bear_s@rambler.ru

Reduction of the Electrical Resistance of Grounding Devices by the Use of a Soil Replacement Mixture Based on Graphite and Hydrogel to Stabilize the Electrophysical Parameters of the Soil

I. A. Pavlovich¹⁾, S. M. Baraishuk¹⁾

¹⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract: This article discusses the factors that affect the electrical resistance of the current spreading of the grounding device. The issue of the electrophysical parameters of the soil that affect its resistivity and the consideration of such parameters in the design of grounding devices is considered. It is shown that keeping moisture in the near-electrode space of the grounding electrode, as well as maintaining it at a certain level, facilitates improving the quality and reliability of the grounding. A relationship has been established between the ability to retain moisture and the magnitude of seasonal fluctuations in the electrical resistance of the soil, and also the season factor, which takes into account changes under different climatic environmental conditions. The issues of application of various methods of reducing the resistivity of the soil during mounting of grounding devices are considered. One of the main ways to reduce ground resistance is the use of solutions of various mineral salts. This method is not optimal, as it accelerates the corrosion processes in the materials of the ground electrodes. Therefore, the paper also considers other ways to reduce the resistance of the ground loop; in particular, the authors propose a method for reducing the resistance of a grounding device based on the method of partial replacing the soil in the near-electrode region with a mixture with a lower resistivity capable of collecting moisture based on graphite and hydrogel. This type of mixture is environmentally friendly when used, as well as it is non-aggressive to the material of the ground loop. The principle of operation of this mixture is based on the fact that the hydrogel makes it possible to stabilize the moisture at the site of laying the circuit, while graphite increases the overall conductivity of the mixture. The paper presents the results of laboratory studies, which have been carried out in accordance with GOST 9.602–2016. For this purpose, control samples were placed in containers made of a non-conductive material (plexiglas) and dependence of resistivity on moisture, temperature, specific content of graphite and hydrogel was measured. The article presents graphs of the dependences of the mixture specific resistance on moisture, temperature, and the quantitative content of the hydrogel. From the results obtained, it can be concluded that the mixture can be used in the energy sector to improve the reliability of electrical installations and ensure electrical safety.

Keywords: grounding, soil-substituting mixture, season factor, graphite, hydrogel, moisture, electrolytic grounding

For citation: Pavlovich I. A. Baraishuk S. M. (2023) Reduction of the Electrical Resistance of Grounding Devices by the Use of a Soil Replacement Mixture Based on Graphite and Hydrogel to Stabilize the Electrophysical Parameters of the Soil. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 322–332. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-322-332> (in Russian)

Введение

Заземляющее устройство (ЗУ) важная часть технических мероприятий, обеспечивающих надежную работу электроустановок, применяемых для защиты человека от поражения электрическим током при случайном прикосновении к токопроводящим частям электрооборудования.

Электрическое сопротивление ЗУ зависит от множества факторов: непосредственное электрическое сопротивление материалов заземляющих электродов, качество выполнения контактных соединений элементов кон-

тура заземления, конфигурация (эти факторы определяются качеством выполнения работ), а также удельное сопротивление грунта в околоэлектродном пространстве и коэффициент сезонного изменения удельного сопротивления грунта, внимание которым уделяют только в случае высоких удельных сопротивлений.

В свою очередь для удельного сопротивления грунта определяющими параметрами являются состав, влажность и температура [1, 2]. Удельное сопротивление определяет свойства грунта создавать благоприятные свойства для растекания тока, возникающего вследствие замыкания на корпус электрооборудования в аварийных ситуациях, а также возникновения напряжения в металлических элементах конструкций зданий и сооружений.

Для Беларуси значения удельного электрического сопротивления грунтов идентичных типов во всех областях отличаются незначительно и могут быть приняты усредненными. В других грунтах, за исключением песка, ожидаемое удельное электрическое сопротивление не превышает 600 Ом·м [3], однако коэффициент сезонности может достигать значения 4. Удельное сопротивление зависит от типов почвы (песок, глина, известняк), размеров и плотности прилегания частиц, влажности и температуры, а также химического состава почвы, наличия в ней кислот, солей, щелочей [4].

Состояние рассматриваемого вопроса

Согласно исследованиям [1], влияние пористости почвы и способности удерживать влагу непосредственно влияет на удельное сопротивление грунта. Результаты научных изысканий [1] показывают, что при высокой степени минерализации грунта, обусловленной содержанием ионов растворов солей, содержащихся в почве, удельное сопротивление растеканию электрического тока снижается. Исходя из этого можно сделать вывод, что увеличение способности грунта удерживать влагу, стабилизировать влажность в околоэлектродном пространстве способствует улучшению свойств заземляющего устройства.

Также одним из факторов, влияющих на способность ЗУ выполнять свои функции, является глубина промерзания почвы [5]. Коэффициент сезонности сопротивления ЗУ указывает на изменение сопротивления контура в зависимости от климатических условий той или иной местности, а также на температурный режим почвы. Колебание сопротивления ЗУ в течение года приводит к необходимости увеличения количества электродов в контуре, глубины их залегания, чтобы компенсировать сезонное увеличение сопротивления. Необходимость обеспечивать регламентируемую величину сопротивления контура приводит к перерасходу материалов заземляющих проводников, увеличению объема производимых монтажных работ, что сказывается на увеличении затрат.

При монтаже контуров заземления применяются различные способы уменьшения сопротивления заземляющих устройств, такие как использование различных типов материалов электродов, а также применение разных видов добавок (электролитов) и замена грунта в околоэлектрод-

ном пространстве иным, имеющим более низкое удельное сопротивление, чем исходный грунт [6].

Согласно зарубежным исследованиям, удельное сопротивление грунта может быть уменьшено применением в околоэлектродном пространстве хлорида натрия, сульфата магния, сульфата меди и хлорида кальция или аналогичных веществ [7, 8]. Наибольшее распространение получило применение поваренной соли и сульфата магния [9]. Данный способ сводится к обработке околоэлектродного пространства, чтобы не было непосредственного контакта с электродом заземляющего устройства. Эту обработку необходимо периодически повторять вследствие вымывания этих веществ, также их использование увеличивает скорость корродирования материалов, из которых выполняется заземляющий контур. Для предотвращения скорого разрушения электродов появляется необходимость применения защитных покрытий, которые должны иметь достаточную проводимость [9]. Поэтому применение данного метода ограничено из-за повышенных капиталовложений в строительство ЗУ.

Другим методом уменьшения сопротивления грунта, а как следствие, и всего ЗУ является применение заземляющих электродов в бетонной оболочке. Бетонная оболочка ниже уровня грунта представляет собой полупроводниковую среду с удельным сопротивлением около 30 Ом·м при 20 °С или несколько ниже, чем у среднего суглинка [1]. Использование заземлителя с бетонным покрытием, содержащим песок, нитрофоску, графит, цемент в нужных количествах, способствует обеспечению необходимой проводимости и срока эксплуатации ЗУ [10].

В Российской Федерации широкое распространение получило использование смесей минерального активатора грунта. Эта смесь представляет собой электропроводящий полусухой электролит. Применение данного способа эффективно только совместно с полыми перфорированными электродами заземлителя, устойчивыми к коррозии. Как правило, они изготавливаются из толстостенной трубы нержавеющей стали. При взаимодействии с почвой смесь диффундирует, образуя электролит [11]. Основной проблемой использования данного метода является повышенная коррозия как самих электродов, так и стальных элементов других конструкций, расположенных в непосредственной близости от них.

Еще одним способом уменьшения удельного электрического сопротивления грунта является использование углеродосодержащих порошков (графит). Этот метод позволяет повысить проводимость в грунтах, обладающих очень высоким электрическим сопротивлением (порядка 400–600 Ом·м), но имеет низкую эффективность при сопротивлении ниже 100 Ом·м [9].

Применение омедненных заземлителей рекомендуется [14] в почвах с высоким удельным сопротивлением. Сам медный электрод имеет более низкие механические характеристики по сравнению со сталью, поэтому более широкое хождение получили омедненные электроды, полученные электрохимическим способом. Толщина медного слоя достигается в районе 250 мкм, этого достаточно для снижения сопротивления растеканию тока.

Однако применение омедненных и оцинкованных элементов систем заземления приводит к ухудшению работы ЗУ. Это связано с тем, что медь, которая обладает положительным стандартным потенциалом, совместно с углеродистой низколегированной сталью, имеющей отрицательный стандартный потенциал, приводит к повышенной коррозии в местах соединения [12].

Еще одним решением, снижающим сопротивление контура заземления, является использование глубинных заземлителей длиной более 15 м. Целесообразность их применения в электросетевом строительстве обосновывается двумя основными факторами:

- заземлители могут достигать нижележащих слоев земли с низким удельным сопротивлением, что способствует снижению их сопротивления за счет достижения водонасыщенных слоев грунта;
- сезонный коэффициент таких заземлителей при их длине 10 м и выше приблизительно равен 1 [9].

Другим способом увеличения способности удерживать воду в близлежащих к электродам заземлителях, слоях почвы является применение гидролизованного полиакрилонитрила, в том числе в составе смеси.

Гидролизированный полиакрилонитрил (гидрогель) является экологически безопасным. Исследования [9] указывают на то, что замена части грунта в околоэлектродном пространстве данной смесью способна уменьшить сопротивление грунта. Снижение этого показателя объясняется тем, что гидрогель связывает влагу в почве и не дает ей уходить. Вода с гидрогелем не вымывает минеральные вещества из грунта. Исследования доказывают, что введение в смесь углеродистых наполнителей и глины позволяет еще больше снижать сопротивление грунта.

Кроме того, применение данного способа позволяет снизить температуру замерзания грунта, что дает возможность использовать более высокие средние многолетние низшие температуры при определении климатической зоны площадки месторасположения проектируемого электрооборудования [9].

Исследование влияния используемой смеси на основе гидрогеля на коэффициент сезонности позволило определить, что он снижается до 20 % по сравнению с контрольным заземлителем [9].

Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что применение того или иного метода снижения сопротивления ЗУ или удельного сопротивления грунта в области расположения электродов заземления влечет за собой трудности.

В связи с тем, что в Республике Беларусь введен ТКП 427-2022 (33240), где нормированное значение наведенного сопротивления грунта снизилось до 25 В, необходимо выработать наиболее эффективный способ снижения сопротивления ЗУ. В качестве возможного решения сложившейся проблемы нами было предложено использование грунтозамещающей смеси на основе графита и гидрогеля.

Методика проведения эксперимента

Для проведения лабораторных экспериментальных исследований грунтозамещающей смеси и грунта были построены измерительные ячейки, согласно методике, изложенной в ГОСТ 9.602–2016. Измерения проводились по схеме, представленной на рис. 1. Для измерений использовались:

источник постоянного тока стабилизированный Union Test HY 3005d;

миллиамперметр Victor класса точности 1.5 с диапазоном 100 и 500 мА;

вольтметр Victor с входным сопротивлением не менее 1 МОм;

ячейка из диэлектрического материала (оргстекло) прямоугольной формы с внутренними размерами: $a = 100$ мм, $b = 45$ мм, $h = 45$ мм.

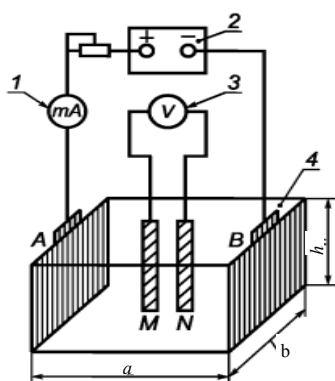


Рис. 1. Схема установки для определения удельного электрического сопротивления грунта и смесей в лабораторных условиях: 1 – миллиамперметр; 2 – источник тока; 3 – вольтметр; 4 – измерительная ячейка размерами a , b , h ; A и B – внешние электроды; M и N – внутренние электроды

Fig. 1. Scheme of the installation for determining the electrical resistivity of soil and mixtures in laboratory conditions: 1 – milliammeter; 2 – current source; 3 – voltmeter; 4 – measuring cell with dimensions a , b , h ; A and B – external electrodes; M and N – internal electrodes

Результаты измерений

Натурные испытания смеси проводились ранее, их результаты представлены в работах [13, 14]. В данной работе исследована зависимость удельного сопротивления смеси от температуры, влажности и содержания гидрогеля. Результаты представлены на рис. 2 [13].

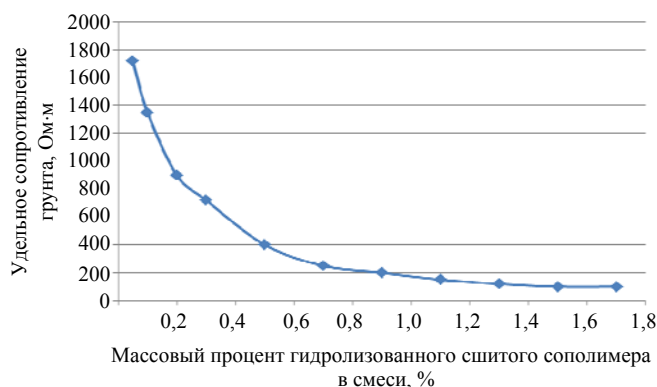


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления грунта от содержания в нем активированного гидрогеля

Fig. 2. Dependence of soil resistivity on the content of activated hydrogel in it

Как видно, при концентрации выше 0,7 % сопротивление меняется незначительно, а при превышении концентрации 1,2 % транспортная функция сшитых сополимеров достигает насыщения, и сопротивление смесей практически не изменяется, что позволяет говорить, о том, что повышение концентрации более 1,3 % не будет столь эффективным [13].

На следующем этапе были проведены исследования зависимости удельного сопротивления от температуры при одинаковой влажности контрольного образца (обычного грунта) и смеси. Результаты эксперимента приведены на рис. 3.

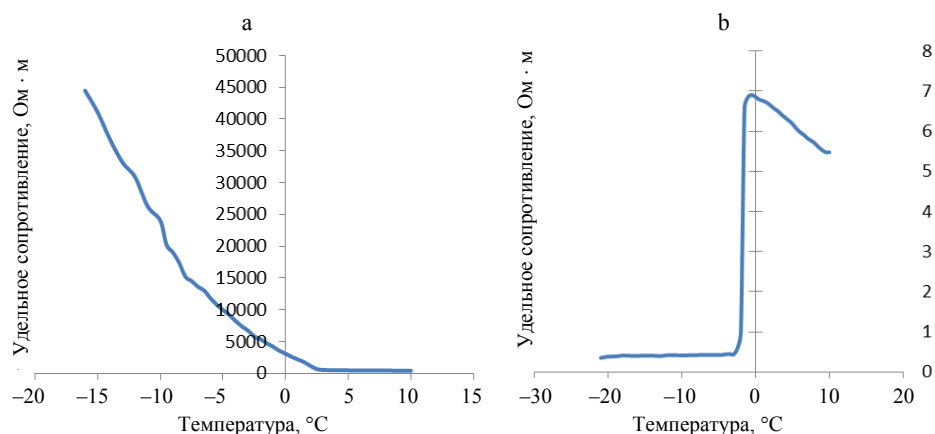


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления грунта (а) и экспериментальной смеси (b) от температуры при влажности 35 %

Fig. 3. Dependence of the resistivity of the soil (a) and the experimental mixture (b) on temperature at moisture of 35 %

При росте температуры происходит скачкообразное увеличение сопротивления, обратное тому, что мы видим для сопротивления грунта (рис. 3а). Это объясняется переходом влаги образца 2 в другое агрегатное состояние и последующим плавным снижением сопротивления до его полной стабилизации в районе 5 Ом·м (рис. 3b).

Полученные данные указывают на то, что происходит снижение влияния температуры на значение удельного сопротивления в околоэлектродном пространстве контура заземления.

В дальнейшем экспериментальная часть включала в себя определение зависимости удельного сопротивления смеси при различной влажности и температуре (рис. 4).

Как видно из графика, температура замерзания составляет от $-3,5$ до -2 °C. Кроме того, мы видим аномальное поведение удельного сопротивления, а именно его уменьшение при замерзании. Такое явление можно объяснить уплотнением проводящих частей графита, содержащегося в смеси. Это позволяет говорить о возможной компенсации сезонных колебаний электрофизических параметров грунта, влияющих на сопротивление заземляющего устройства.

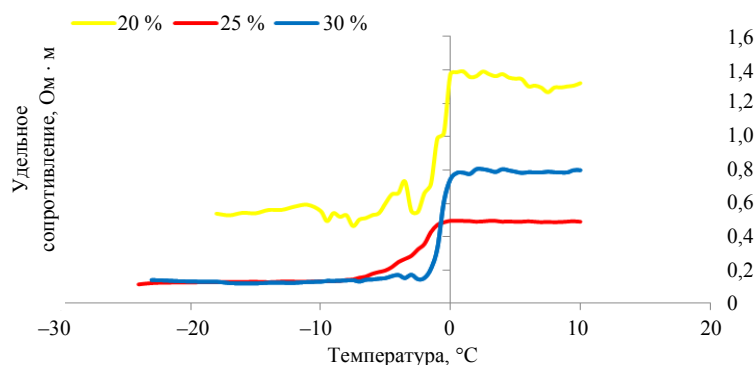


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления смеси от температуры при различной влажности

Fig. 4. Dependences of the mixture specific resistance on temperature at different moisture

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

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

где $\rho_{\text{экв}}$ – искомое расчетное удельное сопротивление, Ом · м; ρ_3 – удельное сопротивление грунта, Ом · м; $d_{\text{смеси}}$ – эквивалентный диаметр заземлителя, м; d_3 – диаметр заземлителя, м; $\rho_{\text{смеси}}$ – удельное сопротивление смеси, Ом · м.

Формула (1) получена эмпирически и проверена на образцах с различным содержанием компонентов и, соответственно, удельным сопротивлением.

Сравнивая полученную формулу (1) с представленной в работе [15] для коксовой мелочи, проводя необходимые расчеты, можно увидеть, что формула (1) более точно описывает влияние замены грунта на общее сопротивление заземляющего устройства.

ВЫВОД

В работе получены результаты исследований температурной и концентрационной зависимости удельного электрического сопротивления. Оно не согласуется с известной зависимостью, что расширяет возможность применения этой смеси в районах с низкой среднегодовой температурой.

Проведенные исследования показали снижение сезонной зависимости сопротивления контура заземления [6, 9, 13], что позволяет говорить о снижении сопротивления контура за счет снижения удельного сопротив-

ления грунта $\rho_{уд}$, снижении сезонности. Вкупе с обратной зависимостью от температуры делает их интересными с точки зрения модификации грунтов с удельным сопротивлением больше 200 Ом·м.

Предложенная эмпирическая формула хорошо описывает влияние удельного сопротивления и его объема в месте монтажа на изменение удельного сопротивления грунта.

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что применение грунтозамещающей смеси при монтаже заземляющих устройств является обоснованным, так как это ведет к уменьшению удельного сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. IEEE Std 142–2007. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. Approved 7 June 2007. 225 p. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2007.4396963>.
3. Драко, М. А. Коррозия заземлителей электроустановок / М. А. Драко // Энергетическая стратегия. 2019. № 6. С. 44–48.
4. 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.
5. Кучеренко, Д. Е. Влияние особенностей грунта на расчет и проектирование ЗУ / Д. Е. Кучеренко, Д. Н. Грищенко // COLLOQUIUM-JOURNAL. 2018. № 12–6. С. 84–90.
6. Барайшук, С. М. Снижение сезонных колебаний сопротивления растеканию тока заземляющих устройств применением смесей для стабилизации влажности грунта / С. М. Барайшук, И. А. Павлович, М. И. Кахоцкий // Эпоха Науки. 2020. № 24. С. 87–93.
7. Grounding System Design Method in High Soil Resistivity Regions / Zhuang Chijie [et al.] // Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering. 2008. Vol. 34, No 5. 893–897.
8. The influence of Seasonal Soil Moisture on the Behavior of Soil Resistivity and Power Distribution Grounding Systems / L. Coelho Vilson [et al.] // Electric Power Systems Research. 2015. Vol. 118. P. 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.027>.
9. Драко, М. А. О разработке смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила для уменьшения удельного электрического сопротивления грунта / М. А. Драко, С. М. Барайшук, И. А. Павлович // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 80–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92>.
10. Tung, C. C. Performance of Electrical Grounding System in Soil at Low Moisture Content Condition at Various Compression Levels / C.C. Tung, S. C. Lim // Journal of Engineering Science and Technology. 2017. Vol. 12, Special Iss. 1. P. 27–47.
11. Грибанов, А. Н. Бипрон – заземление электроустановок / А. Н. Грибанов // Экспозиция Нефть Газ. 2016. № 4. С. 72–75.
12. Kirkpatrick, E. L. The conflict Between Copper Grounding Systems and Cathodic Protection Systems [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.elkeng.com/pdfs/6-The-Conflict-Between-Copper-GroundingCP122001.pdf>.

13. Снижение сопротивления заземляющих устройств применением обработки грунта неагрессивными к материалу заземлителя стабилизирующими влажностью добавками / С. М. Барайшук [и др.] // Агропанорама. 2021. № 5 (147). С. 28–33.
14. Павлович, И. А. Температурная зависимость удельного сопротивления грунтозамещающих композиционных смесей для оптимизации заземления / И. А. Павлович, С. М. Барайшук, М. Х. Муродов // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 21–22 декабря 2021 г. Минск: БГАТУ, 2021. С. 230–232.
15. Профессиональный центр знаний zandz.com о молниезащите и заземлении [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://zandz.com/ru/>. Дата доступа: 24.10.2022.
16. 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 и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний: ТКП 339-2011(02230). Введ. 23.08.2011. Минск: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2011. 593 с.
17. Молниезащита зданий, сооружений и инженерных коммуникаций: СН 4.04.03-2020. Введ. 21.04.2021. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. 161 с.

Поступила 04.10.2022 Подписана в печать 13.12.2022 Опубликовано онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Vedeneeva L. M., Chudinov A. V. (2017) Investigation of the Influence of the Basic Properties of Soil on the Resistance of Grounding Devices. *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Politekhnicheskogo Universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i Gornoe Delo = Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 16 (1), 89–100 (in Russian).
2. IEEE Std 142–2007. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. Approved 7 June 2007. 225. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2007.4396963>.
3. Drako M. A. (2019) Corrosion of Grounding Conductors of Electrical Installations. *Energeticheskaya Strategiya* [Power Strategy], (6), 44–48 (in Russian).
4. Vedeneeva L. M., Chudinov A. V. (2016) Investigation of the Influence of Soil Moisture and Porosity on the Value of Their Conductivity. *Vestnik PNIPU. Bezopasnost' i Upravlenie Riskami* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Safety and Risk Management], (5), 119–130 (in Russian).
5. Kucherenko D. E., Grishchenko D. N. (2018) The Influence of Soil Features on the Calculation and Design of the Storage Device. *Colloquium-Journal*, (12–6) (23), 84–90 (in Russian).
6. Baraishuk S. M., Pavlovich I. A., Kakhotsky M. I. (2020) Reduction of Seasonal Fluctuations in the Resistance to the Spreading of the Current of Grounding Devices Using Mixtures to Stabilize Soil Moisture. *Epokha Nauki* [The Age of Science], (24), 87–93 (in Russian).
7. Zhuang Chijie, Zeng Rong, Zhang Bo, HE Jin-Liang (2008) Grounding System Design Method in High Soil Resistivity Regions. *Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering*, 34 (5), 893–897 (in Chinese).
8. Vilson L. C., Piantini A., Almaguer H. A. D., Coelho R. A., Boaventura W. C., Paulino J. O. S. (2015) The Influence of Seasonal soil Moisture on the Behavior of Soil Resistivity and Power Distribution Grounding Systems. *Electric Power Systems Research*, 118, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2014.07.027>.
9. Drako M.A., Baraishuk S. M., Pavlovich I. A. (2021) Compound Mixtures Based on Hydrolyzed Polyacrylonitrile Reducing Soil Electrical Resistivity. *Power Engineering: Research*,

- Equipment, Technology*, 23 (1), 80–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92> (in Russian).
10. Tung C. C., Lim S. C. (2017) Performance of electrical Grounding System in Soil at Low Moisture Content Condition at Various Compression Levels. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12 (Special Issue), 27–47.
 11. Griбанов А. Н. (2016) Bipron: Grounding of Electrical Installations. *Ekspozitsiya Neft' Gaz = Exposition Oil & Gas*, (4), 72–75 (in Russian).
 12. Kirkpatrick E. L. *The Conflict Between Copper Grounding Systems and Cathodic Protection Systems*. Available at: <https://www.elkeng.com/pdfs/6-The-Conflict-Between-Copper-GroundingCP122001.pdf>.
 13. Barayshuk S. M., Pavlovich I. A., Murodov M. H., Abdullaev H., Skripko A. N. (2021) Reducing the Resistance of Grounding Devices by Using Soil Treatment with Moisture-Stabilizing Additives that Are Not Aggressive to the Grounding Material. *Agropanorama*, (5), 28–33 (in Russian).
 14. Pavlovich I. A., Barayshuk S. M., Murodov M. H. (2021) Temperature Dependence of the Resistivity of Soil-Substituting Composite Mixtures for the Optimization of Grounding. *Energosbereazhenie – Vazhneishee Usloviye Innovatsionnogo Razvitiya APK: Materialy Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii, Minsk, 21–22 Dekabrya 2021 g.* [Energy Saving as the Most Important Condition for the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, December 21–22, 2021] Minsk, BGATU, 230–232 (in Russian).
 15. Professional Knowledge Center Zandz. *Com on Lightning Protection and Grounding*. Available at: <https://zandz.com/ru/> (accessed 24 October 2022) (in Russian).
 16. ТКР 339-2011(02230) *Electrical Installations for Voltage up to 750 kV. Power Transmission Lines, Overhead and Current Lines, Distribution and Transformer Substations, Electric Power and Battery Installations, Electrical Installations of Residential and Public Buildings. Rules and Protective Measures of Electrical safety. Electricity Accounting. Norms of Acceptance Tests*. Minsk, Ministry of Energy of the Republic of Belarus, 2011. 593 (in Russian).
 17. SN 4.04.03-2020 *Lightning Protection of Buildings, Structures and Utilities*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2020. 161 (in Russian).

Received: 4 October 2022

Accepted: 13 December 2022

Published online: 31 July 2023