

# Техническое и физико-математическое направления

УДК 621.316.9, 624.131.437.311  
DOI 10.24411/2409-3203-2020-12417

## СНИЖЕНИЕ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЕКАНИЮ ТОКА ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПРИМЕНЕНИЕМ СМЕСЕЙ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА

**Барайшук Сергей Михайлович**

к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой практической подготовки студентов

**Павлович Иван Александрович**

магистр технических наук, ассистент кафедры подготовки студентов

**Кахоцкий Мирослав Иванович**

магистрант кафедры подготовки студентов

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

Республика Беларусь, г. Минск

**Аннотация:** проведен анализ зависимости удельного сопротивления грунта от влажности, на основе которого предложен состав для нормализации (уменьшения сезонности) удельного электрического сопротивления грунта. Проведен ряд натурных экспериментов по измерению значений сопротивлений заземляющих устройств экспериментальных контуров, после применения засыпки мест закладки элементов контура различными составами и внесением других типов грунтов и минералов.

**Ключевые слова:** заземляющее устройство, удельное электрическое сопротивление грунта, заземлитель, околоэлектродное пространство, смеси для оптимизации сопротивления заземления, физико-химические параметры грунта, коэффициент сезонности.

## REDUCTION OF SEASONAL VIBRATIONS OF RESISTANCE OF GROUNDING DEVICES BY USING MIXTURES TO STABILIZE GROUND MOISTURE

**Baraishuk Siarhei M.**

PhD, Associate Professor, Head of the Department of practical training of students.

**Pavlovich Ivan A.**

Assistant of the Department of practical training of students

**Kakhotskiy Miroslav I.**

Master's student of the Department of practical training of students

Belarusian State Agrarian Technical University

Belarus, the city of Minsk

**Abstract:** The analysis of the dependence of the soil resistivity on moisture was carried out, on the basis of which a composition was proposed for normalizing (reducing the seasonality) of the soil resistivity. A number of full-scale experiments were carried out to measure the values of the resistances of the grounding devices of the experimental circuits, after applying the filling of the installation sites of the circuit elements with various compositions and the introduction of other types of soils and minerals.

**Keywords:** grounding device, electrical resistivity of soil, ground electrode, near-electrode space, mixtures for optimizing grounding resistance, physical and chemical parameters of soil, seasonality coefficient.

Заземление должно удовлетворять требованиям обеспечения безопасности людей и животных, защиты электроустановок, а также обеспечения эксплуатационных режимов работы электроустановок и грозозащиты [1].

Наибольшее число ЗУ энергетических систем выполняется в виде соединенных различным образом горизонтальных и вертикальных элементов. Характерной особенностью таких заземлителей является то, что поперечные размеры отдельных элементов, как правило, существенно меньше их длины. Это позволяет при расчете основных электрических параметров (сопротивление растеканию, распределение потенциала и напряженности поля в среде) пренебречь неравномерностью распределения плотности тока [2].

Наиболее важными факторами, влияющими на величину сопротивления растеканию тока контура заземления, являются конфигурация контура заземления и удельное сопротивление грунта. Для удельного сопротивления грунта, в свою очередь, определяющими параметрами являются влажность и температура [3 – 4]. Известны различные технологии выполнения заземляющих устройств и способы их монтажа, которые включают в себя как использование различного типа заземлителей, так и использование различного рода добавок: электролитов, вводимых в около электродное пространство заземлителя, а также замену части грунта в около электродном пространстве иным, имеющим более низкое удельное сопротивление, чем исходный грунт.

В некоторых случаях для достижения нормированных величин электрических параметров ЗУ требуется значительное количество вертикальных электродов и, соответственно, большая дополнительная площадь под искусственный заземлитель. Нерациональное использование стали при традиционном выполнении системы заземления, как правило, ведет к излишним капитальным затратам. При этом эксплуатационные характеристики заземляющих устройств не улучшается.

Согласно зарубежной практике, удельное сопротивление почвы может быть уменьшено до 90% введением в около электродное пространство хлорида натрия, сульфата магния, сульфата меди и хлорида кальция или аналогичных веществ. Чаще всего используются поваренная соль и сульфат магния. Химические вещества обычно наносят, помещая их в круглую канавку вокруг электрода таким образом, чтобы предотвратить прямой контакт с электродом. Однако такая обработка непостоянна и должна периодически обновляться в зависимости от способа химической обработки и характеристик почвы. Также данный способ отрицательно сказывается на защите заземляющих электродов от коррозии [5]. Так же, широко распространено использование заземляющих электродов в бетонной оболочке. Бетон ниже уровня земли представляет собой полупроводниковую среду с удельным сопротивлением около 30 Ом·см при 20° С или несколько ниже, чем у среднего суглинка [6]. Использование для анодного заземлителя токопроводящей бетонной оболочки, содержащей песок, препарат коллоидно-графитовый, цемент, шунгитовую крошку, нитрофоску в указанных количествах позволяет обеспечить достаточную электрическую проводимость и срок действия устройства [7].

В Российской Федерации получило распространение использование минерального активатора грунта «МАГ-2000», представляющего собой полусухой электролит или электропроводящий гидрогель, увеличивающий площадь токоотдачи, имеющий низкое сопротивление растеканию тока электрод – грунт, использование которого возможно и достаточно эффективно лишь совместно с заземляющими электродами «Бипрон». Данные электроды изготовленными из нержавеющей стали и имеющими внутри специальный многокомпонентный наполнитель, который подбирается в зависимости от влажности почвы

и климатических условий. [8]. При взаимодействии с грунтом наполнение электродов диффундирует в грунт через перфорацию в стенках электрода, так же образуя электролит.

Проведенные исследования по активности коррозии металлических конструкций воздушных линий электропередач [9], показывают, что в климатических условиях Беларуси коррозия металлоконструкций систем энергоснабжения и, в том числе, заземления наблюдаются на участке до 1 м. ниже уровня земли, что хорошо согласуется с геологическими данными по типичным грунтам. Поэтому применение электролитических заземлений мелкого заглубления противоречит требованиям [10]. В целях сохранения работоспособности и улучшения долговечности заземляющих проводников необходимо своевременное выполнение мероприятий по антикоррозионной защите, одним из которых может явиться снижение кислотности почвы в местах заложения ЗУ. Наиболее актуальны эти мероприятия для горизонтальных участков проводников. Перспективным способом защиты ЗУ от коррозии является применение обработки грунта веществами и смесями, неагрессивными к материалу заземлителя, содержащими ингибиторы коррозии, либо вещества, уменьшающие кислотность почвы в околоэлектродном пространстве. В частности, нормативные документы рекомендуют применять заливку глинистым или другим проводящим раствором.

Анализ, ранее исследованных зависимостей сопротивления почвы от влажности, описанных в частности в [11], хорошо согласуются с результатами полученными авторами и представленными на рисунке 1 и показывает, что стабилизация влажности грунта по величине 12-16 массовых процентов является оптимальной, дальнейшее увеличение влажности уже не приводит, к сколь либо значительному снижению сопротивления.

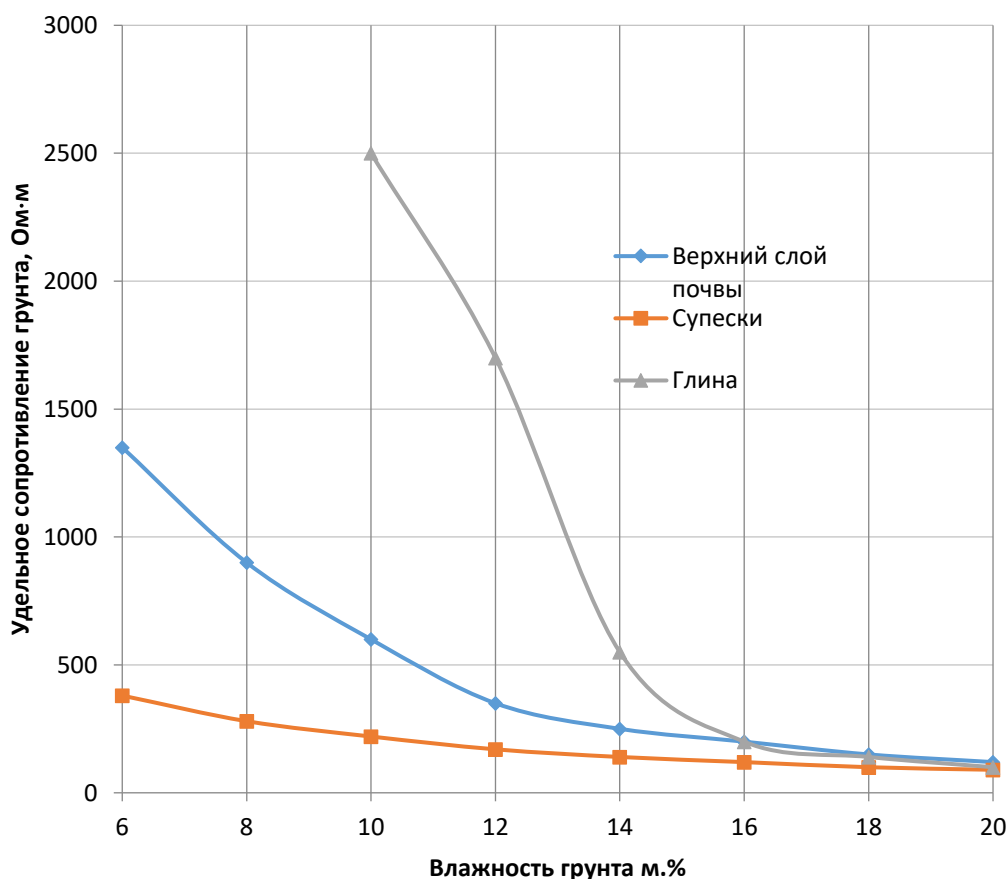


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления растеканию тока различных грунтов от влажности, выраженной в массовых процентах.

Анализ различных экспериментальные исследования свойств гидросорбирующих агентов, например, гидрогелей на основе гидролизованного полиакрилонитрила проведенные в частности в работах [4, 12 – 14], показывает, что введение их в незначительных количествах в околоэлектродное пространство грунта способствует стабилизации влажности грунта, а также формированию вокруг электрода связанного электролитического гелеобразного раствора. Это не токсичное, не загрязняющее окружающую среду и применяемое даже в сельскохозяйственном производстве вещество является основным стабилизирующим влажность компонентом смесей для оптимизации заземления. Исследование динамики транспортных свойств гидрогелей, проведенное в [14-15], так же показало принципиальную возможность использовать гидролизованный полиакрилонитрил в качестве гелеобразного (полусухого) электролита, в следствии процессов транспортировки и перераспределения ионных оснований, адсорбированных с водным раствором, внутри состава. На основании этих данных авторы исследовали спектр составов смеси, содержащей гидростабилизирующие добавки, бентонит, проводящие добавки, и зольные добавки. Зола хорошо регулирует рН грунта, а следовательно, уменьшает кислотность почвы и сформированных гидрогелей, что способствует уменьшению коррозионного воздействия на заземляющий электрод, и соответственно увеличению срока службы.

На рисунке 2 приведены результаты измерений удельного сопротивления смеси грунта с гидролизованным полиакрилонитрилом в различных пропорциях.

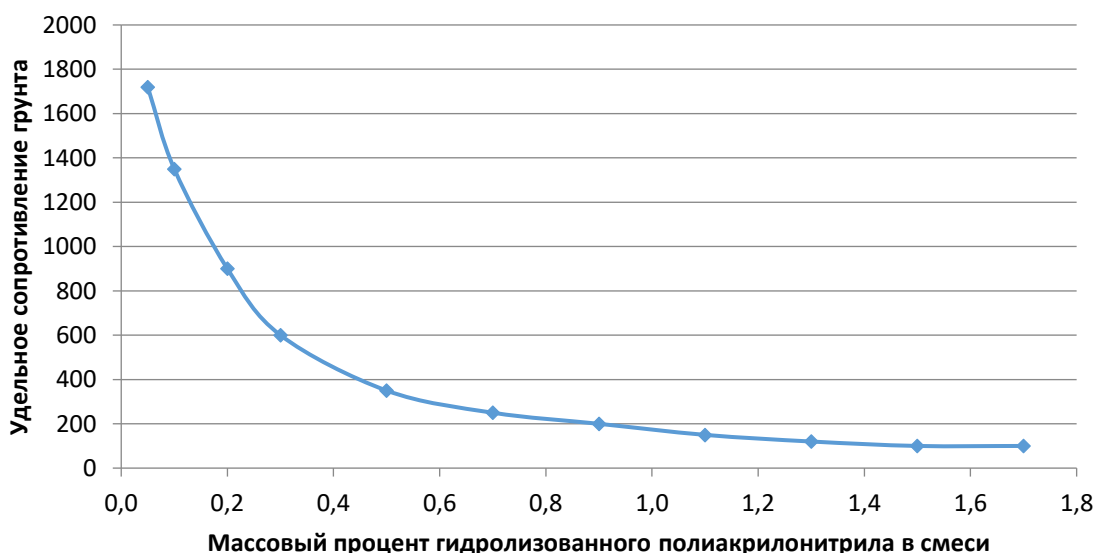


Рис.2. Зависимость удельного сопротивления грунта от процента введения геля на основе гидролизованного полиакрилонитрила.

Как видно из графика, представленного на рисунке 2, при внесении гидрогелей полученных набуханием гидролизованного полиакрилонитрила сухой массой более 1,3-1,5% от массы грунта происходит стабилизация влажности, и дальнейшее увеличение концентрации не приводит к уменьшению удельного сопротивления грунта, что косвенно указывает на получение оптимальной влажности грунта.

При проведении натурных экспериментов на супесчаном грунте были смонтированы заземляющие устройства (контуры заземления), представляющие собой два вертикальных электрода из стали диаметром 12 мм длиной 2 м, соединенных горизонтальной полосой 4x40 мм длиной 4м. В околоэлектродном объеме грунта экспериментального контура при монтаже проведена обработка гидролизованным полиакрилонитрилом. Систематические

измерения значений сопротивления ЗУ и удельного электрического сопротивления грунта в месте заложения экспериментальных и контрольных контуров выполнялись каждые 10 дней при помощи измерителя ИС-10, по предложенной производителем оборудования методике.

Результаты экспериментальных исследований сопротивления контрольного и экспериментального контура, приведены на рисунке. 3. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что наименьшее значение сопротивления имеет ЗУ, околоэлектродное пространство которого обработано экспериментальной смесью для снижения сопротивления растеканию ЗУ.

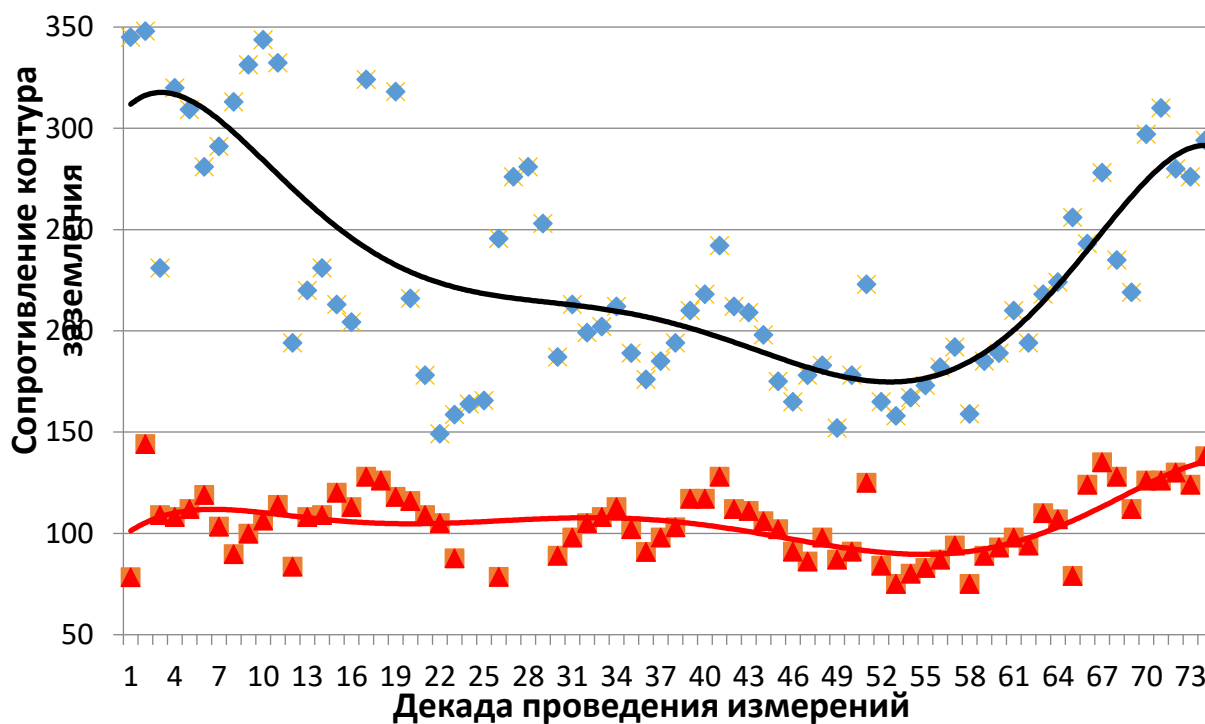


Рис. 3. Значения сопротивления растеканию тока контрольного (синие маркеры и линия) и экспериментального (красные маркеры и линия) контура, измеряемые каждые 10 дней.

Как видно из графика, применение гидрогеля позволяет не только уменьшить колебания сопротивления растеканию ЗУ, но и уменьшить сопротивление ЗУ в сравнении с контрольным контуром. Согласно [16-17], 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 °С удельное сопротивление грунта на глубине 0,5 м - увеличивается в 3 раза. Применение предложенной добавки так же снижает температуру замерзания грунта на 4-6 °С, что дает возможность использовать более высокие средние многолетние низшие температуры при определении климатической зоны площадки месторасположения проектируемого электрооборудования, и уменьшать коэффициенты сезонности при интерпретации натуральных измерений. Проведенные исследования показали, что влияние на снижение электрического сопротивления можно разделить на 2 фактора: изменение коэффициента сезонности и уменьшение удельного сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве, что позволяет внести корректировки в расчеты сопротивления заземлителя при применении смесей при монтаже ЗУ. Очевидно, что эффективность такой замены тем выше, чем больше разница удельного электрического сопротивления грунта и смеси, а так же чем большее количество грунта заменено в околоэлектродном пространстве. Это обеспечит максимально продолжительное

предупреждение промерзания грунта в осенне-зимний период, что является одним из факторов для качественной работы заземляющего устройства.

#### Заключение

Применение смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила наиболее эффективно при использовании совместно с заземлителями глубина заложения которых меньше глубины промерзания грунта, то есть находящимися в слоях грунта с наибольшими сезонными колебаниями, и будет расти при увеличении площади контакта таких заземлителей с грунтом, обработанным гидролизованным полиакрилонитрилом. Замечено и для вертикальных составных заземлителей уменьшение коэффициента сезонности для вертикальных, по-видимому, обусловлено влиянием смеси на их части, смонтированные вблизи поверхности грунта. Применение комплексных смесей содержащих, помимо гидростабилизирующих добавок так же и низкодиспергированные проводящие вещества, и ингибиторы коррозии позволяет уменьшить сопротивление ЗУ в сравнении с контрольными ЗУ, сгладить сезонные колебания сопротивления ЗУ и капитальные затраты на монтаж ЗУ путем уменьшения количества электродов и размеров территории, на которой они располагаются. Таким способом достигается не только искусственное снижение удельного сопротивления грунта в около электродной зоне, но и обеспечивается уменьшение глубины промерзания грунта в зимний период. А также, за счёт уменьшения кислотности почвы уменьшается коррозионное воздействие на заземляющий электрод и, соответственно, увеличение срока службы заземляющего устройства.

#### Список литературы:

1. Смирнов О.В., Сухачев И.С. О некоторых особенностях устройства заземления и расчета молниезащиты // Известия вузов «Нефть и газ». - Тюмень, 2014. - № 2. - С. 102-106.
2. Ивлиев Е.А. К расчету электрических параметров стержневых заземлителей // Электричество, 1992, № 7, с. 41–44.
3. Веденева 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.
4. IEEE Std 142 -2007 IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. – Approved 7 June 2007. 225 p.
5. Драко М.А. Коррозия заземлителей электроустановок // Энергетическая стратегия, 2019, № 6 (69), с. 44–48.
6. Веденева 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.
7. Tung C.C., Lim S.C. Performance of electrical grounding system in soil at low moisture content condition at various compression levels // Journal of Engineering Science and Technology. - 2017. - Vol. 12, Special Issue 1. - P. 27-47.
8. Грибанов, А.Н. Бипрон – ззаземление электроустановок / А.Н. Грибанов // Экспозиция Нефть Газ. – 2016. – С. 72-75.
9. Колик, В.Р., Драко М.А., Мойсеенко О.А. Актуальность обследования заземляющего устройства и устройств молниезащиты подстанций 35 кВ и выше // Энергетическая стратегия, 2014, № 2, с .23–25.
10. 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). Мн.: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2011, 593 с.

11. P.A. Ferre, J.D. Redman, D.L. Rudolph, and R.G. Kachanoski, "The dependence of the electrical conductivity measured by time domain reflectometry on the water content of a sand", *Water Resour. Res.*, 1998.

12. Lai, Yang & Hu, Yuhang. (2018). Probing the swelling-dependent mechanical and transport properties of polyacrylamide hydrogels through AFM-based dynamic nanoindentation. *Soft Matter*. 14. 10.1039/C7SM02351K.

13. Ширинов Ш.Д., Джалилов А.Т. Исследование кинетики набухания синтезированных гидросорбентов на основе гидролизованного полиакрилонитрила // *Universum: Химия и биология : электрон. научн. журн.*, 2018, № 3 (45).

14. Барайшук, С.М., Павлович И.А. Снижение сопротивления заземляющих устройств применением обработки грунта неагрессивными к материалу заземлителя стабилизирующими влажностью добавками // *Агропанорама*, 2020, № 1 (137), с. 20–23.

15. Драко М.А., Барайшук С.М., Ерусланов В.Л. Перспективные направления развития практики проектирования заземляющих устройств электроустановок Белорусской энергосистемы // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации. В 3-х книгах. / Книга 3 / Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2020, 364 с. С 144–153.*

16. Ланзони, Дж. Особенности заземления в условиях вечномерзлых грунтов / Дж. Ланзони // *Краткий технический обзор. – 2005.*

17. Zhou M., Wang J., Cai L., Fan Y. Laboratory investigations on factors affecting soil electrical resistivity and the measurement // *IEEE Transactions on Industry Applications*. - 2015. - Art. No. 7182309.

