

## СНИЖЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПРИМЕНЕНИЕМ ОБРАБОТКИ ГРУНТА НЕАГРЕССИВНЫМИ К МАТЕРИАЛУ ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ СТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ ВЛАЖНОСТЬ ДОБАВКАМИ

**С.М. Барайшук,**

*зав. каф. практической подготовки студентов БГАТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент*

**И.А. Павлович,**

*ассистент каф. практической подготовки студентов БГАТУ*

*Рассмотрены возможные способы уменьшения сопротивления контура заземления для высокоомных грунтов. На основании результатов исследований проведен анализ влияния смесей для оптимизации заземления на удельное сопротивление грунта, коэффициент сезонности, сопротивление контура заземления.*

*Ключевые слова: заземляющее устройство, удельное электрическое сопротивление грунта, электробезопасность, коэффициент сезонности.*

*The possible ways of reducing the resistance of the ground loop for high-resistance soils are considered. Based on the results of the research, the analysis of the effect of mixtures for optimizing grounding on the soil resistivity, the seasonality coefficient, and resistance of the ground loop was carried out.*

*Keywords: grounding device, ground electrical resistivity, electrical safety, seasonality coefficient.*

### Введение

При проектировании, монтаже и обслуживании заземляющих устройств в грунтах, имеющих высокое удельное сопротивление растеканию тока, для снижения сопротивления заземления рекомендуется использовать ряд технических решений, одним из которых является применение обработки грунта веществами и смесями, неагрессивными к материалу заземлителя, для снижения сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве [1]. С этой целью используют различные виды околоэлектродных заполнителей. В данной статье рассмотрено влияние компонентов разрабатываемых смесей на сопротивление контура заземления.

Для повышения эффективности заземлителя и снижения переходного электрического сопротивления «электрод – грунт» рекомендуется увеличивать площадь токоотдачи вокруг электрода. Для этого используют различные технические решения, например использование для анодного заземлителя токопроводящей бетонной оболочки, что позволяет обеспечить достаточную электрическую проводимость и увеличить срок службы устройства [2]. Электрическая проводимость токопроводящей оболочки создается за счет введения в бетонную смесь коллоидно-графитового и углеродного наполнителя.

Еще одним, более распространенным вариантом, является использование засыпки глиной, угольной или коксовой мелочью, электролитом из минеральных солей, а также и других материалов, не активирующих коррозию металлов заземляющего устрой-

ства [3]. Известны минеральные активаторы, производящиеся на территории СНГ [4], представляющие собой смесь искусственного графита, бетонита, модифицированную галогенидным активатором и ПАВ. При использовании электролитов можно достигнуть значительного снижения удельного сопротивления грунта, однако через 2-4 года требуется повторная обработка околоэлектродного пространства. Попытки устранить эти недостатки введением в землю вокруг электрода металлы в измельченном виде (коллоидные растворы, мелкая металлическая стружка) [5] показали, что коллоиды неустойчивы в почве, они вымываются дождевой водой, кроме того данный способ не соответствует нормам экологической безопасности. Все описанные выше решения имеют ряд недостатков, основными из которых являются: применимость только в регионах с достаточно высокой и стабильной влажностью грунта и увеличение стоимости монтажа заземляющего устройства.

Целью настоящей работы является изучение возможности уменьшения сопротивления контура заземления применением смесей, стабилизирующих влажность и увеличивающих проводимость в околоэлектродном пространстве.

### Основная часть

Наиболее перспективным методом снижения сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве, а значит и сопротивления заземляющего устройства в целом, является использование электропроводящего состава, неагрессивного к материалу

заземлителя и стабилизирующего влажность [5-6] непосредственно в околоэлектродном пространстве. В таком случае обеспечивается, как уменьшение температуры замерзания несвязанной влаги в грунте за счет ее связывания, так и уменьшение сопротивления грунта за счет формирования связанных электролитических растворов. Введение гидростабилизирующих веществ на основе гидролизованного полиакрилонитрила эффективно при снижении высоких сопротивлений заземлений (порядка 400-600 Ом) и малоэффективно при величинах сопротивлений менее 100 Ом. В этом случае он может давать сколь либо заметный эффект только в сочетании с углеродосодержащими порошками, аналогично известным ранее способом оптимизации сопротивления заземления. На основе нормативных документов и имеющегося опыта, авторами проводились исследования влияния таких смесей и их отдельных компонентов на сопротивление заземляющих устройств.

Для проведения исследований были смонтированы несколько заземляющих устройств: контрольный контур заземления, представляющий собой вертикальный составной электрод из оцинкованной стали диаметром 16 мм, длиной 3 м, и горизонтальный фрагмент соединительной полосы размером 4x50 мм той же длины, без применения добавок. Экспериментальные контуры имели аналогичную конструкцию, но в околоэлектродном объеме грунта была проведена обработка смесями или отдельными веществами для оптимизации сопротивления заземления. Измерения параметров сопротивления заземляющих устройств выполнялись при помощи измерителя ИС-10 трехпроводным методом, при разных значениях температуры (выше и ниже 0 °С) и влажности окру-

жающей среды и грунта. Результаты измерений сопротивления контуров приведены в таблице 1.

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что наименьшее значение сопротивления имеет заземляющий контур 3. Однако наибольший интерес

**Таблица 1. Результаты измерений параметров сопротивления контуров в течение месяца после монтажа**

Дата	Значение сопротивления ЗУ	Значение сопротивления ЗУ	Значение сопротивления ЗУ	Значение сопротивления ЗУ	Значение сопротивления ЗУ
	1	2	3	4	5
24.10.2018	348	114	74	121	210
28.10.2018	332,3	107,3	70,8	117,3	191
30.10.2018	333,7	106,7	87,3	156	290,7
09.11.2018	194	83,5	70,7	88,3	191
13.11.2018	220	108	78	94	187
18.11.2018	231	109	81,7	93,2	182
29.11.2018	204,3	113	78,9	79,3	184,8

представляет уменьшение колебаний сопротивления на контуре 2, в котором в околоэлектродное пространство добавлен единственный компонент – гидролизированный полиакрилонитрил [7]. Этот состав не токсичен, не загрязняет окружающую среду и используется в сельскохозяйственном производстве. Годовые графики изменения сопротивления приведены для контрольного контура и контура 2, выполненного с применением смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила (рис. 1).

Применение такой добавки в грунт снижает температуру замерзания грунта на 4 °С, что дает возможность использовать более высокие средние многолетние низшие температуры, при определении к какой климатической зоне относится площадка проектирования заземления. Исследования показали, что влияние на снижение сопротивления можно разделить на два фактора: изменение коэффициента сезонности и уменьшение удельного сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве.

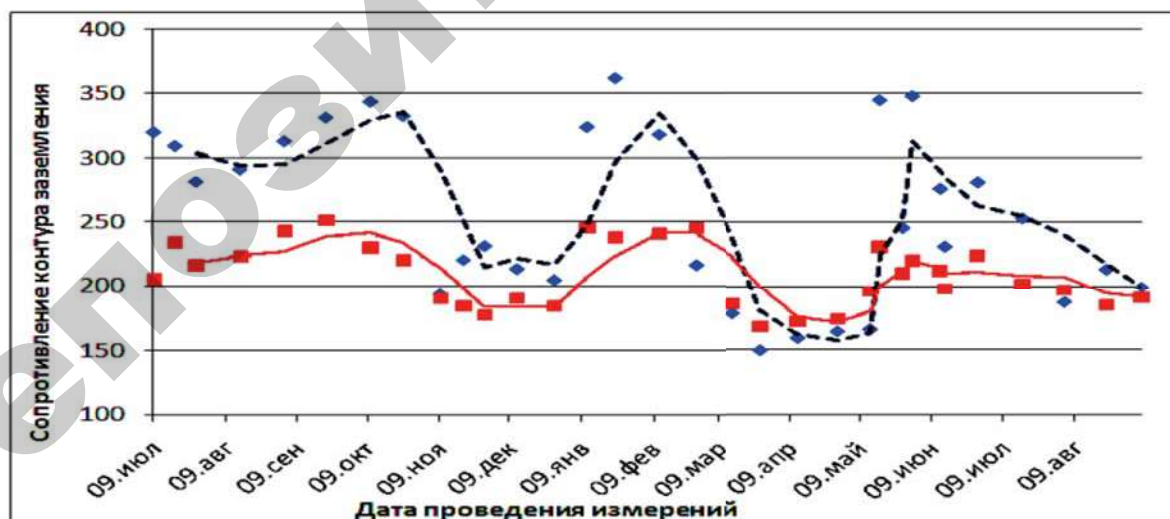


Рисунок 1. Годовой график изменения сопротивления контрольного (верхняя кривая) и контура, выполненного с применением гидролизованного полиакрилонитрила (нижняя кривая)

**Расчет сопротивления заземлителя при применении смесей для оптимизации**

Основным параметром, определяющим электропроводность грунта и особенности растекания электрического тока в нем, является удельное электрическое сопротивление грунта. Эта величина зависит от состава грунта и слоистости, размеров частиц грунта и плотности их прилегания друг к другу, влажности и близости грунтовых вод, температуры, концентрации растворенных химических веществ и их химических свойств. На практике данную величину измеряют с учетом поправочного коэффициента, учитывающего температуру и влажность (коэффициент сезонности), и используют как базовый параметр для расчета заземления. Чем меньше удельное сопротивление грунта, тем меньше будет сопротивление растеканию тока заземляющего устройства, и необходима меньшая площадь переходного контакта «заземлитель – грунт».

В случае применения смесей для оптимизации сопротивления заземления, происходит частичная замена исходного грунта в околоэлектродном пространстве на смесь, имеющую в рабочем состоянии значительно меньшее удельное сопротивление. При этом параметром, влияющим на изменение сопротивления, будет площадь соприкосновения смеси и исходного грунта, а в случае применения ее по всей длине электрода – периметр контакта. Очевидно, что эффективность такой замены тем выше, чем больше разница удельного сопротивления грунта и смеси, а также чем большее количество грунта заменено в околоэлектродном пространстве. В последнем случае эффективность замены спадает по экспоненциальному закону, и при значительном периметре контакта (более 1 метра) фактически не имеет целесообразности. Экспериментальные данные показывают, что максимально эффективно применение замещающих смесей для создания периметров контакта в диапазоне 0,4-1 м, при этом при расчете контура заземления необходимо использовать эквивалентное удельное сопротивление грунта вместо измеренного сопротивления исходного грунта.

Эквивалентное удельное сопротивление грунта с учетом замещения части грунта смесью можно определить, используя формулу, полученную на основе экспериментальных данных для однослойного грунта (1) и двухслойного грунта (2)

$$\rho_{\text{экс}} = \Psi \cdot \left( \rho_{\text{грунт}} \frac{1}{e^{1,3/P}} + \frac{20}{e^{4/P}} \right), \quad (1)$$

$$\rho_{\text{экс}} = \Psi \left( \frac{\rho_{1\text{грунт}} \cdot \rho_{2\text{грунт}} \cdot l}{\rho_{1\text{грунт}} (l - H + t) + \rho_{2\text{грунт}} (H - t)} \right) \times \left( \frac{1}{e^{1,3/P}} + \frac{20}{e^{4/P}} \right) \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{экс}}$  – искомое эквивалентное удельное сопротивление грунта, Ом·м;

$\rho_{\text{грунт}}$  – полученное в результате натуральных измерений удельное сопротивление грунта, Ом·м;

$\Psi$  – коэффициент сезонности;

$H$  – глубина верхнего слоя грунта, м;

$t$  – глубина траншеи, м;

$l$  – длина вертикального заземлителя, м;

$P$  – периметр сечения замещающей смеси, м.

Схема размещения в грунте вертикального составного заземлителя представлена на рисунке 2.

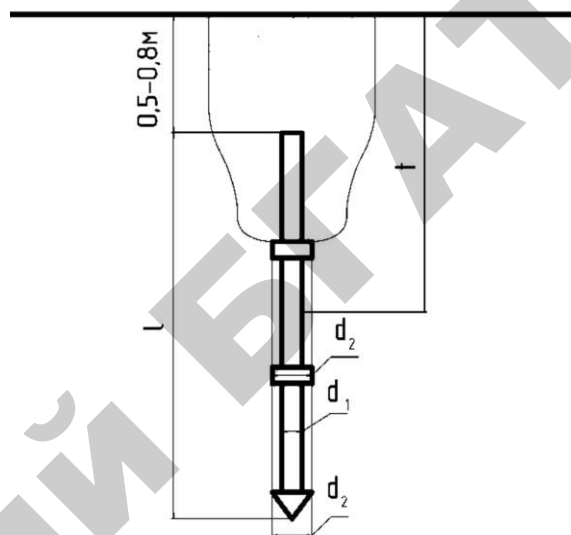


Рисунок 2. Схема размещения в грунте вертикального составного заземлителя

При использовании вертикальных составных заземлителей диаметром  $d_1=16$  мм, для их соединений применяются втулки и наконечники  $d_2=22$  мм (рис. 2). При забивании электрода, прорываемый грунт проливается смесью, которая заполняет пустоты, образовавшиеся от муфт и наконечника (диаметр этих пустот, как правило, соответствует диаметру муфт и наконечника  $d_2$ ), а ближе к поверхности превышает их. Минимальный периметр контакта в таком случае  $P=\pi d \approx 0,069$  м, но на самом деле из-за вибраций периметр будет несколько больше, его нужно учесть при расчете эквивалентного удельного сопротивления грунта для вертикального электрода. Аналогично для горизонтальной полосы, размещенной в траншее шириной 0,2 м и засыпанной слоем 0,1 м смеси, периметр контакта смеси с исходным грунтом  $P=0,6$  м.

В случае использования вертикального составного заземлителя круглого сечения, заглубленного в землю (рис. 2) в условиях обработки смесью околоэлектродного пространства, уравнение для расчета сопротивления заземлителя примет вид:

$$R_{\text{экс}} = \frac{\rho_{\text{экс}}}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d_{\text{экс}}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (3)$$

где  $l$  – длина вертикального заземлителя, м;

$d_{\text{экс}}$  – эквивалентный диаметр заземлителя, м;

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

$d_{э\text{кв}}$  – эквивалентный диаметр заземлителя, м, определяется по формуле (4). Данная поправка корректирует вклад изменения удельного сопротивления грунта в околоэлектродном слое (объема, возникающего при прохождении соединительных муфт в грунте) при замещении грунта смесью с низким удельным сопротивлением.

$$d_{э\text{кв}} = d_{з\text{азем}} \left( 1 + \frac{(d_{муфты} - d_{з\text{азем}})}{d_{з\text{азем}}} \cdot \frac{\rho_{э\text{кв}}}{\rho_{грунта\_изм}} \right), \quad (4)$$

где  $d_{э\text{кв}}$  – эквивалентный диаметр заземлителя, м;  
 $d_{з\text{азем}}$  – диаметр стержня составного заземлителя, м;  
 $d_{муфты}$  – диаметр соединительной муфты, м;  
 $\rho_{э\text{кв}}$  – удельное эквивалентное сопротивление грунта с учетом всех коэффициентов, Ом·м;

$\rho_{грунта\_изм}$  – измеренное удельное сопротивление грунта, Ом·м.

При исследовании влияния смеси на коэффициент сезонности установлено, что при засыпке смесью горизонтальной полосы, коэффициент сезонности снижается на 18,7 % по сравнению с контрольным контуром, а в случае, если при забивании вертикальных электродов смесью обработано и их околоэлектродное пространство, то коэффициент сезонности снижается на 23,3 % по сравнению с контрольными значениями для необработанного контура.

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что применение смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила наиболее эффективно при использовании 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 гидролизированным полиакрилонитрилом. Дополнительное уменьшение коэффициента сезонности для вертикальных составных заземлителей, по видимому, обусловлено влиянием смеси на их части, смонтированные вблизи поверхности грунта. Применение таких смесей позволит уменьшить капитальные затраты на монтаж заземляющих устройств в результате уменьшения количества заземлителей и размеров территории, на которой они располагаются.

### Заключение

Экспериментальные данные показали, что применение обработки грунта в местах заложения контуров заземления при их монтаже смесями на основе гидролизованного полиакрилонитрила, позволяет снизить сопротивление от 23 до 120 % такого контура заземления по сравнению с необработанным грунтом. Выполнение заземления в грунтах с высоким коэффициентом сезонности с применением гидролизованного полиак-

рилонитрила позволяет снизить сезонные колебания сопротивления до 23,3 %. К достоинствам применения такой обработки необходимо отнести более стабильные характеристики по сопротивлению заземления, снижение металлоемкости контуров заземления, что ведет к снижению затрат на монтаж и эксплуатацию. При продолжении данных исследований представляет интерес проведение анализа возможности добавления в смесь низко диспергированных проводящих веществ и ингибиторов коррозии, а также определение оптимального соотношения таких компонентов в составе смесей для оптимизации заземления.

### 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 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.
2. Анодный заземлитель с токопроводящей оболочкой: пат. 2622548 РФ, МПК C23F 13/16 /Р.Р. Зиннатуллин; заявитель ООО «Евразия-строй» №2015151160; заявл. 27.11.2015; опубл. 16.06.2017 // Бюл. Федеральной службы по интеллектуальной собственности. – 2017. – №17. – С. 2-7.
3. Компоненты системы молниезащиты. Требования к смесям, нормализующим заземление: ГОСТ Р МЭК 62561-7-2016. – Введ. 01.01.2018. – М.: Стандартинформ, 2018. – Ч. 7. – 12 с.
4. Грибанов, А.Н. Бипрон – заземление электроустановок / А.Н. Грибанов // Экспозиция Нефть Газ. – 2016. – № 4. – С. 72-75.
5. IEEE Std 142 -2007 IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. – Approved 7 June 2007. – 225 pp.
6. Shi, L. A novel poly(glutamic acid)/silk-sericinhydrogel for wound dressing: Synthesis, characterization and biological evaluation. / Shi, L., Yang N., Zhang H., Chen L., Tao L., Wei Y., Liu H., Luo Y. // Materials Science and Engineering: C. –2009.– Vol. 48 (1).– P. 533–540.
7. Ширинов, Ш.Д. Исследование кинетики набухания синтезированных гидросорберов на основе гидролизованного полиакрилонитрила / Ш.Д. Ширинов, А.Т. Джалилов // Химия и биология. – 2018. – № 3 (45).

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 28.11.2019