

УДК 332.1

ЭКВИВАЛЕНТНОЕ УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ГРУНТА ПОЛОСЫ ОТВОДА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Сергей Викторович Кириллов

кандидат технических наук

kirill_mich@mail.ru

Мичуринская дистанция электроснабжения ОАО «РЖД»

Мичуринский государственный аграрный университет

Мичуринск, Россия

Аннотация. Заземляющее устройство является одним из основных элементов электроустановки, которое должно обеспечивать нормальное функционирование электрооборудования и электробезопасность при любых режимах эксплуатации. Одним из параметров, определяющих условия работы заземлителя и его конструкцию является удельное электрическое сопротивление земли. В большинстве случаев при расчете сопротивления заземлителя делают допущение, что земля имеет однородную или двухслойную структуру. Очевидно, что на самом деле земля не может быть двухслойной и тем более однородной структурой. Принятие допущений при расчете конструкций заземляющих устройств электроустановок, может оказать значительное влияние на конструктивное исполнение заземлителя и на способность выполнять возложенные на него функции. Учет неоднородности земли значительно повышает точность расчета заземлителей. В работе рассмотрен метод расчета эквивалентного удельного сопротивления многослойной земли полосы отвода железной дороги. Представленные теоретические наработки на достаточном уровне соотносятся с результатами практических исследований автора, изложенных в предыдущей работе и

связанной с исследованием электропроводных свойств грунта полосы отвода железной дороги.

Ключевые слова: заземляющие устройства, удельное сопротивление грунта, сопротивление многослойного грунта, электропроводные свойства грунта.

Совершенствование устройств электроснабжения является неотъемлемой частью технического прогресса, особенно это касается работы устройств электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, которые имеют свою специфику и значительные отличия от систем электроснабжения промышленных, городских и других потребителей. Особенно это касается, когда имеет место взаимодействие различных систем и инфраструктур, как пример, которые рассмотрены в настоящей работе - система электроснабжения сельскохозяйственных потребителей от электрических сетей железных дорог. И углубленное исследование характеристик, параметров и режимов работы элементов и устройств систем электроснабжения данных потребителей, является актуальной задачей.

Заземляющее устройство является одним из основных элементов электроустановки, которое должно обеспечивать [1, 2, 3, 4]:

- электромагнитную совместимость места нахождения человека и других живых существ в пределах влияния различных факторов данной электроустановки и самой электроустановки;
- обеспечение работы электроустановки во всех режимах ее работы: нормальном, аварийном, вынужденном и послеаварийном.

Заземляющее устройство электроустановки – преднамеренно образованная совокупность присоединенных к общему заземлителю и электрически связанных между собой сторонних проводящих частей, открытых проводящих частей, уравнивающих, экранирующих, нулевых защитных, защитных заземляющих, рабочих заземляющих, PEN – проводников электроустановки и информационно – технологического оборудования здания. Открытые проводящие части – нетоковедущие проводящие части электроустановки, доступные для прикосновения, которые могут оказаться под напряжением при повреждении изоляции токоведущих частей, а также при прохождении тока молнии или электромагнитного импульса. Сторонние проводящие части – это проводящие части, которые не являются частью электроустановки, но могут оказаться под напряжением при определенных

условиях, в частности при повреждении изоляции токоведущих частей электроустановки [1, 2, 3, 4].

Заземляющие устройства, являются неотъемлемой частью электроустановок всех классов напряжения. Заземляющим устройством называется совокупность заземлителя и заземляющих проводников. Заземлителем называется проводник (электрод) или совокупность металлических соединённых между собой проводников (электродов), непосредственно находящихся в соприкосновении с грунтом (землёй).

Система заземления должна обеспечивать связь заземляемых элементов электрооборудования и земли в пределах электроустановки.

Условия работы заземляющих устройств электроустановки определяются следующими факторами:

- удельное электрическое сопротивление грунта;
- электрические параметры заземляющих и других проводников.

Таким образом грунт (земля) является элементом системы электроснабжения и участвует в работе электроустановок и всей системы электроснабжения в целом [1, 2, 5].

Качество заземляющих устройств оказывает значительное влияние на безопасность использования электрических установок и на рабочие режимы электроустановок и других устройств, в ходе эксплуатации, которых, требуется использование заземляющего устройства. А качество работы заземляющего устройства зависит от двух факторов: технического состояния самого заземляющего устройства и удельного сопротивления грунта [1, 2, 5]

Удельным сопротивлением грунта называется электрическое сопротивление, оказываемое грунтом в форме куба объемом 1 кубический метр при прохождении тока от одной грани этого куба к противоположной. Удельное сопротивление грунта обозначается через ρ и выражается в Ом*м. Сопротивление ρ можно определить, используя эмпирическую формулу [2, 5]:

$$\rho = \alpha \cdot \rho_h \cdot \Phi^{-i} \cdot S^{-n}, \quad (1)$$

где ρ_h - удельное электрическое сопротивление содержащейся в грунте воды;

Φ – коэффициент, определяющий пористость грунта;

S – доля объема грунта, заполненного водой;

α , i , n – эмпирические параметры, определяемые составом грунта.

Так как разновидностей грунта значительное количество, то и параметры замеров электрического сопротивления грунта могут сильно различаться между собой. На показания удельного сопротивления влияют - тип почвы, плотность, количество влаги в почве, наличие пор и пустот, уровень промерзания, температура внешней среды, концентрация в грунте различных химических веществ, солей и щелочных остатков и другие факторы [1, 2, 5]. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 50571.5.54–2013 «ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ НИЗКОВОЛЬТНЫЕ» регламентирует средние значения большинства типов почвы, которые можно встретить на территории России.

Как видно из выражения (1), аналитический расчет всех факторов, влияющих на величину ρ , затруднен, поэтому удельное сопротивление, удовлетворяющее принятой точности расчета, чаще всего получают путем непосредственных измерений или из справочных материалов.

Необходимость получения значений удельного сопротивления грунта возникает уже на этапе предпроектного обследования, проектирования и сдачи объекта в эксплуатацию. Система заземления должна также подвергаться периодическим проверкам во время эксплуатации, чтобы коррозия или изменение удельного сопротивления грунта не могли значительно повлиять на её параметры [2, 4].

Основные компоненты слоя грунта, которые в большей части участвуют в прохождении электрического тока электроустановок и систем электроснабжения - кремнезем, глинозем, известняк, уголь и т. д. Данные составляющие, представляют собой изоляторы, и поэтому проводимость грунта зависит от почвенного раствора, т. е. влаги и солей, находящихся между

непроводящими твердыми частицами компонентов, что по сути является электролитом. Значения удельного сопротивления для различных минералов, в ряде случаев, может отличаться на несколько порядков. Эта разница обусловлены влиянием примесей и различной структурой минеральных зерен, которые подвергались измерениям. Микроскопические трещины, поры и окисления поверхности в пределах индивидуальных зерен вызывают значительные изменения измеряемых сопротивлений. В таблице 1 приведены рекомендуемые расчетные значения удельного электрического сопротивления различных компонентов верхнего слоя земли [2, 6, 7]:

Таблица 1

Значения удельного электрического сопротивления слоя земли

№ п/п	Характеристика слоя грунта	Удельное сопротивление, Ом*м
1.	песок сильно увлажнённый	10-60
2.	песок сухой	1500-4200
3.	суглинок	10 - 190
4.	глина	20-60
5.	торф	10-50
6.	солончаковые почвы	15-25
7.	щебень сухой	не менее 5000
8.	щебень мокрый	не менее 3000
9.	чернозем	10-50

Материалы и методы

В большинстве случаев при расчете сопротивления растеканию заземляющих устройств делают допущение, что земля, в которой расположен заземлитель имеет однородную структуру. В некоторых случаях принимается двухслойная структура земли [2, 4, 8]. Очевидно, что на самом деле земля не может быть двухслойной и тем более однородной структурой, особенно в местах прохождения коммуникаций, периодического производства земляных, строительных или других работ – в городской черте, местах расположения предприятий, полосе отвода железных дорог и пр. Игнорирование данного фактора и принятие допущений при расчете конструкций заземляющих устройств электроустановок, может оказать значительное влияние на конструктивное исполнение заземлителя, а главное - на способность выполнять

возложенные на него функции. Учет неоднородности земли значительно повышает точность расчета заземлителей.

Эквивалентным удельным сопротивлением многослойной земли называется такое удельное сопротивление однородной земли, при котором сопротивление растеканию тока данного заземлителя, имеет такое же значение, что и в реальном многослойном грунте [2, 8].

При расчете заземляющего устройства, расположенного в многослойном грунте принимаются следующие допущения:

- земля, в которой расположен заземлитель, является идеальным бесконечным полупространством, состоящим из n слоев;
- толщина верхних $h_1, h_2, h_3, \dots, h_{n-1}$ слоев конечна, нижний слой h_n имеет неограниченную мощность ($h_n = \infty$);
- в пределах каждого слоя удельное сопротивление земли постоянно и равно $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$ соответственно;
- поверхность земли и граница раздела между слоями горизонтальны;
- продольное сопротивление сетки и вертикальных электродов переменному току частотой 50 Гц пренебрежимо мало.

В общем виде расчет эквивалентного удельного сопротивления земли $\rho_{\text{экв}}$, имеющей n -слоев определяется следующей формулой:

$$\rho_{\text{экв}} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}}, \quad (2)$$

где H – толщина рассматриваемого слоя земли;

ρ_i - удельное сопротивление n -го слоя земли.

При расчете заземлителя электроустановки, можно принять:

$$H = L_B, \quad (3)$$

где L_B = длина вертикального заземлителя или глубина залегания контура заземления.

Особенность данного подхода, заключается в допущении, что сопротивление растеканию отдельных частей заземляющего устройства,

расположенных в соответствующем слое грунта, можно считать соединенными параллельно. Известно, что сопротивление объекта прямо пропорционально удельному сопротивлению материала и его длине, и обратно пропорционально площади его сечения. Ток со стержня заземлителя стекает в направлении, перпендикулярном оси этого стержня, равномерно во все стороны. Следовательно, применительно к нашему случаю, сопротивление земли прямо пропорционально удельному сопротивлению грунта и расстоянию до стержня, и обратно пропорционально площади боковой стенки охватываемого цилиндра (стержня).

Выражение (1) может иметь вид:

$$\rho_{\text{экв}} = \frac{H}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n}} \quad (4)$$

Особенностью всех стационарных (нетяговых) электропотребителей, расположенных вблизи железнодорожных линий и присоединенных к электрической сети, питаемой от тяговой подстанции переменного тока является то, что в качестве одного фазного проводника питающей линии используются рельсы железнодорожной линии, и в соответствии с проектными решениями - это фаза «С». Данная система передачи электроэнергии - два дополнительных провода – рельс (ДПР) имеет уровень напряжения 25 кВ и достаточно широко внедрялась при масштабной электрификации железных дорог СССР, проводимой в 50-х – 80-х годах XX века [9]. У большинства данных КТП, подключенных к данной системе электроснабжения, имеются два собственных контура заземления – выравнивающий, который служит для выравнивания потенциала и защиты персонала от поражения электрическим током, и выносной – рабочий, для организации работы низковольтных сетей напряжением 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью. Дополнительно у КТП, подключенных к системе электроснабжения ДПР имеется особенность, определяемая техническими возможностями системы тягового электроснабжения и ДПР - с трансформатором мощностью до 25 кВА

включительно, допускается работа данного КТП без присоединения к рельсу. В этом случае фаза «С» присоединяется к рабочему контуру заземления (высоковольтному), и основным фазным проводником в данном случае является земля (Инструкция по заземлению устройств энергоснабжения на электрифицированных железных дорогах ЦЭ-191, утверждена 10.06.1993 г.). Таким образом, у одной КТП подключенной к системе электроснабжения ДПР 25 кВ, может быть до трех контуров заземления – рабочий высоковольтный, выравнивающий (защитный) и рабочий низковольтный (выносной) [9].

Очевидно, что данные подстанции имеют связь с инфраструктурой железной дороги, и как правило располагаются в непосредственной близости от железнодорожного пути, в полосе отвода железной дороги. Полоса отвода железных дорог – это земельные участки, которые прилегают к железнодорожным путям, занятые ими или предназначенные для них, а также на которых размещены различные объекты железнодорожного транспорта и связанной инфраструктуры, в т.ч. устройства энергетики и систем электроснабжения.

Было проведено исследование состава земли полосы отвода железной дороги, в местах расположения комплектных трансформаторных подстанций, системы ДПР и рабочего высоковольтного контура заземления, обеспечивающий работу подстанции, а также электробезопасность человека и живых существ.

Земельные участки полосы отвода имеют свои особенности, которые оказывают значительное влияние на характеристики и свойства грунта (земли) [5]:

- неоднородность грунта (земли);
- воздействие технических жидкостей и веществ;
- выброс посторонних структур грунта и элементов верхнего строения пути в полосу отвода вследствие особенностей работы строительной ремонтной техники железной дороги;
- воздействие вибрации от железнодорожного подвижного состава;

- близкое расположение различных металлических предметов в грунте (рельсы, металлические трубопроводы, устройства заземления, кабельные линии и т.п.);
- регулярное проведение строительных и ремонтных работ на инфраструктуре железных дорог;
- воздействие электромагнитных и электростатических полей от системы тягового электроснабжения и др.

Результаты и обсуждение

В результате исследования установлено, земля в полосе отвода железных дорог в вертикальной проекции размещения контура заземления может иметь до шести основных слоев грунта (в границах Тамбовской, Рязанской и Липецкой областей). Исследуемые участки полосы отвода в указанных регионах по географическим характеристикам располагаются посередине умеренного пояса, в центре Русской равнины, в Окско-Донской низменности и западных отрогах Приволжской возвышенности. Большая часть участков входят в зону Центрально-Черноземного района.

Результаты исследования состава земли и характеристики слоев в местах расположения трансформаторных подстанций и их контуров заземления, подключенных к системе ДПР электрических железных дорог приведены в таблице 2.

Таблица 2

Состав земли и характеристики слоев в местах расположения трансформаторных подстанций и их контуров заземления, подключенных к системе ДПР электрических железных дорог

Номер слоя земли, начиная от поверхности	Характеристики слоя	Толщина слоя, м	Удельное сопротивление слоя, Ом*м
1	Загрязненный щебень	0,1 – 0,2	300 - 800
2	Загрязненный песок	0,05 – 0,3	100 - 200
3	Чернозем	0,5 – 1,2	10 - 20
4	Песок	0,3 – 1,2	10-30
5	Глина	1,0 – 2,5	15-30
6	Известняк	> 1	300 - 1000

На рисунке 1 представлена визуализированная схема расположения слоев исследуемых слоев грунта в полосе отвода железной дороги рассматриваемых регионов РФ и участков железной дороги.

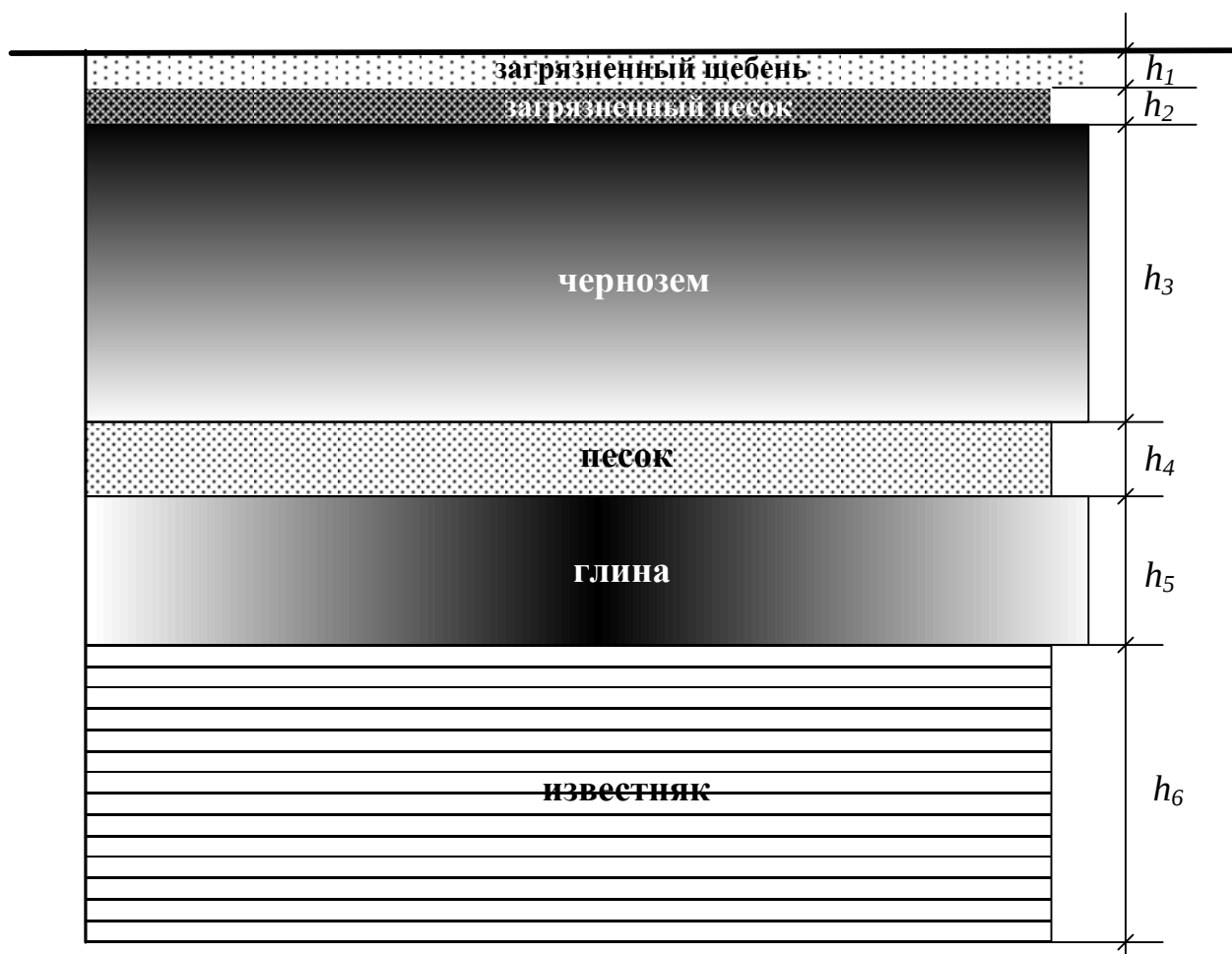


Рисунок 1 – Визуализированная схема расположения слоев исследуемых слоев грунта в полосе отвода железной дороги (рассматриваемых регионов РФ и участков железной дороги)

Для изучения пределов изменений удельного электрического сопротивление многослойного грунта было проведено исследование с применением математического процессора Mathcad, согласно выражению (2) с использованием данных, приведённых в таблице 1. Вычисления проводились с использованием указанных слоев земли с различными характеристиками. В результате проведенных расчетов и исследования было установлено, что минимальное значение удельного электрического сопротивление многослойного грунта (с использованием данных таблицы 1) может составлять значение – **9,39** Ом*м. Максимальное значение удельного электрического сопротивление

многослойного грунта зависит от толщины слоев, которые имеют наиболее удельное сопротивление - загрязненный щебень, загрязненный песок и известняк, и данное значение может превышать значение **100 Ом*м**. Необходимо отметить, что результаты расчета эквивалентного удельного электрического сопротивления многослойного грунта полосы отвода железной дороги соотносятся с результатами практического исследования и анализа удельного сопротивления грунта, изложенных в [5].

Предложенная методика расчета эквивалентного удельного электрического сопротивления многослойного грунта полосы отвода железной дороги позволяет значительно повысить точность расчета и надежность эксплуатации заземлителей, а также обеспечить условия электробезопасности для людей и животных.

Выводы

1. Заземляющее устройство является важным элементом электроустановки, которое участвует в работе системы электроснабжения и должно обеспечивать условия электробезопасности.
2. Одним из основных параметров, определяющим условия работы заземляющего устройства электроустановки и его конструкцию является удельное сопротивление грунта.
3. Земля, в которой расположено заземляющее устройство, является многослойной структурой, каждый слой которой имеет свои геометрические размеры и электропроводные характеристики.
4. При расчете конструкции заземляющего устройства, необходимо учитывать в комплексе работу всех элементов заземляющего устройства, в т.ч. взаимодействие их с разными уровнями земли.
5. Электропроводные свойства грунта полосы отвода железных дорог имеют существенные отличия в электрических характеристиках в сравнении с грунтами, удаленных от территории железной дороги, которые необходимо учитывать при расчете конструкции заземлителя.

Список литературы:

1. Бургсдорф, В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1987 400 с.: ил.
2. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок: справочник //2-е изд. Москва: Энергосервис, 2006. ISBN 5-900835-90-1. EDN QMJBRJ.
3. Карякин Р.Н., Лосев В. Г. Удар молнии в заземляющее устройство // Электричество. 2020. № 3. С. 28-38. DOI 10.24160/0013-5380-2020-3-28-38. EDN PKICAE.
4. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети. 2е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. А.А. Федорова и Г.В. Сербиновского. М.: Энергия, 1980. 576 с.
5. Кириллов С.В. Исследование электропроводных свойств грунта полосы отвода железной дороги // Наука и Образование. 2024. Т. 7, № 3. EDN ATRHUJ.
6. Безик Д. А., Гурьянов Г. В., Безик Е. И. Некоторые вопросы расчёта электропроводности почв // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 4(14). С. 223-228. EDN VJKDRT.
7. Субботина М. Г., Батье-Салес Х. Об электропроводности почв в современных исследованиях // Пермский аграрный вестник. 2013. № 3(3). С. 28-33. EDN RDSCGN.
8. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. М: Энергоатомиздат, 1991 г. 464 с.
9. Кириллов С.В., Виноградов А.В. Основы концепции совершенствования электроснабжения сельских потребителей от системы электроснабжения электрифицированной железной дороги // Техника и оборудование для села. 2024. № 7(325). С. 42-45. DOI 10.33267/2072-9642-2024-7-42-45. EDN AOZMAI.

UDC 332.1

EQUIVALENT SPECIFIC ELECTRICAL RESISTANCE OF MULTILAYER SOIL OF RAILWAY RIGHT-OF-WAY

Sergey Viktorovich Kirillov

candidate of technical sciences

kirill_mich@mail.ru

Michurinskaya power supply division of JSC Russian Railways

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

Abstract. A grounding device is one of the main elements of an electrical installation, which must ensure normal operation of electrical equipment and electrical safety under any operating conditions. One of the parameters that determine the operating conditions of the grounding device and its design is the specific electrical resistance of the earth. In most cases, when calculating the resistance of the grounding device, an assumption is made that the earth has a homogeneous or two-layer structure. Obviously, in reality, the earth cannot be two-layer and even more so a homogeneous structure. Accepting assumptions when calculating the designs of grounding devices of electrical installations can have a significant impact on the design of the grounding device and the ability to perform the functions assigned to it. Taking into account the heterogeneity of the earth significantly increases the accuracy of the calculation of grounding devices. The paper considers a method for calculating the equivalent specific resistance of multilayer earth of the right-of-way of a railway. The presented theoretical developments are sufficiently consistent with the results of practical research by the author set out in the previous work and related to the study of the electrical conductivity properties of the soil of the right-of-way of a railway.

Key words: grounding devices, soil resistivity, multilayer soil resistance, soil conductivity.

Статья поступила в редакцию 10.05.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.

The article was submitted 10.05.2025; approved after reviewing 20.06.2025; accepted for publication 30.06.2025.