

УДК 621.311

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛИ

Сергей Викторович Кириллов^{1,2}

кандидат технических наук, доцент

kirill_mich@mail.ru

Александр Сергеевич Гордеев³

доктор технических наук, профессор

gorde2020@gmail.com

Вадим Эдуардович Лихачев⁴

инженер

lichachiov98@mail.ru

Михаил Алексеевич Шатохин⁴

инженер

shatohinmihail@gmail.com

¹ Юго-Восточная дирекция по энергообеспечению ОАО «РЖД»

г. Воронеж, Россия

² Мичуринский государственный аграрный университет

³ ООО НПП «Энерго-Профи»

⁴ Мичуринская дистанция электроснабжения ОАО «РЖД»

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. Для получения информации о режимах работы и параметрах электроустановки необходимо знать электрические характеристики оборудования и проводников. Заземляющее устройство является важной частью электроустановки, и работает в непосредственном контакте с землей, поэтому необходима информация об электрических свойствах земли.

Разработан стенд, который позволяет исследовать электрические параметры земли и их зависимости от физических и других характеристик среды.

Ключевые слова: стенд, контур заземления, измерения, земля, электропроводность, электрическое сопротивление, исследование, тренд.

Совершенствование существующих и использование новых способов для повышения надежности работы устройств электроснабжения является актуальной задачей. Использование земли в качестве фазного и нулевого проводника в электроустановках различного класса напряжений практикуется уже давно. И в настоящее время существуют различные системы электроснабжения, использующие землю в качестве проводника электрического тока.

Основным элементом электроустановки, обеспечивающим взаимодействие самой электроустановки и земли, является заземляющее устройство. Условия работы заземляющих устройств электроустановки определяются следующими факторами:

- электрические параметры заземляющих и других проводников;
- электрическое сопротивление земли [1-4].

Таким образом, для того чтобы знать информацию о параметрах и режимах работы электроустановок, использующих землю в качестве проводника крайне важно знать электрические параметры земли и зависимости этих параметров от физических характеристик среды.

Материалы и методы

Рабочий режим контура заземления (с протеканием рабочих токов в нормальном режиме) используется в электроустановках до 1 кВ, с глухозаземленной нейтралью и в электроустановках напряжением 110 кВ и выше, с эффективно заземленной нейтралью [1, 2].

Трансформаторные подстанции, подключенные к электрической сети системы «два дополнительных провода – рельс» (ДПР) электрифицированных железных дорог получают питание напряжением 27,5 кВ. Особенностью данных подстанций, является то, что они способны работать с использованием земли в качестве основного проводника фазы высокого напряжения, при наличии высоковольтного контура заземления, выполненного с определенными требованиями [5-7].

Также имеется система электроснабжения «два провода – земля» (ДПЗ), которая используется в нашей стране, и в ряде зарубежных стран в электрических сетях напряжением до 35 кВ. В данной системе электроснабжения, земля также используется в качестве основного проводника фазного провода высокого напряжения [8,9,10].

Основными рабочими функциями заземляющих устройств электроустановок напряжением выше 1 кВ, использующих землю в качестве нулевого или фазного проводника, являются обеспечение в рабочем режиме достаточной проводимости цепи: трансформатор – контур заземления – земля, и надежного срабатывания релейной защиты [1, 2].

Таким образом, в практической эксплуатации электроустановок имеются режимы, когда земля используется не только для выполнения защитных функций, как электрическая емкость, имеющая нулевой потенциал, но и как проводник электрического тока, выполняя (замещая) функции металлического проводника, который имеет определенные электрические характеристики – проводимость, электрическую емкость и индуктивность, определяющие его фазовые характеристики. Данные характеристики необходимы для расчета заземляющих устройств, выбора уставок релейной защиты и автоматики, расчета параметров электробезопасности электроустановки, моделирования режимов работы электроустановок и систем электроснабжения [1, 2, 11].

Земля представляет собой смесь органических веществ, минералов, газов и воды. Сочетание этих составляющих по массе и объему является непостоянным [1, 4]. Очевидно, что соотношение составляющих данной смеси, а также температура среды, могут оказывать влияние на электрические параметры земли. Поэтому необходимо проведение лабораторных исследований электрических параметров земли и их зависимостей от физических характеристик среды.

Результаты и обсуждение

На кафедре агроинженерии и электроэнергетики Мичуринского государственного аграрного университета разработан стенд для исследования электрических параметров земли и их зависимостей от физических

характеристик среды. В данном стенде, земля, представлена в виде отдельного физического элемента с использованием специальной конструкции, которая обеспечивает замену в нем земли и изменение физических характеристик среды – влажность, температуру и pH -фактор земли. В процессе исследования контролируется сопротивление (проводимость) земли при различном напряжении, силе тока и частоте.

На рисунке 1 представлена электрическая схема данного стенда, а на рисунке 2 – его структура с указанием приборов и оборудования.

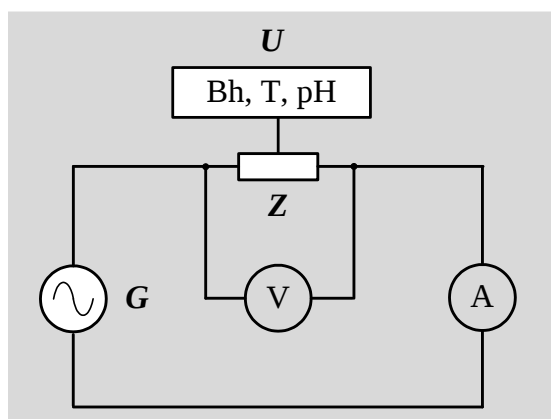


Рисунок 1 – Электрическая схема стенда для исследования электрического сопротивления земли
 Z – измерительная ячейка с образцом грунта, G – источник переменного тока различных напряжения и частот, V – вольтметр, A – амперметр, U – универсальный прибор, измеряющий влажность, температуру и pH -фактор

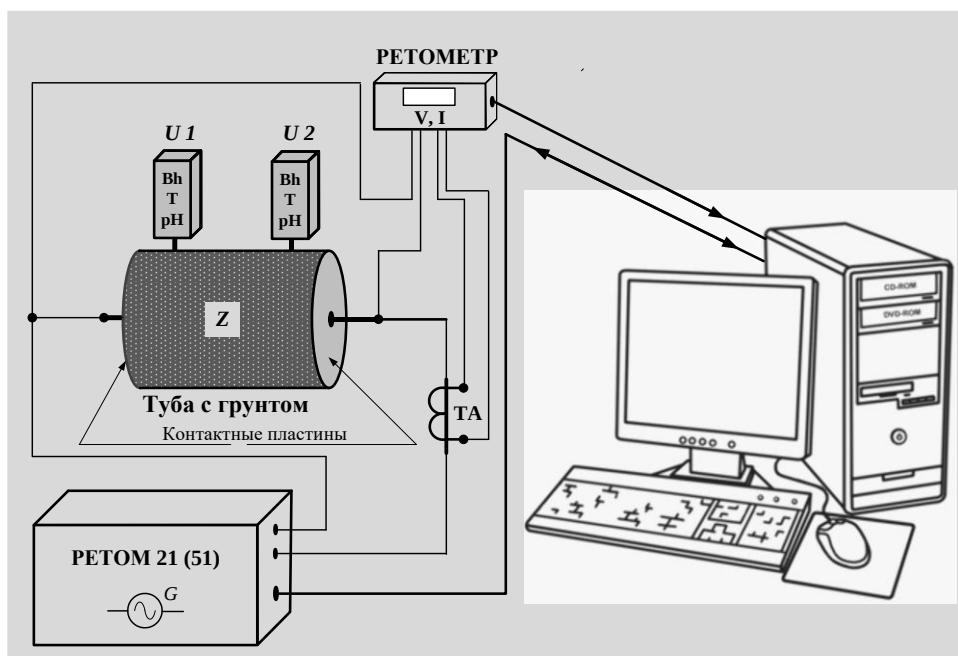


Рисунок 2 – Стенд для исследования электрического сопротивления земли с указанием приборов и оборудования

Стенд для исследования электрических параметров земли и их зависимостей от физических характеристик среды состоит из следующих элементов (рисунок 2):

- измерительная ячейка Z с исследуемым образцом земли;
- генератор переменного тока заданной частоты – многофункциональный испытательный комплекс РЕТОМ-21 (или 51) (производитель НПП «Динамика», г. Чебоксары);
- вольтамперфазометр - измерительный многофункциональный автоматизированный прибор РЕТОМЕТР (производитель НПП «Динамика», г. Чебоксары);
- $U1$ и $U2$ – универсальные приборы, измеряющие несколько разнородных измеряемых величин - влажность, температуру и pH -фактор;
- управляющее устройство - ПЭВМ.

На рисунке 3 представлено устройство измерительной ячейки стенда.

Измерительная ячейка представляет собой трубу 1 пластмассовую диаметром 160 мм - рисунок 3. Она служит для помещения в нее исследуемого образца земли. По торцам трубы находятся крышки 3, которые содержат контактные пластины 4, служащие для подведения через электроды 5 электрического напряжения к земле 2. Диаметр контактных пластин 4 равен внутреннему диаметру трубы 1. Площадь каждой пластины $S_{КП} = 20096 \text{ мм}^2$. Расстояние между контактными пластинами $L_{КП} = 300 \text{ мм}$.

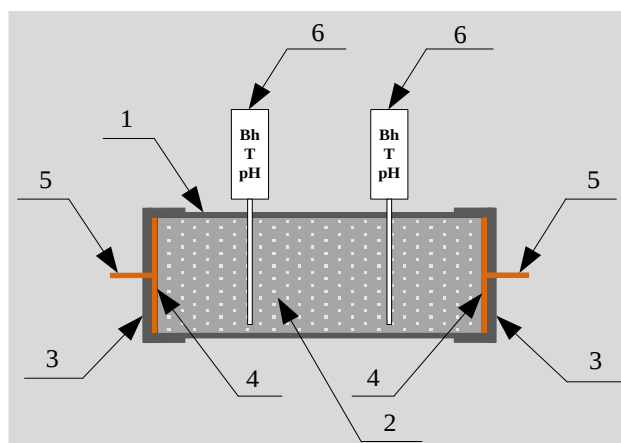


Рисунок 3 – Измерительная ячейка стенда для исследования электрических параметров земли
1 - труба с исследуемой землей, 2 – грунт, 3 – крышки трубы, 4 – контактные пластины, 5 – электроды, 6 – универсальные приборы для измерения температуры, влажности и pH -фактора

В стенде используется генератор электрического напряжения РЕТОМ-21 (51) - *G*. Для измерения напряжения и тока на выходе генератора *G* используются вольтметр *V* и амперметр *A*, рисунок 1. Дополнительно в процессе эксперимента в исследуемую землю помещают универсальные приборы для измерения температуры, влажности и *pH*-фактора - *U1* и *U2*, рисунки 2 и 3. Приборы *U1* и *U2* дублируют друг друга, в расчетах применяют средние величины зафиксированных значений температуры, влажности и *pH*-фактора.

Стенд работает следующим образом: собирается электрическая схема по рисунку 1, включается генератор *G* и напряжение *U* заданной частоты подается на электроды 4, рисунок 3. В грунте 2 начинает протекать электрический ток. В процессе проведения эксперимента измеряется напряжение на электродах, протекающий ток, температура, влажность и *pH*-фактор земли.

РЕТОМ-21 (51) – программно-технический измерительный комплекс, предназначенный для измерения напряжения постоянного и переменного тока, интервалов времени, а также воспроизведения напряжения и силы переменного и постоянного тока, частоты и времени. Диапазон изменения тока в однофазном режиме – $0,15 \div 60$ А, в режиме постоянного тока – $0,1 \div 20$ А. Диапазон изменения частоты: $1 \div 500$ Гц.

Ретометр имеет следующие возможности:

- измерение напряжения переменного тока;
- измерение напряжения постоянного тока;
- измерение силы переменного тока;
- измерение силы постоянного тока;
- измерение угол сдвига фаз между током и напряжением, между током и током, между напряжением и напряжением;
- измерение активной реактивной мощности в электрической цепи;
- измерение полного сопротивления электрической цепи.

На стенде для измерения физических параметров земли осуществляют:

- измерение приложенного напряжения, В;

- измерение протекающего тока через землю, мА;
- измерение влажности от 0 до 100%;
- измерение температуры от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- измерение pH - фактора $-0 \div 14$.

На рисунке 4 представлена фотография стенда.

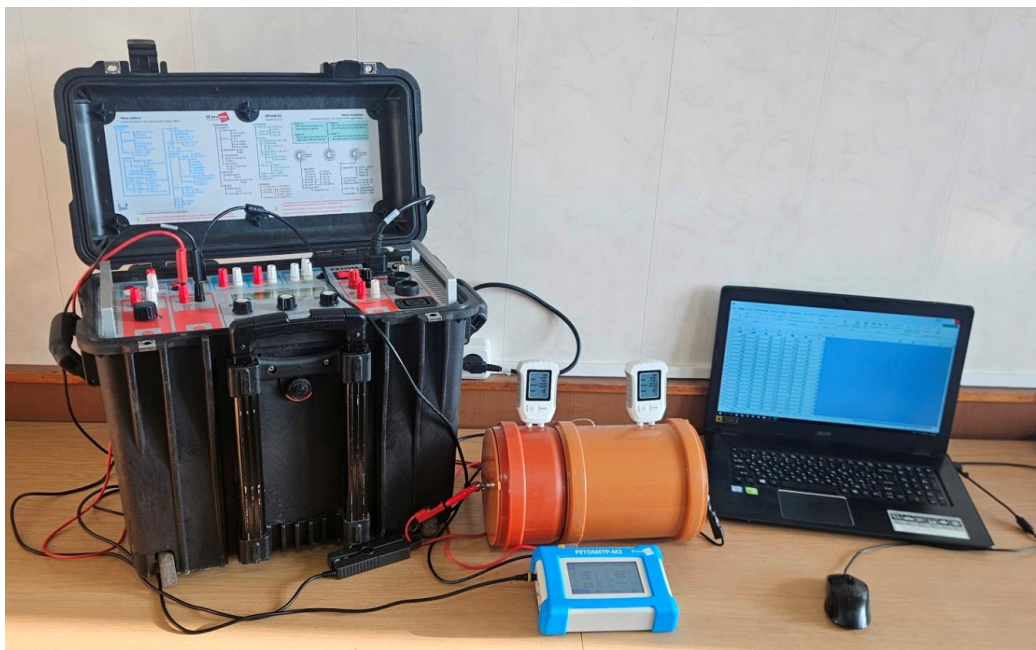


Рисунок 4 – Фотография стенда для исследования электрических параметров земли.

Методика исследования электрических характеристик почвы на стенде заключается в следующем:

1. Отбор земли. Для исследования подготавливается земля, по составу и структуре соответствующая грунту из мест расположения электроустановок.
2. Земля засыпается в измерительную ячейку - тубу. Для устранения пустот земли в тубе, последняя подвергается уплотнению путем встряхивания.
3. Туба с землёй охлаждается до необходимой температуры (при необходимости). Охлаждение производится в электрической морозильной камере в течение 24 ч. Охлаждение земли в трубе можно осуществлять также в естественных условиях – в период отрицательных температур, на открытом воздухе.
4. Включение тубы с землёй в электрическую схему согласно рисунку 1.

5. На РЕТОМе-51 (21), рисунок 1, устанавливается необходимое напряжение и частота тока. Напряжение изменяется от 0 до 120 В с шагом 30 В, а частота с 50 до 500 Гц с шагом 50 Гц. Нижняя граница в 50 Гц выбрана исходя из того, что это основная частота сети, а высшая граница в 500 Гц исходя из преобладающих возможных высших гармоник сети.

6. После установки напряжения и частоты в течение 60 секунд измеряются следующие параметры: время, прошедшее с момента эксперимента, мин.; U - напряжение, подведенное к контактным пластинам; f - частота электрического напряжения, Гц; I - ток, проходящий через землю мА; φ - угол сдвига фаз между напряжением и током, рад; pH -фактор земли; W -влажность земли, %; T - температура земли, °С. После проведения эксперимента рассчитывается сопротивление земли по формуле:

$$R = \frac{U}{I}, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где U – напряжение, приложенное электродам, В;

I – ток протекающий через землю, мА.

Таким образом, основными функциями стенда, являются создать необходимые условия и подтвердить или опровергнуть предположение, что ток, протекающий через землю, зависит (является функцией) от уровня приложенного напряжения, частоты тока, уровня pH земли, влажности и температуры земли:

$$I = f(U, f, pH, W, T) \quad (2)$$

Температура и влажность земли в процессе проведения эксперимента и изменения температуры от -20 °С до $+20$ °С, естественным образом повышается, что фиксируется приборами. Влажность земли изменяется также добавлением в нее воды.

После проведения корреляционного анализа результатов измерений на стенде получены следующие трендовые зависимости электрического сопротивления земли от параметров эксперимента. На рисунках 5 - 10 символом «о» обозначены данные эксперимента, а линией - тренд.

На рисунке 5 приведен тренд изменения электрического сопротивления от кислотности (pH -фактора) земли. Электрическое сопротивление земли стабильно до $pH = 6,5$, далее начинается его рост.

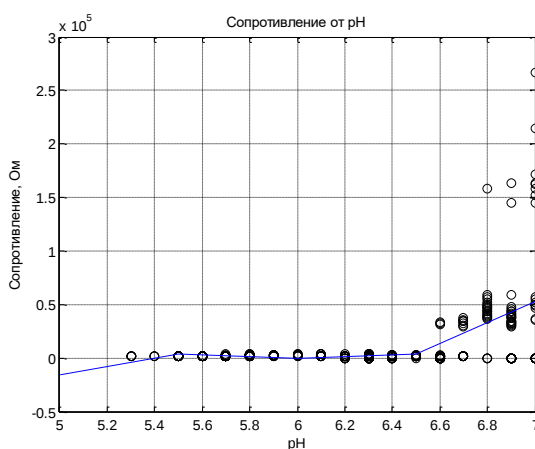


Рисунок 5 – Тренд изменения электрического сопротивления от кислотности земли.

На рисунке 6 приведен тренд изменения электрического сопротивления от температуры земли. Имеется сильная зависимость близкой к экспоненциальной электрического сопротивления земли от ее температуры. Сильное изменение сопротивления наблюдается при отрицательных температурах $-20 \dots 0$ °С. При положительных температурах сопротивление стабильно.

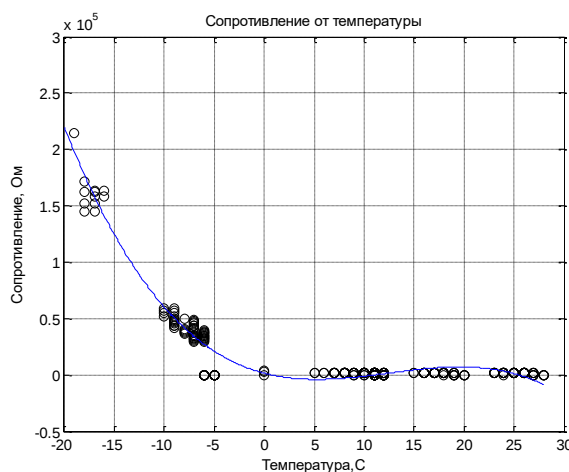


Рисунок 6 – Тренд изменения электрического сопротивления от температуры земли.

На рисунке 7 приведен тренд изменения электрического сопротивления от влажности земли. Наблюдается экспоненциальный спад сопротивления по мере роста влажности земли. При влажности более 30% спад прекращается.

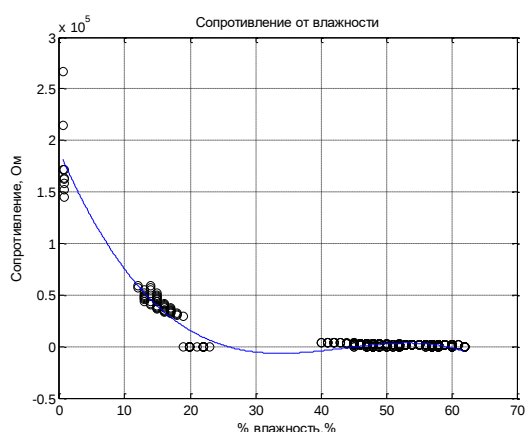


Рисунок 7 – Тренд изменения электрического сопротивления от влажности земли

На рисунке 8 представлен тренд изменения электрического сопротивления от величины, приложенного к земле напряжения. Наблюдается незначительное нелинейное увеличение сопротивления по мере увеличения приложенного к земле напряжения.

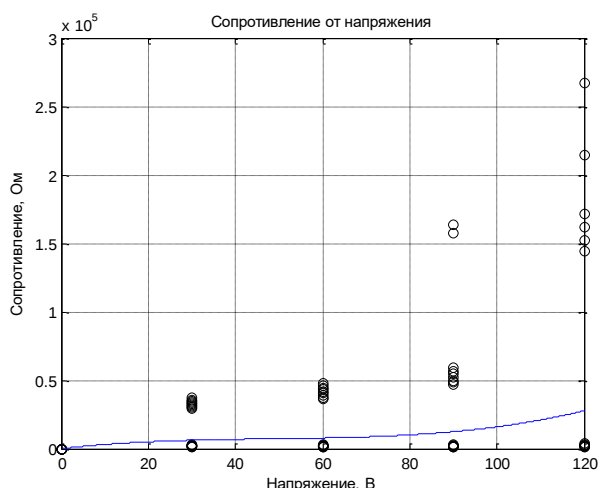


Рисунок 8 – Тренд изменения электрического сопротивления от величины напряжения

На рисунке 9 приведен тренд изменения электрического сопротивления от тока, протекающего по земле. Электрическое сопротивление земли изменяется нелинейно и стабильно при токе более 20 мА.

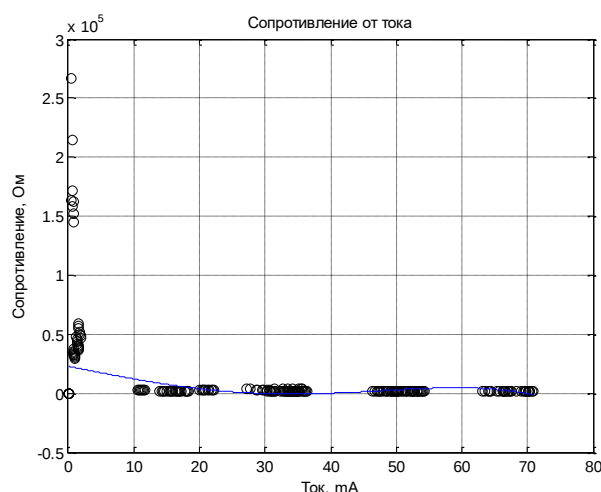


Рисунок 9 – Тренд изменения электрического сопротивления от тока, протекающего по земле

На рисунке 10 показан тренд изменения электрического сопротивления от частоты приложенного к земле напряжения. При увеличении частоты электрическое сопротивление незначительно падает.

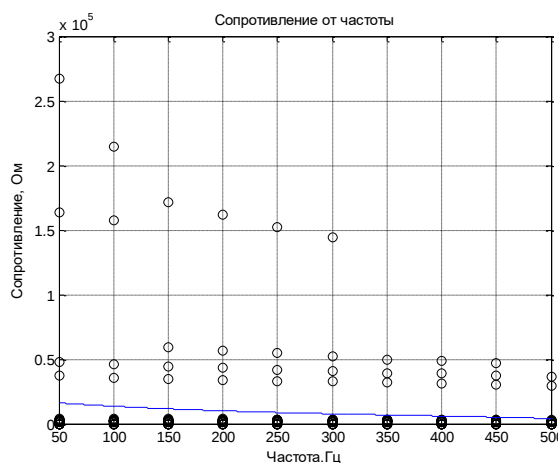


Рисунок 10 – Тренд изменения электрического сопротивления от частоты напряжения

Приведенные на рисунках 5-10 тренды изменения электрического сопротивления в зависимости от различных факторов показывают, что земля при пропускании через нее электрического тока имеет нестабильное электрическое сопротивление, зависящее от ее температуры и влажности. В незначительной степени на электрическое сопротивление земли оказывают ее кислотность, величина приложенного напряжения и протекающего тока. При увеличении частоты пропускаемого тока, сопротивление земли уменьшается.

Полученные результаты и зависимости электрических параметров грунта от физических характеристик среды можно использовать для расчета удельного сопротивления земли, расчета контура заземления, моделировании различных режимов работы электроустановок, использующих землю в качестве рабочего проводника, а также возможно построение математических моделей электрических параметров земли с использованием математических функций - решетчатой функции Грина или метода импедансного аналога электромагнитного пространства [12, 13].

Выводы:

- разработан стенд для исследования электрических характеристик земли и их зависимостей от физических параметров среды;
- функциональные возможности стенда позволяют исследовать зависимости электрических характеристик земли от следующих факторов – тип земли, ее влажность, температура и кислотность со значениями, соответствующим реальным природным условиям;
- полученные значения электрических характеристик земли можно использовать для расчета контура заземления, моделировании различных режимов работы электроустановок, использующих землю в качестве проводника, а также при построении математических моделей электрических параметров земли параметров земли с использованием математических функций.

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. Кириллов С.В. Исследование электропроводных свойств грунта полосы отвода железной дороги // Наука и Образование. 2024. Т. 7, № 3. EDN ATRHUJ.

4. Субботина М. Г., Батье-Салес Х. Об электропроводности почв в современных исследованиях // Пермский аграрный вестник. 2013. № 3(3). С. 28-33. EDN RDSCGN.

5. 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.

6. Кириллов С. В., Виноградов А. В. Обоснование использования земли в качестве одной из фаз питания трансформаторной подстанции 25/0,4 кВ системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2025. № 2(74). С. 72-82. DOI 10.31563/1684-7628-2025-74-2-72-82. EDN VHWXQD.

7. Кириллов С.В., Виноградов А. В. Практическое исследование системы электроснабжения сельских потребителей, питаемых от электрических сетей железных дорог // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 4. С. 68-77. DOI 10.26897/2687-1149-2025-4-68-77. EDN JKMRCA.

8. Линии электропередач с уменьшенным количеством проводов в горных территориях / Н. С. Бурянина, Ю. Ф. Королюк, Е. И. Малеева, Е. В. Лесных // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. Т. 10, № 3(37). С. 404-410. DOI 10.21177/1998-4502-2018-10-3-404-410. EDN YONKJV.

9. Крюков А. В., Лэ В. Т., Чан З. Х. Моделирование режимов систем электроснабжения, оборудованных сдвоенными линиями “два провода - земля” // Актуальные вопросы аграрной науки. 2021. № 41. С. 41-55. EDN LEDORU.

10. Бурянина Н. С., Королюк Ю. Ф., Лесных Е. В. Использование линий электропередачи по схеме "два провода - земля" // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 3(122). С. 91-99. DOI 10.21285/1814-3520-2017-3-91-99. EDN YHPQWZ.

11. Кириллов С. В., Шатохин М. А. Особенности работы релейной защиты линий электроснабжения сельских потребителей, питаемых от

электрических сетей железных дорог // Наука и Образование. 2025. Т. 8, № 1. EDN UWIJYM.

12. Курбаншоев С. З., Нусайриев М. А. Построение матрицы Грина и проекторов систем разностных уравнений // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. 2017. № 4(169). С. 14-25. EDN YRXMPJ.

13. Иванов С. А., Сестрорецкий Б. В., Боголюбов А. Н. Метод импедансного аналога электромагнитного пространства для решения трехмерных векторных задач электродинамики // Журнал радиоэлектроники. 2008. № 5. С. 4. EDN KUICJP.

UDC 621.311

A STAND FOR RESEARCHING ELECTRICAL PARAMETERS OF THE EARTH

Sergey V. Kirillov^{1,2}

candidate of technical sciences, associate professor

kirill_mich@mail.ru

Alexander S. Gordeev³

doctor of technical sciences, professor

gorde2020@gmail.com

Vadim Ed. Likhachev⁴

engineer

lichachiov98@mail.ru

Mikhail Al. Shatokhin⁴

engineer

shatohinmihail@gmail.com

¹ South-Eastern Directorate for Energy Supply of JSC "Russian Railways"

Voronezh, Russia

²Michurinsk State Agrarian University

³NPP Energo-Profi LLC

⁴Michurinsk Power Supply Distance of JSC Russian Railways

Michurinsk, Russia

Abstract. To obtain information about the operating modes and parameters of an electrical installation, it is necessary to know the electrical characteristics of the equipment and conductors. The grounding device is a crucial part of the electrical installation and operates in direct contact with the ground, so information about the electrical properties of the earth is essential. A setup has been developed that allows for the study of the electrical parameters of the earth and their dependence on the physical and other characteristics of the environment.

Key words: stand, ground loop, measurements, earth, electrical conductivity, electrical resistance, research, trend.

Статья поступила в редакцию 10.09.2025; одобрена после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 31.10.2025.

The article was submitted 10.09.2025; approved after reviewing 20.10.2025; accepted for publication 31.10.2025.