

Инновационная система мониторинга сопротивления изоляции силовой цепи электровоза в эксплуатации

С.А. Кахаев¹, О.В. Мельниченко², А.Ю. Портной³, А.О. Линьков⁴

¹ Аспирант 2.9.3., уч. мастер каф. «ЭПС», ИрГУПС, г. Иркутск

² д.т.н., Заведующий каф. «ЭПС», ИрГУПС, г. Иркутск

³ д.ф.-м.н., профессор каф. «ФМиП», ИрГУПС, г. Иркутск

⁴к.т.н., доцент каф. «ЭПС», ИрГУПС, г. Иркутск

***Аннотация.** Одна из основных причин отказов электроподвижного состава – это пробой изоляции электрооборудования в силовой цепи. Непредвиденные отказы локомотивов приносят значительный ущерб для ОАО «РЖД», характеризующийся многомиллионными убытками, срывами установленных графиков движения поездов, необходимостью вызова вспомогательного локомотива, вынужденными простоями в ремонте. Решением данной проблемы может служить система мониторинга сопротивления изоляции силовых цепей в эксплуатации, основанная на способе анализа тока утечки. Своевременное обнаружение факта снижения сопротивления изоляции силовых цепей позволит заблаговременно исключить постановку аварийного электровоза под поезд, запланировать ремонт и повысить качество его приемки после ремонта. В статье описан макетный образец предлагаемой системы мониторинга и представлены результаты его лабораторных испытаний. Лабораторные испытания подтвердили погрешность измерений менее 7%, что позволяет рекомендовать систему для внедрения.*

***Ключевые слова:** электровоз, сопротивление изоляции, лабораторные испытания, мониторинг, силовая цепь, прогнозирование отказов, цифровизация железнодорожного транспорта.*

Актуальность проблемы. Одним из ключевых направлений научно-технологического развития холдинга "РЖД" является реализация проекта "Цифровая железная дорога" [1]. Необходимость повышения надежности тягового подвижного состава (далее ТПС) в современном железнодорожном транспорте становится все более очевидной как на практике, так и в рамках стратегического планирования. Этот аспект акцентируется в многочисленных руководящих документах ОАО РЖД, включая «Белую книгу», которая формулирует ключевые задачи локомотивного комплекса. Среди них выделяются цели и задачи, такие как увеличение среднесуточной

производительности локомотива рабочего парка в грузовом движении не менее чем на 10%, а также снижение доли неисправных локомотивов, находящихся на всех уровнях ремонта и обслуживания, до 16,3% [2].

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2021 года №1100-р был утвержден паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с целью повышения пропускных и провозных возможностей (второй этап)» [3]. Целевым показателем данного проекта является увеличение пропускной способности указанных магистралей. В частности, в 2023 году полигон осуществил перевозку на 173 млн тонн, затем в 2024 году - 180 миллионов тонн. К 2030 году планируется достичь 210 млн тонн. Рассматривается возможность обеспечения до 270 млн тонн к 2035 году. Плановые объёмы достижимы при наличии в эксплуатируемом парке исправного и мощного ТПС, однако надежность локомотивов остается на невысоком уровне, что создает риски для реализации поставленных задач.

За 2024 год на Восточном полигоне ОАО «РЖД» допущено более 1500 отказов электровозов по причине пробоя изоляции силовых цепей [4], что привело к значительным задержкам поездов, увеличению парка локомотивов и локомотивных бригад.

Чтобы выявить основные причины выхода из строя электрооборудования и тяговых электродвигателей (далее ТЭД) проанализирована статистика по неплановым ремонтам электровозов Восточно-Сибирской дирекции тяги за 2024 год [5], электровозов переменного тока серии Э5К, 2(3)ЭС5К [6], представленную на рисунке 1. Полученные результаты анализа представлены в виде диаграмм на рисунке 2.

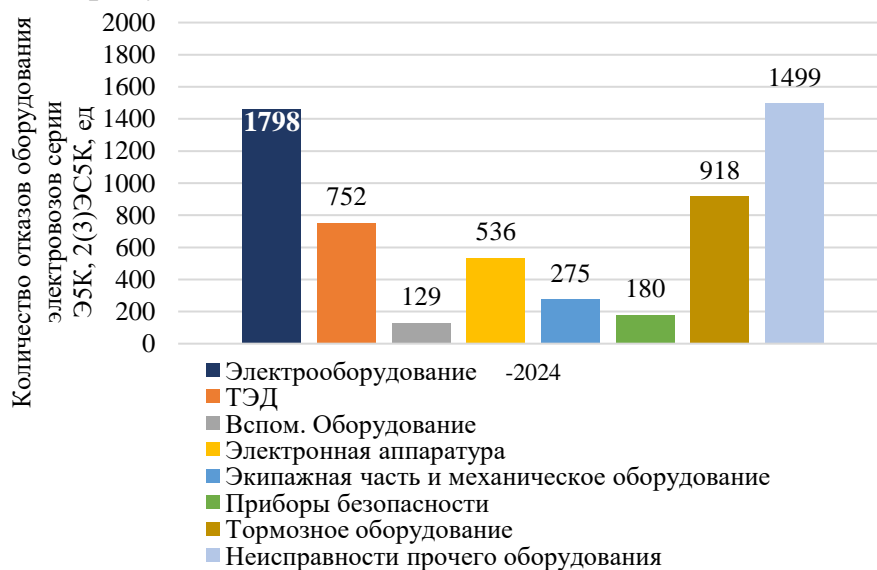


Рисунок 1 – Анализ статистики отказов электрического оборудования электровозов переменного тока Восточно-Сибирской дирекции тяги за 2024 г.



Рисунок 2 – Причины выхода из строя электровозов серий Э5К, 2(3)ЭС5К Восточно-Сибирской дирекции тяги за 2024 год
а) – электрооборудования; б) – ТЭД

По данным Восточно-Сибирской дирекции тяги за 2024 год зафиксировано 6088 случаев unplanned repairs of freight electric locomotives of alternating current, the total downtime of which (including redistribution and waiting) amounted to 198436,58 hours. In the course of the analysis, 714 cases of unplanned repairs, caused by problems with the insulation of the power circuit and tripping of the protection of the GV R3. The total downtime amounted to 33 560,1 hours.

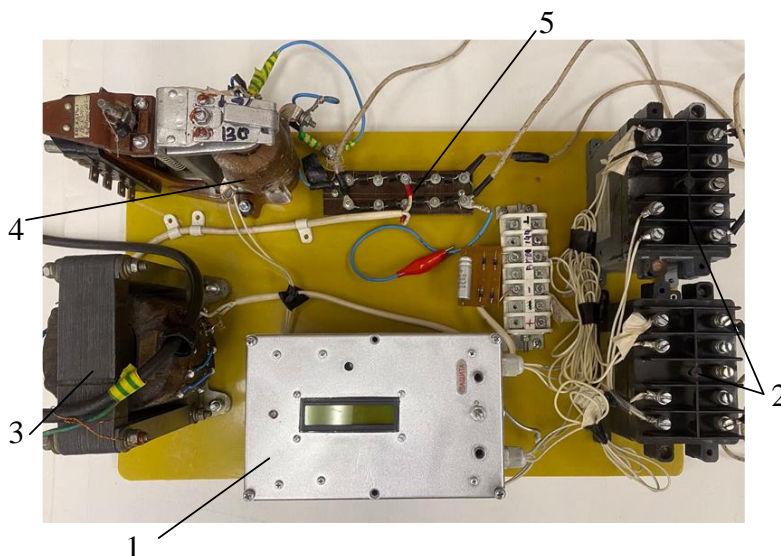
The magnitude of the resistance of the insulation of the power circuits of the electric locomotive in operation today is an uncontrollable parameter. For protection against insulation breakdown «to ground» devices are used, which, upon reaching the set current leakage, disconnect the power supply of the electrical equipment, tripping the GV R3. Existing methods of measuring the resistance of the insulation of the power groups of electric locomotives are carried out on a stand with disassembly of the power circuit of the electric locomotive during TOiP [7].

The work is related to the study of the method of determining the resistance of the insulation of the power circuit of the electric locomotive, which will allow to continuously control this parameter in the route and ensure timely detection of deviations from the norms, forecasting and prevention of failures [8]. The implementation of the proposed device will ensure a reduction in the number of failures of the power equipment of the electric locomotive by prevention and non-occurrence of failures due to the cause of insulation breakdown. This solution will ensure continuous control of the resistance of the insulation of the power circuit both on the stand of the electric locomotive, and in

движении в эксплуатации. Это, в свою очередь повысит качество приемки электровозов после проведения ремонта, позволяя иметь актуальную информацию о текущем состоянии электрооборудования.

Постановка цели. Цель исследования – оценить работоспособность разработанного макетного образца системы мониторинга сопротивления изоляции силовой цепи электровоза переменного тока при проведении лабораторных испытаний.

Предложенный макетный образец. Для проверки технических решений, авторами разработан макетный образец системы мониторинга сопротивления изоляции силовой цепи электровоза переменного тока, представленный на рисунке 3.



1 – Блок контроля сопротивления изоляции с индикатором; 2 – датчики напряжения типа (ПН-1); 3 – трансформатор; 4 – реле заземления (РЗ-303); 5 – диодный мост.

Рисунок 3 – Макетный образец системы мониторинга сопротивления изоляции

Основные технические характеристики разработанного макетного образца приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики макетного образца системы мониторинга сопротивления изоляции

Наименование параметра	Значение
Диапазон измерения сопротивления изоляции силовой цепи, МОм	0,2- 20
Частота измерения сопротивления, не более, с	2
Потребляемая мощность, Вт	55
Номинальный ток, А	1
Связь с внешними устройствами вычислительной техники. Интерфейс	RS-485
Скорость обмена информацией по интерфейсу RS-485, бод, не более	115-200
Габаритные размеры, мм	450x350x350
Масса, кг, не более	10
Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения сопротивления изоляции, %, не более	± 10

Макетный образец содержит каналы измерения, подключаемые к элементам силовой цепи, информация с которых через гальванические развязывающие усилители передается в аналого-цифровой преобразователь и поступает в процессор для расчета текущего сопротивления изоляции. Электрические компоненты располагаются на печатных платах, закрытых металлическим корпусом. На верхней части корпуса закреплен блок индикации. Корпус закреплен на текстолитовой плите, обеспечивающей изоляцию от корпуса электровоза.

Достоинством решения является то, что не требуется непосредственного вмешательства в силовую схему электровоза – мониторинг ведется за счёт каналов, включаемых параллельно штатной системе защиты от пробоя на землю.

Проведение испытаний. С целью экспериментальной проверки работоспособности предлагаемого технического решения [9] и его макетного образца (рисунок 3) разработан лабораторный стенд, представленный на рисунке 4, который включает в себя физическую модель электровоза с одним ТЭД, штатное оборудование защиты электровоза от пробоя на землю, измерительные каналы, которые служат для гальванической развязки от силовой цепи электровоза и измерения параметров необходимых для расчета сопротивления изоляции, а также блок контроля сопротивления изоляции.

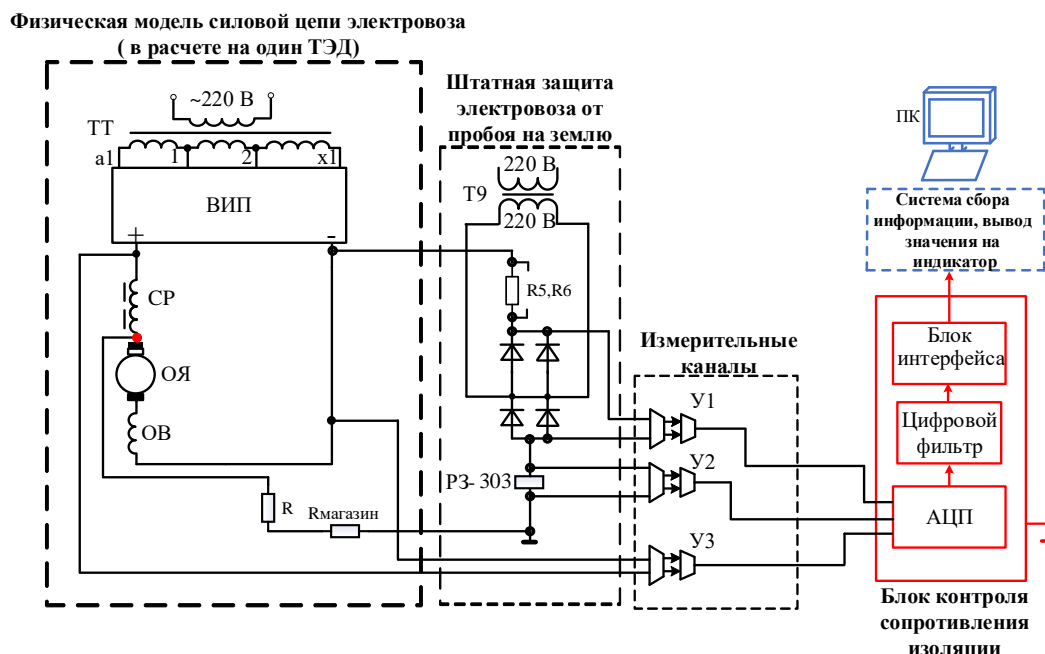


Рисунок 4 – Упрощенная силовая схема лабораторного стенда с предлагаемой системой мониторинга сопротивления изоляции

Данный стенд позволяет смоделировать работу системы мониторинга сопротивления изоляции лабораторных условиях. Это дает возможность:

- отработать алгоритмы работы системы мониторинга;
- провести настройку параметров системы;

- произвести общую оценку работоспособности, а также возможность функционирования системы без сбоев;
- идентифицировать и устранить потенциальные неисправности до начала эксплуатационных испытаний;
- оценить реакцию системы на различные возмущающие воздействия и определить ее устойчивость;
- провести сравнительный анализ с результатами математического моделирования;
- подготовить систему мониторинга к дальнейшим испытаниям на реальном электровозе.

В рамках испытаний использовалась физическая модель электровоза, созданная на кафедре «Электроподвижной состав» ИрГУПС. На рисунке 5 представлена схема модели «Электровоз» научно-экспериментального стенда, к которой подключается макетный образец системы мониторинга сопротивления изоляции.

Модель «Электровоз» содержит следующие функциональные узлы:

- A1 – лабораторный макет преобразователя;
- A2 – выпрямительная установка возбуждения;
- A3 – преобразователь разгон/торможение для вспомогательного двигателя;
- M1 – ТЭД;
- M2 – вспомогательный двигатель;
- Wh 1 – блок измерения параметров первичной цепи.

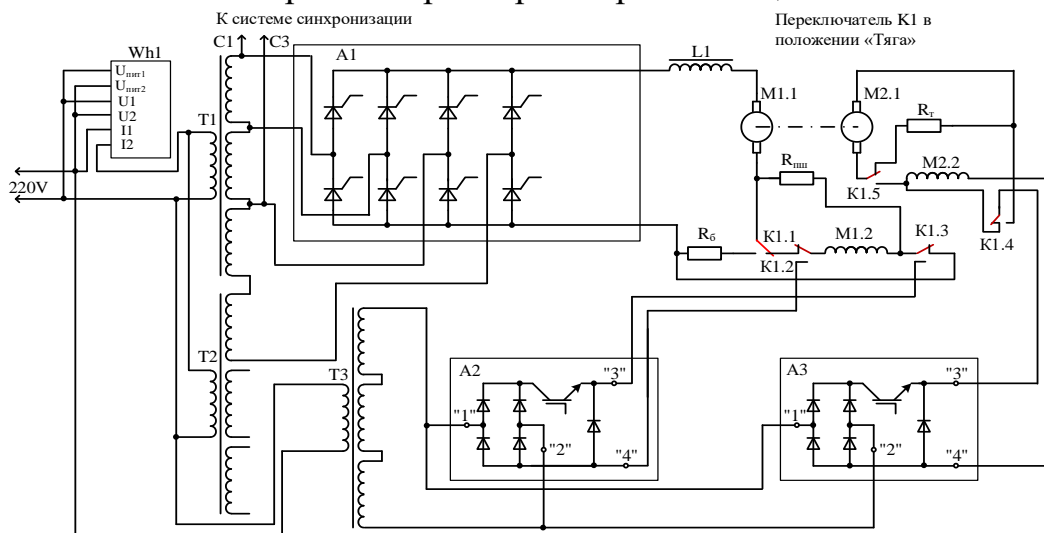


Рисунок 5 – Схема модели «Электровоз» лабораторного научно-экспериментального стенда

Лабораторный стенд, представляющий собой упрощенную физическую модель электровоза, расположен на базе мини-депо университета ИрГУПС с подключенным макетным образцом системы мониторинга сопротивления изоляции представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Внешний вид физической модели электровоза с подключённой системой мониторинга сопротивления изоляции

Для оценки работоспособности разработанной системы мониторинга выполнен ряд экспериментов на разработанном стенде. К устройству контроля изоляции последовательно подключены резистор номиналом 5,1 кОм и магазин сопротивлений типа РЗЗ [10], значения которого регулировались в диапазоне от 10 кОм до 1 МОм. Измерительные каналы У1-У3 выполнены на преобразователях напряжения типа ПН-1 [11], имеющих гальваническую развязку. В качестве диодного моста использовался мост из диодов типа FR307 [12].

С помощью первого измерительного канала У1 измеряется падение напряжения U_{pz} на катушке реле заземления, которое пересчитывается в ток утечки $I_{ут}$ по формуле (1)

$$I_{ут} = \frac{U_{pz}}{R_{pz}}, \quad (1)$$

где R_{pz} – сопротивление катушки реле заземления, Ом;

U_{pz} – напряжение на катушке реле заземления, В.

С помощью второго измерительного канала через гальванически развязывающий усилитель У2 измеряется напряжение $U_{дм}$ диодного моста D1-D4.

Третьим измерительным каналом через гальванически развязывающий усилитель У3 измеряется напряжение $U_{вип}$, выдаваемое выпрямительно-инверторным преобразователем ВИП, которое пересчитывается в сопротивление изоляции $R_{из}$ по формуле (2)

$$R_{из} = \frac{U_{дм} - U_{pz} - (R_{5-6} * I_{ут}) + U_{вип}}{I_{ут}}, \quad (2)$$

где R_{5-6} – сопротивление резисторов R5 и R6, Ом;

$U_{\text{вип}}$ – напряжение на ВИП, В.

Эти параметры позволяют непрерывно отслеживать состояние изоляции и оперативно выявлять отклонения.

Проведенный анализ и сопоставление полученных данных с эталонными значениями сопротивлений, установленными в магазине, позволили определить погрешность измерений (рисунок 7).

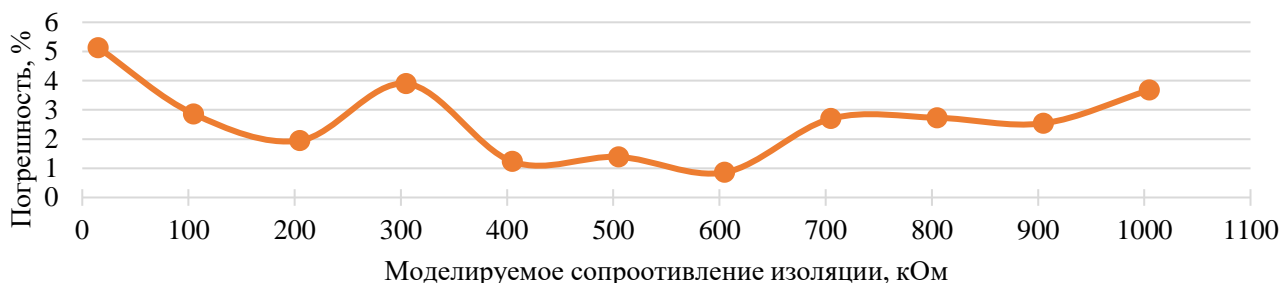


Рисунок 7 – Погрешность системы мониторинга, полученная в результате опытов на физической модели электровоза

Проведенные лабораторные испытания подтвердили работоспособность системы мониторинга сопротивления изоляции, погрешность измерений составила менее 7% в режиме соответствующему выбегу. Однако для практической реализации системы мониторинга необходимо провести дополнительные исследования в реальных условиях эксплуатации электровозов, что позволит оценить влияние различных факторов, таких как электромагнитные помехи, температурные воздействия, вибрации и другие внешние воздействия, возникающие в ходе движения электровоза на работу системы.

Если оставить без контроля сопротивление изоляции силовой цепи, то в дальнейшем, при текущем наращивании тяжеловесного движения и росту нагрузки на ТПС, количество отказов в пути следования по причине пробоя изоляции будет увеличиваться. Это приведет к задержкам движения поездов по перегонам, снижению пропускной способности и технической скорости. Своевременное определение текущего состояния сопротивления изоляции силовой цепи предотвратит постановку потенциально неисправного электровоза под поезд и не допустит его отказа в пути следования.

Заключение. Лабораторные испытания, проведенные на физической модели силовой цепи электровоза с расчетом на один ТЭД, показали, что разработанная система мониторинга способна осуществлять достоверный и непрерывный контроль фактического сопротивления изоляции силовой цепи электровоза. Испытания подтвердили высокую точность системы, с погрешностью измерений менее 7%.

Список используемых источников

1. Российская Федерация. Правительство. Об утверждении Стратегии развития транспортного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года и плана мероприятий по ее реализации: распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.08.2017 №1756-р. — Текст: непосредственный.
2. ОАО «Российские железные дороги». Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга "РЖД" на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года: распоряжение от 17 апреля 2018 года №769/р (Белая книга).
3. Паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)»: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2021 г. №1100-р.
4. Анализ состояния безопасности движения поездов, отказов в работе технических средств и технологических нарушений в Восточно-Сибирской дирекции тяги за декабрь и 12 месяцев 2024 года, №В-СИБ Т-73/пд от 17.01.2025.
5. Анализ причин и последствий технологических нарушений, допущенных по ответственности линейных предприятий Восточно-Сибирской дирекции тяги за декабрь и 12 месяцев 2023 года и 2024 года.
6. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К): руководство по эксплуатации / Новочеркасский электровозостроительный завод. — Новочеркасск, 2007. — Т. 1. — 635 с.; Т. 2. — 640 с.
7. Кахаев, С.А. Анализ способов контроля сопротивления изоляции силовой группы электровозов переменного тока / С.А. Кахаев, А.О. Линьков, В.Н. Знаенок // Молодежная наука: труды XXVIII Всероссийской студенческой научно практической конференции КриЖТ ИрГУПС (г. Красноярск, 25.04.2024 г.) : Т. 2: – с.128-134.
8. Патент 2807416 Российская Федерация, МПК G 01 R 27/18, В 60L 3/00. Способ оценки сопротивления изоляции силовой группы постоянного тока электровозов и устройство для его реализации / Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Линьков А.О., Шрамко С.Г., Знаенок В.Н., и др.; заявитель и патентообладатель Знаенок В.Н. № 2023116661; заявл. 26.06.2023, опубл. 14.11.2023, Бюл. №32 10 с.
9. Кахаев, С.А. Математическое моделирование работы системы мониторинга сопротивления изоляции силовой цепи электровозов переменного тока / С.А. Кахаев, О.В. Мельниченко, А.О. Линьков // ОБРАЗОВАНИЕ – НАУКА – ПРОИЗВОДСТВО: Материалы VIII Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции (г. Чита, 22 ноября 2024 г.): Т.1: Раздел 1. «Подвижной состав железных дорог» / редкол.: А.А. Ерёменко (отв. ред.) [и др.]; ЗаБИЖТ ИрГУПС. — Чита: ЗаБИЖТ ИрГУПС, 2024. С. 53-63.
10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 3.452.011 ТО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://armadatest.net/wp-content/uploads/2019/08/magazin-soprotivlenija-izmeritelnyj-r33.-tehnicheskoe-opisanie-i-instrukcija-po-ekspluatácii-3.452.011-to.pdf> (дата обращения: 10.03.2025).
11. Тепловоз ТЭМ 18ДМ 6 руководство по эксплуатации. Вспомогательное комплектующее оборудование. Электрооборудование. ТЭМ 18ДМ РЭ5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rcit.su/techinfoX66.html> (дата обращения: 10.03.2025).
12. Data Sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.diodes.com/assets/Datasheets/products_inactive_data/ds26003.pdf (дата обращения: 10.03.2025).