

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 621.3.051.25

EDN: <https://elibrary.ru/zvkmqv>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-273-286>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



Эффективность совместной работы устройств обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ и железнодорожной автоматики и телемеханики на грузонапряженных участках железных дорог

А. А. Крылов✉, А. Б. Косарев

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Для Восточного полигона железных дорог России, охватывающего Забайкальскую и Дальневосточную железные дороги, характерна повышенная грузонапряженность с ожидаемым ростом в ближайшей перспективе. Работа устройств тягового электроснабжения на отдельных участках связана с высокой токовой нагрузкой, в том числе в обратной тяговой сети. Необходимы особые меры по защищенности сети и сохранению ее работоспособности.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбран участок Розенгартовка – Бойцово – Бикин Дальневосточной железной дороги для оценки влияния совместной работы устройств обратной тяговой сети и железнодорожной автоматики и телемеханики. Участок расположен на главном электрифицированном ходу Транссибирской магистрали с электротягой переменного тока напряжением 25 кВ. Был проведен сравнительный анализ эффективности применения мероприятий, наиболее значимых с точки зрения степени воздействия на повышение защищенности устройств железнодорожной автоматики и телемеханики при совместной работе с обратной тяговой сетью переменного тока напряжением 25 кВ.

Результаты. Определены параметры работы обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ на исследуемом участке. Оценены факторы взаимного влияния на параметры работоспособности в условиях реального движения поездов повышенной массы, возникающие в работе обратной тяговой сети, и степени их влияния на работоспособность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Обсуждение и заключение. По результатам проведенных исследований на участке Дальневосточной железной дороги приведены доказательства о возможности повышения пробивного напряжения коммутирующих устройств до 2500 В. Разработаны и классифицированы технические мероприятия по минимизации воздействия режимов обратной тяговой сети переменного тока на работоспособность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики с оценкой достигаемого эффекта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железная дорога, система внешнего электроснабжения, система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, потеря электроэнергии, несимметрия напряжения, входное сопротивление, нормальная схема питания тяговых нагрузок

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Крылов А. А., Косарев А. Б. Эффективность совместной работы устройств обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ и железнодорожной автоматики и телемеханики на грузонапряженных участках железных дорог // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 273–286. EDN: <https://elibrary.ru/zvkmqv>.

Original article

UDK 621.3.051.25

EDN: <https://elibrary.ru/zvkmqv>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-273-286>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



Efficiency of joint operation of 25 kV reverse traction AC network devices and railway automation and telemechanics on heavy-load railway sections

Anton A. Krylov✉, Alexander B. Kosarev

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The Eastern Polygon, which covers Trans-Baikal and Far Eastern Russian railways, is characterised by increased freight traffic with an expected growth in the near future. The operation of traction power supply devices in certain areas is associated with a high current load, including reverse traction network. Special measures are required to secure the network and keep it operational.

Materials and methods. Rosengartovka – Boytsovo – Bikin section of the Far Eastern Railway was chosen as the research object to assess the impact of joint operation of reverse traction AC network devices and railway automation and telemechanics. The section is located on the main electrified course of the Trans-Siberian railway with an AC traction with 25 kV voltage. Comparative analysis of the effectiveness of the most significant measures in terms of impact on improving the security of railway automation and telemechanics devices was carried out when working with a 25 kV reverse traction AC network.

Results. The operation parameters of reverse traction AC network with 25 kV voltage in the study area were determined. The factors of mutual influence on the performance parameters in conditions of real movement of heavy-load trains arising in the operation of the reverse traction network and the degree of their influence on the performance of railway automation and telemechanics devices are estimated.

Discussion and conclusion. According to the results of the research conducted on the section of the Far Eastern Railway, evidence is provided on the possibility of increasing the critical voltage of switching devices up to 2500 V. Technical measures were developed and classified to minimise the impact of 25 kV reverse traction network modes on the operational performance of railway automation and telemechanics devices, indicating the degree of their impact and evaluating the achieved effect.

KEYWORDS: railway, external power supply, traction power supply system, traction substation, electric power loss, voltage unbalance, input impedance, standard traction load power supply circuit

FOR CITATION: Krylov A. A., Kosarev A. B. Efficiency of joint operation of 25 kV reverse traction AC network devices and railway automation and telemechanics on heavy-load railway sections. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):273–286. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-273-286>.

Введение. На сегодняшний день перед транспортной отраслью Российской Федерации и ОАО «РЖД» поставлена задача увеличения пропускной и провозной способности полигонов железных дорог в направлении основных портов Дальнего Востока для возможности увеличения объемов экспорта и валового внутреннего продукта¹. Выполнение данных задач достигается за счет увеличения количества пар поездов, перевозящих грузы в направлении морских портов Дальнего Востока, увеличения весовых норм поездов и необходимости обращения поездов повышенной массы (сдвоенных поездов) с учетом дефицита возможности провозной способности и существующих барьерных ограничений по инфраструктуре Восточного полигона, в том числе в границах Забайкальской и Дальневосточной железных дорог. С учетом наличия данных факторов, в границах указанных железных дорог применяются особые условия и требования, предъявляемые к надежности и эффективности работы устройств тягового электроснабжения и железнодорожной автоматики и телемеханики (далее — ЖАТ), реализуются мероприятия по их усилению и модернизации, обеспечивающие надежность перевозочного процесса. Вышеуказанные полигоны железных дорог по своим параметрам и специфике работы являются наиболее грузонапряженными на всей сети железных дорог ОАО «РЖД». Воздействие эксплуатационных и аварийных режимов с повышенными токовыми нагрузками, возникающими в обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ, на устройства ЖАТ потребуют особых условий для их защищенности, сохранения работоспособности и повышения эффективности в данных условиях эксплуатации.

Наличие указанных выше факторов и критериев привело к необходимости исследовать электромагнитные процессы при работе обратной тяговой сети переменного тока совместно с устройствами ЖАТ [1] для минимизации рисков возникновения аварийных режимов и снижения отказов технических средств на грузонапряженных участках железных дорог. Последнее особенно важно при организации тяжеловесного движения поездов вследствие влияния тягового тока, протекающего в обратной тяговой сети в момент движения электрического подвижного состава (далее — ЭПС), а также токов повышенной амплитуды, возникающих в аварийных режимах, в том числе при влиянии атмосферных и коммутационных перенапряжений. Одной из важнейших характеристик электромагнитных процессов является электромагнитная совместимость, рассмотренная в работе [2]. Авторами был разработан алгоритм, позволяющий проанализи-

ровать характеристики электромагнитной совместимости, а также была обоснована методика расчета коммутационных перенапряжений, в том числе и при разряде токов молнии в контактную сеть системы электроснабжения с высоковольтным питающим проводом. Установлено, что защита напольных устройств сигнализации, централизации и блокировки (далее — СЦБ) от коммутационных перенапряжений в системе электроснабжения с высоковольтным питающим проводом может быть решена соединением опор контактной сети с протяженным заземлителем, расположенным в земле и не соединенным с рельсовым путем.

Дополнительно в работе [3] был обоснован метод расчета коммутационных перенапряжений, включая разряд токов молнии в контактную сеть и высоковольтный силовой провод, для изоляции контактной сети в системе электроснабжения. Защита устройств наружной СЦБ от коммутационных перенапряжений в системе электроснабжения с высоковольтным силовым проводом может быть решена путем подключения арматуры опорных фундаментов контактной сети к протяженному искусственному заземлителю, который расположен под землей и не соединен с железнодорожным полотном [3]. В работе² изучены методы электрического расчета тяговых сетей, проведено натурное моделирование электромагнитных процессов в тяговых сетях для основных расчетных режимов работы устройств электроснабжения и электропоездов. На основании изложенного был предложен ряд практических решений по обеспечению электробезопасности при эксплуатации и ремонте тяговых сетей, а также при капитальном ремонте пути на двухпутных участках переменного тока. Исходя из этих выводов, в [4] разработана методика расчета сопротивлений тяговых сетей переменного тока.

В 2014 г. сотрудниками дорожной лаборатории Свердловской железной дороги и Уральского государственного университета путей сообщения было проведено научное исследование в области совершенствования эксплуатации и повышения надежности работы рельсовых цепей. В итоговой монографии [5] были представлены результаты внедрения этих разработок на Свердловской железной дороге в условиях пониженного сопротивления изоляции рельсовых цепей и повышенных тяговых токов при электротяге постоянного тока. Дополнительно рассмотрены процессы и закономерности изменения сопротивления изоляции рельсовых цепей, сопротивления токопроводных стыков, а также сведения об объективных критериях и методах количественной оценки эксплуатационных свойств рельсовых цепей. Представлена новая система оптимальной регулировки рельсовых цепей [5].

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. 285 с.

² Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока: производств. изд. М.: Транспорт, 1987. 279 с.

На основании выполненного анализа предложены следующие механизмы работы системы тягового железнодорожного электроснабжения (далее — СТЭ): нормальный, вынужденный и аварийный. В работе [6] были рассмотрены режимы работы СТЭ с целью развития и совершенствования автоматизированных средств определения режимов работы и расчета параметров СТЭ, с контролем наличной пропускной способности железной дороги по тяговому электроснабжению и снятием инфраструктурных ограничений. Кроме этого, изучение данного вопроса позволит проверить гипотезу о возможности повышения уровня пробивного напряжения коммутирующих устройств до 2500 В.

Материалы и методы. В нормальном режиме работы СТЭ закон распределения потенциалов между рельсом и землей носит вероятностно-статистический характер, поскольку зависит от количества, массы и координат местонахождения поездов, находящихся в пределах межподстанционной зоны (далее — МПЗ). Для обеспечения нормального функционирования устройств регулирования движения и элементов СТЭ необходимо, чтобы токи и потенциалы не превышали установленных для данных элементов допустимых значений. При переменном токе разность потенциалов между рельсом и землей может превышать 1400–1500 В, что недопустимо как по условиям нормального функционирования СТЭ, СЦБ и ЖАТ и обеспечения безопасности движения, так и по условиям электробезопасности для обслуживающего персонала и пассажиров [7]. Также исследования по данному вопросу описаны в работе [8], где изучено влияние переходного сопротивления балласта верхнего строения пути на величину потенциала «рельс — земля».

С ростом массы поездов, в случае если длина МПЗ и расстояние между тяговыми подстанциями (далее — ТП) остаются неизменными, то среднее значение потенциала между рельсом и землей в пределах этой МПЗ в нормальном режиме работы СТЭ возрастает пропорционально токовым нагрузкам, т.е. наличию на участке одного или нескольких ЭПС (рис. 1).

Результаты расчета потенциалов между рельсом и землей для основной гармоники тока ($f = 50$ Гц) на однопутном и двухпутном участках при наличии трех единиц ЭПС и двустороннем питании МПЗ представлены в виде графиков на рис. 2 и 3.

Из этого следует, что потенциалы между рельсом и землей для двухпутных участков железных дорог ниже, чем для однопутного участка [9].

Наиболее тяжелым вынужденным режимом работы СТЭ является режим ее работы при отключении (аварийном или плановом) одной из ТП. В этом случае длина МПЗ увеличивается примерно вдвое, что приводит к увеличению потерь напряжения на токоприемниках электропоездов и уменьшению уровня напряжения на них, а также к увеличению потерь мощности в тяговой сети. Возрастают токи тех фидеров ТП, которые питают возникшую протяженную МПЗ. Увеличивается нагрузка ТП, питающих удлиненную МПЗ³.

К вынужденному режиму работы СТЭ относится и отключение поста секционирования, который, как правило, расположен в средней части МПЗ. В результате вместо двусторонней схемы питания образуются две зоны с односторонним питанием. Это приводит к увеличению потерь напряжения и мощности в тяговой сети и уменьшению напряжения на токо-

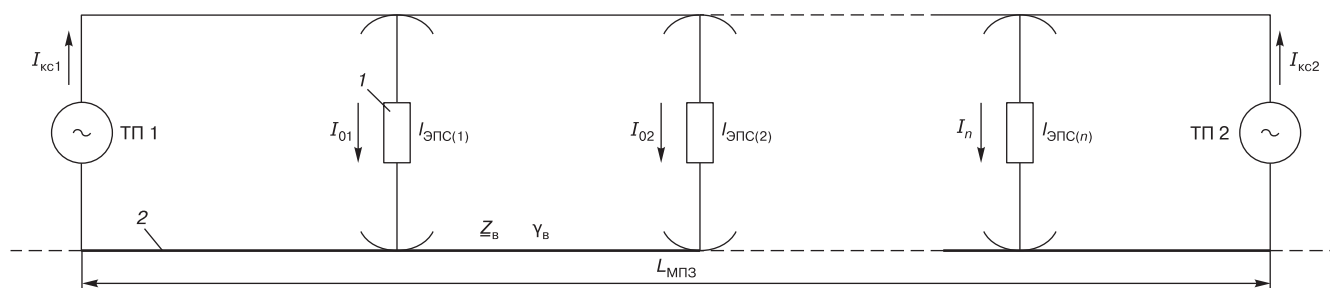


Рис. 1. Схема расчета потенциалов рельсов при двустороннем питании и произвольном количестве нагрузок*:
 I — нагрузка (ЭПС); 2 — рельсы; $I_{01}...I_n$ — токи ЭПС; $l_{ЭПС(1)}...l_{ЭПС(n)}$ — расстояния i -го ЭПС от ТП 1; $L_{МПЗ}$ — длина МПЗ;
 $Z_в$ — волновое сопротивление рельсовой сети; $\gamma_в$ — коэффициент распространения рельсовой сети, 1/км;
 $I_{кc1}$ — ток в контактной сети от ТП 1; $I_{кc2}$ — ток в контактной сети от ТП 2

* Источник: [11]

Fig. 1. Calculation scheme of rail potentials with two-way power supply and arbitrary number of loads*:
 I — load (electric rolling stock); 2 — rails; $I_{01}...I_n$ — electric rolling stock currents; $l_{ЭПС(1)}...l_{ЭПС(n)}$ — distance between i -th electric rolling stock and traction substation 1; $L_{МПЗ}$ — inter-substation zone length; $Z_в$ — rail network wave impedance; $\gamma_в$ — rail network distribution coefficient, 1/km;
 $I_{кc1}$ — current in catenary system from traction substation 1; $I_{кc2}$ — current in catenary system from traction substation 2
 * Source: [11]

³ Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1982. 528 с.

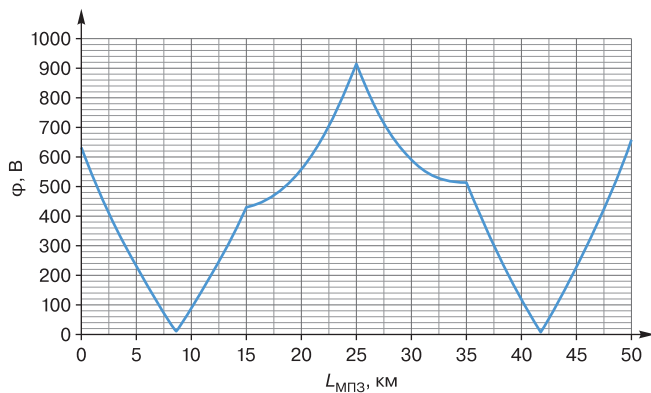


Рис. 2. Потенциалы между рельсом и землей для однопутного участка при трех ЭПС в пределах МПЗ*
* Источник: данные авторов

Fig. 2. Potentials between rail and ground for a single-track section of three electric rolling stocks within the inter-substation zone*
* Source: authors' data

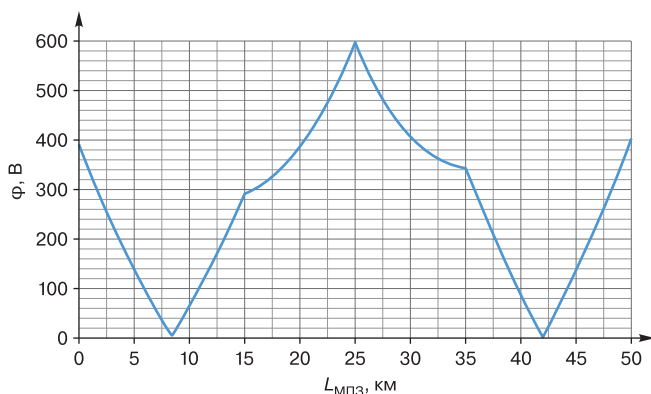


Рис. 3. Потенциалы между рельсом и землей для двухпутного участка при трех ЭПС в пределах МПЗ*
* Источник: данные авторов

Fig. 3. Potentials between rail and ground for two-track section with three electric rolling stocks within the inter-substation zone*
* Source: authors' data

приемниках. За счет включения нормально разомкнутых продольных разъединителей контактной сети (далее — КС), расположенных в зоне поста секционирования, можно обеспечить двустороннее питание КС на рассматриваемой МПЗ. Но при этом будут иметь место достаточно протяженные «мертвые» зоны токовой защиты, установленной на фидерах ТП.

Расчетная схема определения потенциала рельсов от тока ЭПС в вынужденном режиме при одной нагрузке и одной ТП в пределах МПЗ представлена на рис. 4.

Результаты расчета потенциалов рельсов [10] на однопутном и двухпутном участках в вынужденном режиме при трех ЭПС от основной гармоники тока ($f = 50$ Гц) представлены в виде графика на рис. 5 и 6.

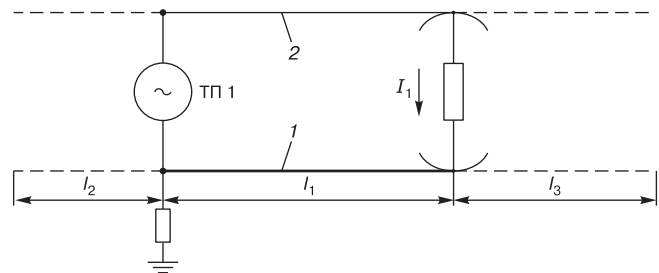


Рис. 4. Схема расчета потенциалов рельсов в вынужденном режиме*:
 l — рельс; 2 — контактная сеть; l_1 — расстояние от ТП до i -го ЭПС; l_2 — расстояние до ТП; l_3 — расстояние от ЭПС; I_1 — ток ЭПС
* Источник: данные авторов

Fig. 4. Calculation scheme of rail potentials in forced mode*:
 l — rail; 2 — catenary system; l_1 — distance between traction substation and i -th electric rolling stock; l_2 — distance to traction substation; l_3 — distance from electric rolling stock; I_1 — electric rolling stock current
* Source: authors' data

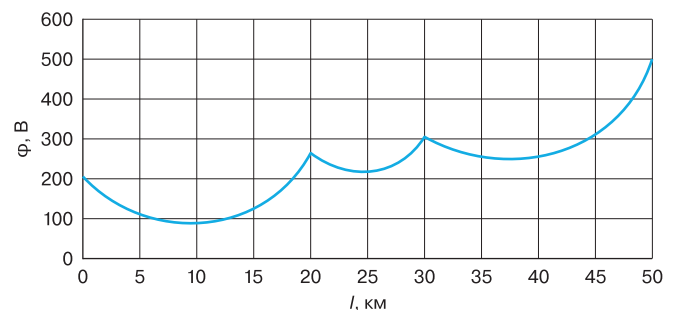


Рис. 5. Распределение потенциалов рельсов на однопутном участке в вынужденном режиме при трех ЭПС в пределах МПЗ*
* Источник: данные авторов

Fig. 5. Distribution of rail potentials on a single-track section in forced mode with three electric rolling stocks within the inter-substation zone*
* Source: authors' data

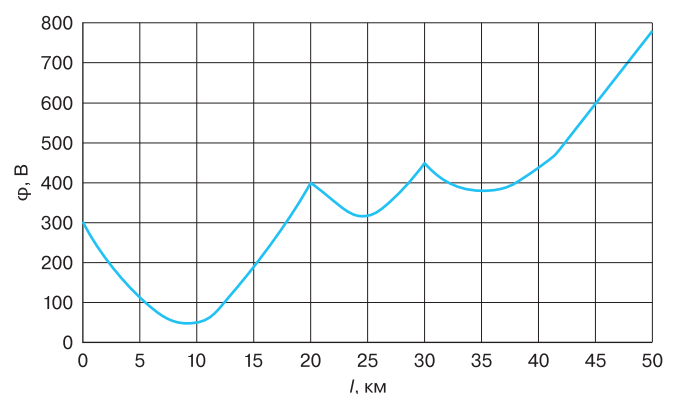


Рис. 6. Моделирование распределения потенциалов рельсов на двухпутном участке в вынужденном режиме при трех ЭПС в пределах МПЗ*
* Источник: данные авторов

Fig. 6. Simulation of the distribution of rail potentials on a double-track section in forced mode with three electric rolling stocks within the inter-substation zone*
* Source: authors' data

Таким образом, работа СТЭ в вынужденном режиме оказывает незначительное влияние на процесс возникновения повышенных потенциалов между рельсом и землей, что объясняется наличием контуров заземления на ТП, в том числе на отключенных, которые не способствуют формированию повышенных потенциалов. В случае короткого замыкания (далее — КЗ) на рельс в системе переменного тока, направление тока КЗ совпадает с направлением тока тягового режима. Влияние индуктивности рельсов приводит к отличию характера изменения потенциала рельсов в переходном процессе. На участках электротяги переменного тока выделяют три периода формирования потенциала между рельсом и землей в точке КЗ:

- рост потенциала обусловлен увеличением силы тока КЗ;
- изменение потенциала при отключении КЗ автоматическим выключателем в ТП. В момент разрыва цепи выключателем в рельсах возникает напряжение, которое поддерживает ток КЗ и вызывает появление тока самоиндукции, циркулирующего по замкнутому контуру «рельс — земля — рельс»;
- снижение потенциала, вызванное ослаблением тока самоиндукции.

Когда КЗ получает питание от двух ТП, это изменяет как характер тока в точке КЗ, так и распределение потенциала между рельсом и землей (рис. 7). Наиболее типичная ситуация для режима КЗ возникает, когда оно совпадает с нахождением поезда в зоне питания, работающего в тяговом режиме. В этом случае тяговые двигатели электроваза переключаются на генераторный режим и дополнительно питают место КЗ. В то время как отключение тока ТП занимает 0,05–0,1 с, генераторный режим электроваза продлевает ток в точке КЗ до 0,3–0,6 с.

При КЗ потенциалы обеих полярностей могут достигать нескольких сотен вольт. На рельсах участков с переменным током при КЗ контактной сети были зафиксированы напряжения до 1,5 кВ.

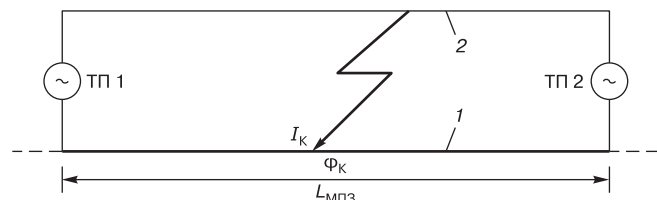


Рис. 7. Схема расчета максимального потенциала рельсов при КЗ и двустороннем питании МПЗ*:

1 — рельсовая сеть; 2 — контактная сеть; I_K — ток КЗ;
 ϕ_K — потенциал между рельсом и землей в точке КЗ

* Источник: данные авторов

Fig. 7. Calculation scheme of rails maximum potential in case of short circuit and two-way power supply of the inter-substation zone*:

1 — rail network; 2 — catenary system; I_K — short-circuit current;
 ϕ_K — rail-to-earth potential in short-circuit point

* Source: authors' data

По результатам моделирования (рис. 8 и 9) можно сделать вывод, что в режиме КЗ при величине переходного сопротивления $R_{\Pi} = 5 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ наблюдается

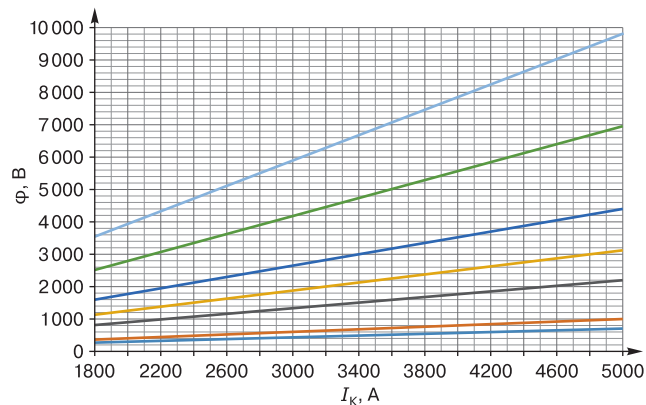


Рис. 8. Влияние переходного сопротивления и тока КЗ однопутного участка на максимальный рельсовый потенциал при двустороннем питании МПЗ*:

— 0,5 Ом · км; — 1 Ом · км; — 5 Ом · км; — 10 Ом · км;
 — 20 Ом · км; — 50 Ом · км; — 100 Ом · км

* Источник: данные авторов

Fig. 8. Influence of the transient resistance and short-circuit current of a single-track section on the maximum rail potential with inter-substation zone two-way power supply*:

— 0,5 Ohm · km; — 1 Ohm · km; — 5 Ohm · km;
 — 10 Ohm · km; — 20 Ohm · km; — 50 Ohm · km;
 — 100 Ohm · km

* Source: authors' data

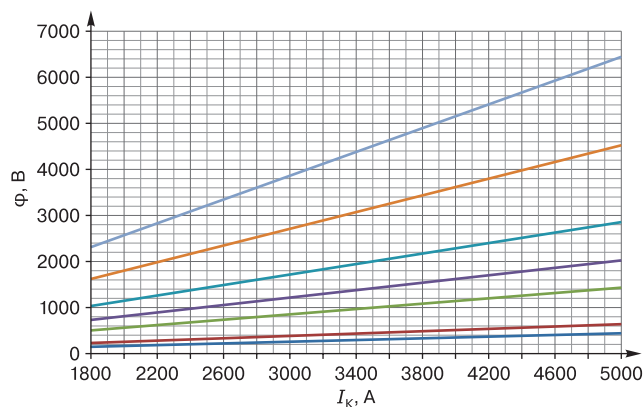


Рис. 9. Влияние переходного сопротивления и тока КЗ на максимальный уровень потенциала рельсов в условиях двухпутного участка, питаемого с двух сторон магистральной питающей заземляющей сетью МПЗ*:

— 0,5 Ом · км; — 1 Ом · км; — 5 Ом · км; — 10 Ом · км;
 — 20 Ом · км; — 50 Ом · км; — 100 Ом · км

* Источник: данные авторов

Fig. 9. Influence of transient resistance and short-circuit current on the maximum rail potential level in conditions of a double-track section powered from both sides by the inter-substation main supply grounding network*:

— 0,5 Ohm · km; — 1 Ohm · km; — 5 Ohm · km;
 — 10 Ohm · km; — 20 Ohm · km; — 50 Ohm · km;
 — 100 Ohm · km

* Source: authors' data

повышенная величина потенциалов, которая может привести к пробоем искрового промежутка и дальнейшему стеканию части тока КЗ в цепи устройств ЖАТ и конструкции инфраструктуры, имеющие гальваническую связь с землей. Негативным последствием может быть отказ в работе устройств ЖАТ вследствие термического воздействия токов КЗ.

Результаты исследования. По данным работы СТЭ на режимах (нормальном, вынужденном и аварийном) были разработаны мероприятия, способствующие повышению надежности и эффективности совместной работы обратной тяговой сети и устройств ЖАТ на грузонапряженных участках железных дорог по критерию прямого или косвенного воздействия, приведенные в табл. 1.

Следует отметить, что прямое воздействие — это воздействие низкого, среднего или высокого уровня, направленное непосредственно на снижение влияния разности потенциалов между рельсом и землей на функционирование систем и устройств ЖАТ. Косвенное воздействие — это воздействие низкого, среднего или высокого уровня, направленное на снижение разности потенциалов между рельсом и землей, включая параметры, изменение которых приводит к снижению разности потенциалов.

На основе данных из табл. 1 были проведены исследования на участке Розенгартовка — Бойцово — Бикин Дальневосточной железной дороги [11]. Этот двухпутный участок протяженностью 42,15 км расположен на главном электрифицированном ходу Транссибирской магистрали с электротягой переменного тока напряжением 25 кВ. Структурно находится в составе межподстанционной зоны Розенгарт

товка — Бикин. Весовые нормы поездов в четном направлении составляют 6300, 7200, 12 000, 14 000 т, скорость ограничена до 70–80 км/ч. Фидеры контактной сети тяговой подстанции Розенгартовка подключаются в точке с координатой 8713,68 (рис. 10). Пост секционирования контактной сети расположен на станции Бойцово.

На участке уложены рельсы типа Р65, движение грузовых поездов осуществляется электровозами ЗЭС5К «Ермак».

Проведен сравнительный анализ эффективности применения наиболее значимых с точки зрения степени воздействия на повышение защищенности устройств ЖАТ мероприятий при совместной работе с обратной тяговой сетью переменного тока напряжением 25 кВ.

Рассмотрим подробнее результаты, полученные в ходе исследования.

Заземление средней точки ДТ. К средним точкам путевых ДТ могут быть подключены различного рода заземляющие устройства, необходимые для нормального функционирования устройств тягового электроснабжения. В целях снижения потенциала между рельсом и землей на действующих участках возможно подключение контуров заземления к средним точкам ДТ. Результаты измерений потенциала рельсов относительно земли были получены в феврале 2023 года на участке Розенгартовка — Бойцово — Бикин для оценки влияния подключения заземления к средним точкам ДТ.

Схема подключения измерительных каналов регистратора при подключенном контуре заземления к средней точке ДТ представлена на рис. 11.

Результаты исследования представлены на рис. 12.

Таблица 1

Перечень технических мероприятий для повышения эффективности совместной работы обратной тяговой сети и устройств ЖАТ на грузонапряженных участках железных дорог*

Table 1

Classification of technical measures of improving the efficiency of the joint operation of the reverse traction network and railway automation and telemechanics devices on heavy-load railway sections*

№ п/п	Наименование мероприятия	Место применения	Воздействие			Получаемый эффект
			Прямое	Косвенное	Уровень	
1	Заземление средней точки дроссель-трансформатора (далее — ДТ)	На действующих участках		+	Средний	При подключении отдельно сделанных вынесенных контуров заземления к междупутным перемычкам потенциалы между рельсом и землей уменьшаются
2	Применение в цепях заземления опор КС элементов с повышенным статическим напряжением пробоя	На действующих участках	+		Высокий	Снижение количества отказов систем и устройств ЖАТ

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

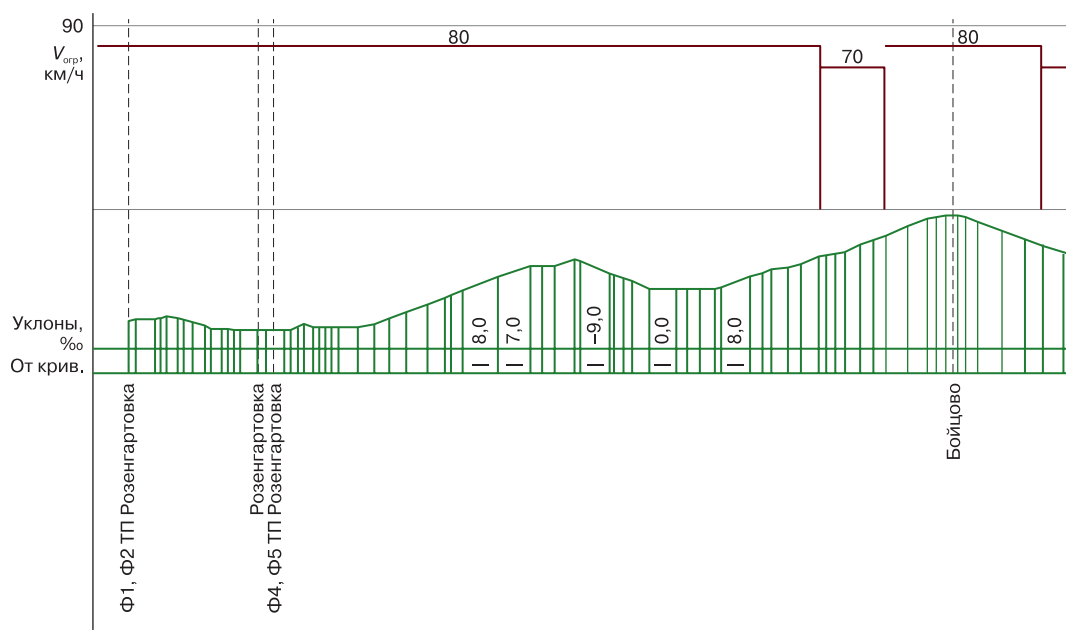


Рис. 10. Продольный профиль участка Розенгартовка – Бойцово

* Источник: данные авторов

Fig. 10. Rosengartovka – Boitsovo section

* Source: authors' data

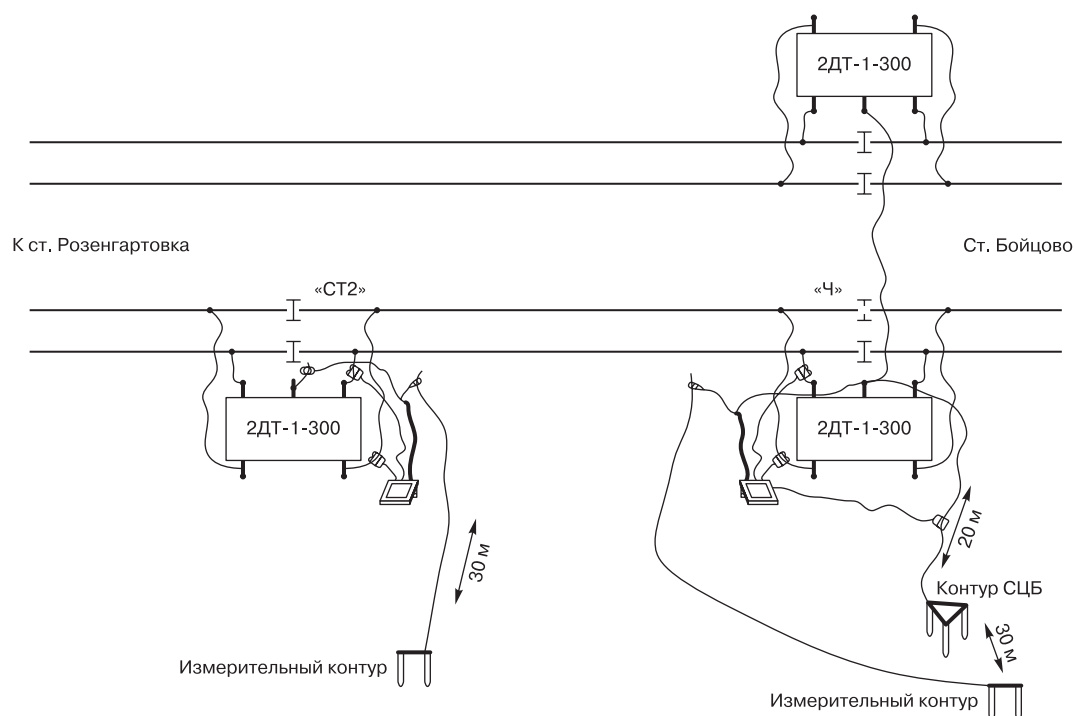


Рис. 11. Схема подключения измерительных каналов регистратора при подключенном контуре заземления к средней точке ДТ*:

СТ2 — сигнальная точка перегона Розенгартовка – Бойцово; «Ч» — сигнальная точка станции Бойцово

* Источник: данные авторов

Fig. 11. Connection diagram of the measuring channels of the recorder with the ground network connected to the midpoint of impedance transformer*:

СТ2 — signal point of the Rosengartovka – Boitsovo proving ground; «Ч» — signal point of the Boitsovo station

* Source: authors' data

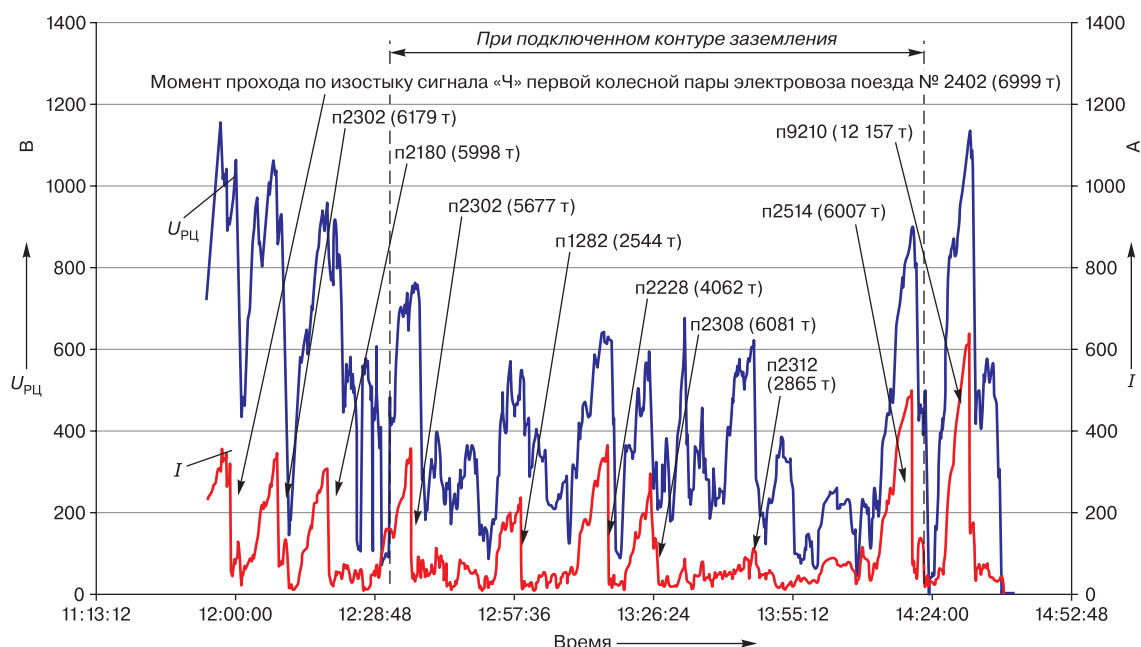


Рис. 12. График напряжения РЦ (U_{PC}) и суммарного тока со стороны перегона (I) на ДТ на сигнальной точке «Ч»*
* Источник: данные авторов

Fig. 12. Graph of the rail circuit voltage (U_{PC}) and the total current from the proving ground (I) on the DT at the signal point «Ч»*
* Source: authors' data

Как видно из графика, время начала измерения — 12:00, а окончания — 14:40 (табл. 2).

В 12:30 были подключены отдельно вынесенные контуры заземления к междупутным перемычкам

Таблица 2

Расшифровка графика напряжения РЦ и суммарного тока (со стороны перегона) на ДТ на сигнальной точке «Ч»*

Table 2

Decoding of the rail circuit voltage graph and the total current (from the proving ground) on the impedance transformer at the signal point «Ч»*

№ п/п	Время	Номер поезда	Масса, т	I , А	U_{PC} , В
1	12:00	2402	6999	350	1180
2	12:10	2302	6179	340	1050
3	12:20	2180	2180	300	950
4	12:40	2306	5677	350	780
5	12:57	1282	2544	210	550
6	13:10	2228	4062	350	610
7	13:26	2308	6081	300	600
8	13:40	2312	2865	100	605
9	14:10	2514	6007	500	900
10	14:35	9210	12 157	610	1175

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

(начало испытаний). Время окончания испытаний — 14:24. В результате исследований выявлено, что при подключении контуров заземления к междупутным перемычкам потенциалы между рельсом и землей снижаются на 30–35 %. Полученные результаты исследования представлены на рис. 12.

Из результатов видно, что заземление средней точки ДТ не решает вопросов требований электробезопасности. Использование земли в качестве обратного провода в тяговых сетях переменного тока предопределяет наличие конструктивных особенностей заземляющей системы подстанций, которая одновременно является цепью отсоса. В результате этот контур заземления является не только защитным, но и рабочим элементом, по которому постоянно протекает обратный ток.

Применение в цепях заземления опор КС элементов с повышенным статическим напряжением пробоя. Выбор способа заземления может быть определен рядом требований, исходящих из реальной величины сопротивления каждого из заземляемых устройств. На участках переменного тока искровые промежутки устанавливаются в индивидуальные заземления при сопротивлении опор менее 100 Ом и при подключении к рельсу двухниточной РЦ и менее 5 Ом — при подключении к средней точке ДТ⁴.

⁴ Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: приказ Министерства транспорта РФ от 23 июня 2022 г. № 250. 84 с.

Защитные устройства в цепи заземления должны обеспечивать надежную работу защит от токов КЗ, электробезопасность обслуживающих работников и других лиц и способствовать нормальному функционированию устройств ЖАТ и РЦ, а на участках постоянного тока ограничивать утечки тяговых токов в землю.

В нормальном режиме работы заземляемая конструкция и рельсы изолированы друг от друга. Они должны соединяться, только когда защитное устройство в цепи заземления оказывается под предельным напряжением и пробивается. При достижении установленного значения приложенного напряжения ток течет через защитное устройство. Таким образом, в защищаемых устройствах ограничивается перенапряжение.

Известно, что на железнодорожных участках переменного тока при самых неблагоприятных условиях (хорошая изоляция балластного слоя пути, обращение тяжеловесных поездов, значительная длина МПЗ, вынужденные режимы работы СТЭ и т.д.) потен-

циал между рельсом и землей может достигать 1700–1800 В⁵.

По данным, представленным на рис. 13 и 14, наибольший потенциал между рельсом и землей был выявлен на сигнальной точке № 4 перегона Розенгартовка – Бойцово [12].

Как видно из рис. 14, существенные различия амплитудного и действующего значения напряжения между рельсом и землей объясняются наличием высших гармоник тягового тока.

График напряжения между рельсом и землей для поезда № 9218 весом 14 086 т приведен на рис. 15.

На рис. 16 и 17 приведены потенциальные диаграммы, построенные по результатам замеров значений напряжений между рельсом и землей на сигнальной точке комплектной трансформаторной подстанции, расположенной вдоль линии «два провода – рельс» и сигнальных точек «Ч» и № 4 при движении сдвоенного поезда повышенной массы № 9218 весом 14 086 т.

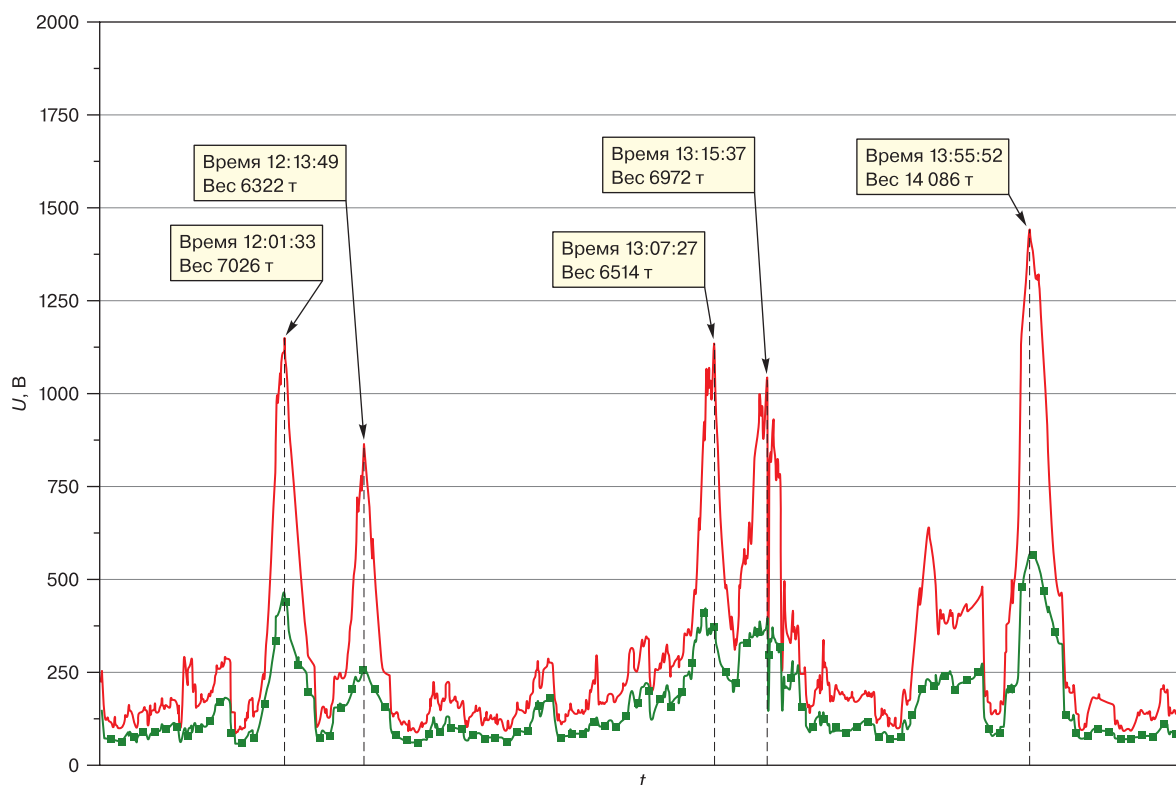


Рис. 13. Напряжение между рельсом и землей на сигнальной точке № 4 перегона Розенгартовка – Бойцово*:

— $U_{\text{ампл}}$ — амплитудное (пиковое) значение напряжения; — $U_{\text{действ}}$ — действующее значение напряжения

* Источник: данные авторов

Fig. 13. Voltage between rail and ground at signal point No. 4 of the Rosengartovka – Boitsovo proving ground*:

— $U_{\text{ампл}}$ — amplitude (peak) voltage value; — $U_{\text{действ}}$ — current voltage value

* Source: authors' data

⁵ ГОСТ Р 55602–2013. Аппараты коммутационные для цепи заземления тяговой сети и тяговых подстанций железных дорог. Общие технические условия: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 сентября 2013 г. № 906-ст. М.: Стандартинформ, 2014. 21 с.

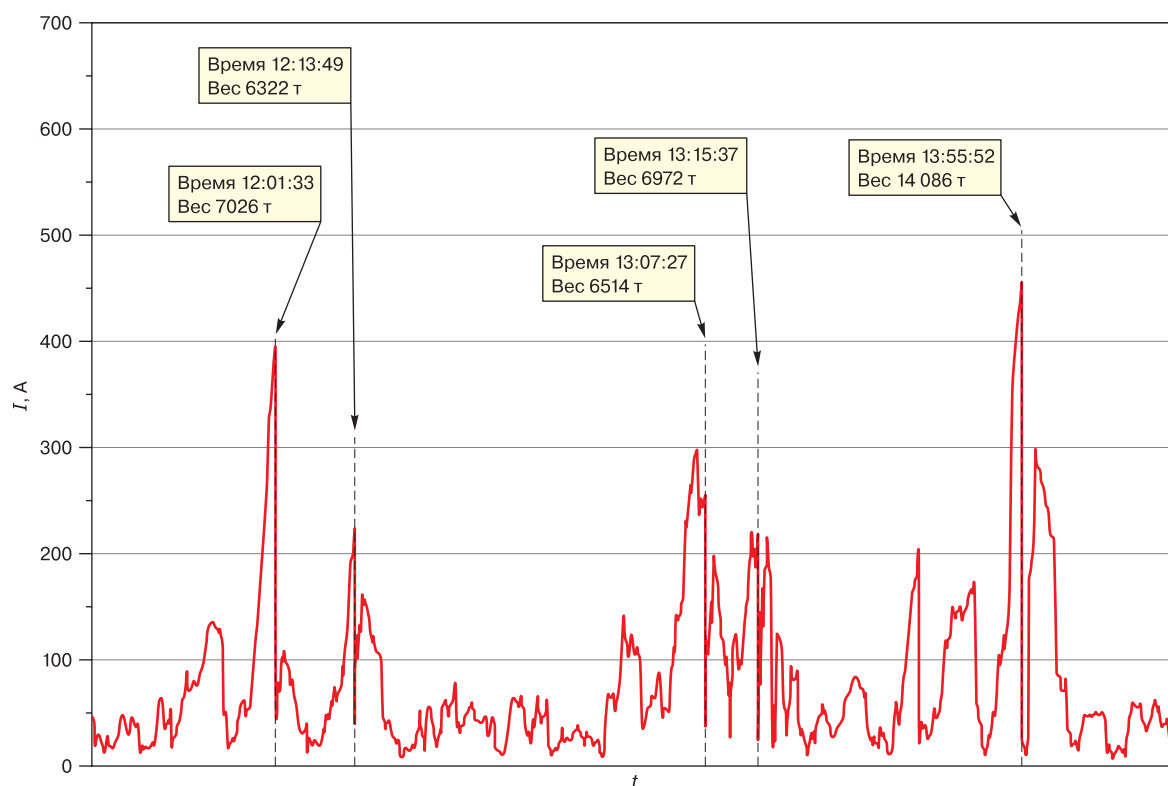


Рис. 14. Ток ДТ сигнальной точки № 4 перегона Розенгартовка – Бойцово*
* Источник: данные авторов

Fig. 14. Impedance transformer current of signal point No. 4 of the Rosengartovka – Boitsovo proving ground*
* Source: authors' data

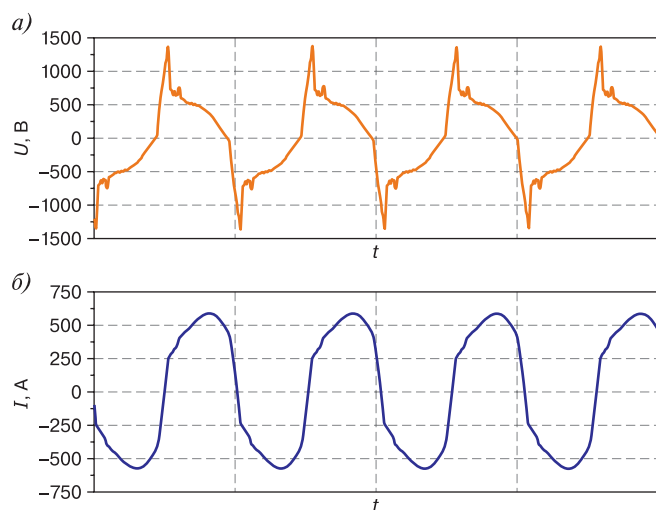


Рис. 15. График напряжения «рельс – земля» (а) и ток рельсовой линии (б) при проходе поезда весом 14 086 т*
* Источник: данные авторов

Fig. 15. Graph of the rail-to-earth voltage (a) and rail line current (b) during the passage of the train with 14 086 t weight*
* Source: authors' data

В результате произведенных измерений (рис. 16) максимальный потенциал между рельсом и землей при проходе поезда № 9218 весом 14 086 т в точках контроля достиг 1441 В, но не превысил 1500 В (действующее значение согласно ГОСТ Р 55602–2013⁶).

При использовании метода линейной экстраполяции с учетом средней скорости движения поезда № 9218 по рассматриваемому участку и максимального тягового тока значение максимального потенциала между рельсом и землей в данных условиях достигло 1930 В.

Для определения возможности использования в аварийном режиме работы СТЭ в цепях заземления опор КС элементов со статическим напряжением пробоя более 2200 ± 100 В было осуществлено моделирование пробоя изоляции КС в программе COMSOL Multiphysics, использующей в расчетах метод конечных элементов. Самым неблагоприятным случаем является возникновение КЗ вблизи отключенной тяговой подстанции, так как в этом случае напряжение на опоре с пробитой изоляцией будет наименьшим. Было принято, что сопротивление заземления опоры с пробитой изоляцией составляет 10 Ом.

⁶ Там же.

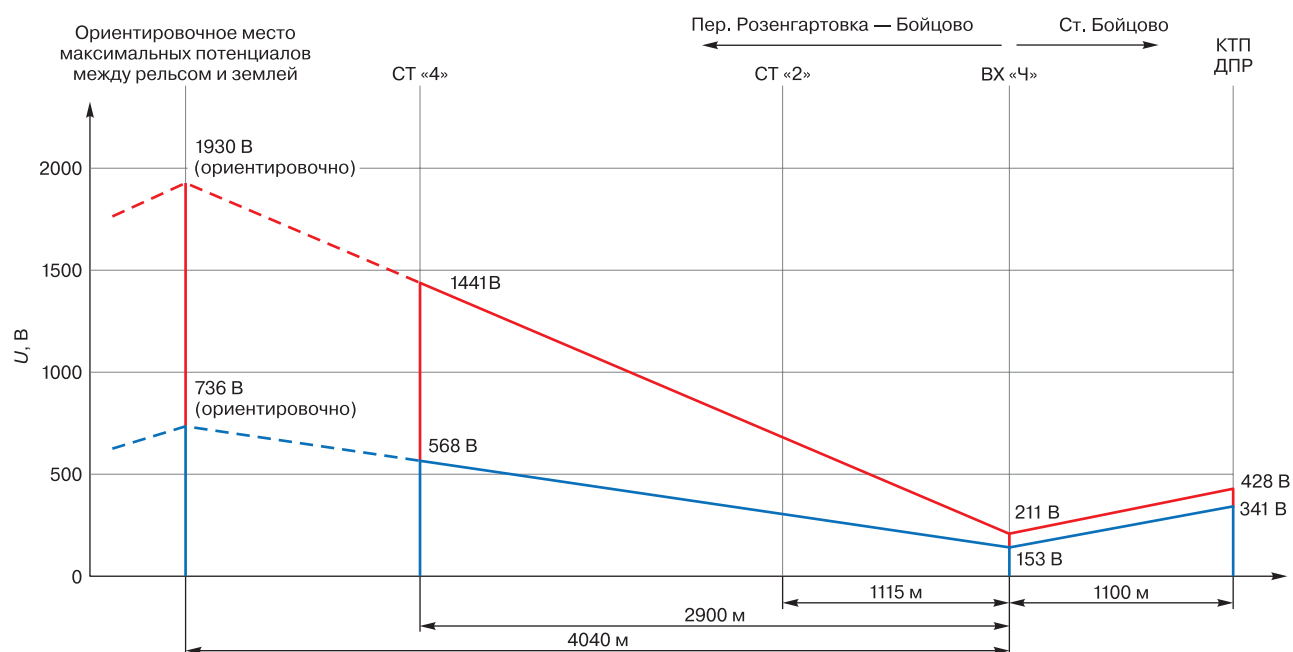


Рис. 16. Потенциальная диаграмма рассматриваемого участка при движении поезда весом 14 086 т*:

— $U_{\text{ампл}}$ — амплитудное (пиковое) значение напряжения; — $U_{\text{действ}}$ — действующее значение напряжения
* Источник: данные авторов

Fig. 16. Potential diagram of the considered section with train weight 14 086 t in motion*:

— $U_{\text{ампл}}$ — amplitude (peak) voltage value; — $U_{\text{действ}}$ — current voltage value
* Source: authors' data

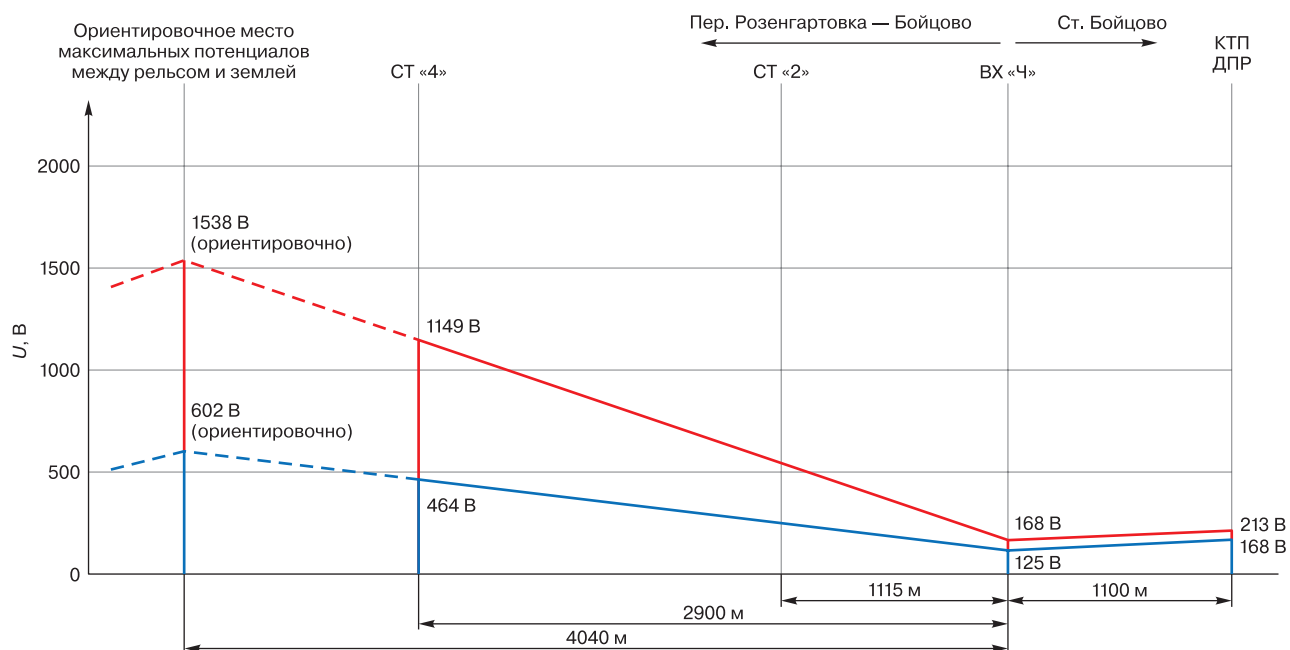


Рис. 17. Потенциальная диаграмма рассматриваемого участка при движении поезда весом 7026 т*:

— $U_{\text{ампл}}$ — амплитудное (пиковое) значение напряжения; — $U_{\text{действ}}$ — действующее значение напряжения
* Источник: данные авторов

Fig. 17. Potential diagram of the considered section with train weight 7026 t in motion*:

— $U_{\text{ампл}}$ — amplitude (peak) voltage value; — $U_{\text{действ}}$ — current voltage value
* Source: authors' data

По результатам моделирования установлено, что разность потенциалов между контактной подвеской и рельсами на опоре в месте КЗ значительно выше статического напряжения пробоя 2200 ± 100 В. Следовательно, с точки зрения надежности срабатывания защиты при пробое изоляции КС на участках переменного тока возможно увеличение пробивного напряжения в диапазоне до $(2300 - 2500 \text{ В}) \pm 100$ В. При этом электробезопасность эксплуатационного персонала с целью его защиты при нахождении в зоне работы коммутающих устройств в цепях заземления опор контактной сети и исключения вероятности поражения электрическим током за счет повышенного уровня статического напряжения пробоя должна обеспечиваться за счет выполнения требований ГОСТ Р 58321–2025, пункт 8.3.4.⁷

Обсуждение и заключение. По результатам проведенных экспериментальных исследований и измерений на участке Розенгартовка – Бойцово – Бикин Дальневосточной железной дороги была доказана возможность повышения пробивного напряжения коммутающих устройств до 2500 В для оценки возможности их применения в цепях заземления опор КС в работе обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ. Разработаны и классифицированы технические мероприятия по минимизации воздействия режимов обратной тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ на работоспособность устройств ЖАТ с указанием степени их воздействия и с оценкой достигаемого эффекта, направленные на повышение эффективности и надежности работы устройств ЖАТ при взаимодействии с обратной тяговой сетью в системе тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ, которые, в свою очередь, способствуют снижению или исключению рисков возникновения критических ситуаций. Дополнительно на основании проведенного исследования была разработана автоматизированная обучающая система⁸, которая помогает в проведении расчетов, связанных с выбором параметров, определением характеристик, режимов и нагрузочной способности СТЭ и их отдельных элементов.

Важно отметить, что на эффективность совместной работы обратной тяговой сети и устройств ЖАТ влияют гармонический состав тягового тока, наличие продольной и поперечной асимметрии рельсовой линии, а также схемы заземления шкафов СЦБ. Также для более объективного и рационального выбора устройств обратной тяговой сети электрифицированных

железных дорог переменного тока напряжением 25 кВ совместно с устройствами ЖАТ на этапе проектирования, при выборе параметров и проектных решений целесообразно разработать методику совместного моделирования работы СТЭ и ЖАТ для повышения точности и возможностей проводимых расчетов с описанием алгоритма для целей последующей автоматизации на персональном компьютере.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. 480 с. EDN: <https://elibrary.ru/vmeqgbz>.
2. Косарев А. Б., Косарев Б. И. *Fundamentals of electromagnetic safety of railway power supply systems*. Moscow: Intext. 2008. 480 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vmeqgbz>.
3. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Электромагнитная совместимость электроустановок не тяговых потребителей и системы электроснабжения с высоковольтным питающим проводом // *Электричество*. 2020. № 1. С. 12–19. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-12-19>. EDN: <https://elibrary.ru/kpmxya>.
4. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Electromagnetic compatibility of the electrical installations of non-traction loads and the power supply system with a high-voltage power lead. *Elektrichestvo*. 2020; (1):12–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-1-12-19>. EDN: <https://elibrary.ru/kpmxya>.
5. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Electromagnetic effect of an alternating current traction power supply system with a high-voltage power cord on electrical installations and networks of nontraction consumers. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(2):128–134. <https://www.doi.org/10.3103/S1068371220020054>. EDN: <https://elibrary.ru/putbbz>.
6. Карякин Р. Н. Методика расчета сопротивлений тяговых сетей переменного тока. М.: Трансжелдориздат, 1962. 37 с.
7. Карякин Р. Н. *Methodology for calculating the resistances of AC traction networks*. Moscow: Transzheldorizdat. 1962. 37 p. (In Russ.).

⁷ ГОСТ Р 58321–2025. Электроустановки систем тягового железнодорожного электроснабжения переменного тока. Требования к заземлению: принят 29 сентября 2025 г. № 1119-ст. 58 с.

⁸ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660736 Российская Федерация. Автоматизированная обучающая система «ЭЛБТОН». Модуль расчета обратной тяговой рельсовой сети: № 2024619015: заявл. 22.04.2024; опубл. 13.05.2024 / П. И. Смолин, А. Ю. Смыслов, Е. Д. Харьковская [и др.]; заявитель АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». EDN: <https://elibrary.ru/alyxqm>.

5. Бушуев А. В., Бушуев В. И., Бушуев С. В. Рельсовые цепи: теоретические основы и эксплуатация. Екатеринбург: УрГУПС, 2014. 311 с. EDN: <https://elibrary.ru/vwpcjrp>.

Bushuev A. V., Bushuev V. I., Bushuev S. V. *Rail networks: theoretical foundations and operation*. Ekaterinburg: USURT, 2014. 311 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vwpcjrp>.

6. Рудашевский Р. А., Рудашевская А. В., Смолин П. И., Ребров И. А., Крылов А. А. Совершенствование автоматизированных средств определения режимов работы и расчета параметров системы тягового электроснабжения // Наука и образование: транспорт. 2021. № 2. С. 66–69. EDN: <https://elibrary.ru/twncgm>.

Rudashevsky R. A., Rudashevskaya A. V., Smolin P. I., Rebrov I. A. Improvement of automated means for determining operating modes and calculating parameters of traction power supply system. *Science and Education for Transport*. 2021;(2):66–69. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/twncgm>.

7. Косарев Б. И. Электробезопасность в тяговых сетях переменного тока. М.: Транспорт, 1988. 215 с.

Kosarev B. I. *Electrical safety in AC traction networks*. Moscow: Transport, 1988. 215 p. (In Russ.).

8. Крылов А. А., Ребров И. А., Рудашевская А. В., Рудашевский Р. А., Харьковская Е. Д. Влияние переходного сопротивления балласта верхнего строения пути на величину потенциала рельс — земля на участках железных дорог, электрифицированных на переменном токе // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 16–22. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-16-22>. EDN: <https://elibrary.ru/swlkkq>.

Krylov A. A., Rebrov I. A., Rudashevskaya A. V., Rudashevskiy R. A., Khar'kovskaya E. D. Transition resistance influence of the upper structure track ballast on the rail-to-earth potential at AC railway sections. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):16–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-16-22>. EDN: <https://elibrary.ru/swlkkq>.

9. Тряпкин Е. Ю., Игнатенко И. В., Власенко С. А., Шурова Н. К. Исследование причин возникновения повышенных потенциалов тяговой рельсовой сети переменного тока путем регистрации данных в режиме единого времени // Транспорт Урала. 2023. № 1(76). С. 120–125. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-1-120-125>. EDN: <https://elibrary.ru/oplnph>.

Tryapkin E. Yu., Ignatenko I. V., Vlasenko S. A., Shurova N. K. Study of causes of increased potentials of alternating current traction rail network by registration of data in united time mode. *Transport of the Urals*. 2023;1(76):120–125. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-1-120-125>. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/oplnph>.

10. Ковалев В. А., Тряпкин Е. Ю., Игнатенко И. В. Расчет потенциала «рельс–земля» системы тягового электроснабжения 25 кВ в среде PascalABC.net // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 2(19). С. 44–46. EDN: <https://elibrary.ru/yaoiaiy>.

Kovalev V. A., Tryapkin E. Yu., Ignatenko I. V. Rail-to-earth potential calculation for 25 kV traction energy system in PascalABC.NET program. *Transport of the Asia-Pacific Region Science Journal*. 2019;2(19):44–46. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/yaoiaiy>.

11. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю., Ковалев В. А. Разработка методики расчета потенциала рельс — земля в условиях тяжеловесного движения // Научные труды КубГТУ. 2022. № 4. С. 93–102. EDN: <https://elibrary.ru/ugrcdr>.

Ignatenko I. V., Vlasenko S. A., Tryapkin E. Yu., Kovalev V. A. Development of a methodology for calculating the rail-to-ground potential in conditions of heavy traffic. *Scientific Papers of the Kuban State Technological University*. 2022;(4):93–102. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ugrcdr>.

12. Тряпкин Е. Ю., Шурова Н. К. Исследование влияния режима работы электроподвижного состава на потенциал в рельсовой цепи // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2020. № 4(25). С. 74–78. EDN: <https://elibrary.ru/uhiihj>.

Tryapkin E. Yu., Shurova N. K. Examining the influence of electric rolling stock operating mode on the potential in the rail chain. *Transport of the Asia-Pacific Region Science Journal*. 2020;4(25):74–78. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/uhiihj>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Антон Александрович КРЫЛОВ,

директор центра «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), SPIN-код: 9113-4100, <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

Александр Борисович КОСАРЕВ,

д-р техн. наук, проф., научный руководитель института — ученый секретарь, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton A. KRYLOV,

Director of Electrification and Thermal Power Engineering Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 9113-4100, <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

Alexander B. KOSAREV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Scientific Adviser — Scientific Secretary, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Антон Александрович КРЫЛОВ. Обзор основных направлений исследования, обоснование направления исследования, формулировка цели и задач, сбор и структурирование методики проведения испытаний, расчет зависимостей и обработка результатов, написание статьи (90 %).

Александр Борисович КОСАРЕВ. Формирование выводов и предложений (10 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anton A. KRYLOV. Overview of the main research directions and their justification, goals and objectives formulation, collection and structuring of test methods, calculation of dependencies and processing of results, article writing (90 %).

Alexander B. KOSAREV. Conclusions and suggestions formulation (10 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 15.10.2025, рецензия от первого рецензента получена 31.10.2025, рецензия от второго рецензента получена 05.11.2025, рецензия от третьего рецензента получена 11.11.2025, принята к публикации 26.11.2025.

The article was submitted 15.10.2025, first review received 31.10.2025, second review received 05.11.2025, third review received 11.11.2025, accepted for publication 26.11.2025.