

# Определение диагностического признака для анализа состояния изолирующих стыков



**А. С. Яковлева,**  
старший преподаватель  
кафедры «Автоматизи-  
рованные, телекомму-  
никационные и электро-  
технические системы»  
Дальневосточного госу-  
дарственного универси-  
тета путей сообщения  
(ДВГУПС),



**Е. П. Епифанова,**  
старший преподаватель  
кафедры «Автоматизиро-  
ванные, телекоммуника-  
ционные и электротехни-  
ческие системы» ДВГУПС,



**Ю. В. Пономарчук,**  
канд. физ.-мат. наук,  
директор Института  
транспортных и энерге-  
тических систем ДВГУПС

**Эксплуатация высокоскоростных железнодорожных магистралей предъявляет исключительные требования к безопасности, надежности и бесперебойности движения поездов. Ключевую роль в их выполнении играют рельсовые цепи.**

Сбои в работе рельсовых цепей могут нарушить логику занятия участков пути и, как следствие, привести к включению красного показания на ограждающем участке светофоре, что вызывает незапланированное снижение скорости движения поездов вплоть до экстренного торможения. Это создает риски для безопасности и влечет за собой целый ряд негативных последствий: задержку поездов, снижение участковой скорости, уменьшение пропускной способности линий, нарушение графика движения и плана формирования поездов, повышенный расход электроэнергии и ухудшение других эксплуатационных показателей.

Анализ отказов показывает, что со стороны аппаратуры рельсовых цепей и их путевых элементов основной причиной являются неисправности изолирующих стыков. За последние несколько лет их доля в общем числе отказов рельсовых цепей составляет в среднем порядка 30–35 %. Например, в 2014 г. зафиксировано 3456 отказов (39 %), в 2019 г. — 2528 (33 %), в 2024 г. — 2916 (36,6 %).

## Развитие интеллектуального мониторинга изолирующих стыков

Основной функцией изолирующих стыков является обеспечение электрической изоляции смежных рельсовых цепей для предотвращения паразитного проникновения сигналов автоматической локомотивной сигнализации. Снижение сопротивления изоляции изолирующих стыков приводит к ряду критических последствий:

- снижению уровня безопасности движения и надежности работы систем сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ);
- риску возникновения ложной занятости смежного пути, ведущей к нарушениям графика движения, задер-

жкам поездов и снижению пропускной способности;

- кумулятивному эффекту при совместной неисправности изолирующих стыков и дроссель-трансформатора, способного вызвать дуговой разряд между рельсами и их механическое разрушение.

Для повышения надежности изолирующих стыков используют высокопрочные стыки типа АпАТЭК, обеспечивающие стабильное функционирование при высоких динамических нагрузках<sup>1</sup>. При этом для сокращения количества отказов изолирующих стыков и их предупреждения необходимо перейти от планово-предупредительного ремонта, основанного на периодических ручных проверках и фиксации отклонений постфактум, к стратегии обслуживания по их фактическому состоянию.

Это позволяет сделать системы технического диагностирования и мониторинга, которые широко распространены на железных дорогах [1]. Они фиксируют отклонения, выходящие за пределы нормы (постфактум), но не анализируют динамику параметров в рамках допустимого диапазона, которая свидетельствует о развитии предотказного состояния, что приводит к росту ложных срабатываний и необоснованным простоям.

Особую проблему представляет контроль технического состояния изолирующих стыков на съездах, расположенных между главными путями. Их диагностика на предмет деградационных отказов, а также контроль накопления токопроводящих металлических частиц на торцевой части рельсов осложнены из-за ограниченного доступа и отсутствия эффективных методов неразрушающего контроля в данной зоне.

<sup>1</sup> Патент № 2671892 С1 Российская Федерация. Металлокомпозитная накладка клееболтового изолирующего стыка / Кленин Ю. Г., Тимофеев М. А., Ушаков А. Е., Хруленко М. А. Опубл. 07.11.2018. Бюл. № 31. 12 с.

Для высокоскоростных магистралей (ВСМ), где требования к надежности, безопасности и пропускной способности предельно высоки, необходим подход, построенный на принципах предиктивной аналитики и управления техническим состоянием по фактическим данным [2, 3]. Его реализация не должна быть выполнена «с нуля», а представлять собой эволюционное развитие современных систем технического диагностирования и мониторинга в части интеллектуальных функций аналитики, дополняя ее интеллектуальными аналитическими модулями.

Необходимы исследования, связанные с анализом причин сбоев и статистики об отказах изолирующих стыков, разработкой математических и имитационных моделей, учитывающих динамику отказов и экстремальные эксплуатационные условия. Для реализации функций предиктивной аналитики необходимо расширить программные средства системы мониторинга и добавить в них модули, обеспечивающие прогнозирование отказов на ранней стадии, а также внедрение адаптивного (основанного на состоянии) подхода к техническому обслуживанию.

Несмотря на наличие развитого математического аппарата теории надежности и технической диагностики, в том числе в вопросах прогнозирования, в системах мониторинга на железных дорогах такие функции только зарождаются. Это обусловлено различными факторами, в частности недостаточностью контрольных точек, ненадежностью каналов передачи данных, историческими особенностями проектирования систем мониторинга и т. д.

Развитие же программных средств аналитики данных позволит прогнозировать с высокой достоверностью. При этом важнейшим фактором на высокоскоростных магистралях выступает максимизация безопасности и бесперебойности высокоинтенсивного движения, а снижение затрат является важным, но вторичным аспектом.

Цель статьи состоит в установлении диагностического признака для контроля исправности изолирующих стыков для дальнейшего использования выбранной модели в системе технического диагностирования и мониторинга устройств системы железнодорожной автоматики и телемеханики на ВСМ<sup>1</sup>.

### Описание процессов и определение параметра для выявления предотказного состояния

Математическое и имитационное моделирование основывалось на классической теории электрических цепей, при этом рассматривалась модель разветвленной тяговой рельсовой линии для съезда между главными путями, описанная на основе законов Кирхгофа.

Параметрический и верификационный анализ заключался в исследовании асимметричного отказа в выбранной модели. Теоретическую базу исследования составляют классические работы в области рельсовых цепей [4–6]. При этом современные исследования [7–11] подтверждают актуальность перехода к интеллектуальным системам диагностики с применением математического моделирования. Они также демонстрируют возможности моделирования для анализа помехоустойчивости, распределения тяговых токов и разработки устройств диагностики на основе анализа токов в дроссель-трансформаторах.

Основной задачей стала подборка математической модели, способной описать процессы, происходящие в изолирующих

стыках, и определение ключевого диагностического параметра, характеризующего их состояние перед возможным отказом. Важнейшим показателем состояния изолирующего стыка принято его сопротивление, которое уменьшается при износе и повреждениях.

В основу работы положена математическая модель разветвленной тяговой рельсовой линии<sup>2</sup> на главных путях станции со съездом [12]. При построении расчетной схемы использована схема замещения (рис. 1) с учетом более 90 различных параметров [13], которые можно условно разделить на две группы:

Параметры сопротивлений элементов схемы:

- сопротивления выравнивающих дросселей  $Z_d$ ;
- продольные сопротивления рельсовых нитей на главных путях и съезде, представленные в виде параметров Т-образных схем замещения  $Z'_{11a}, Z'_{11b}, Z'_{21a}, Z'_{21b}, Z'_{12a}, Z'_{12b}, Z'_{22a}, Z'_{22b}, Z'_{C1a}, Z'_{C1b}, Z'_{C2a}, Z'_{C2b}, Z''_{11a}, Z''_{11b}, Z''_{21a}, Z''_{21b}, Z''_{12a}, Z''_{12b}, Z''_{22a}, Z''_{22b}, Z''_{C1a}, Z''_{C1b}, Z''_{C2a}, Z''_{C2b}$ ;
- поперечные сопротивления рельсов относительно земли на главных путях и съезде  $R'_{P311}, R'_{P321}, R'_{P312}, R'_{P322}, R'_{P3C1}, R'_{P3C2}, R'_{P311}, R'_{P321}, R'_{P312}, R'_{P322}, R'_{P3C1}, R'_{P3C2}$ ;
- сопротивления изолирующих стыков на съезде  $R_{IC1}, R_{IC2}$ ;
- входные сопротивления участков рельсовых линий  $Z'_{ВХК1}, Z'_{ВХК2}, Z''_{ВХК1}, Z''_{ВХК2}$ ;
- сопротивления отрезков рельсовых нитей  $Z'_{H1}, Z'_{H2}, Z''_{H1}, Z''_{H2}$ .

Параметры токов в элементах схемы:

- тяговые токи по главным путям  $I'_T, I''_T, I'_{H1}, I'_{H2}, I''_{H1}, I''_{H2}$ ;
- по отдельным критическим участкам (в дросселях  $I'_{ДН1}, I'_{ДН2}, I'_{ДК1}, I'_{ДК2}, I'_{ДН1}, I'_{ДН2}, I'_{ДК1}, I'_{ДК2}$ , в плечах Т-образных схем замещения  $I'_{11a}, I'_{11b}, I'_{21a}, I'_{21b}, I'_{12a}, I'_{12b}, I'_{22a}, I'_{22b}$ ), на съезде (токи в рельсах съезда  $I'_{C1}, I'_{C2}, I'_{C1}, I'_{C2}$  через изолирующие стыки  $I'_{IC1}, I'_{IC2}$ ), а также токи утечки в землю с рельсовых нитей на главных путях и съезде  $I'_{Y11}, I'_{Y12}, I'_{Y21}, I'_{Y22}, I'_{YC1}, I'_{YC2}, I'_{Y11}, I'_{Y21}, I'_{Y12}, I'_{Y22}, I'_{YC1}, I'_{YC2}$ .

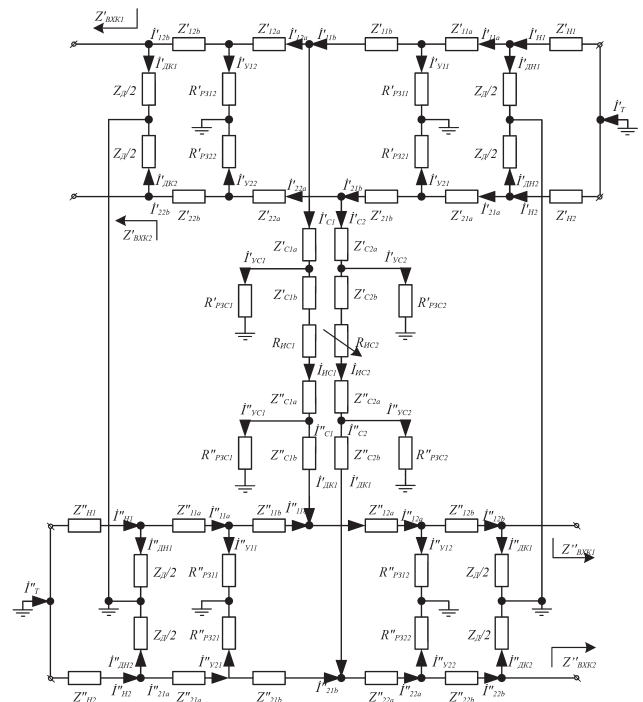


Рис. 1. Расчетная схема замещения рельсовой линии

<sup>1</sup> Данная задача выбрана рабочей группой, состоящей из студентов четвертого курса специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» в ноябре 2024 г. в рамках сетевой реализации проектной деятельности совместно с Российским университетом транспорта (МИИТ). В работе приняли участие В. Е. Любимкин, А. Э. Нестеров, Н. Е. Недождеев, Д. А. Мещеряков.

<sup>2</sup> Патент № 2695438 С1 Российская Федерация. Способ измерения электрических сопротивлений неоднородных рельсовых нитей на электрифицированных участках железных дорог / Шаманов В. И., Ваншин А. Е., Денежкин Д. В., Кузьмин В. С., Тасболотова Л. Опубл. 23.07.2019. Бюл. № 21. 11 с.

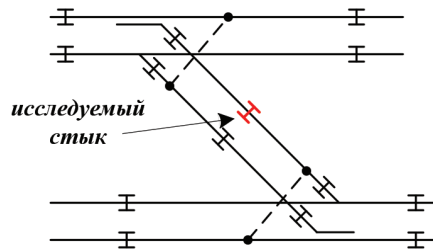


Рис. 2. Фрагмент разветвленной рельсовой линии со съездом

Для расчета системы уравнений в программе Mathcad составлена математическая модель разветвленной тяговой рельсовой линии съезда, расположенного на главных путях, где в исходных данных для анализа учтены длины ответвлений (рис. 2).

В результате расчетов были определены сопротивления стыков, тяговые токи, поперечные сопротивления, которые позволили произвести расчет токов в схеме замещения. На основе полученных значений токов сформирована матрица, с помощью которой можно произвести расчет тока, протекающего через исследуемый изолирующий стык при различных значениях его сопротивления (см. таблицу, рис. 3).

Снижение сопротивления изолирующего стыка до 20 Ом и ниже приводит к резкому возрастанию обратного тягового тока, протекающего через данный стык, а это создает угрозу для надежности работы рельсовых цепей и безопасности движения. Следовательно, пороговое значение сопротивления изолирующего стыка составляет 20 Ом, которое сигнализирует о существенном нарушении его изолирующих функций.

Для проверки результатов сделано допущение, что сопротивление исследуемого стыка начинает уменьшаться, тогда как сопротивление другого стыка остается неизменным и составляет 100 Ом (в расчетах использовано значение тока, при значении сопротивления стыка 100 Ом): в таком случае коэффициент асимметрии тяговых токов, протекающих через изолирующие стыки, можно определить по формуле<sup>1</sup>

$$\dot{K}_i = \frac{I'_{ИС1} - I'_{ИС2}}{I'_{ИС1} + I'_{ИС2}},$$

<sup>1</sup> Электрические рельсовые цепи. Измерение асимметрии обратного тягового тока в двухниточных рельсовых цепях, по которым осуществляется пропуск обратного тягового тока и предусмотрено задание поездных маршрутов: технико-нормировочная карта ТНК ЦШ 0156–2016. 10 с.

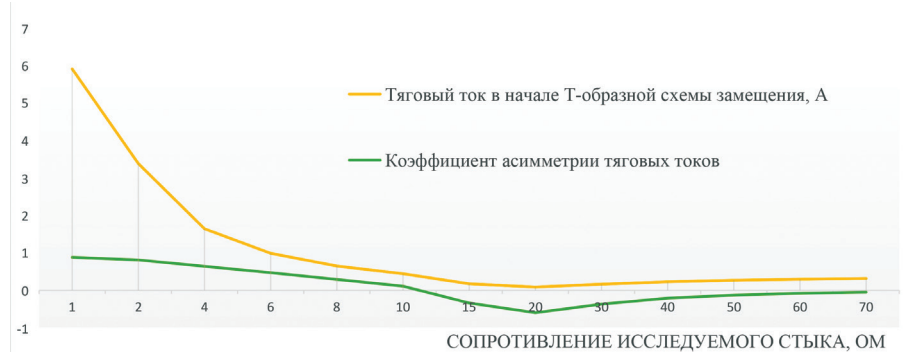


Рис. 3. Графики зависимости величины и коэффициента асимметрии тягового тока от сопротивления изолирующего стыка

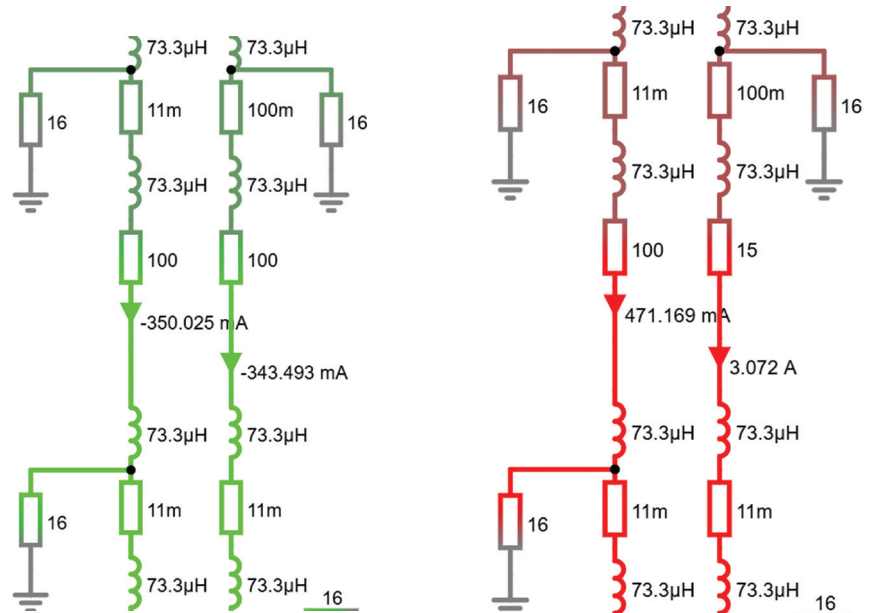


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования расчетной схемы рельсовой линии в программе Circuit Simulator при значениях сопротивления исследуемого стыка: слева — 100 Ом, справа — 15 Ом

где  $I'_{ИС1}$  — значение обратного тягового тока, протекающего через исследуемый изолирующий стык;  
 $I'_{ИС2}$  — значение обратного тягового тока, протекающего через изолирующий стык смежной рельсовой линии (на основании расчетов составляет 0,355 мкА при значении сопротивления стыка 100 Ом).

Расчетные значения коэффициента асимметрии показаны в таблице.

Полученный график позволил проанализировать нелинейный характер отклика системы (резкое возрастание тока при достижении порогового значения сопротивления). Следовательно, можно сделать вывод, что при снижении сопротивления менее 20 Ом токи будут проходить в смежную рельсовую цепь.

Для верификации работоспособности математической модели использован метод имитационного моделирования с применением программы Circuit Simulator с учетом того, что все сопро-

тивления  $Z$  имеют активно-индуктивный характер, они учтены в виде катушки индуктивности и резистора. Анализ моделирования также показал, что при уменьшении сопротивления одного из изолирующих стыков обратный тяговый ток, протекающий через него, в определенный момент будет увеличиваться, что позволит выявить его деградацию (рис. 4).

Асимметрия обратного тягового тока может возникнуть и по ряду других причин: вследствие неодинакового продольного электрического сопротивления рельсовых нитей, зависящего от метеорологических условий, проводимости опор контактной сети, конструкции верхнего строения пути и его засоренности, неравенства переходных сопротивлений рельсовых нитей относительно земли, в частности обрыва стыковых соединителей. Поэтому помимо измерения и анализа значения тока в рельсовых линиях в районе изолирующих стыков необ-

Зависимости коэффициента асимметрии токов, протекающих через изолирующий стык при изменении его сопротивления

| Сопротивление<br>исследуемого стыка,<br>Ом               | 100   | 90    | 80    | 70    | 60    | 50    | 40    | 30    | 20    | 15    | 10    | 8     | 6     | 4     | 2     | 1     |
|----------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Тяговый ток в начале<br>Т-образной схемы<br>замещения, А | 0,353 | 0,343 | 0,331 | 0,316 | 0,296 | 0,268 | 0,227 | 0,162 | 0,086 | 0,173 | 0,442 | 0,648 | 0,987 | 1,642 | 3,383 | 5,911 |
| Коэффициент<br>асимметрии тяговых<br>токов               | 0     | -0,01 | -0,03 | -0,05 | -0,08 | -0,13 | -0,21 | -0,37 | -0,6  | -0,34 | 0,11  | 0,29  | 0,47  | 0,64  | 0,81  | 0,88  |

ходимо применять дополнительный критерий выявления признаков ложного освобождения или занятия пути, например, с помощью алгоритмов контроля последовательного занятия и освобождения рельсовых цепей, так как для ВСМ должна обеспечиваться реализация функции безостановочного проследования поезда по ложно занятой рельсовой цепи с подтверждением ее фактического состояния.

Концепция проектирования системы диагностирования и мониторинга устройств сигнализации, централизации и блокировки на высокоскоростных магистралях

Полученные результаты могут стать одним из элементов в теоретической основе для проектирования интеллектуальной системы предиктивного мониторинга устройств СЦБ на ВСМ. Используемая математическая модель для определения параметра сопротивления изолирующих стыков может быть внедрена в систему диагностики и мониторинга. Современная система диагностики должна включать:

- первичную диагностику, которая сводится к постоянному мониторингу сопротивления изолирующих стыков и выявлению ранних признаков снижения их надежности;
- вторичную диагностику — детальное обследование выявленных участков для подтверждения диагноза и принятия мер по устранению возможных проблем;
- мониторинг, который необходим для сбора и анализа данных о состоянии всех изолирующих стыков на станции высокоскоростной магистрали.

Дальнейшее развитие систем мониторинга и диагностики должно предусматривать создание комплекса со следующим функционалом [14–16]:

- непрерывный мониторинг и сбор массивов данных большого объема

с устройств СЦБ ВСМ (рельсовые цепи, изолирующие стыки, стрелочные переводы, системы связи);

- цифровые модели (двойники) критического оборудования для прогнозирования поведения в различных сценариях;
- аналитический модуль на основе искусственного интеллекта, включающий в себя ядро системы, реализующее предиктивную аналитику для прогнозирования остаточного ресурса, раннего предупреждения о предотказных состояниях и автоматической классификации неисправностей;
- система поддержки решений для формирования адресных предписаний для ремонтных бригад, оптимизация графиков технического обслуживания и логистики запасных частей.

Заключение

Исследование на основании математической модели позволяет установить количественную связь между сопротивлением изолирующего стыка и протекающим через него обратным тяговым током: пороговое значение сопротивления стыка (20 Ом), являющееся диагностическим критерием его существенной деградации, и коэффициент асимметрии токов как индикатор асимметричного ухудшения изоляции.

Предложен дополнительный критерий необходимый для достаточности оценки деградации изолирующего стыка, реализуемый посредством алгоритмов контроля последовательного занятия и освобождения рельсовых цепей. Внедрение предлагаемой модели расширит функциональные возможности существующих систем контроля, повысит качество функционирования рельсовых цепей, сократит эксплуатационные расходы за счет своевременного получения информации о состоянии устройств и их параметров при возникновении в них предотказных состояний.

Для высокоскоростных магистралей необходима интеллектуальная система

мониторинга нового поколения, которая, наследуя инфраструктуру сбора данных, совершает качественный скачок от ручных методов диагностики к предиктивной аналитике на основе искусственного интеллекта. Это позволит управлять надежностью инфраструктуры ВСМ проактивно, что является залогом ее безопасной, бесперебойной и экономически эффективной эксплуатации.

Внедрение такой системы позволит перейти к управлению техническим состоянием по фактическому износу, исключить необходимость периодических ручных проверок, повысить безопасность, надежность и экономическую эффективность эксплуатации инфраструктуры высокоскоростного движения.

Дальнейшие исследования связаны с экспериментальной апробацией предложенного диагностического признака на стендовом и натурном оборудовании, а также разработкой прототипа аналитического ИИ-модуля для обработки поступающих телеметрических данных.

Литература

1. Епифанова Е. П., Онищенко А. А. Современные системы управления объектами и мониторингом параметров устройств железнодорожного транспорта: учеб. пособие. Хабаровск: ДВГУПС, 2017. 86 с.

2. Розенберг Е. Н., Хакиев З. Б., Кузьмин В. С. Система мониторинга для обеспечения функциональной безопасности ответственного технологического процесса движения поездов. // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2024. № 2. С. 18–24.

3. Горелик А. В., Романов Н. В., Щедрина Т. С. Организация эффективного технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на малодеятельных участках

// International Journal of Advanced Studies. 2024. Т. 4. № 4. С. 169–184. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-4-3 29. EDN: WOTLEB.

4. Лисенков В. М. Методы анализа и синтеза рельсовых цепей (статистический подход). М.: ВИНТИ, 2014. 221 с.
5. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: справочник / под ред. В. С. Аркатова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ООО Миссия-М, 2006. 496 с.
6. Полевой Ю. И. Модели рельсовых линий: монография. Самара: СамГУПС, 2009. 117 с.
7. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография. СПб.: ПГУПС, 2016. 171 с.
8. Ефанов Д. В., Хорошев В. В., Осадчий Г. В. Концептуальные основы синтеза безопасных систем управления движением поездов // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 3 (100). С. 50–57.

9. Ефанов Д. В., Михайлюта Е. М. Управление надежностью и безопасностью перевозочного процесса с применением систем непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 2 (105). С. 84–94.
10. Ефанов Д. В., Богданов Н. А. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 36–42.
11. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В. Микропроцессорная система диспетчерского контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: учебное пособие для вузов. 2-е изд., стер. СПб.: Лань. 2022. 180 с.
12. Шаманов В. И. Расчеты помех от тягового тока в неоднородных рельсовых линиях // Автоматика на транспорте. 2020. № 3 (6). С. 241–267.
13. Денежкин Д. В. Повышение помехоустойчивости аппаратуры рельсовых

цепей и автоматической локомотивной сигнализации при электротяге переменного тока: дис. ... канд. техн. наук. М.: РУТ (МИИТ), 2023. 179 с.

14. Надежкин В. А., Надежкина С. А., Мусин А. Р. О возможности применения технологий искусственного интеллекта для определения и прогнозирования технического состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22. Вып. 2. С. 484–491.
15. Тарасов Е. М., Надежкин В. А. Диагностирование в жизненном цикле изолирующих стыков рельсовых цепей // Транспорт: наука, техника, управление. 2024. № 2. С. 45–50.
16. Руднева Д. С., Ефимова М. Е. Контроль состояния изолирующих стыков на железных дорогах: проблемы и методы решения // Вестник науки. 2025. Т. 4. № 6 (87). С. 1841–1849.

## ПОДПИСКА

Подписка на журнал «Транспорт Российской Федерации» оформляется в любом отделении почтовой связи

- по объединенному каталогу «Пресса России», подписной индекс 15094,
- по электронному каталогу «Почта России», подписной индекс П1719

Подписаться на журнал через редакцию можно в течение года с любого месяца,

- выслав заявку по факсу: (812) 310-40-97;
- выслав заявку по электронной почте: [rt@rostransport.com](mailto:rt@rostransport.com);
- или заполнив заявку на сайте [www.rostransport.com](http://www.rostransport.com), раздел «Подписка».



Подписку также можно оформить в агентствах:

«Книга-Сервис»

Тел.: (495) 680-90-88

<http://akc.ru>

«Урал-Пресс»

Тел.: (495) 789-86-36

«Почта России»

Тел.: (495) 956-20-67

<http://russianpost.ru>