

К. А. Никулин, П. В. Шепелин

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РЕМОНТА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. В статье оценены перспективы современных тенденций и инновационных подходов к ремонту тяговых электродвигателей (ТЭД). Рассмотрены направления развития технологий ремонта. Практическая значимость работы заключается в возможности применения представленных рекомендаций для повышения качества ремонта и срока службы тяговых электродвигателей.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, ремонт, интеллектуальные системы, автоматизация, цифровые технологии.

Для цитирования: Никулин, К. А. Современные тенденции развития ремонта тяговых электродвигателей / К. А. Никулин, П. В. Шепелин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 129–136. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_129.

Проведенный анализ работы ТЭД на полигоне обращения электропоездов постоянного тока сведенный в таблицу 1 и рис. 1 показал, что основная доля отказов электрических машин в эксплуатации приходится на якорь, а именно его межвитковые замыкания и на изоляцию – ее пробой и перегрев.

Таблица 1

Статистика отказов ТЭД по узлам

Узел ТЭД	Доля отказов, %	Основные виды дефектов
Коллектор	12,3	Износ пластин, искрение, замыкания между ламелями
Изоляция	22,1	Пробой изоляции, снижение сопротивления, перегрев
Щетки	7,3	Износ графитовых элементов, нестабильный контакт
Якорь	58,3	Межвитковые замыкания, разбалансировка, перегрев

А обработка данных о причинах отказов, сведенные в таблицу 2 и рис. 2. выявило, что лимитирующим фактором возникновения отказов в эксплуатации является некачественно проведенный ремонт, а остальные причины, такие как условия эксплуатации и нарушение межремонтных пробегов, только усугубляют статистические показатели.

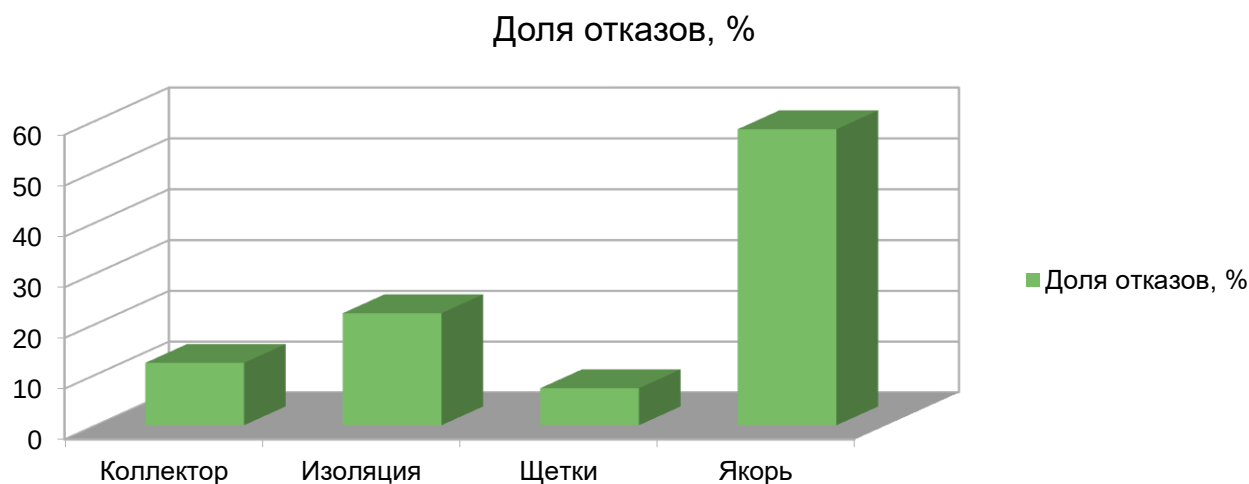


Рис. 1. Доля отказов узлов ТЭД

Таблица 2

Статистика причин отказов ТЭД

Узел ТЭД	Доля отказов, %	Описание
Качество ремонта	39,7	Нарушение технологии ремонта, несоблюдение последовательности операций, несогласованность межремонтных пробегов.
Условия эксплуатации и техническое обслуживание	24,5	Перегрузки, загрязнение, нарушение норм технического обслуживания.
Нарушение межремонтных пробегов	16,5	Несогласованность с документами, фактическое превышение пробегов до ТР.
Конструктивно-технологические факторы	10,2	Недостаточная отработка узлов, несовершенство конструкции.
Старение и выработка ресурса	9,1	Снижение сопротивления изоляции, разрушение бандажа, ослабление креплений.

Исходя из вышеприведенного анализа в статье были рассмотрены современные и инновационные технологии ремонта ТЭД, которые возможно применить на ремонтных предприятиях для повышения качества ремонта и соответственно уменьшения количества отказов ТЭД в эксплуатации.

На первом этапе следует выделить основные элементы ТЭД, совершенствование технологии ремонта которых требует новых подходов на предприятиях.

В настоящее время, в развитии ремонтных производств железнодорожного транспорта, отмечается устойчивая тенденция к модернизации оборудования и методов ремонта тяговых электродвигателей с целью повышения производительности, точности и стабильности качества выполняемых операций [1, 5]. В ремонтных депо и на специализированных предприятиях реализуется переход от традиционных технологий к комплексным автоматизированным и цифровым решениям, обеспечивающим воспроизводимость результатов и возможность последующего анализа данных о ремонтах.



Рис. 2. Доля причин отказов ТЭД

Обработка коллектора. Щеточно-коллекторный узел – один из самых уязвимых элементов тягового электродвигателя. Для повышения его надежности разрабатываются электрофизические методы обработки. В технологии науглероживания медных пластин коллектора с использованием электроэрозионной обработки (электроискровой обработки), на поверхности медных коллекторных пластин формируется тонкий углеродистый слой путём подачи импульсов между угольным электродом и медной пластиной [6]. Такая обработка улучшает коммутационные характеристики машины и увеличивает износостойкость коллектора. При электроискровой обработке достигается высокая точность геометрических параметров (диаметра рабочей поверхности, высота коллекторных пластин, межламельные расстояния) и качество поверхности коллектора, минимальный дефектный слой и сравнительно лёгкая автоматизация процесса. Исследования показывают, что применение этой технологии позволяет существенно повысить износостойкость коллектора и продлить ресурс работы ТЭД постоянного тока. Поверхностное пластическое деформирование коллекторных пластин, которое упрочняет поверхностный слой за счет холодного деформирования, повышает усталостную прочность и снижает вероятность возникновения трещин. Также активно развивается применение нанокompозитных покрытий [4], где в медную основу вводятся дисперсные наночастицы тугоплавких металлов, что существенно повышает износостойкость и термостойкость коллектора.

В условиях локомотивных депо традиционно упрочнение поверхности коллектора не производится – обычно коллектор обтачивают и шлифуют, не применяя специальных упрочняющих покрытий. Предлагаемые инновации (науглероживание, плазменно-напылительные покрытия) пока не вошли в технологию депоовского ремонта, хотя демонстрируют потенциал для повышения надёжности [6]. Другие современные методы ремонта включают автоматизированный контактный ремонт обмоток (компьютеризированную намотку), использование лазерных или ультразвуковых методов очистки коллекторных пластин, применение высокотехнологичных графитовых материалов для щёток. Данные разработки активно ведутся научно-исследовательскими институтами. Промышленные предприятия рассматривают возможности применения указанных методов при ремонте и модернизации тяговых электродвигателей. Внедрение электроискровых и плазменных технологий рассматривается в составе программ по повышению ресурса и надёжности электрических машин. В депоовской практике данные методы пока реализуются на стадии опытного внедрения.

Автоматизация процесса балансировки. Современные балансировочные установки, оснащаются промышленными контроллерами, сенсорными панелями и программным обеспечением для анализа спектров вибрации и автоматического расчёта корректирующих масс [1]. Подобные решения представлены, например, в балансировочных системах отечественных производителей, а также зарубежных компаний Schenck RoTec (Германия) и СЕМВ (Италия). Такие системы позволяют стандартизировать операции балансировки, исключить субъективные ошибки персонала и повысить точность устранения динамического

дисбаланса роторов. В деповской практике применяются как стационарные балансировочные комплексы, так и переносные модули, адаптированные для использования непосредственно в ремонтных участках. Развивается направление внедрения автоматических установок для динамической балансировки с адаптивным управлением. Такие установки способны в режиме реального времени корректировать вращение ротора на основе данных вибродатчиков, без необходимости его демонтажа. Аналогичные подходы исследуются в работах ученых транспортных ВУЗов, где рассматриваются возможности интеграции систем адаптивной балансировки в общую цифровую платформу ремонта тяговых электродвигателей. Это особенно актуально для ремонтных депо, где снижение времени на технологические операции напрямую влияет на производительность и себестоимость ремонта. Автоматизация процесса балансировки, в сочетании с цифровым архивом параметров каждого электродвигателя, формирует основу для интеллектуальной системы контроля качества ремонта и позволяет переходить к более высокому уровню стандартизации ремонтных процессов.

Аддитивные технологии. В сфере ремонта и модернизации тяговых электродвигателей стремительно развивается применение аддитивных и трёхмерных технологий, открывающее новые возможности для повышения эффективности и сокращения сроков ремонтных процессов [4]. Использование 3D-печати позволяет изготавливать сложные и индивидуальные элементы непосредственно на месте эксплуатации, без привлечения внешних производственных предприятий, что особенно важно для редких или снятых с производства компонентов. Перспективным направлением является развитие гибридных технологий, совмещающих аддитивное формирование деталей с последующей механической обработкой, что обеспечивает высокую точность, улучшенные эксплуатационные характеристики и снижение себестоимости ремонта.

Ведущие зарубежные компании, такие как ExOne, Maxxxwell и Additive Drives, уже демонстрируют потенциал аддитивных технологий при производстве компонентов электрических машин: от печати медных катушек с оптимизированным тепловым отводом до изготовления статоров прототипов тяговых двигателей, что позволило существенно сократить сроки изготовления. На данный момент эти решения преимущественно применяются на этапе проектирования, их адаптация для ремонтных депо открывает перспективу сокращения времени простоя подвижного состава и повышения технической готовности локомотивов. Дополнительно применение 3D-печати и цифрового моделирования обеспечивает объективную оценку износа и деформаций деталей, способствует созданию цифровых двойников узлов и повышает точность дефектовки. Интеграция трёхмерных моделей с системами технической диагностики и управления ремонтом формирует основу для цифрового сопровождения тяговых электродвигателей на всём жизненном цикле — от эксплуатации до капитального ремонта. В России исследования и прикладные разработки в области аддитивных технологий для электрических машин ведутся во многих транспортных и научно-производственных центрах. Железнодорожные предприятия разрабатывают тестовые проекты по изготовлению деталей, оснастки и крепёжных элементов с помощью 3D-печати. Внедрение аддитивных технологий для восстановления или изготовления элементов тяговых электродвигателей могут быть реализованы в локомотивных депо в ближайшие годы, при создании специализированных производственных участков и разработке нормативной базы.

Восстановление изоляции. Современные установки пропитки и вакуумной сушки, обеспечивают строгое соблюдение температурно-временных режимов, фиксируемых электронным протоколом. Это исключает вероятность перегрева или недосушки обмоток и повышает стабильность диэлектрических характеристик изоляции [5]. Автоматическое регулирование параметров процесса и регистрация кривых температуры и давления создают заготовку для внедрения цифровых систем контроля качества ремонта на уровне технологического цикла. Установки для пропитки оснащаются прецизионными температурными анализаторами, которые обеспечивают многоточечный контроль

температурного поля по всему объёму обмотки в процессе сушки и пропитки. Это исключает локальные перегревы и обеспечивает равномерность полимеризации изоляционных материалов. Для комплексного обслуживания изоляции внедряются диагностико-ремонтные комплексы, объединяющие средства диагностики, очистки и восстановления изоляции в единый технологический цикл.

Применение изоляционных лент последнего поколения позволяет значительно повысить характеристики системы изоляции обмотки якоря. После бандажирования обмотки якоря сухими лентами применяется вакуумно-нагнетательная пропитка (VPI): сочетание вакуума и избыточного давления обеспечивает максимальное проникновение компаунда в изоляцию обмотки, заполняет все воздушные полости между витками и увеличивает жесткость намотки, уменьшая тангенс угла диэлектрических потерь. Разработки и внедрение технологий вакуумно-нагнетательной пропитки, сушки и восстановления изоляции выполняются в научно-производственных организациях и на предприятиях железнодорожного машиностроения, а также в производственных подразделениях локомотивостроительных заводов. Опыт промышленного применения установок вакуумной пропитки имеется также на ряде локомотиворемонтных заводов, где используются отечественные установки пропитки и сушки. Реализация проектов по модернизации технологических линий пропитки и внедрению цифрового контроля параметров процесса, в перспективе поспособствует повышению надёжности изоляции и стабильности её диэлектрических характеристик.

Цифровая диагностика и предиктивное обслуживание. Современные тенденции в ремонте ТЭД предполагают внедрение цифровых технологий для диагностики и прогноза отказов. В ремонтной практике применяются решения с «умными» IoT-датчиками: мониторинг температуры, вибрации и тока в режиме реального времени для прогнозной диагностики. Системы оснащаются беспроводными модулями передачи данных и интегрируются в локальные сети предприятия, что позволяет осуществлять дистанционный контроль за состоянием оборудования. Использование облачных платформ для сбора и анализа данных обеспечивает доступ к информации в любой момент времени, независимо от их местоположения. Развивается концепция цифрового двойника: построения виртуальной модели электродвигателя для имитации процессов износа и прогноза последствий различных стратегий ремонта. На основе результатов испытаний, трёхмерных геометрических моделей и данных эксплуатации формируется цифровой двойник, с помощью которого возникает возможность в проведении оптимизации режимов работы и контроля технического состояния электродвигателя [2]. Такой подход позволяет проводить оценку износа, исключая полную дефектацию на практике. Значительное внимание уделяется интеграции приборов неразрушающего контроля в технологический процесс ремонта. Применение оптоэлектронных анализаторов искрения, позволяющих визуализировать коммутационные процессы в коллекторных машинах постоянного тока, а также портативных виброанализаторов и тепловизоров, позволят оперативно устранять скрытые дефекты. Использование оптоэлектронных методов контроля искрения способствует снижению числа рекламаций и повторных ремонтов за счёт объективизации оценки состояния щеточно-коллекторного узла.

В локомотивном депо диагностика состояния ТЭД зачастую ограничена визуальным контролем и традиционными измерениями (измерение сопротивления изоляции, обточка коллектора по шаблону), что не позволяет объективно оценить остаточный ресурс машины. Применение автоматизированных средств для контактной и бесконтактной диагностики позволило бы более достоверно определять техническое состояние узлов. Интеграция информационных систем позволяет фиксировать результаты диагностики и данных эксплуатации, образуя «большие данные» для последующей аналитики состояния парка ТЭД. На основе анализа массивов данных возможно построение прогнозных моделей надёжности.

Внедрение подобных технологий в проектах ОАО «РЖД» в перспективе позволят повысить межремонтные пробеги локомотивов.

Цифровизация процессов учёта и предремонтного анализа данных. Крупные депо и ремонтные предприятия переходят к ведению электронных журналов дефектов и баз данных результатов стендовых испытаний. Такие решения позволяют обеспечить систематизацию и долговременное хранение информации о каждом ремонтном цикле, включая параметры испытаний, результаты измерений, информацию об узлах и агрегатах. На основе накопленных данных формируются аналитические отчёты, позволяющие выявлять закономерности возникновения дефектов и определять узкие места в технологии ремонта

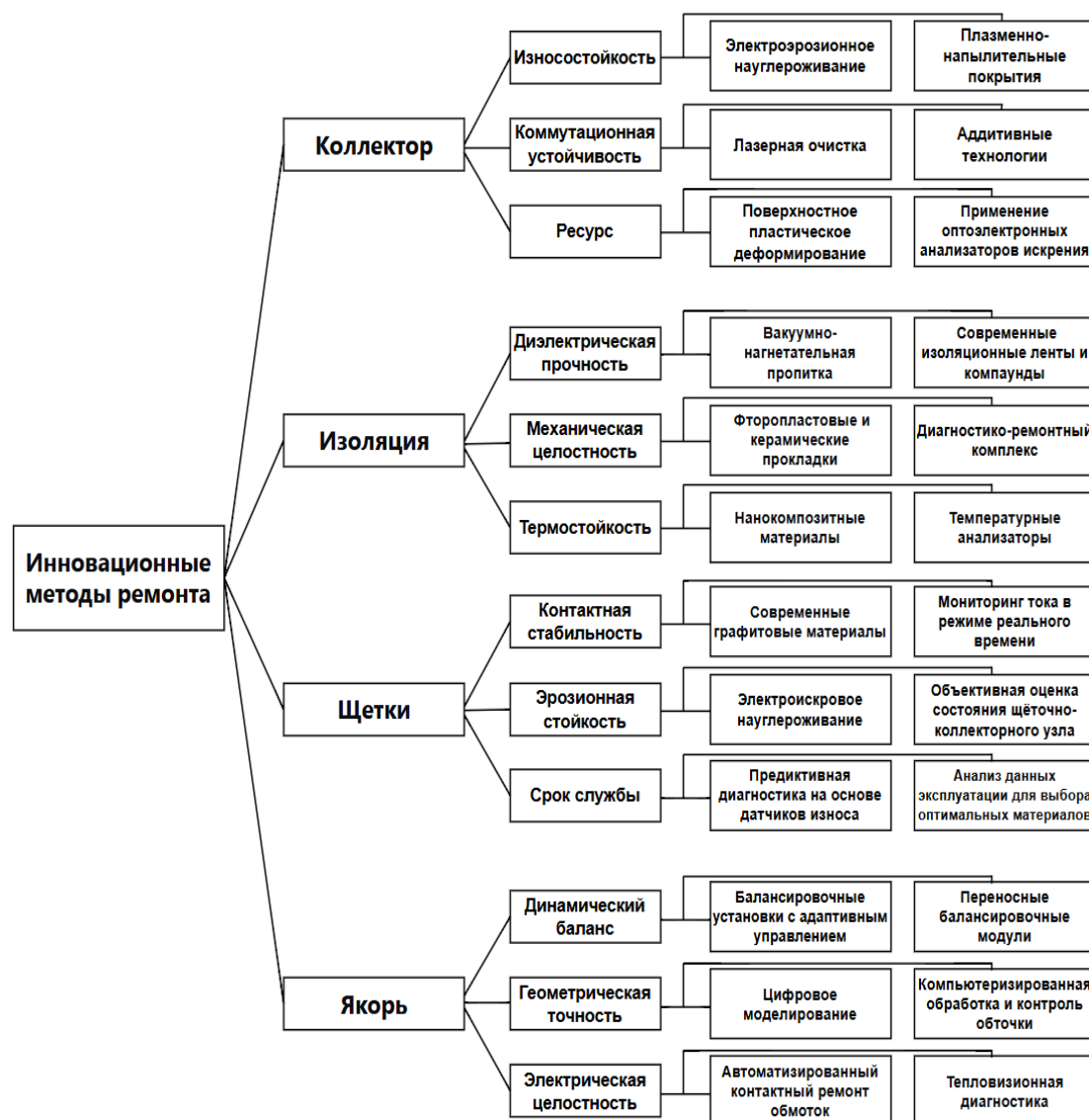


Рис. 3. Иновационные методы ремонта

Российские IT-компании, предлагают решения для промышленной аналитики и систем поддержки принятия решений на основе машинного обучения. Применение данных инструментов в перспективе позволит перейти от традиционного планового ремонта к модели «ремонта по техническому состоянию», при которой решения о восстановлении или замене элементов принимаются на основании статистических прогнозов и анализа вероятности отказов [3].

Внедрение цифровых систем учёта и предремонтного анализа способствует формированию единого информационного пространства локомотивного депо. Интеграция

данных с измерительных стендов, балансировочных и испытательных установок в централизованную базу позволяет создавать цифровой паспорт каждого тягового электродвигателя, что обеспечит полную прослеживаемость технического состояния агрегата на протяжении всего срока службы. В практике железнодорожного транспорта ОАО «РЖД» реализована стратегия цифровой трансформации, в которой используются цифровые платформы для диагностики и мониторинга состояния активов, включая предиктивную аналитику и цифровые двойники подвижного состава.

Заключение. Современные тенденции ремонта ТЭД демонстрируют переход ремонтных подразделений от ручного и эмпирического подхода к методам, основанным на научном обосновании и цифровых технологиях управления процессом ремонта. Внедрение автоматизации, стандартизации испытаний, интеграции средств неразрушающего контроля и цифровизации данных формирует основу для последующего внедрения интеллектуальных систем поддержки принятия решений. В ближайшей перспективе, комбинация традиционных ремонтных технологии с интеллектуальными алгоритмами анализа данных, позволит существенно повысить надёжность и эффективность ремонта тяговых электродвигателей локомотивов.

По результатам анализа можно выделить следующие тенденции в улучшении ремонта ТЭД, такие как: аддитивные технологии; нанокompозитные материалы; предиктивная диагностика; цифровое моделирование, которые будут активно развиваться в ближайшие 5-7 лет.

На основе анализа современных технологий можно сформировать ряд направлений для дальнейшего развития ремонтного блока по тяговым электрическим двигателям электропоездов постоянного тока представленных на рис. 3.

Список литературы

1. Данковцев, В. Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. Т. Данковцев, В. И. Киселев, В. А. Четвергов – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2007. – 558 с.
2. Андрончев, И. К. Моделирование электрических процессов в силовых цепях локомотивов с двигателями постоянного тока / И. К. Андрончев, И. П. Гордеев, П. В. Шепелин // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 2(80). – С. 7-15. – EDN HEEJYE.
3. Разработка метода оценки надежности работы тяговых электродвигателей с целью оптимизации системы планово-предупредительного ремонта трамвайных вагонов, выработавших свой ресурс / Е. В. Шищенко, В. Н. Водолазов, В. М. Руцкий, П. В. Шепелин // Вестник СамГУПС. – 2016. – № 1(31). – С. 51-55. – EDN VSCWTR.
4. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital

References

1. Dankovtsev, V. T. Technical maintenance and repair of locomotives: Textbook for higher education institutions of railway transport / V. T. Dankovtsev, V. I. Kiselev, V. A. Chetvergov - M.: State Educational Institution "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport", 2007. - 558 p.
2. Andronchev, I. K. Modeling of electrical processes in power circuits of locomotives with DC motors / I. K. Andronchev, I. P. Gordeev, P. V. Shepelin // Bulletin of Transport of the Volga Region. - 2020. - No. 2 (80). - P. 7-15. - EDN HEEJYE.
3. Development of a method for assessing the reliability of traction electric motors in order to optimize the system of scheduled preventive maintenance of tram cars that have exhausted their service life / E. V. Shishchenko, V. N. Vodolazov, V. M. Rutsky, P. V. Shepelin // Bulletin of Samara State University of Railways. - 2016. - No. 1 (31). - P. 51-55. - EDN VSCWTR.
4. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital

Manufacturing (2021) Springer, 3rd ed., DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7

5. Грищенко, А. В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава: учебник для студенческих учреждений / А. В. Грищенко, В. В. Стрекопытов. – М.: Академия, 2005. – 320 с.

6. Повышение надежности работы тяговых электродвигателей локомотивов за счет применения электроискровой обработки коллекторных пластин / Ю. В. Титов, Д. Ю. Белан, Г. Б. Тодер, А. О. Отраднова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 16-24. – ISSN: 1994-6309

Manufacturing (2021) Springer, 3rd ed., DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7

5. Grishchenko, A. V. Electrical machines and converters of rolling stock: a textbook for student institutions / A. V. Grishchenko, V. V. Strekopytov. – M.: Academy, 2005. – 320 p.

6. Improving the Reliability of Locomotive Traction Motors through the Use of Electrosark Machining of Commutator Plates / Yu. V. Titov, D. Yu. Belan, G. B. Toder, A. O. Otradnova // Metal Processing (Technology, Equipment, Tools). – 2019. – Vol. 21, No. 1. – Pp. 16-24. – ISSN: 1994-6309

K. A. Nikulin, P. V. Shepelin

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF TRACTION ELECTRIC MOTOR REPAIR

Abstract. The article examines modern trends and innovative approaches to the repair of traction electric motors. It explores promising directions for the development of repair technologies. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the presented recommendations to improve the quality of repairs and increase the inter-repair intervals of traction electric motors.

Keywords: traction electric motor, repair, intelligent systems, automation, digital technologies.

For citation: Nikulin, K. A. Modern Trends in the Development of Traction Electric Motor Repair / K. A. Nikulin, P. V. Shepelin // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya. – 2025. – № 4. – P. 129–136. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_129.

Сведения об авторах

Никулин Кирилл Александрович

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Тяговый подвижной состав», аспирант,
e-mail: jakenikulin2402@gmail.com

Шепелин Павел Викторович

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Тяговый подвижной состав», кандидат технических наук, доцент,
e-mail: shepelin@samgups.ru

Information about the authors

Nikulin Kirill Alexandrovich

Volga State Transport University (VSTU), Chair «Traction Rolling Stock», Postgraduate student,
e-mail: jakenikulin2402@gmail.com

Shepelin Pavel Viktorovich

Volga State Transport University (VSTU), Chair «Traction Rolling Stock», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: shepelin@samgups.ru