

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

<https://doi.org/10.17816/transsyst635142>

© Е.Л. Рыжова¹, В.Ю. Осипов²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

² Эксплуатационное локомотивное депо Саратов – Пассажирское
(Саратов, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Цель. Показать практическую значимость оценки технического состояния тяговых электродвигателей электропоездов при неуставившихся режимах работы на примере выявления характера и причин возникновения аварийного нарастания тока якоря тягового электродвигателя НБ–520В в режиме тяги с помощью сравнительного анализа фрагментов файлов поездки электропоездов серии ЭП1 в условиях локомотивного депо.

Методы. Проведен обзор существующих инновационных методик исследования неуставившихся режимов работы тяговых электродвигателей локомотивов, которые можно использовать для определения причин возникновения аварийного нарастания тока якоря тягового электродвигателя при различных режимах его работы. Исследование аварийного нарастания тока якоря было рассмотрено в режиме тяги, для чего проанализированы результаты фрагментов файлов поездки, полученных с помощью микропроцессорной системы диагностирования электропоезда ЭП1.

Результаты. Предлагаемые методы функционального диагностирования позволяют не только выявить развивающиеся неисправности и предотвратить необратимые явления в работе тяговых электродвигателей, но и обнаружить развивающиеся дефекты на ранней стадии, планировать сроки и объемы ремонта оборудования. Выявлены характер и причины возникновения аварийного нарастания тока якоря, «бросков» тока тягового электродвигателя НБ–520В в режиме тяги, которые являются следствием нарушения типовых эксплуатационных режимов электропоездов. Для определения причин данных неисправностей в условиях ремонтного депо разработан рекомендуемый порядок действий, при выявлении характера возникающих неуставившихся режимов работы тягового электродвигателя.

Заключение. Своевременная и верная диагностика тягового электродвигателя с целью выявления неисправностей даст возможность сократить время простоя электропоезда при неплановом ремонте, позволит предотвратить ненужные затраты на замену тягового электродвигателя. Разработанный алгоритм действий рекомендуется для определения причин аварийного нарастания тока якоря тягового электродвигателя в режиме тяги на основании выявленных закономерностей. Использование диагностических микропроцессорных систем электропоезда может помочь в разработке мероприятий, направленных на снижение и предупреждение данных неисправностей, что, в свою очередь, позволит снизить количество отказов на линии и уменьшить количество задержанных поездов. Кроме рекомендуемого порядка действий по выявлению неисправностей тягового двигателя, определены новые аспекты для создания комплексной информационно-измерительной системы контроля и диагностики с учетом текущего технического состояния оборудования

Ключевые слова: тяговый электродвигатель; диагностика; аварийное нарастание тока; ток якоря; токораспределение; термическое повреждение; сопротивление изоляции.

Как цитировать:

Рыжова Е.Л., Осипов В.Ю. Применение технических средств диагностирования тяговых двигателей подвижного состава // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 4. С. 556–576. doi: 10.17816/transsyst635142

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

© E.L. Ryzhova¹, V.Y. Osipov²¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)² Saratov – Passenger Operational Locomotive Depot
(Saratov, Russia)**THE USE OF TECHNICAL MEANS FOR DIAGNOSING
TRACTION ENGINES ROLLING STOCK**

Aim. Demonstrate the practical significance of assessing the technical condition of traction electric locomotives during unsteady operating modes by analyzing the nature and causes of an emergency increase in the armature current of the NB–520V traction motor in traction mode. This study uses comparative analysis of trip file fragments from EP1 series electric locomotives at a locomotive depot.

Methods. A review was conducted on innovative methods for studying the unsteady operating modes of traction electric motors in locomotives. These methods help determine the causes of emergency armature current increases under various operating conditions. The emergency increase in the armature current was considered in the traction mode, for which the results of the fragments of the trip files were analyzed using a microprocessor-based traction motor diagnostic system installed on an EP1 electric locomotive.

Results. The proposed diagnostic methods allow for the detection of developing malfunctions early, preventing irreversible damage in traction motor operations. These methods also help plan the timing and volume of equipment repairs. The study identified the nature and causes of emergency armature current surges in the NB-520V motor during traction mode, which were linked to violations in standard operating modes of electric locomotives. A recommended procedure was developed for use in repair depots to identify and address unsteady operating modes of the traction electric motor.

Conclusion. Timely and correct diagnosis of traction motors can significantly reduce downtime during unplanned repairs, avoiding unnecessary costs for motor replacements. The developed algorithm enables efficient identification of the causes of armature current surges in traction mode, using diagnostic microprocessor systems on electric locomotives. These systems help develop preventative measures, reducing motor failures on the line and train delays. In addition to the recommended procedure for detecting traction engine malfunctions, the study highlights new opportunities for creating an integrated information and measurement system for monitoring and diagnostics, based on the current technical condition of locomotive equipment.

Keywords: traction electric motor; diagnostics; emergency current build-up; armature current; current distribution; thermal damage; insulation resistance.

To cite this article:

Ryzhova EL, Osipov VYu. The use of technical means for diagnosing traction engines of rolling stock. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):556–576. doi: 10.17816/transsyst635142

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от многих промышленных аналогов надежность функционирования тяговых электрических машин локомотивов в определяющей степени зависит от условий их работы в неустановившихся режимах. В первую очередь, это относится к тяговым электродвигателям (ТЭД), работа которых в реальных условиях эксплуатации сопровождается постоянными скачками токов и напряжений, изменением скорости движения в широком диапазоне значений, схемными переключениями, периодически возникающими случаями боксования и срабатывания аппаратов защиты. Поэтому знание и учет основных закономерностей и функциональных зависимостей, свойственных для неустановившихся режимов работы, является одним из основных условий правильного проектирования тяговых электрических машин и их надежной работы в реальных условиях эксплуатации.

Для тяговых электродвигателей локомотивов изучение неустановившихся режимов работы имеет особую актуальность и практическую значимость в связи с целым рядом особенностей их конструкции и условий, в которых они работают. Опыт эксплуатации и статистические наблюдения доказывают, что отказы тяговых электродвигателей локомотивов в условиях стационарной нагрузки, уровень которой не превышает регламентированных проектным расчетом значений, происходят крайне редко – только при наличии существенных дефектов, внесенных в их конструкцию в процессе производства или ремонта. В подавляющем большинстве случаев выход из строя узлов тяговых электродвигателей наблюдается при воздействии на них динамических перегрузок, возникновение которых обусловлено особенностями протекания переходных процессов. Нестационарные режимы для тяговых электродвигателей локомотивов являются специфической особенностью их условий работы в виде постоянно действующего фактора, который требует изучения и учета, поскольку выступает источником потенциально опасных перегрузок и как следствие, выхода ТЭД из строя [1–3].

СОВРЕМЕННЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

В связи с вводом в эксплуатацию нового подвижного состава широко развиваются инновационные методы исследования состояния тяговых

двигателей, которые помогут сократить расход электроэнергии, времени и экономические затраты.

Методы теоретического расчета и математического моделирования неустановившихся режимов работы тяговых электродвигателей применяются для исследования особенностей поведения тяговых электродвигателей в нестационарных режимах работы и для количественной оценки возникающих динамических перегрузок в системе тягового привода. Система дифференциальных уравнений для описания работы ТЭД не имеет точного математического решения из-за появления ряда факторов при работе электрической машины в неустановившемся режиме: наличие индуктивностей обмоток машины нелинейного характера, процесс образования вихревых токов, описание параметров которых носит условный, гипотетический характер, и нелинейность индивидуальных для каждого двигателя магнитных свойств и характеристик его магнитопровода, и неоднородность трудно поддающихся расчету полей рассеяния обмоток двигателя и многое др. Поэтому в настоящее время методы расчета неустановившихся режимов работы тяговых электродвигателей сводятся к численному моделированию переходных режимов работы тяговых электродвигателей с использованием современных компьютерных средств.

Главным критерием соответствия расчетов электрических переходных процессов в тяговых электрических машинах реальному процессу их эксплуатации остается экспериментальная проверка математической модели. При экспериментальном изучении динамических процессов в силовых цепях тяговых электродвигателей, в первую очередь, приходится решать три технические проблемы: обеспечение одновременной записи на носители информации быстроменяющихся рабочих параметров машины, измерение больших токов и измерение высоких напряжений. Развитие цифровых технологий хранения и обработки информации привело к появлению многоканальных аналого-цифровых преобразователей в составе цифровых записывающих осциллографов, либо через специально разработанные программы-драйверы, устанавливаемые на управляющие результаты измерения ПЭВМ, позволяющие производить цифровую запись быстро протекающих переходных процессов тяговых электродвигателей. Вне зависимости от средств регистрации первичным источником сигналов выступают специализированные датчики, отображающие уровень рабочих параметров (величины токов, напряжений и параметры магнитного поля) машины и обеспечивающие электробезопасность при измерении силовых

токов и высоких напряжений через маломощные входы электронных устройств [4].

Среди современных методов исследования неустановившихся режимов работы ТЭД выделяется методика, основанная на выполнении мониторинга потребляемого тока с последующим выполнением спектрального анализа полученного сигнала, которая позволяет с высокой степенью достоверности определять состояние различных элементов двигателя. Наличие в спектре тока двигателя характерных частот определенной величины свидетельствует о наличии повреждений электрической и/или механической части электродвигателя и связанного с ним механического устройства. Данным методом определяется наличие таких дефектов, как межвитковые замыкания обмоток статора, повреждения подшипников, ослабление элементов крепления электродвигателя, дефекты механической передачи, несоосность валов двигателя и механической нагрузки. Серьезность повреждений определяется сравнением величины сигнала на характерной частоте повреждения с величиной сигнала на частоте питающей сети. Частоты, характерные для отдельных видов повреждений, совпадают очень редко. Диагностика тока и последующий спектральный анализ позволяют обеспечить разрешение по частоте до 0,01 Гц. Когда частоты от различных повреждений совпадают, необходимо дальнейшее уточнение характера дефекта с использованием традиционно применяемых методов диагностики. Недостатком спектрального анализа тока двигателя является сложность оценки результатов. Любая амплитудно-модулируемая частота учитывается в спектре дважды, по обе стороны питающего напряжения. Двойной учет модулируемой частоты обуславливает недостаточную точность диагностирования и отсутствие возможности увеличения числа анализируемых гармоник.

Для исключения наложения частот от различных повреждений и, как следствие, искажения картины реального состояния двигателя используется метод анализа спектров модулей векторов Парка тока (PI) и напряжения (PU). В отличие от простого спектрального анализа сигналов тока, при формировании спектров модуля вектора Парка любая модулируемая амплитудной модуляцией характерная частота учитывается в спектре вектора Парка только один раз. Гармоники в спектре PI, соответствующие различным видам неисправностей, отличаются друг от друга. Таким образом, выявление в спектре PI характерных гармоник достоверно и однозначно свидетельствует о наличии электрических и механических неисправностей в электродвигателе и приводе им

в действие устройстве. Дополнительно к измерению потребляемого тока проводится мониторинг приложенного к электродвигателю напряжения с целью определения причин возникновения выявленных повреждений, которые могут быть обусловлены качеством питающего напряжения. Результаты мониторинга приложенного напряжения учитываются при прогнозировании развития повреждения и определении остаточного ресурса электродвигателя. Учет мониторинга напряжения позволяет более точно прогнозировать развитие повреждений, обусловленных качеством питающего электродвигатель напряжения.

Таким образом, метод на основе спектрального анализа модуля вектора Парка тока и напряжения представляет собой достоверный, эффективный и удобный метод выявления дефектов и повреждений электродвигателей и связанных с ними механических устройств, позволяет исключить двойной учет модулируемой частоты, что обеспечивает повышение точности диагностики. Упрощенная процедура диагностирования, возможность проведения диагностики в дистанционном режиме и полной автоматизации процесса диагностики позволяют проводить регулярные измерения параметров большого количества электродвигателей, накапливать базу данных измерений, отслеживать динамику фактического развития отдельных повреждений и прогнозировать их дальнейшее развитие и остаточный ресурс оборудования. Реализация технологии обслуживания оборудования по фактическому состоянию посредством применения данного метода обеспечивает снижение до минимума ущерба предприятия от аварийных отказов оборудования за счет раннего обнаружения зарождающихся дефектов и контроля развития повреждений [5].

Разработано и успешно применяется в депо большое количество методов оценки технического состояния тяговых электродвигателей, в том числе, автоматизированных, основанных на различных диагностических параметрах, которые позволяют контролировать исправность всех составляющих ТЭД и реализовать систему ремонта с учетом фактического состояния узлов локомотива. Наиболее перспективным является использование комбинированных методов диагностики, учитывающих несколько диагностических параметров в едином комплексе.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Цель технического диагностирования ТЭД – выявление несоответствия свойств двигателя заданным или требуемым

характеристикам, определение вида, расположения и причин появления неисправностей. К основным задачам диагностирования ТЭД относятся: контроль технического состояния двигателя, поиск места и определение причины неисправности, а также прогнозирование технического состояния на определенный промежуток времени. Ожидаемая технико-экономическая эффективность применения конкретного средства технического диагностирования в значительной степени зависит от того, насколько полно на начальной стадии их разработки проработаны вопросы, связанные с будущей практической эксплуатацией того или иного диагностического устройства. По сравнению с планово-предупредительной системой ремонта и обслуживания тягового подвижного состава, действующей в настоящее время на сети железных дорог Российской Федерации, ремонт по фактическому состоянию является наиболее экономичным. Данная система текущего ремонта возможна при наличии достоверной информации о техническом состоянии узлов и агрегатов локомотивов [6–8].

В процессе эксплуатации электровозов серии ЭП1 может возникнуть неисправность, которая характеризуется аварийным нарастанием тока якоря – это явление, которое может произойти в электродвигателях, когда ток, протекающий через якорь ТЭД, возрастает до опасного уровня. Это может произойти по различным причинам, включая короткое замыкание, перегрузку, механические неисправности или неисправности в системе управления. При аварийном нарастании тока якоря наблюдается перегрев обмоток и других частей двигателя, что может вызвать повреждения изоляции и даже выход его из строя, повреждения якоря, щеток, коллектора и других узлов, что приведет к необходимости их ремонта или замены, а также к снижению общей эффективности работы ТЭД и увеличению потерь.

Аварийное нарастание тока якоря является следствием какой-либо неисправности ТЭД или режима его работы и выявляется по данным микропроцессорных систем управления и диагностики (МСУД), установленных на электровозе [9, 10]. Неисправность, характеризующаяся аварийным нарастанием тока тягового электродвигателя электровозов в различных режимах работы, может быть связана с несколькими факторами, которые требуют диагностики и последующего устранения. Вот некоторые возможные причины данного явления:

1. Возникновение сбоев в работе системы управления из-за неисправности датчиков или контроллеров.

2. Плохие или окисленные контактные соединения в цепи могут приводить к увеличению сопротивления и, как следствие, скачкам тока.
3. Механические неисправности – заедание подшипников, износ колесной пары или других механических элементов могут создать дополнительное сопротивление и привести к увеличению тока.
4. Короткие замыкания или пробой в изоляции обмоток двигателя.
5. Нестабильное питание, скачки напряжения или отсутствие одной из фаз.

В отличие от аварийного нарастания тока якоря «броски» тока тягового электродвигателя – это резкое внезапное и кратковременное изменение величины тока в цепи питания тяговых двигателей электровозов, возникающее из-за включения или отключения электрических устройств или из-за электромагнитных помех. Временное превышение номинального значения тока наблюдается при запуске, ускорении или при преодолении сопротивления движению. Переходные режимы с бросками тока наиболее часто происходят при колебаниях напряжения контактной сети, а также при восстановлении напряжения после кратковременного снятия, вызванного отрывом токоприемника или автоматическим повторным включением защиты на тяговых подстанциях. Факторы, способствующие броскам тока, могут включать [11]:

1. Увеличение нагрузки, например, при начале движения локомотива или при следовании по подъему;
2. Отрыв токоприемника от контактного провода с последующим восстановлением контакта.

Ограничения системы, например, по току, установленные для защиты оборудования.

Резкие изменения тока могут вызвать перегрузку, привести к ускорению износа двигателя, вызвать пульсации напряжения, повреждение электронных компонентов электровоза. Поэтому важно контролировать такие пики и принимать меры для их минимизации.

Для анализа причин возникновения выявленных неисправностей при неустановившихся режимах работы тяговых электродвигателей могут использоваться различные методы, включая математическое моделирование, экспериментальные измерения и мониторинг состояния оборудования. Отделение аварийного нарастания тока якоря от резких бросков тока в эксплуатационных режимах может быть выполнено с использованием нескольких методов:

1. Отслеживание величины тока, по временным характеристикам на осциллографе или специализированном оборудовании. Аварийные нарастания тока, как правило, имеют быстрое, резкое изменение, в то время как типовые режимы будут показывать более плавные изменения.
2. Выявление предельных значений тока для нормальных режимов работы ТЭД, превышение значения которых, может указывать на возможное аварийное состояние.
3. Использование термодатчиков для мониторинга температуры в аварийных ситуациях может помочь выявить ненормальные увеличения температуры проводников и оборудования до того, как они приведут к серьезным последствиям.
4. Определение наличия неисправностей с использованием методов функциональной диагностики, таких как контроль за состоянием изоляции, анализ вибраций.
5. Ведение документации с фиксацией резких изменений тока при типовых режимах работы двигателя для идентификации причин, вызывающих эти колебания тока (циклы включения/выключения, нагрузочные колебания и т.д.).
6. Использование современных систем мониторинга для предсказания поведения тока в зависимости от нагрузок, что позволяет обеспечивать раннее выявление неисправностей.

Важно понимать, что комбинация этих методов может дать более полное представление о работе ТЭД и помочь более точно отделить аварийные ситуации от нормальных эксплуатационных колебаний. После выявления точной причины неисправности возможны корректные меры по её устранению, что позволит предотвратить повторные случаи резких изменений тока и обеспечить надежную эксплуатацию электровоза [12].

В процессе исследования рассмотрены три фрагмента файла поездки МСУД трех электровозов, на которых выявлено аварийное нарастание тока тягового электродвигателя НБ-520В в режиме тяги. На основании полученных данных в ходе поездки электровозов произведен краткий сравнительный анализ фрагментов трех поездок [13, 14].

При моделировании поездки электровоза в пути следования возникла аварийная ситуация, при которой происходило срабатывание аппарата защиты. При детальном рассмотрении фрагмента № 1 файла поездки МСУД (Рис. 1) видно, что аварийное нарастание тока произошло при скорости движения 19 км/ч на 4-м тяговом электродвигателе НБ-520В. Ток якоря

составляет 411 А, при этом на тяговых электродвигателях: 1, 2, 3, 5, 6 ток якоря составляет 140 А. То есть ток якоря 4-го ТЭД в 3 раза больше, чем на остальных тяговых электродвигателях. Линия тока якоря 4-го ТЭД имеет форму «пилы», а ток якоря 5 и 6 тяговых электродвигателей имеют схожую форму, но значение тока меньше. Для формы тока в виде «пилы» характерным является изменение значения тока якоря от наименьшего значения к наибольшему и, наоборот, в течение минуты с интервалом в одну секунду. В результате нестабильной работы 4-го ТЭД произошло нарушение токораспределения на двух других тяговых электродвигателях, которые входят во вторую группу управления, что свидетельствует о наличии обрыва в цепи самого тягового электродвигателя или о наличии межвиткового замыкания в одной из обмоток неисправного тягового электродвигателя.

При рассмотрении фрагмента №2 файла поездки МСУД (Рис. 2) видно, что аварийное нарастание тока произошло на 2-м тяговом электродвигателе НБ-520В. При скорости движения 26 км/ч на 2-м ТЭД ток якоря составляет 830 А, а на тяговых электродвигателях 1, 3, 4, 5, 6 – от 256 до 330 А. То есть ток якоря 2-го ТЭД в 4 раза выше, чем на остальных тяговых электродвигателях. При дальнейшем следовании электровоза на полной тяге всех электродвигателей на 2-м ЭД ток якоря начал превышать значение в 1160 А, при этом, так же, как и до резкого увеличения тока, продолжало наблюдаться нарушение токораспределения на 1-м и на 3-м тяговых электродвигателях (Рис. 3). В течение времени следования локомотива линия значения тока 2-го тягового электродвигателя характеризуется неравномерностью, то есть наблюдается мгновенное увеличение значения тока якоря через одинаковые временные промежутки.

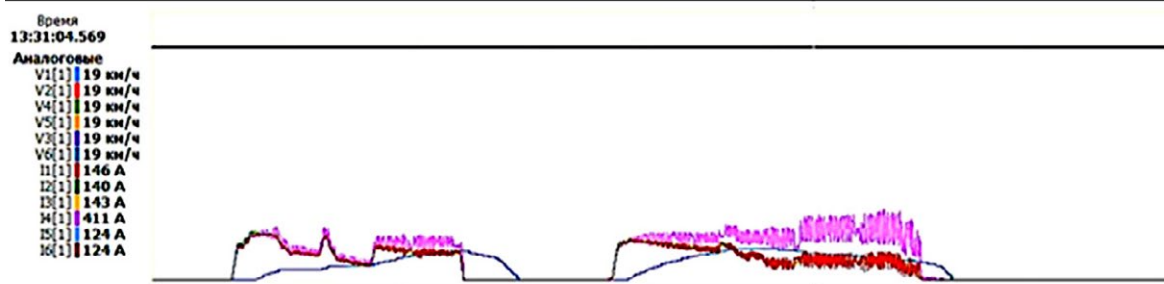


Рис. 1. Фрагмент файла поездки № 1

Fig. 1. Fragment of trip file № 1

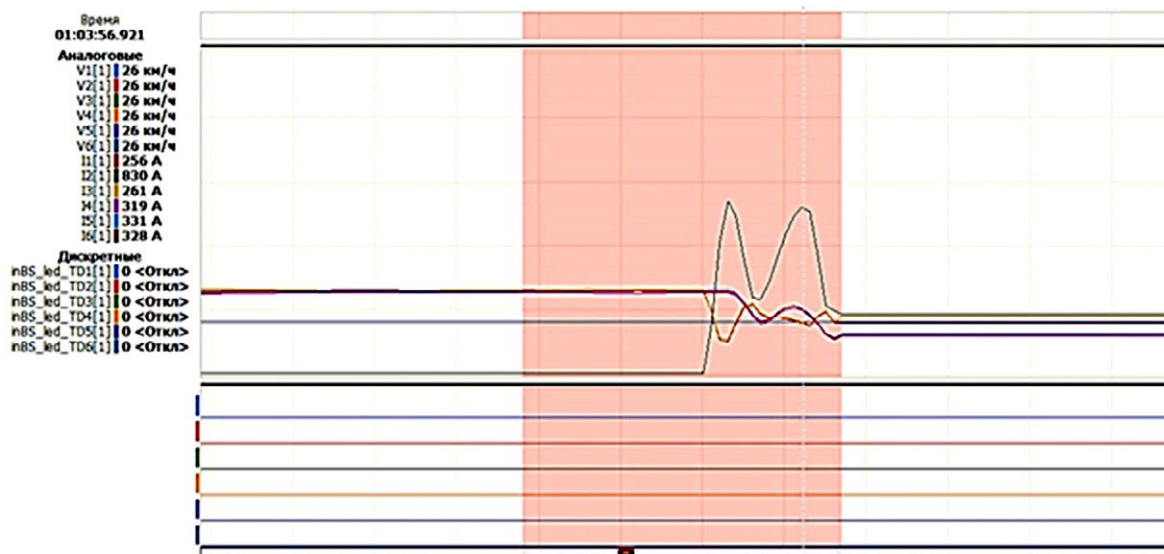


Рис. 2. Фрагмент файла поездки № 2

Fig. 2. Fragment of trip file № 2

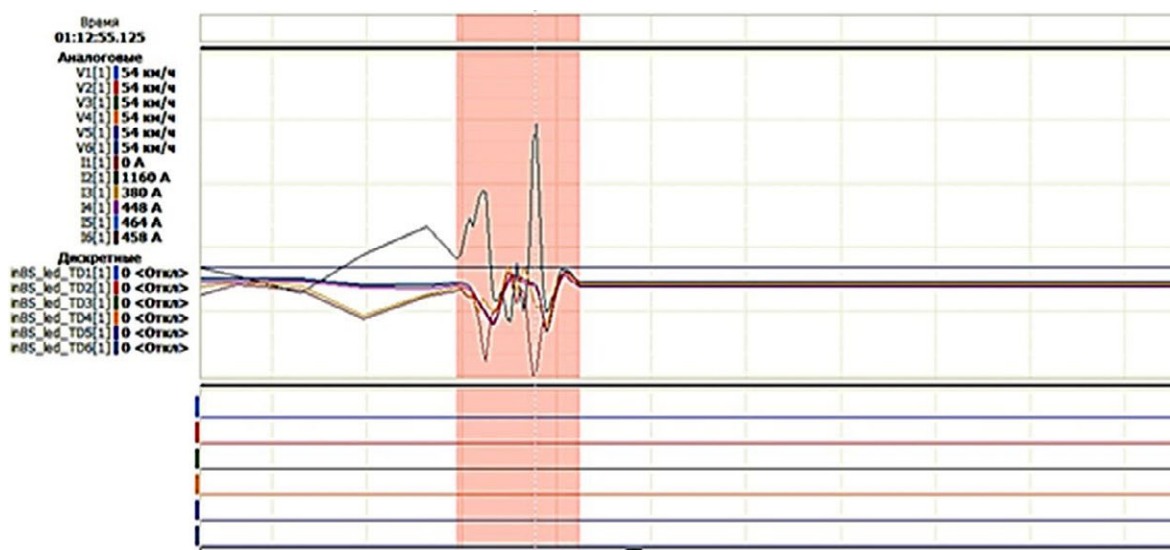


Рис. 3. Фрагмент файла поездки № 2 при следовании электровоза на полной тяге

Fig. 3. Fragment of the file of trip № 2 when following an electric locomotive at full thrust

Для определения конкретной причины неисправности была произведена проверка целостности цепи электрической схемы электровоза. Путем прикладывания щупов мультиметра к выводам тормозного переключателя был выявлен обрыв в электрической цепи электровоза. При проверке шинного монтажа тормозного переключателя было выявлено термическое разрушение шины в районе силового кулачкового контактора

тормозного переключателя QT1 блока силовых аппаратов (БСА1) (Рис. 4), а также термическое повреждение самого кулачкового контактора. Термическое повреждение (отгар) шины 2-го тягового электродвигателя произошел в виду ослабления болтового крепления силовых шин, идущих к кулачковому контактору тормозного переключателя QT1 БСА1 в результате отсутствия достаточного момента силы, необходимого для затяжки данных болтовых соединений при проведении цикловых работ при плановых видах ремонта. В результате этого в процессе эксплуатации электровоза от вибрации внутри кузова произошло максимальное ослабление данного болтового крепления, что и привело к термическому повреждению шин.

Следующая аварийная ситуация описывается фрагментом № 3 файла поездки МСУД, при детальном рассмотрении которого видно, что при скорости движения 54 км/ч на 2-м тяговом электродвигателе НБ-520В ток якоря меняет свои значения от 200 А до 450 А, а на тяговых электродвигателях 1, 3, 4, 5, 6 ток якоря находится в пределах 440 А. Линия тока якоря 2-го тягового электродвигателя характеризуется хаотичным изменением значений тока (Рис. 5).

При поиске причины неисправности было выявлено, что на клеммной рейке МСУД-Н не надежно зафиксирован провод, идущий от датчика ЛЕМ 2-го тягового электродвигателя, изображенного на электрической

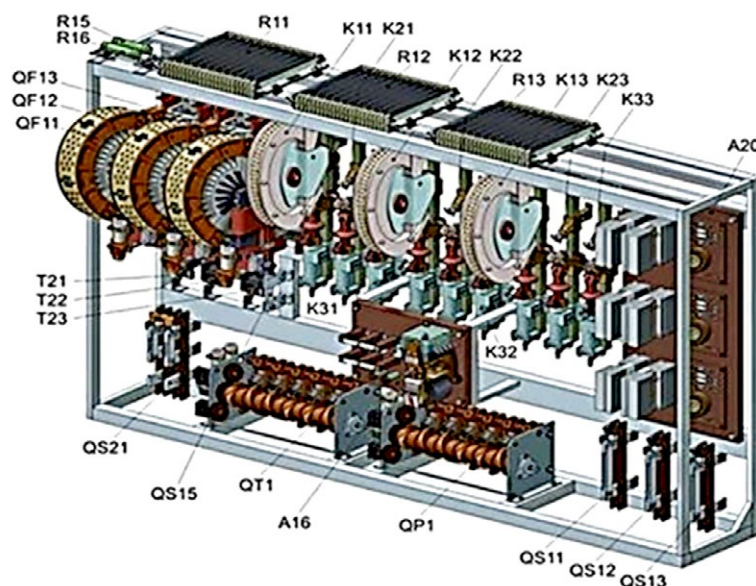


Рис. 4. Блок силовых аппаратов БСА1 [5]

Fig. 4. Block of power apparatuses BSA1 [5]

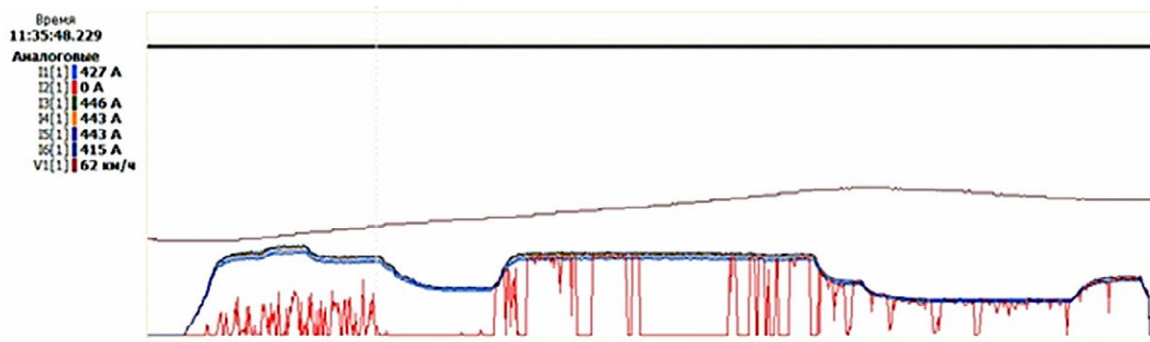


Рис. 5. Фрагмент файла поездки № 3

Fig. 5. Fragment of trip file № 3

схеме Т22 (Рис. 4), что в свою очередь привело к искажению значений тока якоря 2-го тягового электродвигателя.

Таким образом, при сравнении двух фрагментов файлов поездок, полученных с МСУД двух разных электровозов серии ЭП1, выявлено, что основным отличием между ними является форма линии тока якоря неисправного ТЭД: в первом случае линия тока якоря имеет форму «пилы», тогда как во втором случае наблюдаются мгновенные «броски» тока с таким же стремительным снижением его значения, но количество таких «скачков» в течение одной минуты значительно меньше, чем в первом случае и они распределены неравномерно.

Для устранения неисправности тягового электродвигателя – аварийного нарастания тока предусмотрена комплексная проверка следующими шагами:

- Проверка состояния контактных соединений и их очистка.
- Измерение параметров системы управления и ее тестирование на наличие ошибок.
- Визуальный осмотр механических и электрических частей двигателя.
- Измерение токов и напряжений в рабочем режиме.
- Проверка состояния обмоток на наличие коротких замыканий и других неисправностей.

Для выявления причин возникновения «бросков» тока в тяговом электродвигателе НБ-520В электровозов серии ЭП1 в условиях ремонтного депо рекомендуется следовать следующему алгоритму действий:

1. Визуальный осмотр:

- Проверить состояние электродвигателя на наличие видимых повреждений, трещин, коррозии.

- Осмотреть подводящие кабели и соединения на предмет повреждений, плохих контактов или перегревов
- Проверить шинный монтаж силовой схемы электровоза, целостность силовой электрической цепи тягового электродвигателя.
- Убедиться, что питающие провода исправны и правильно подключены: разъединитель QS11-13 БСА1 или БСА2 должен быть отключен (выбор разъединителя зависит от вида испытываемого тягового электродвигателя)
- Убедиться в отсутствии посторонних предметов, мешающих работе двигателя.

2. Проверка электропитания:

- Измерить напряжение на выходе источника питания.
- Проверить наличие напряжения на клеммах электродвигателя.
- Провести замеры токов на разных режимах работы и обработать полученные данные для анализа.

3. Измерение сопротивления обмоток:

- При помощи миллиомметра измерить сопротивление обмоток.
- Сравнить результаты с нормами, указанными в технической документации: сопротивление изоляции обмоток постоянному току при +20 °C:
 - цепи всех катушек главных полюсов (без шунта), Ом: 0,00655...0,00725
 - цепи всех катушек добавочных полюсов и компенсационной обмотки, Ом: 0,01305...0,01145;
 - обмотки якоря, Ом: 0,0115...0,0127.

- провести проверку якорной обмотки тягового электродвигателя. Для этого необходимо перевести реверсор QR1 в «нейтральное положение» и исключить его из цепи путем укладки диэлектрического материала между контактами реверсора. Далее приложить щупы мультиметра или мегаомметра на выводы соответствующего тягового электродвигателя. Для проверки обмотки возбуждения отдельно от цепи необходимо также вывести реверсор из цепи способом, указанным выше, и приложить щупы мультиметра или мегаомметра на соответствующие выводы обмотки возбуждения.

4. Проверка изоляции:

- Использовать мегомметр для проверки сопротивления изоляции обмоток к корпусу и между обмотками: (должно быть не менее 2,5 МОм).

- Обратить внимание на состояние изоляционных материалов.
- 5. Тестирование на нагрузку:
- Подключить электродвигатель к тестовой нагрузке и измерить его параметры (ток, напряжение, мощность).
- Проверить, корректно ли работает двигатель под нагрузкой.
- 6. Проверка отсутствия повреждений в электродвигателе:
- Проверить состояние коллектора и щеток, убедиться в их исправности и правильном контакте: проверить состояние коллекторно-щеточного аппарата (необходимо проворачивать траверсу) на наличие переброса электрической дуги, открыв смотровые люки неисправного ТЭД. Проверить целостность изоляции обмоток в пределах возможной видимости. Проверить положение нейтрали.
- 7. Проверка работы системы охлаждения:
- Убедиться в отсутствии перегрева двигателя.
- Проверить работоспособность системы вентиляции и других элементов, отвечающих за охлаждение.
- 8. Акустическая диагностика:
- Обратить внимание на звуки, издаваемые двигателем (шумы, стуки, вибрации), которые могут указывать на механические неисправности.
- 9. Проверка механизмов управления:
- Осмотреть и протестировать элементы управления.
- Убедиться в корректности работы датчиков и исполнительных механизмов, управляющих питанием двигателя: проверить надежность крепления проводов датчиков ЛЕМ на самих датчиках, а также на клеммной рейке МСУД-Н.
- 10. Поиск механических неисправностей:
- Проверить подшипники, валы и другие механические элементы на наличие износа или повреждений.
- 11. Сравнительный анализ полученных данных с нормами и предыдущими показателями для выявления отклонений и аномалий.

Процесс диагностики должен быть организован последовательно и систематично с фиксацией всех результатов для дальнейшего анализа и принятия решений по устранению неполадок, следуя предписаниям технической документации и соблюдая правила безопасности [6–8].

Для сокращения времени нахождения электровоза серии ЭП1 в неэксплуатируемом парке и для выявления возможного предотказного состояния тягового электродвигателя или неисправности его электрической схемы к вышеизложенному алгоритму рекомендуется применять файлы

поездов микропроцессорной системы диагностирования (МСУД-Н), которые в соответствии с замечаниями, зафиксированными в журнале технического состояния локомотива формы ТУ-152, необходимо расшифровать, сравнить полученные данные с уже имеющейся базой данных неисправностей тягового электродвигателя. На основании полученных результатов расшифровки файлов поездки и вышеперечисленных проверок ремонтному персоналу необходимо произвести диагностику ТЭД и сделать заключение о причинах возникших неисправностей.

Согласно проведённым экспериментальным исследованиям на натурном образце тягового электродвигателя НБ-520В, подтверждена эффективность предложенного алгоритма поиска неисправностей, приводящих к броскам в ТЭД, внедрение которого может существенно снизить риск возникновения кругового огня на коллекторе, что, в свою очередь, повысит общую надежность и безопасность функционирования устройства. Это открывает новые возможности для улучшения эксплуатации тяговых электродвигателей с высокой степенью надежности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленные неисправности не всегда относятся к неустановившимся режимам работы тяговых электродвигателей. На основании экспериментальных данных и анализа файлов поездок МСУД можно убедиться, что характер и причина возникновения неисправностей в режиме тяги одинаковы для всех испытуемых ТЭД лишь на первый взгляд, но при проведении анализа файлов поездок МСУД становится понятно, что имеются различия в результатах их диагностики. Для устранения выявленных неисправностей ТЭД в режиме тяги в условиях депо необходимо произвести проверку целостности силовой электрической схемы электровоза, не производя замену тягового электродвигателя. Замена тягового электродвигателя крайне трудоемкий процесс и будет выполняться как сверхцикловые работы. В данном случае своевременная и верная диагностика неисправностей двигателя даст возможность сократить время простоя электровоза при неплановом виде ремонта, а также позволит исключить затраты на замену ТЭД.

Диагностика и определение причин неисправностей тягового электродвигателя в режиме тяги требует систематического и комплексного подхода. Данный алгоритм оценки технического состояния тягового двигателя электровоза разработан на основании выявленных закономерностей и является рекомендацией. В процессе дальнейших

исследований методов диагностики и закономерностей возникновения неисправностей тяговых электродвигателей электровозов данный материал будет совершенствоваться и дополняться.

Кроме рекомендуемого порядка действий определение причин неисправностей тягового двигателя может включать несколько новых ключевых аспектов [3]:

1. Изучение и использование уже имеющихся эксплуатационных данных о работе электродвигателя, включая режимы нагрузки, частоту срабатываний защитных устройств, и анализ отклонений от нормальной работы.
2. Применение современных неразрушающих методов диагностики, позволяющих выявить скрытые дефекты на ранних стадиях, таких как ультразвуковая диагностика, термография, вибродиагностика и анализ спектра шумов.
3. Применение компьютерного моделирования и симуляции для прогнозирования поведения электродвигателя в различных эксплуатационных условиях может помочь в понимании, как изменения в конструкции или условиях эксплуатации могут повлиять на производительность ТЭД.
4. Внедрение мониторинга в реальном времени с помощью систем Интернета вещей (IoT), которые могут передавать данные о состоянии электродвигателя в облако для последующего анализа и использовать алгоритмы машинного обучения для предсказания возможных неисправностей.
5. Установление системы обратной связи при взаимодействии с эксплуатационным персоналом с целью получения информации о работе системы в режиме реального времени и потенциальных проблемах, которые могут быть не зафиксированы диагностическими системами.

Применение современных информационных технологий, средств диагностики, вычислительной техники, автоматизированных систем неразрушающего контроля позволяет создать информационно-технические комплексы по управлению системой ремонта, перейти к организации ремонта с учетом технического состояния оборудования на основе предупреждения отказов в пути следования и рационального использования ресурса оборудования подвижного состава для обеспечения требуемого уровня надежности и экономичности [15]. Создание комплексной информационно-измерительной системы контроля

и диагностики позволяет автоматизировать технологию и организацию технического обслуживания и текущего ремонта электровозов, учитывая информацию о реальном техническом состоянии узлов и агрегатов локомотива.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дурандин М.Г. Работа тяговых электродвигателей в неустановившихся режимах: конспект лекций. Екатеринбург: УрГУПС, 2016. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: <https://h.twirpx.one/file/2435648/.pdf>
2. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги: учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2005. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: <https://dntb-centr.ru/b/383?ysclid=lziaaio7od305187170.pdf>
3. Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов: учебник для студентов техникумов и колледжей ж/д транспорта. М.: УМК МПС России, 2000. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: https://pomogala.ru/books_9_tyaga/osnovy_tyagi_poezdov_osipov.html
4. Классификация методов диагностирования тяговых электродвигателей. Лекция. 2024. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: <https://lektsia.com/8x4871.html?ysclid=m1e1u4ssiq106233570>
5. Современные инновационные методы диагностирования тяговых электродвигателей. Лекция. 2024. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: <https://lektsia.com/8x4872.html?ysclid=m1e1jfsjt0539678066>
6. Буйносов А.П., Стаценко К.А. Техническая диагностика электроподвижного состава: учебно-методическое пособие по дисциплине «Техническая диагностика электроподвижного состава» для студентов специальности 190303 – Электрический транспорт железных дорог. Федеральное агентство ж.-д. трансп. Уральский гос. ун-т путей сообщ. Каф: «Электрическая тяга». Екатеринбург: УрГУПС, 2008. EDN: UCWJQA
7. Бобровников Я.Ю., Стецюк А.Е. Диагностические комплексы электроподвижного состава: учеб. пособие. Хабаровск: ДВГУПС, 2012. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/6257526/diagnosticheskie-kompleksy-elektropodvizhnogo-sostava?ysclid=m1e2gmt4du528934562.pdf>
8. Мельников В.А. Совершенствование методов диагностирования тепловозов 2ТЭ116У с применением данных бортовых систем управления: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2023. EDN: CFRVMO

9. Якушев А.Я. Автоматизированные системы управления электрическим подвижным составом: учеб. пособие. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016.
10. Семченко В.В. Эксплуатация и техническое обслуживание электронных систем управления электровозов переменного тока. Красноярск: ДЦВ Красноярской железной дороги, 2010. С. 69–72.
11. Плакс А.В., Ширяев А.В., Брагин А.Г. Ограничение бросков тока в тяговом приводе электроподвижного состава с микропроцессорным управлением импульсным регулятором напряжения: материалы временных коллективов. В кн.: Электрификация и развитие железнодорожного транспорта России. Традиции, современность, перспективы: Тезисы докл. междунар. симпозиума Eltrans>2001. СПб.: ПГУПС, 2001. С. 111. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: https://biblioserver.usurt.ru/cgi-bin/irbis64r_13/cgiirbis_64.exe?LNG=&Z21ID=&I21DBN=TFZHT&P21DBN=TFZHT&S21STN=1&S21REF=&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=1&S21P03=A=&S21STR=Плакс,%20Алексей%20Владимирович
12. Коньков А.Ю. Основы технической диагностики локомотивов: учеб. пособие. Хабаровск: ДВГУПС, 2007. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: https://scb/uploaded/1_1361365445.pdf?ysclid=m1e2652qf9261594189
13. Дорохина Е.С. Мониторинг теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Томск, 2015. EDN: ZPSIOJ
14. Вольвич А.Г., Орлов Ю.А., Щербаков В.Г. Математическое моделирование многомоторного тягового электропривода с двигателями независимого возбуждения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2010. № 2. С. 38–42. EDN: LHMHED
15. Лапицкая Г.А. Инновационные технологии неразрушающего контроля и технической диагностики тепловозов. В кн.: Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы третьей Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 10–11 ноября 2016 года. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2016. С. 92–98. EDN: XWXYR

REFERENCES

1. Durandin MG. *Operation of traction electric motors in unsteady modes: lecture notes*. Yekaterinburg: UrGUPS; 2016. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://h.twirpx.one/file/2435648/.pdf>
2. Kuzmich VD, Rudnev VS, Frenkel SYa. *Theory of locomotive traction: textbook for universities of railway transport*. Moscow: Marshrut; 2005. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://dntb-centr.ru/b/383?ysclid=lziaaio7od305187170.pdf>
3. Osipov SI, Osipov SS. *The basics of train traction: mextbook for students of technical schools and colleges of railway transport*. Moscow: UMK MPS of Russia, 2000.

- (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: https://pomogala.ru/books_9_tyaga/osnovy_tyagi_poezdov_osipov.html.pdf
4. Classification of diagnostic methods for traction electric motors. Lecture. 2024. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://lektsia.com/8x4871.html?ysclid=m1e1u4ssiq106233570>
 5. Modern innovative methods of diagnosing traction electric motors. Lecture. 2024. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://lektsia.com/8x4872.html?ysclid=m1e1jfsjt0539678066>
 6. Buinosov AP, Statsenko KA, Buinov AP, Statsenko KA. *Technical diagnostics of electric rolling stock: an educational and methodological manual on the discipline «Technical diagnostics of electric rolling stock» for students of the specialty 190303 – Electric transport of railways. Federal Agency of Railway Transport, Ural State University ways of communication, Office: «Electric traction». Yekaterinburg: UrGUPS; 2008. (In Russ.) EDN: UCWJQA*
 7. Bobrovnikov YaYu, Stetsyuk AE. *Diagnostic complexes of electric rolling stock: textbook the manual*. Khabarovsk: DVGUPS; 2012. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://studylib.ru/doc/6257526/diagnosticheskie-kompleksy-elektropodvizhnogo-sostava?ysclid=m1e2gmt4du528934562>
 8. Melnikov VA. Improvement of methods for diagnosing 2TE116U diesel locomotives using data from on-board control systems. [dissertation] Moscow; 2023. (In Russ.) EDN: CFRVMO
 9. Yakushev AY. *Automated control systems for electric rolling stock: textbook the manual*. Moscow: Educational and methodological center for education in railway transport; 2016. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://djvu.online/file/R7Q3Zr8mpDuAy>
 10. Semchenko VV. *Operation and maintenance of electronic control systems of electric locomotives of alternating current*. Krasnoyarsk: DCV of the Krasnoyarsk Railway; 2010:69–72. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004963946?ysclid=lziu4zxikq36401649>
 11. Plaks AV, Shiryayev AV, Bragin AG. Limitation of current surges in a traction drive of an electric rolling stock with microprocessor control of a pulse voltage regulator: materials of temporary collectives. In: *Electrification and development of railway transport in Russia. Traditions, modernity, prospects: Abstracts of the International Conference. Symposium Eltrans'2001*. St. Petersburg: PGUPS; 2001. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: https://biblioserver.usurt.ru/cgi-bin/irbis64r_13/cgiirbis_64.exe?LNG=&Z21ID=&I21DBN=TFZHT&P21DBN=TFZHT&S21STN=1&S21REF=&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=1&S21P03=A=&S21STR=Плакс,%20Алексей%20Владимирович
 12. Konkov AY. *Fundamentals of technical diagnostics of locomotives: textbook the manual*. Khabarovsk: DVGUPS; 2007. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: https://scb/uploaded/1_1361365445.pdf?ysclid=m1e2652qf9261594189
 13. Dorokhina ES. Monitoring of the thermal state of asynchronous traction electric motors [dissertation] Tomsk; 2015. (In Russ.) EDN: ZPSIOJ

14. Volvich AG, Orlov YuA, Shcherbakov VG. Mathematical modeling of a multi-motor traction electric drive with independent excitation motors. *Izvestiya vuzov. The North Caucasus region. Technical sciences*. 2010;(2):38–42. (In Russ.) EDN: LHMHED
15. Lapitskaya, GA. Innovative technologies of non-destructive testing and technical diagnostics of locomotives. In: *Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction: materials of the Third All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation. Omsk, November 10–11, 2016*. Omsk: Omsk State University of Railway Engineering, 2016. pp. 92–98. (In Russ.) EDN: XWXYR

Сведения об авторах:

Рыжова Елена Львовна, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 1880-3372; ORCID: 0000-0001-7984-2558;

E-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Осипов Владислав Юрьевич, ведущий технолог;

eLibrary SPIN: 9408-0251; ORCID: 0009-0009-4566-3274;

E-mail: osipov.power@yandex.ru

Information about the authors:

Elena L. Ryzhova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 1880-3372; ORCID: 0000-0001-7984-2558;

E-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Vladislav Yu. Osipov, leading technologist;

eLibrary SPIN: 9408-0251; ORCID: 0009-0009-4566-3274;

E-mail: osipov.power@yandex.ru