

Т. В. Волчек, В. С. Томилов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КОЛЛЕКТОРНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. Рассмотрены перспективы развития Восточного полигона, установлена необходимость повышения ресурса работы оборудования эксплуатируемых электровазозов. Приведена статистика отказов оборудования электровазозов серии «Ермак». Выявлено, что наибольшее количество отказов приходится на тяговый электродвигатель, а именно на его коллекторно-щеточный аппарат из-за возникновения переброса электрической дуги и пробоя изоляции. Рассмотрены причины их появления. Предлагается оснастить тяговый электродвигатель дополнительными датчиками, а именно сигнализатором искрения, что позволит своевременно обнаруживать искрение в коллекторно-щеточном аппарате и предотвращать образование кругового огня, а также температурными датчиками, которые позволят напрямую определять температуру обмоток. Представлены места для установки данных датчиков.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, коммутация, небалансная ЭДС, искрение, температурный контроль, пробой изоляции, круговой огонь.

Для цитирования: Волчек, Т. В. Совершенствование методов контроля состояния коллекторного тягового электродвигателя при его эксплуатации / Т. В. Волчек, В. С. Томилов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 202–208. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_202.

Введение

Сегодня для ОАО «РЖД» крайне важно устойчивое развитие Восточного полигона. Он имеет ключевое значение для обеспечения грузоперевозок по всей стране, соединяя Европейскую часть России с Дальним Востоком. За 2023 г. провозная способность Восточного полигона составила 173 млн т, к 2030 г. значение этого показателя должно составлять 210 млн т, а уже к 2035 г. – 270 млн т [1]. Для увеличения грузооборота более чем на 30 % требуется усовершенствование и обновление тягового подвижного состава, развитие инфраструктуры, оптимизация технологических процессов, которая подразумевает внедрение новых технологий и методов ремонта подвижного состава, управления локомотивом и т.д. В настоящее время на Восточном полигоне организуется тяжеловесное движение грузовых поездов массой 7100 т на основе эксплуатации электровазоза переменного тока с коллекторным приводом серии 3ЭС5К «Ермак». Также для увеличения грузооборота эксплуатируются сдвоенные тяжеловесные поезда массой 14200 т [2]. При этом в перспективе к 2030 г. на Восточном полигоне планируется организация движения грузовых поездов массой 8000–8800 т. Увеличение массы состава негативно влияет на оборудование электровазозов, которые находятся в эксплуатации. Нагрузки на него возрастают, что может способствовать преждевременному выходу оборудования из строя. При этом возникает необходимость проведения внепланового ремонта, а это, в свою очередь, вызывает излишние простои локомотивов и приводит к значительным финансовым потерям для компании.

Анализ работы тяговых электродвигателей электровазозов серии «Ермак»

Красноярская железная дорога является своеобразными воротами Восточного полигона, ее протяженность составляет 14,1 тыс. км. В настоящее время в приписке к Красноярской дирекции тяги числится 1152 секции электровазозов серии 2(3)ЭС5К.

На рис. 1 представлена диаграмма отказов технических средств в зависимости от оборудования локомотива 2(3)ЭС5К за 2022–2023 гг., из которой видно, что наибольшее количество отказов приходится на категории «Электрическое оборудование» и «Силовое оборудование». К категории «Электрическое оборудование» относятся: аккумуляторная батарея, реле защиты, коммутационные аппараты, контроллер машиниста, пульт управления, монтажное оборудование, межсекционное соединение, панели, щиты, сигнализация и т.п. К категории «Силовое оборудование» относятся: тяговые трансформаторы, выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), выпрямительные установки возбуждения (ВУВ), быстродействующие выключатели, главные выключатели, тяговые электродвигатели, элементы блока силовых аппаратов (БСА), сглаживающие реакторы, индуктивные шунты, кабели шин и т.п.

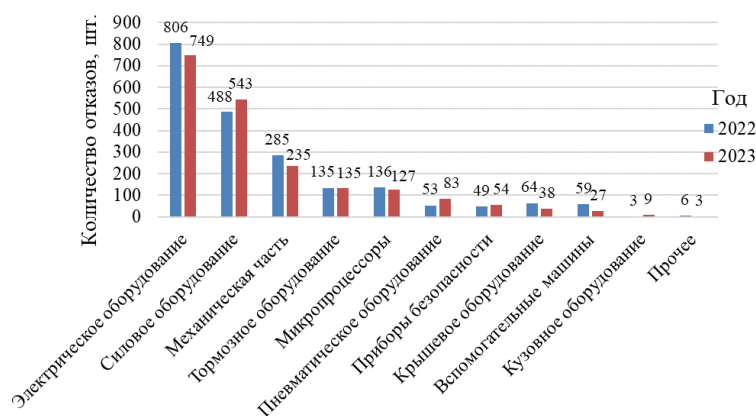


Рис. 1. Диаграмма распределения отказов технических средств по видам оборудования локомотива 2(3)ЭС5К Красноярской дирекции тяги

На рис. 2 представлена диаграмма распределения отказов технических средств по элементам категории «Силовое оборудование» электровоза 2(3)ЭС5К. Наибольшее количество отказов силового оборудования таких электровозов приходится на тяговые электрические двигатели (ТЭД) и составляет около 50 %.

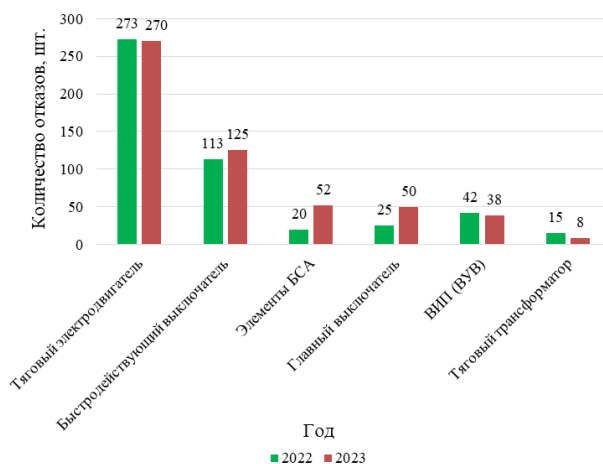


Рис. 2. Диаграмма распределения отказов технических средств по элементам силового оборудования локомотива 2(3)ЭС5К

Наибольшее количество отказов элементов ТЭД наблюдается на коллекторе (36 %), якоре (28 %) и щеточном аппарате (17 %), рис. 3. Установлено, что причинами отказов элементов ТЭД являются: переброс электрической дуги по коллектору (круговой огонь) – 44 %; пробой изоляции – 36 %; механические повреждения – 11 %; прочее – 9 %.

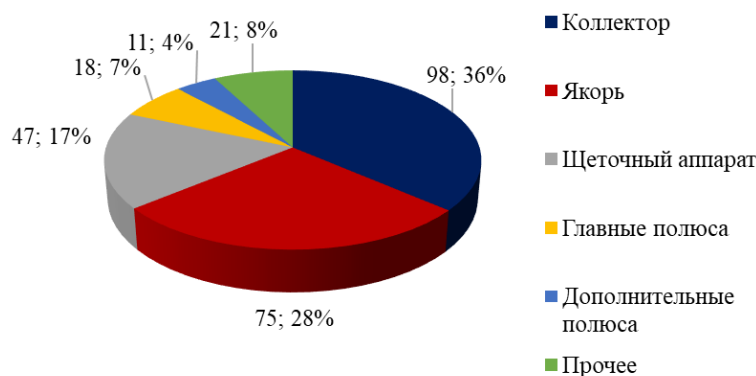


Рис. 3. Распределение отказов по элементам ТЭД электровозов за 2023 г.

Причинами возникновения кругового огня являются недопустимое искрение щеток (более $1\frac{1}{4}$ – $1\frac{1}{2}$ степени искрения) и превышение допустимого значения максимальных межламельных напряжений (19–21 В). Последствия сильного искрения на коллекторе ТЭД показаны на рис. 4. Как правило, искрение щеток обусловлено неудовлетворительным протеканием процесса коммутации, на который огромное влияние оказывает величина небалансной ЭДС (Δe_p), зависящая от величины реактивной (e_p), коммутирующей (e_k) и трансформаторной ЭДС (e_k) [3].



Рис. 4. Последствия искрения на коллекторе ТЭД

Несмотря на то что при конструкционных испытаниях ТЭД добавочные полюса хорошо рассчитаны и отлажены, небалансная ЭДС в коммутируемых секциях все же возникает. Вызвано это тем, что индуктивность в коммутационной зоне, а следовательно, и коммутирующая ЭДС распределены по плавной кривой, а реактивная ЭДС – по ступенчатой [4–6]. Этот дисбаланс тем больше, чем с большим током работает ТЭД. В связи с этим А.Б. Иоффе предложил критерий в виде фактора искрения ($\Phi_{и}$), который позволяет сделать заключение о допустимой величине Δe_p [6].

Фактор искрения оценивается по формуле

$$\Phi_{и} = \left(\frac{40}{D_k}\right)^{1,5} \times \frac{L_c \times i_k^2 \times v_k}{2 \times t_k \times L_{щ}}, \quad (1)$$

где D_k – диаметр коллектора, мм; L_c – индуктивность секции, Гн; v_k – окружная скорость коллектора в номинальном режиме, м/с; t_k – коллекторное деление, пересчитанное на окружность якоря, мм; i_k – ток в короткозамкнутой секции якоря, который определяется по формуле

$$i_k = \frac{(e_p - e_k) + \kappa_p \times e_p}{R_{щ} + r_c}, \quad (2)$$

где $R_{щ}$ – сопротивление контакта «щетка – коллектор», Ом; r_c – активное сопротивление секции, Ом; κ_p – коэффициент, оценивающий нескомпенсированную часть реактивной ЭДС в долях от полного значения e_p , определяется по формуле

$$\kappa_p = \frac{e_p - e_k}{e_p}. \quad (3)$$

Чем больше величина Δe_p , тем больше ток в короткозамкнутой секции якоря, следовательно, фактор искрения увеличивается квадратично.

Еще одной причиной отказа элементов ТЭД является пробой изоляции, который может быть связан с превышением температуры обмоток двигателя. Предположительно, температура обмоток посредством алгоритмов микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД) определяется расчетным путем по формуле [7, 8]

$$\tau = \tau_{\infty} \left(1 - \exp \left(-\frac{\Delta t}{T} \right) \right) + \tau_0 \exp \left(-\frac{\Delta t}{T} \right), \quad (4)$$

где τ_{∞} – установившееся превышение температуры обмотки ТЭД над температурой окружающей среды при данном режиме работы; τ_0 – начальное превышение температуры обмотки; Δt – время между замерами; T – постоянная времени нагрева, равная отношению теплоемкости ТЭД к его теплоотдаче.

При достижении температуры обмоток ТЭД или сглаживающего реактора (СР) порогового значения, а именно: СР 180 °С, главные и дополнительные полюса 150 °С, якорная обмотка 140 °С, на блок индикации на панели управления выводится предупреждение о перегреве данного узла. На основе этого предупреждения машинист должен снизить ток якоря ТЭД. При достижении предельного значения температуры, а именно: СР 190 °С, главные и дополнительные полюса 155 °С, якорная обмотка 145 °С, и ее сохранении в течение 10 с, МСУД автоматически ограничивает токи ТЭД до значения номинального тока длительного режима, равного 810 А.

В свою очередь, расчетный метод определения температуры не учитывает многие факторы, например изменение мощности и тока ТЭД, вызывающее различную интенсивность нагревания деталей, взаимное влияние нагрева одних элементов ТЭД на другие, условия вентиляции и т. д., в связи с чем фактическая температура может быть совсем иной, что было неоднократно доказано при опытных поездках [7, 9]. Неверное определение температуры нагрева обмоток ТЭД может привести к определенным последствиям:

– если алгоритм определяет температуру больше, чем действительное значение, это приводит к активации защитных алгоритмов, которые заложены в МСУД, а следовательно, к излишним простоям локомотива;

– если алгоритм определяет температуру меньше, чем действительное значение, в результате накопительного эффекта это может привести к пробое изоляции тяговых двигателей.

Совершенствование методов контроля состояния тягового электродвигателя при его эксплуатации

Для совершенствования работы ТЭД и преждевременного выявления его неисправности предлагается оснастить ТЭД дополнительными датчиками, которые способны при эксплуатации электровоза обнаружить возникновение искрения коллекторно-щеточного аппарата (КЩА) и напрямую определить температуру нагрева обмоток ТЭД. На рис. 5 представлены места установки дополнительных датчиков в ТЭД.

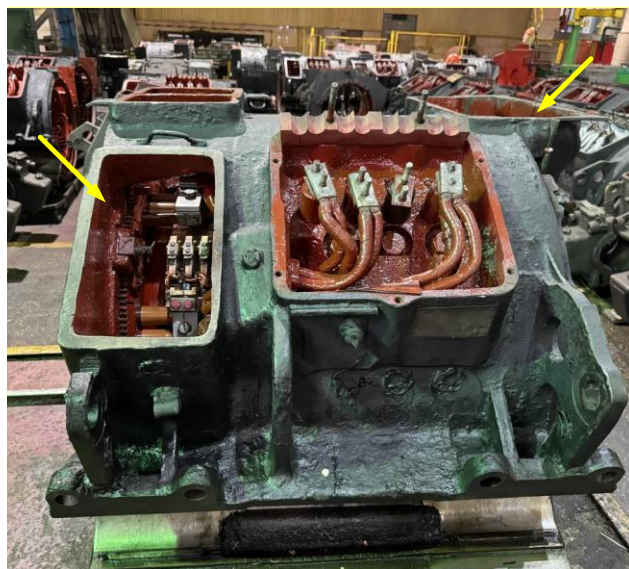


Рис. 5. Места установки дополнительных датчиков для контроля работы ТЭД

Предлагается в отверстие смотрового люка ТЭД установить датчик сигнализатора искрения, который позволит выявить возникновение искрения при эксплуатации электровоза и согласно алгоритму управления передать информацию на МСУД, что даст возможность машинисту скорректировать нагрузку на ТЭД и не допустить круговой огонь.

С целью более точного определения нагрева предлагается использовать температурные датчики для прямого измерения температуры обмоток ТЭД. Это позволит получать актуальные данные о температуре непосредственно в процессе работы агрегата, что особенно важно для предотвращения перегрева и обеспечения безопасности эксплуатации [10].

Применение температурных датчиков позволит более точно контролировать температурный режим работы ТЭД, что будет способствовать увеличению срока службы оборудования и снижению риска выхода его из строя. Это особенно актуально для ТЭД, работающих в условиях повышенных нагрузок и требующих особого внимания к контролю температуры в условиях непрерывно растущих на него нагрузок из-за увеличения массы состава.

Температурные датчики могут быть установлены в различных частях обмоток ТЭД, обеспечивая непрерывный мониторинг температуры. Из расшифровки данных МСУД следует, что наибольший нагрев наблюдается в обмотке дополнительных полюсов и якоре ТЭД, поэтому необходимо установить два датчика. В роли температурного датчика может выступать термопара или ИК-пирометр, технические характеристики и габаритные размеры которого будут определены в процессе проектирования и опытной эксплуатации.

Температурный датчик, измеряющий обмотку ДП, предлагается установить в воздухозаборном отверстии. Возле смотрового окна, рядом с клеммной коробкой предлагается установить датчик для измерения температуры якорной обмотки.

Принцип работы по определению температуры нагрева обмоток ТЭД следующий: с ТЭД на оптический датчик поступает поток излучения, который через оптическую систему и инфракрасный фильтр передается на фотоэлектрический приемник с системой тестирования и преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный температуре. С контроллера (микропроцессорный электронный блок) температура нагрева передается на МСУД. Если температура превышает предельно допустимую температуру, то МСУД отключает ТЭД. Контроллер получает питание от шкафа питания и через оптоволокно питает оптический датчик.

Питание на оптический датчик подаётся от шкафа питания. Данные о температуре ТЭД передаются через оптоволокно, что обеспечивает их надёжную передачу и защиту от электромагнитных помех. Оптоволокно также позволяет разместить датчик на безопасном расстоянии от источника тепла, что повышает точность измерений и продлевает срок службы оборудования.

Использование температурных датчиков является эффективным способом повышения надёжности и безопасности эксплуатации ТЭД, а также способствует оптимизации их работы и снижению затрат на обслуживание и ремонт.

На рис. 6 представлена структурная схема работы теплового датчика (ИК-пирометра).

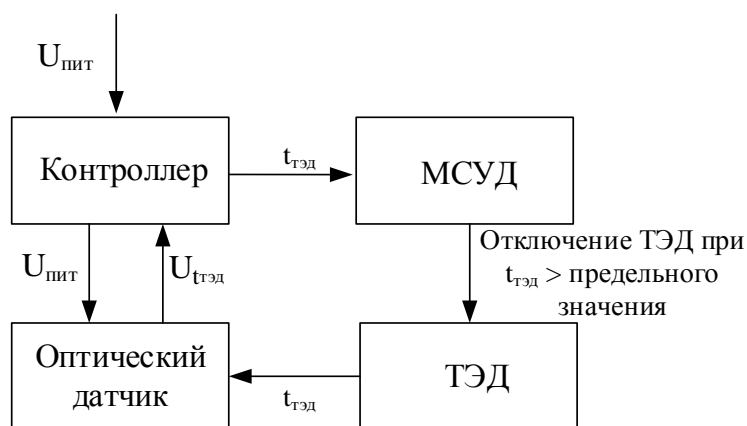


Рис. 6. Структурная схема работы ИК-пирометра

Заключение

Таким образом, проведенный анализ работы ТЭД электровоза серии «Ермак» показывает, что наибольшее количество отказов его элементов приходится на коллекторно-щеточный аппарат по причине возникновения переброса электрической дуги и пробоя изоляции. В связи с увеличением грузопотока на Восточном полигоне нагрузки на ТЭД увеличиваются, поэтому необходимо внедрять технические решения, которые способны увеличить ресурс его работы. Предлагается оснастить ТЭД дополнительными датчиками – сигнализатором искрения и температурными датчиками, что позволит:

- своевременно выявлять возникающее искрение КЩА и не допускать возникновения кругового огня;
- напрямую измерять температуру обмоток ТЭД, что исключит ложное срабатывание МСУД и сократит количество случаев пробоя изоляции.

Список литературы

- 1 Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : утверждена распоряжением Правительства РФ от 19.03.2019 г. № 466р. – URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAga2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 27.11.2024).
- 2 Сдвоенные тяжеловесные. По Восточному полигону успешно проследовали десятки поездов массой 14200 тонн // Гудок. – 2022. – № 10.
- 3 Возникновение трансформаторной ЭДС в секциях якоря тягового электродвигателя электровоза переменного тока в режимах полного и ослабленного поля и пути ее снижения / Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков, С. Г. Шрамко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (77). – С. 41–48 – ISSN 0201-727X.
- 4 **Находкин, М. Д.** Проектирование тяговых электрических машин / М. Д. Находкин. – Москва : Транспорт, 1976. – 623 с.
- 5 **Курбасов, А. С.** Повышение работоспособности тяговых электродвигателей / А. С. Курбасов. – Москва : Транспорт, 1977. – 222 с.
- 6 **Захарченко, Д. Д.** Тяговые электрические машины и трансформаторы : учебник для вузов железнодорожного транспорта / Д. Д. Захарченко. – Москва : Транспорт, 1979. – 303 с.
- 7 Оптимизация алгоритмов системы управления электровозов 3ЭС5К с поосным регулированием силы тяги / М. А. Слепцов, И. П. Васильев, С. А. Старовойтов, И. Ю. Мартынюк // Известия Петербургского университета путей сообщения. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 366–377. – ISSN 1815-588X.
- 8 **Розенфельд, В. Е.** Теория электрической тяги : учебник для вузов железнодорожного транспорта / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1993. – 328 с.
- 9 **Аганов, Р. А.** Методика теплового расчета обмотки якоря тягового электродвигателя электропоездов и непосредственный контроль температуры

References

- 1 Long-term development program of JSC "Russian Railways" until 2025 : approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated 03/19/2019 No. 466r. – URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAga2RXSVoKu.pdf> (date of access: 11/27/2024).
- 2 Double heavyweight. Dozens of trains weighing 14,200 tons successfully passed through the Eastern polygon // Gudok. – 2022. – No. 10.
- 3 The emergence of transformer EMF in the armature sections of the traction electric motor of an alternating current electric locomotive in full and attenuated field modes and ways to reduce it / T. V. Volchek, O. V. Melnichenko, A. O. Linkov, S. G. Shramko // Bulletin of the Rostov State University of Railways. – 2020. – No. 1 (77). – P. 41–48 – ISSN 0201-727X.
- 4 **Nakhodkin, M. D.** Designing traction electric machines / M. D. Nakhodkin. – Moscow : Transport, 1976. – 623 p.
- 5 **Kurbasov, A. S.** Improving the efficiency of traction electric motors / A. S. Kurbasov. – Moscow : Transport, 1977. – 222 p.
- 6 **Zakharchenko, D. D.** Traction electric machines and transformers : a textbook for higher education institutions of railway transport / D. D. Zakharchenko. – Moscow : Transport, 1979. – 303 p.
- 7 Optimization of algorithms for the control system of 3ES5K electric locomotives with axial traction control / M. A. Sleptsov, I. P. Vasiliev, S. A. Starovoytov, I. Y. Martynyuk // Proceedings of Petersburg Transport University. – Saint Petersburg : PGUPS, 2020. – Vol. 17. – Issue 3. – P. 366–377. – ISSN 1815-588X.
- 8 **Rosenfeld, V. E.** Theory of electric traction : a textbook for higher education institutions of railway transport / V. E. Rosenfeld, I. P. Isaev, N. N. Sidorov // 2nd ed., revised and enlarged. Moscow : Transport, 1993. – 328 p.
- 9 **Aganov, R. A.** Methodology of thermal calculation of the armature winding of a traction electric

якоря с помощью контактного датчика / Р. А. Аганов, В. В. Михайлов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 2. – С. 48–52. – ISSN 0201-727X.

10 **Волчек, Т. В.** Методы определения температуры нагрева обмоток тяговых электродвигателей электровозов / Т. В. Волчек, Р. В. Волчек // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Чита : Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО ИрГУПС, 2022. – Т. 1. – С. 15–19.

motor of electric trains and direct control of the armature temperature using a contact sensor / R. A. Aganov, V. V. Mikhailov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2012. – No. 2. – P. 48–52. – ISSN 0201-727X.

10 **Volchek, T. V.** Methods for determining the heating temperature of windings of traction electric motors of electric locomotives / T. V. Volchek, R. V. Volchek // Education – Science – Production : Materials of the VI All-Russian scientific and practical conference (with international participation). – Chita : Zabaikalsky Institute of Railway Transport – branch of FSBEI HE IrSTU, 2022. – Vol. 1. – P. 15–19.

T. V. Volchek, V. S. Tomilov

IMPROVEMENT OF METHODS FOR MONITORING THE CONDITION OF A COLLECTOR TRACTION ELECTRIC MOTOR DURING ITS OPERATION

Abstract. The article considers the development prospects of the Eastern polygon, indicates the need to increase the service life of the equipment of the operated electric locomotives. The statistics of equipment failures of the Ermak series electric locomotives is presented. It is revealed that the greatest number of failures occurs in the traction electric motor, namely, in its collector-brush device due to the occurrence of an electric arc transfer and insulation breakdown. The reasons for their occurrence are considered. It is proposed to equip traction electric motors with additional sensors, namely: a spark alarm, which will allow timely detection of sparking in the collector-brush device and prevent the formation of a circular fire, and temperature sensors, which will allow direct determination of the winding temperature. The article presents the installation locations of these sensors.

Keywords: traction electric motor, switching, unbalanced EMF, sparking, temperature control, insulation breakdown, circular fire.

For citation: Volchek, T. V. Improvement of methods for monitoring the condition of a collector traction electric motor during its operation / T. V. Volchek, V. S. Tomilov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 202–208. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_202.

Сведения об авторах

Волчек Татьяна Витальевна

Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС), кафедра «Эксплуатация железных дорог», кандидат технических наук, e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

Томилов Вячеслав Станиславович

Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС), кафедра «Эксплуатация железных дорог», кандидат технических наук, e-mail: tomilov_vs@krsk.irgups.ru

Information about the authors

Volchek Tatyana Vitalievna

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Branch of the Irkutsk State Transport University (KrIRT IrSTU), Chair «Railway Operation», Candidate of Engineering Sciences, e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

Tomilov Vyacheslav Stanislavovich

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Branch of the Irkutsk State Transport University, Chair «Railway Operation», Candidate of Engineering Sciences, e-mail: tomilov_vs@krsk.irgups.ru