

*Т. В. Волчек, В. С. Томилов, Л. С. Курманова, Р. В. Волчек*

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАРУШЕНИЯ КОММУТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

**Аннотация.** Рассмотрены перспективы развития Восточного полигона, с учетом которых возникает необходимость повышения ресурса работы оборудования эксплуатирующихся электровозов. Выявлено, что наибольшее количество отказов приходится на тяговый электродвигатель (ТЭД), а именно на его коллекторно-щеточный аппарат из-за возникновения переброса электрической дуги, рассмотрены причины ее появления. Разработана методика определения степени искрения ТЭД на основе сравнения аналитически рассчитанных величин реактивной ЭДС и межламельного напряжения интеллектуальным блоком с допустимыми их величинами, установленными опытным путем. Представлен алгоритм работы предлагаемого программно-аппаратного комплекса мониторинга ТЭД электровоза во время эксплуатации.

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

**Для цитирования:** Разработка методики определения нарушения коммутационной устойчивости коллекторных тяговых электродвигателей / Т. В. Волчек, В. С. Томилов, Л. С. Курманова, Р. В. Волчек // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 72–79. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_72.

### *Введение*

Железнодорожный транспорт является одним из ключевых элементов транспортной инфраструктуры. Эффективность его работы во многом определяется надёжностью и долговечностью тягового подвижного состава, в частности тяговых электродвигателей электровозов. В условиях интенсивного использования железнодорожного транспорта ТЭД подвергаются значительным нагрузкам, что зачастую приводит к преждевременному выходу их из строя. Это не только увеличивает расходы на ремонт и техническое обслуживание, но и может стать причиной задержек поездов и нарушения графика движения.

В рамках цифровой трансформации ОАО «РЖД» особое внимание уделяется оснащению подвижного состава современными системами контроля [1]. Одним из наиболее перспективных направлений является применение предиктивной аналитики для обслуживания подвижного состава. Алгоритмы машинного обучения анализируют огромные массивы данных о работе оборудования и выявляют признаки потенциальных неисправностей заблаговременно до их возникновения. В результате снижается количество внезапных отказов техники, следовательно, снижается простой электровозов и повышается надёжность оборудования.

В связи с этим одной из важнейших задач ОАО «РЖД» является поддержание локомотивного парка в исправном техническом состоянии, что позволит обеспечить его устойчивую работу.

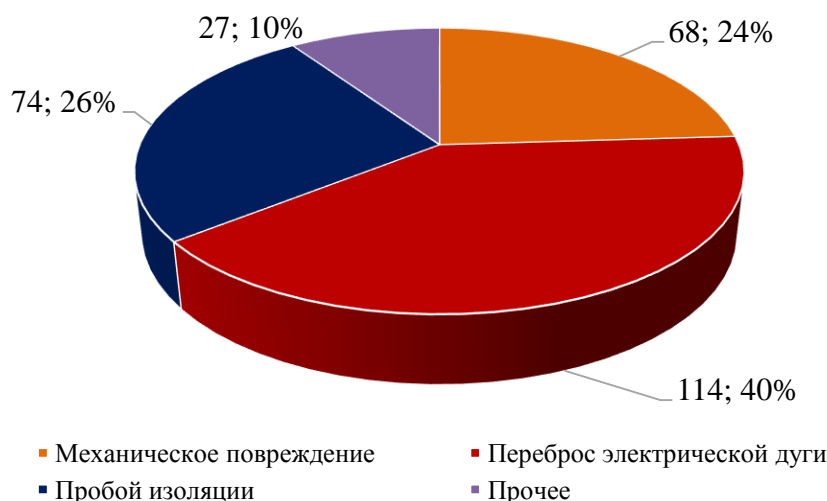
### *Анализ работы ТЭД электровозов серии «Ермак»*

В результате анализа отказов оборудования электровозов переменного тока серии «Ермак» за 2024 год установлено, что 27 % отказов (565 отказов) от общего количества (1780 отказов) составляет силовое оборудование, из которого 50 % приходится на ТЭД. Как показывает статистика, около 40 % отказов ТЭД происходит вследствие возникновения переброса электрической дуги. Причинами такого дефекта являются:

– недопустимое искрение коллекторно-щеточного аппарата, как правило, выше 1 ½ степени искрения;

– недопустимая величина межламельного напряжения ( $e_{\max}$ ), согласно [2], для двигателя типа НБ-514  $e_{\max} = 35,5$  В.

Возникают данные явления вследствие неудовлетворительного протекания процесса коммутации, технологических и механических причин (рис. 1).



**Рис. 1. Диаграмма распределения причин отказов ТЭД электровозов серии «Ермак» приписки Красноярской дирекции тяги**

Как правило, неудовлетворительное протекание процесса коммутации образуется по причине возникновения недопустимой величины небалансной ЭДС ( $\Delta e_p$ ), для ТЭД пульсирующего тока она определяется по формуле

$$\Delta e_p = e_p - e_k + e_r, \quad (1)$$

где  $e_r$  – трансформаторная ЭДС, которая образуется из-за пульсации магнитного потока;  $e_k$  – компенсационная ЭДС [3–8].

Для расчета реактивной ЭДС возможно воспользоваться формулой ученого А.Б. Иоффе [3]

$$e_p = \frac{8 \times i_a \times u_k \times \omega_c^2 \times \lambda \times l_a \times v_k}{(\gamma + u_k + \varepsilon_k - \frac{a}{p}) \times t_k}, \quad (2)$$

где  $i_a$  – ток секции, А;  $u_k$  – число коллекторных пластин на один паз, шт.;  $\omega_c$  – число витков в секции, шт.;  $\lambda$  – удельная магнитная проводимость потока рассеяния паза, г/м;  $l_a$  – длина якоря, м;  $v_k$  – окружная скорость коллектора, м/с;  $\gamma$  – коэффициент щеточного перекрытия;  $\varepsilon_k$  – укорочение якорной обмотки в коллекторных делениях;  $a$  – число пар параллельных ветвей обмотки якоря, мм;  $p$  – число пар полюсов, шт.;  $t_k$  – коллекторное деление.

Согласно [2] для двигателей типа НБ-514 максимальная  $e_p$  равна 5,4 В. Для двигателя типа НБ-514Е данная величина аналогична.

Коммутирующая ЭДС определяется по выражению

$$e_k = 2 \times B_k \times l_a \times v_a \times \omega_c, \quad (3)$$

где  $B_k$  – индукция в зоне коммутации;  $v_a$  – окружная скорость якоря, м/с.

Величину  $\Delta e_p$  для нормальных условий работы определить довольно трудно. Однако при переходном процессе, когда образуется резкий скачок тока, как известно, реактивная ЭДС пропорционально изменяется величине тока, в это время магнитный поток не успевает значительно измениться, что позволяет принять величины трансформаторной и компенсационной ЭДС мало изменяющимися [6]. Тогда определив аналитически  $e_p$  возможно определить  $\Delta e_p$ .

Что касается величины максимального межламельного напряжения, то его можно рассчитать по формуле [3, 10]

$$e_{\max} = \frac{e_{\text{ср}}}{a_\delta} \times \frac{I_B \times \omega_B + \alpha_\delta \times \omega'_a - \omega_{\text{ко}} + \frac{1}{Z_{\text{ко}}} \times \alpha_\delta \times \omega'_a}{\frac{I_B \times \omega_B}{I_a}}, \quad (4)$$

где  $e_{\text{ср}}$  – среднее межламельное напряжение, В;  $a_\delta$  – коэффициент полюсного перекрытия;  $I_B$  – ток возбуждения, А;  $I_a$  – ток якоря, А;  $\omega'_a$  – число витков обмотки якоря, отнесенных к одному полюсу;  $\omega_{\text{ко}}$  – число витков компенсационной обмотки, шт.;  $Z_{\text{ко}}$  – число пазов компенсационной обмотки на полюс, шт.;  $\omega_B$  – число витков обмотки возбуждения, шт.

Среднее межламельное напряжение определяется по формуле

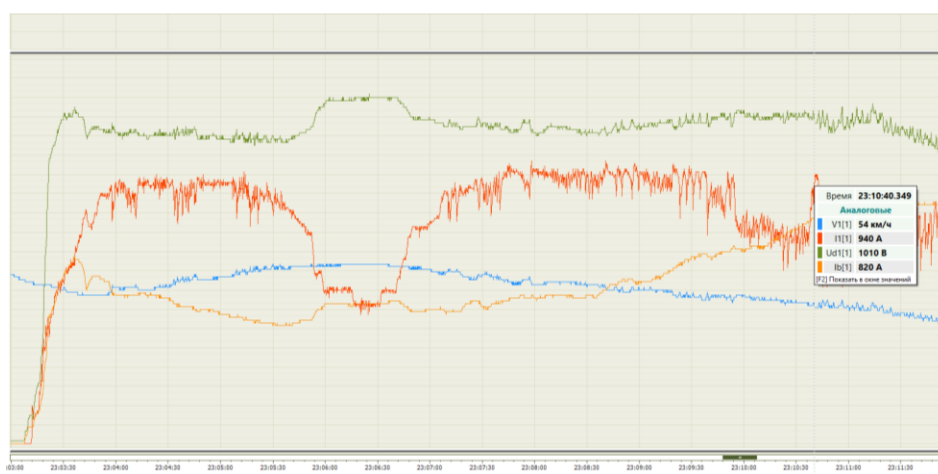
$$e_{\text{ср}} = \frac{2 \times N \times U_{\text{д}}}{K}, \quad (5)$$

где  $N$  – общее число активных проводников обмотки якоря, шт;  $U_{\text{д}}$  – напряжение на двигателе, В;  $K$  – число коллекторных пластин, шт.

#### *Методика определения степени искрения коллекторно-щеточного аппарата ТЭД электровоза при эксплуатации*

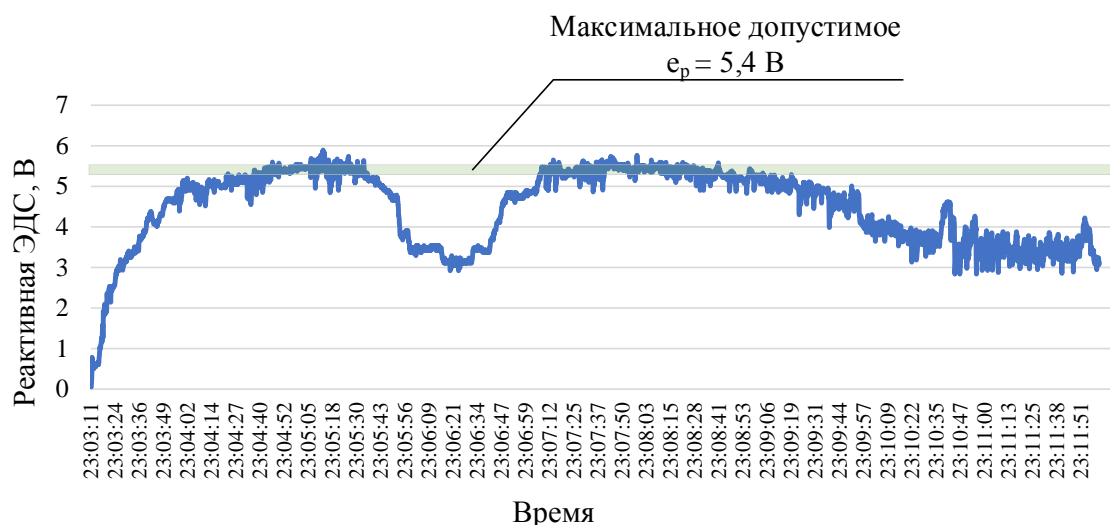
Предлагается разработать программно-аппаратный комплекс на основе искусственного интеллекта для мониторинга степени искрения коллекторно-щеточного аппарата ТЭД электровоза при эксплуатации. Данный комплекс будет включать в себя интеллектуальный блок, на который будут поступать данные тока якоря и возбуждения, напряжения тягового электродвигателя, скорости электровоза с микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД).

На рис. 2 представлена диаграмма расшифровки данных со МСУД электровоза серии ЗЭС5К, на которой изображены скорость электровоза ( $V1$ ), ток якоря ( $I1$ ), напряжения ТЭД ( $U_d$ ), ток возбуждения ( $Ib$ ).

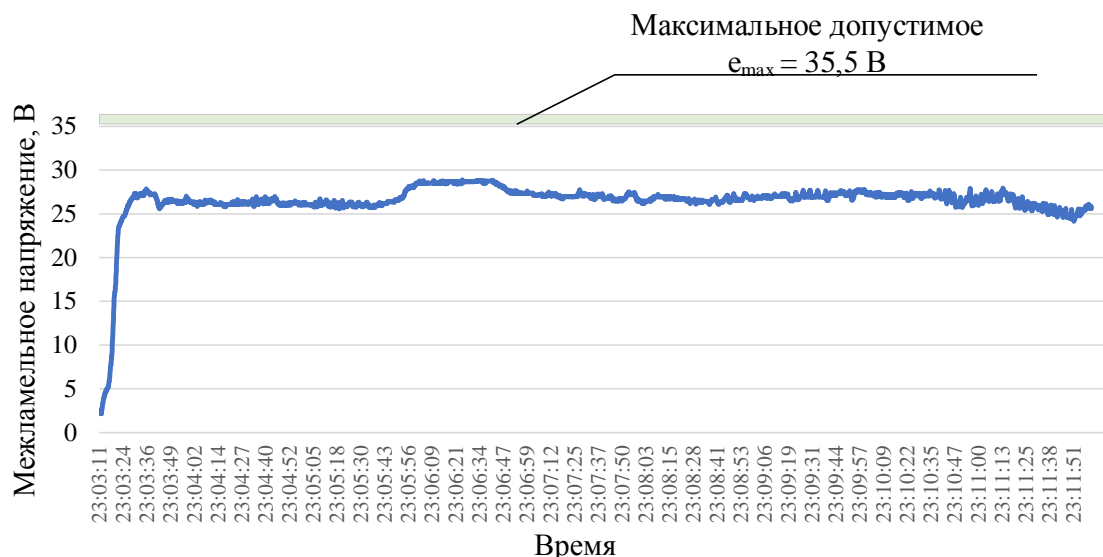


**Рис. 2.** Диаграмма расшифровки данных со МСУД электровоза серии ЗЭС5К

Далее аналитически с помощью конструктивных показателей ТЭД [11] и поступающих со МСУД показателей рассчитываются реактивная ЭДС и межламельное напряжения по выражениям (2) и (4), рис. 3, 4. Затем полученные значения сравниваются с допустимыми величинами, которые также будут уточняться в процессе эксплуатации для определенного типа двигателя, и на основе ГОСТ 2582–2013 будет установлена соответствующая степень искрения.



**Рис. 3.** График реактивной ЭДС, построенный по конструктивным данным ТЭД и данным со МСУД



**Рис. 4. График межламельного напряжения, построенный по конструкционным данным ТЭД и данным со МСУД**

Ученым А.С. Курбасовым установлена зависимость межламельного напряжения от величины некомпенсированной ЭДС, при которой отсутствует вспышка под щетками коллектора:

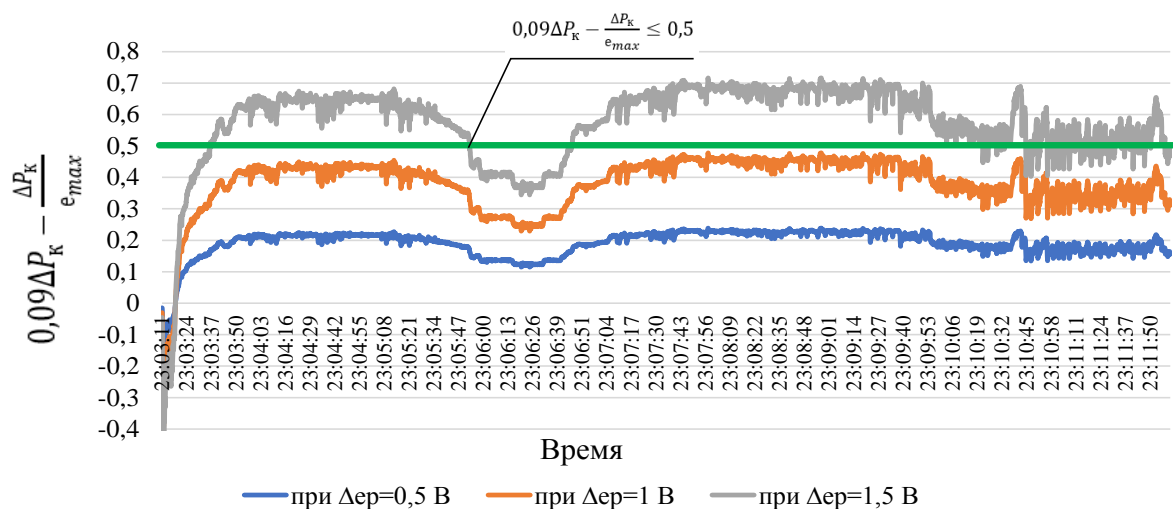
$$0,09\Delta P_k - \frac{\Delta P_k}{e_{\max}} \leq 0,5, \quad (6)$$

где  $\Delta P_k$  – некомпенсированная часть мощности, определяется как

$$\Delta P_k = i_a \times \Delta e_p \times \gamma. \quad (7)$$

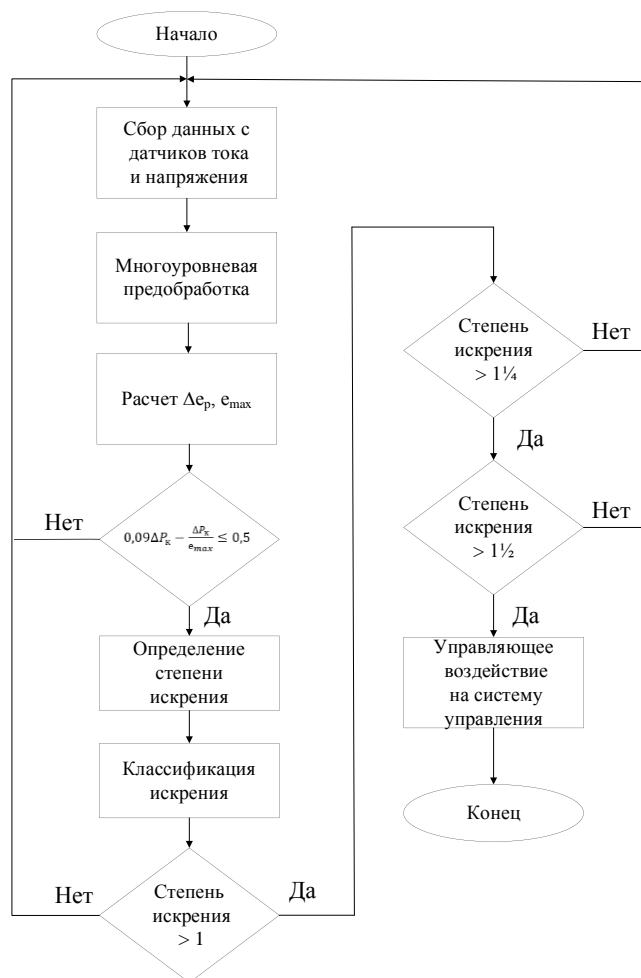
Используя график межламельного напряжения, построим зависимость условия (7) от величины  $\Delta e_p$  при условии, если  $\Delta e_p = 0,5$  В,  $\Delta e_p = 1$  В и  $\Delta e_p = 1,5$  В (рис. 5).

Из анализа рис. 5 видно, что при величине  $\Delta e_p$  более 1 В условие отсутствия вспышки под щетками коллектора не выполняется, это свидетельствует о появлении искрения. В интеллектуальном блоке при переходных процессах величина  $\Delta e_p$  будет определяться автоматически, величина компенсированной ЭДС будет принята равной ее величине в нормальных условиях до возникновения переходного процесса.



**Рис. 5. График зависимости межламельного напряжения от величины некомпенсированной ЭДС**

На рис. 6 представлен график работы предлагаемого программно-аппаратного комплекса мониторинга искрения ТЭД электровоза во время эксплуатации.



**Рис. 6. Алгоритм работы предлагаемого программно-аппаратного комплекса мониторинга ТЭД электровоза во время эксплуатации**

Алгоритм реализует непрерывный цикл предиктивного контроля и защиты ТЭД в реальном времени. На первом этапе производится сбор данных, система непрерывно получает эксплуатационные параметры от МСУД электровоза (ток якоря, ток возбуждения, напряжение на ТЭД, скорость движения). На основе полученных данных и конструктивных параметров ТЭД интеллектуальный блок в реальном времени рассчитывает критические параметры коммутации, а именно: реактивную ЭДС ( $e_r$ ) по формуле (2), максимальное межламельное напряжение ( $e_{max}$ ) по формуле (4), величину небалансной ЭДС ( $\Delta e_p$ ) косвенно или напрямую (на основе анализа переходных процессов). Рассчитанные значения сравниваются с установленными критическими порогами (например, для ТЭД типа НБ-514  $e_{rmax} = 5,4$  В,  $e_{max} = 35,5$  В,  $\Delta e_p > 1$  В как потенциальный признак искрения) и проверяется условие устойчивости по формуле (6). На основе этого анализа определяется текущая степень искрения коллекторно-щеточного аппарата в соответствии со степенями искрения по ГОСТ 2582–2013. При обнаружении искрения степени  $1\frac{1}{2}$  интеллектуальный блок немедленно формирует управляющий сигнал на отключение данного ТЭД. Это экстренная мера для предотвращения развития кругового огня. При обнаружении искрения любой степени (включая менее  $1\frac{1}{2}$ ) система передает аварийное сообщение машинисту локомотива. Это позволяет принять меры для снижения нагрузки на ТЭД и предотвратить развивающуюся неисправность. Процесс повторяется непрерывно на протяжении всей работы электровоза, обеспечивая постоянный мониторинг состояния ТЭД и оперативное реагирование на возникающие нарушения коммутационной устойчивости.

#### **Заключение**

1 В результате анализа отказов электровозов серии «Ермак» установлено, что до 50 % отказов силового оборудования (или ~282 отказа из 565) приходится на ТЭД, причем ~40 % этих отказов ТЭД

(113 случаев) вызваны перебросом электрической дуги в коллекторно-щеточном аппарате по причине нарушения коммутации.

2 Определены ключевые параметры-индикаторы, которые приводят к нарушению коммутации и развитию опасного искрения. Данные параметры напрямую связаны с превышением допустимого значения небалансной ЭДС ( $\Delta e_p > 1$  В).

3 Разработана и алгоритмизирована предиктивная методика, предложен интеллектуальный программно-аппаратный комплекс, который в реальном времени на основе конструктивных параметров ТЭД и эксплуатационных данных (ток якоря  $I_a$ , ток возбуждения  $I_b$ , напряжение ТЭД  $U_d$ , скорость  $V$  от датчиков МСУД) аналитически рассчитывает текущие значения реактивной ЭДС ( $e_r$ ) и максимального межламельного напряжения ( $e_{\max}$ ), сравнивает расчетные значения  $e_r$  и  $e_{\max}$  с их критическими порогами и анализирует условие устойчивости, определяя величину  $\Delta e_p$ , далее автоматически диагностирует степень искрения коллекторно-щеточного аппарата на основе превышения порогов и корреляции  $\Delta e_p > 1$  В с возникновением искрения.

### Список литературы

1 **Ларченко, Е. А.** Цифровая трансформация производственной системы управления в локомотиворемонтном комплексе ОАО «РЖД» / Е. А. Ларченко, А. С. Дубинина, А. А. Еременко // Российская экономика в условиях структурной трансформации : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 02 июня 2023 года / под общей редакцией Д. Н. Ганченко, О. А. Цвиркун. – Москва : «Актуальность.РФ», 2023. – С. 131–139.

2 **Дубровский, З. М.** Грузовые электровозы переменного тока : справочник / З. М. Дубровский, В. И. Попов, Б. А. Тушканов. – Москва : Транспорт, 1991.

3 **Иоффе, А. Б.** Тяговые электрические машины / А. Б. Иоффе. – Москва : Госэнергоиздат, 1967. – 248 с.

4 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). – ISSN 0201-727X.

5 **Находкин, М. Д.** Проектирование тяговых электрических машин / М. Д. Находкин. – Москва : Транспорт, 1976. – 623 с.

6 **Курбасов, А. С.** Повышение работоспособности тяговых электродвигателей / А. С. Курбасов. – Москва : Транспорт, 1977. – 222 с.

7 **Захарченко, Д. Д.** Тяговые электрические машины и трансформаторы : учебник для вузов железнодорожного транспорта / Д. Д. Захарченко. – Москва : Транспорт, 1979. – 303 с.

8 **Волчек, Т. В.** Математическое моделирование энергоэффективной системы ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов переменного тока / Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков // Известия Транссиба. – 2019. – № 3 (39). – С. 2–14. – ISSN 2220-4245.

### References

1 **Larchenko, E. A.** Digital transformation of the production management system in the locomotive repair complex of JSC Russian Railways / E. A. Larchenko, A. S. Dubinina, A. A. Eremenko // Russian economy in the context of structural transformation : collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference, Novokuznetsk, June 02, 2023 / under the general editorship of D. N. Ganchenko, O. A. Tsvirkun. – Moscow : “Aktualnost.RF”, 2023. – P. 131–139.

2 **Dubrovsky, Z. M.** Freight electric locomotives with alternating current : handbook / Z. M. Dubrovsky, V. I. Popov, B. A. Tushkanov. – Moscow : Transport, 1991.

3 **Ioffe, A. B.** Traction electric machines / A. B. Ioffe. – Moscow : Gosenergoizdat, 1967. – 248 p.

4 The emergence of transformer EMF in the sections of the anchor of the traction motor of an AC electric locomotive in full and weakened field modes and ways to reduce it / T. V. Volchek, O. V. Melnichenko, A. O. Linkov, S. G. Shramko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2020. – No. 1 (77). – ISSN 0201-727X.

5 **Nakhodkin, M. D.** Design of traction electric machines / M. D. Nakhodkin. – Moscow : Transport, 1976. – 623 p.

6 **Kurbasov, A. S.** Increasing the performance of traction electric motors / A. S. Kurbasov. – Moscow : Transport, 1977. – 222 p.

7 **Zakharchenko, D. D.** Traction electric machines and transformers : textbook for higher education institutions of railway transport / D. D. Zakharchenko. – Moscow : Transport, 1979. – 303 p.

8 **Volchek, T. V.** Mathematical modeling of an energy-efficient field weakening system for traction electric motors of AC electric locomotives / T. V. Volchek, O. V. Melnichenko, A. O. Linkov // Izvestia Transsiba (Journal of Transsib railway

9 Разработка способа и устройства для снижения пульсации тока возбуждения тягового электродвигателя электровоза в режиме ослабления поля / Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко, А. О. Линков, С. Г. Шрамко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 3 (63). – С. 163–171. – DOI 10.26731/1813-9108.2019.3(63).163-171.

10 **Фролов, Н. О.** Способ определения предотказных состояний тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 на основе анализа данных бортового регистратора параметров его работы / Н. О. Фролов, Е. М. Елькин // Транспорт Урала. – 2024. – № 3 (82). – С. 77–81. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-3-77-81.

11 **Зарифьян, А. А.** Изучение электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь / А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (83). – С. 81–89. – DOI 10.46973/0201727X\_2021\_3\_81.

studies). – 2019. – No. 3 (39). – P. 2–14. – ISSN 2220-4245.

9 Development of a method and device for reducing the excitation current pulsation of an electric locomotive traction motor in the field weakening mode / T. V. Volchek, O. V. Melnichenko, A. O. Linkov, S. G. Shramko // Modern technologies. Systems analysis. Modeling. – 2019. – No. 3 (63). – P. 163–171. – DOI 10.26731/1813-9108.2019.3(63).163-171.

10 **Frolov, N. O.** Method for determining pre-failure conditions of traction motors of 2ES6 electric locomotive based on analysis of data from the onboard recorder of its operating parameters / N. O. Frolov, E. M. Elkin // Transport of the Urals. – 2024. – No. 3 (82). – P. 77–81. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-3-77-81.

11 **Zarifyan, A. A.** Study of electromechanical processes in a collector traction motor taking into account losses / A. A. Zarifyan, A. Sh. Mustafin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2021. – No. 3 (83). – P. 81–89. – DOI 10.46973/0201727X\_2021\_3\_81.

*T. V. Volchek, V. S. Tomilov, L. S. Kurmanova, R. V. Volchek*

#### **DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE VIOLATION OF COMMUTATION STABILITY OF COLLECTOR TRACTION ELECTRIC MOTORS**

**Abstract.** The article discusses the development prospects of the Eastern Polygon, which indicate the need to increase the service life of the equipment of electric locomotives in operation. It was 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. The reasons for its occurrence are considered. A method for determining the degree of sparking of the traction electric motor has been developed based on a comparison of the analytically calculated values of reactive EMF and interlamellar voltage by the intelligent unit with their permissible values established empirically. The article presents an algorithm for the operation of the proposed software and hardware complex for monitoring the traction motor of an electric locomotive during operation.

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

**For citation:** Development of a method for determining the violation of the commutation stability of collector traction electric motors / T. V. Volchek, V. S. Tomilov, L. S. Kurmanova, R. V. Volchek // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3. – P. 72–79. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_72.

#### **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

#### **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

**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.irkups.ru

**Курманова Лейла Салимовна**  
Приволжский государственный универси-  
тет путей сообщения (ПривГУПС),  
кафедра «Тяговый подвижной состав»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: leyla\_kurmanova@mail.ru

**Волчек Роман Витальевич**  
Сибирский федеральный университет,  
кафедра «Нефтегазовое дело»,  
студент,  
e-mail: roma.volchek2004@mail.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.irkups.ru

**Kurmanova Leila Salimovna**  
Samara State Transport University  
(SamGUPS),  
Chair “Traction Rolling Stock”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: leyla\_kurmanova@mail.ru

**Volchek Roman Vitalievich**  
Siberian Federal University,  
Chair “Oil and Gas Business”,  
Student,  
e-mail: roma.volchek2004@mail.ru