

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.03

УДК 621.313

О.А. Филина, А.Н. Цветков, А.Н. Хуснутдинов, А.Г. Логачева

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассматривается проблема технической диагностики на городском электрическом транспорте и электрооборудовании. По причине отсутствия методик своевременного контроля состояния щеточно-коллекторного узла (ЩКУ) и непринятия мер по восстановлению работоспособного состояния около 50–60 % из них приходят в негодность, не отработав до полного срока эксплуатации. Совершенствование конструкции ЩКУ, разработка новых и усовершенствование существующих методов повышения надежности эксплуатации ЩКУ являются актуальной задачей, направленной на повышение долговечности и безотказности работы электродвигателя постоянного тока (ЭДПТ) в целом. **Цель исследования** – разработка усовершенствованного щеточно-коллекторного узла электродвигателей постоянного тока с повышенной надежностью. **Метод**, используемый для создания математической модели и методики оценки интенсивности отказов ЭДПТ и их аппаратной реализации, учитывает все недостатки рассмотренных аналогов и позволяет осуществлять мониторинг по отказам и неисправностям ЩКУ электродвигателей при работе на подвижном составе. **Результаты:** рассчитаны основные показатели надёжности ЩКУ. Разработана математическая модель для выявления видов отказов щеточно-коллекторного узла с учетом его технических характеристик (величина нажатия, биение, амплитуда вибрации), влияющих на показатели надежности в процессе эксплуатации. Разработана программа контроля эффективности функционирования усовершенствованного ЩКУ ЭДПТ с повышенной надежностью в процессе эксплуатации для продления его срока службы. **Практическая значимость:** с использованием предложенной модели на основании исследования видов отказов щеточно-коллекторного узла ЭДПТ разработана усовершенствованная конструкция щеточного узла, которая позволяет увеличить ресурс щетки и снизить затраты на техническое обслуживание ЭДПТ в процессе эксплуатации. Предложены рекомендации для перехода к ремонту электродвигателей подвижного состава по фактическому состоянию.

Ключевые слова: повышение надёжности, спектральный метод, компонент, процесс преобразования, методика, наработка, неисправность, возможные состояния.

O.A. Filina, A.N. Tsvetkov, A.N. Khusnutdinov, A.G. Logacheva

Kazan State Energy University, Kazan, Russian Federation

IMPROVEMENT OF RELIABILITY OF THE IMPROVED BRUSH-COLLECTOR ASSEMBLY OF THE DC MOTOR OF THE MOBILE COMPOSITION

This article is sanctified to the problem to technical diagnostics on a public electric transport and electrical equipment. By reason of absence of methodologies of timely control of the state of brush-collector knot (BCK) and acceptance of measures on renewal of the capable of working state, about 50-60 % comes in uselessness, not working to the complete term of exploitation. Perfection of construction of BCK, development of new and improvement of existent methods of increase of reliability of exploitation of BCK, is the actual task sent to the increase of longevity and faultlessness of work of electric motors on the whole. **Purpose** is to develop the improved brush-collector knot of electric motors of direct-current with enhances able reliability. **Methods** used for creation of mathematical model and development of methodology for estimation the electric motors refuses intensity and hardware takes into account all lacks of the considered analogues and allows to carry out monitoring on refuses and disrepairs of BCK of electric motors during work on a rolling stock. **Results** basic reliability indexes of BCK were expected. A mathematical model is worked out for the exposure of types of refuses of brush-collector knot taking into account his technical descriptions (size of pressure, beating, amplitude of vibration) influencing on reliability indexes in the process of exploitation. The scrutinous of efficiency of functioning of improved BCK electric motors program is worked out with enhance able reliability in the process of exploitation for the extension of his time of service. **Practical relevance:** the offered model on the basis of research of types of refuses of brush-collector knot of electric motors is worked out the improved construction of a brush knot, that allows to increase the resource of brush and bring down expenses on technical maintenance of electric motors in the process of exploitation. Recommendations offer for passing to repair of electric motors on the actual state for a rolling stock.

Keywords: reliability improvement, spectral method, component, conversion process, method, operating time, fault, possible states.

Введение. В настоящее время в мире эксплуатируется значительное количество электродвигателей постоянного тока (ЭДПТ), которые рассчитаны на определенный ресурс. После его выработки эксплуатационная надежность ЭДПТ снижается. Продление эксплуатационного ресурса ЭДПТ без снижения его надежности является актуальной и экономически целесообразной задачей.

Основные элементы ЭДПТ: статор (главный и дополнительные полюса), ротор (якорь), коллектор и токопроводящие щетки. Выделяются основные неисправности ЭДПТ, такие как обрыв в обмотке якоря, соединение обмотки якоря с корпусом, витковое замыкание в обмотке якоря, неправильное чередование главных и дополнительных полюсов, сдвинутые щетки с линии геометрической нейтрали, неисправности коллектора, искрение щеток, сопровождающее повышенный нагрев коллектора и всего электродвигателя, перегрев обмотки якоря [1].

По причине отсутствия методик своевременного контроля состояния щеточно-коллекторного узла (ЩКУ) и непринятия мер по восстановлению его работоспособного состояния около 50–60 % из них приходят в негодность, не отработав до полного срока эксплуатации.

Совершенствование конструкции ЩКУ, разработка новых и совершенствование существующих методов повышения надежности эксплуатации ЩКУ являются актуальной задачей, направленной на повышение долговечности и безотказности работы ЭДПТ в целом.

Повышение надежности ЩКУ достигается несколькими путями, в том числе внедрением современных, высокоточных, объективных методов контроля технического состояния и диагностики, что позволяет своевременно определить зарождающиеся дефекты, спрогнозировать изменение технического состояния и принять меры к устранению дефектов и совершенствованию конструкции.

1. Основное направление повышения надежности ЩКУ. Основные показатели надежности носят вероятностный характер и оцениваются статистически на основании информации о надежности.

Основные факторы, влияющие на надежность электродвигателя: выбор схемы и конструкционного решения при проектировании ЭДПТ; установление элементов, входящих в него; выбор материалов; назначение режимов нормальной эксплуатации; организация ТО и ремонта; выбор режимов обкатки и испытания электродвигателей; обоснование и разработка технологических процессов на изготовление или ремонт деталей и сборку. Так, в ЭДПТ такими узлами являются щеточно-коллекторный узел, якорь, обмотка полюсов и подшипниковый узел [2, 3].

Количественная оценка надежности работы различных технических систем проводится путем точного определения показателя надежности. Он возрастает по мере увеличения повторности информации, приближаясь к своему пределу – математическому отклонению [4, 5].

Надежность эксплуатации ЭДПТ во многом определяется техническим состоянием ЩКУ в целом, щеток и коллектора в частности. Повышение надежности и ресурса щеточно-коллекторного узла электродвигателей постоянного тока (ЩКУ ЭДПТ), применяемых на подвижном составе городского электрического транспорта обусловлено постоянно возрастающими требованиями к совершенствованию его конструкции, ростом скоростей, нагрузок, повышением требований к технико-экономической эффективности [6, 7].

Анализ методов повышения надежности ЩКУ на практике показал обратное: внедряемые до настоящего времени методы приводят к недостаточному интенсивному выносу электропроводящих продуктов износа щеток, загрязняя и коллекторные пластины. В других случаях щетки не вырабатывают полностью свой ресурс до их замены [8, 9].

2. Математическая модель повышения надежности ЩКУ. Надежность и долговечность работы ЭДПТ и ЩКУ в эксплуатации зависят от нагревания, воздействия внешних факторов и т.п. Экономичная работа электродвигателей зависит от технического состояния элементов ЩКУ [10, 11].

Согласно математической модели в качестве критериев для определения оптимальной периодичности ТО ЭДПТ могут быть использованы следующие характеристики:

– надежность щеточно-коллекторного узла во многих случаях может быть определена как вероятность безотказной работы щеточно-аппарата

$$P_{\text{щкы}}(t) \approx P_{\text{ща}}(t); \quad (1)$$

– среднее статистическое значение времени отказов щеток

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i, \quad (2)$$

а среднеквадратическое отклонение отрезков времени

$$\sigma_{\text{щ}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{T})^2}, \quad (3)$$

где t_i – время отказа i -й щетки.

Тогда надежность ЩКУ в течение времени t_i может быть определена по экспоненциальному уравнению

$$P(t) = \exp(-t/T_{\text{cp}}). \quad (4)$$

Представляет интерес случай, когда величина $x = \Delta t$ – достаточно малая. Тогда рассматривается вероятность $\lambda(t)$ отказа щетки на интервале $[t, t + \Delta t]$ при условии, что нет отказа до момента t .

Введенное обозначение функции $\lambda(t)$ называется интенсивностью отказа. Интенсивность отказа есть плотность условной вероятности события, состоящего в том, что щетка, проработавшая безотказно до момента времени t , откажет в промежутке времени $[t, t + \Delta t]$, который предполагается малым. Отсюда видно, что вероятность безотказной

работы ЩКУ на интервале $[t, t + \Delta t]$ определяется только через $\lambda(t)$ (рис. 1) [12, 13]. Следовательно, интенсивность отказа $\lambda(t)$ является локальной характеристикой надежности. Интенсивность отказов определяет периодичность профилактики ЩКУ. Предсказание внезапных отказов и планирование различных мероприятий связаны с обеспечением надежности ЭДПТ при его эксплуатации путем анализа характеристик $\lambda(t)$. Она характеризует надежность невосстанавливаемых частей, такой и является щетка.



Рис. 1. Изменение интенсивности отказов ЩКУ: I – период притирки щетки, II – эксплуатация; III – аварийный износ щетки

В частности, закон Вейбула выражается в виде

$$P(t) = \exp[-\lambda t^\alpha], \quad (5)$$

где λ , α – параметры.

С увеличением времени наработки эффективность снижается:

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t), \quad (6)$$

где $F(t)$ – интегральная функция времени работы до отказа.

Следовательно, дифференциальный закон (плотность) распределения:

$$F(t) = Q(t) = a(t). \quad (7)$$

Приведена зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ ЩКУ к вероятности отказа $Q(t)$ по причине износа щетки (рис. 2).

Данная зависимость служит критерием для определения периодичности ТО, который задается, исходя из технических, экономических и других соображений.

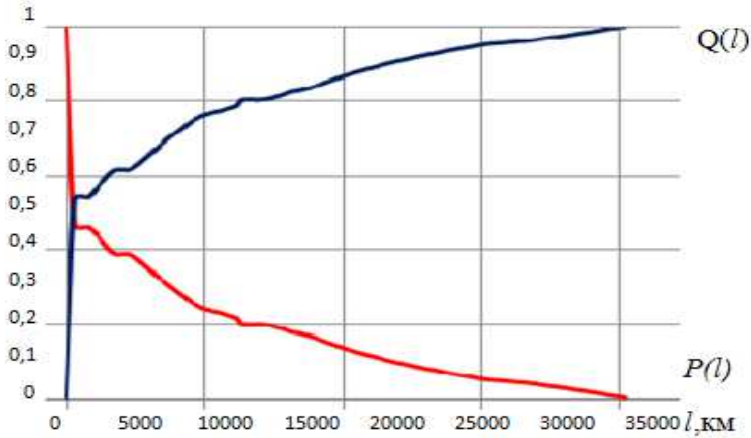


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы ЩКУ $P(t)$ к вероятности отказа ЩКУ $Q(t)$

Средняя скорость износа определяется как

$$\bar{v}_{щ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{щi}, \quad (8)$$

вероятность отказа щетки к моменту времени t с учетом скорости износа щетки определяется по формуле

$$Q_{щ}(t_i) = P \left\{ V_{hi} \geq \frac{H_0 - h_{[дон]}}{t_i} \right\} = \frac{1}{\sigma_{m_h} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{\frac{H_0 - h_{[дон]}}{t_i}}^{\infty} \exp \left[-\frac{(m_h - \bar{v}_h)^2}{2\sigma_{m_h}^2} \right] dm_h. \quad (9)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1. Они охватывают большое число факторов (конструктивно-технологических и эксплуатационных) и достаточно полно характеризуют надежность ЭДПТ в условиях эксплуатации.

Таблица 1

Результаты исследований по подвижному составу

| Год эксплуатации | Количество двигателей | Количество ЭДПТ, отказавших из-за ЩКУ | λ | $P(t)$ | Q | $t_{ср}$ |
|------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|
| 2013 | 340 | 276 | 0,0504 | 0,448052 | 0,551948 | 102,8324 |
| 2014 | 340 | 208 | 0,038 | 0,379562 | 0,620438 | 136,4507 |
| 2015 | 340 | 151 | 0,027 | 0,307536 | 0,692464 | 187,9585 |
| 2016 | 340 | 94 | 0,017 | 0,21659 | 0,78341 | 301,9334 |

По проведенным расчетам математическое ожидание всего количества значений Δh_i щеток $N_{щ}$, входящих в средний интервал износа n_i и применяемых на подвижном составе:

$$m_{\Delta h} = \frac{1}{N_{щ}} \sum \Delta h_i n_i = \frac{1}{808} 11396,88 = 14,10 \text{ мм.} \quad (10)$$

Среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_{\Delta h} \sqrt{\frac{1}{N_{щ}-1} (\sum \Delta h_i^2 n_i - m_{\Delta h}^2 N_{щ})} = 5,4, \quad (11)$$

Таким образом, для расчета $m\Delta h$, $\sigma\Delta h$ и $Q_{щ}(t_i)$ необходимо и достаточно знать значения средней скорости V_h и высоты износа щетки $\Delta h_i n_i$ в каждом из предлагаемых режимов работы ЭДПТ. К постепенным отказам ЩКУ относится износ щеток. Износ коллектора по сравнению с износом щеток, как показывает опыт эксплуатации, ничтожно мал, и поэтому в расчет не принимается [14, 15]. Данные интенсивности износа ЩКУ в ЭДПТ при использовании различных щеток приведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные интенсивности износа ЩКУ в ЭДПТ при использовании различных щеток

| Серия подвижного состава | Тип двигателя | Значения интенсивности износа коллекторов (мм/10 ⁵ км, числитель) и щеток (мм/10 ⁴ км, знаменатель) при работе электродвигателей со щетками марок | | | |
|-----------------------------------|---------------|---|-----------|-----------|-----------------|
| | | ЭГ14 | ЭГ74 | ЭГ61АК | составная щетка |
| Городской электрический транспорт | | | | | |
| КТМ | ДК-259М | | -/1,67 | | -/1,60 |
| ЛМ | ДК-259К | -/1,67 | | | -/1,60 |
| ТролЗа-5265 | ДК-410 | | -/2,50 | | |
| Железнодорожный подвижной состав | | | | | |
| ВЛ80 ^г | ЭД-118А | | 0,12/3,26 | 0,05/1,35 | 0,07/2,09 |
| ВЛ10 | Э108 | 0,17/- | | 0,04/1,90 | -/1,20 |
| ВЛ60 | НБ-412М | 0,21/4,20 | 0,20/3,30 | 0,03/1,80 | -/3,20 |

Основная информация, необходимая для диагностирования ЭДПТ, поступает при проведении испытаний и экспериментов, в ходе которых регистрировались отказы и наличие дефектов в узлах [16].

Основой расчета показателей качества и надежности является модель параметрического отказа, отражающая изменение выходного параметра ЭДПТ под действием различных факторов.

По мере ухудшения технического состояния щеточно-коллекторного узла увеличивается его виброускорение, которое не должно превышать $0,7\text{--}0,9 \text{ мм/с}^2$. Поэтому контроль за вибрацией и предотвращение повышенной вибрации являются важной и ответственной задачей. Для снижения вибрации на щеточно-коллекторном узле была изменена конструкция нажимной пластины. Благодаря диагностированию, в том числе вибродиагностике, рассматриваемой в работе, своевременно выявленные дефекты и заранее подготовленные запчасти могут снизить значительные потери рабочего времени и способствуют сокращению простоя вагонов в ремонте вследствие замены неисправных узлов и деталей.

Проводились экспериментальные исследования на электродвигателях, установленных на подвижном составе троллейбуса и трамвая. По накопленному количеству данных по ЭДПТ производилась прямая обработка данных сразу на ПК. Были выявлены основные диапазоны, отвечающие за определенные узлы ЭДПТ.

На корпус и на узел устанавливался пьезодатчик прибора для измерения и анализа вибрации «Корсар ++», замеряющий вибрации электродвигателя постоянного тока (спектр амплитуд виброускорения, виброскорости и виброперемещения) и СКЗ. После была обработка полученных спектров вибрации на программном обеспечении Atlant. На основании собранного массива данных переменной частоты и амплитуды с шагом каждые 2,5 Гц предложен расчет по формулам (12)–(15) и получена оценка каждого диапазона спектра вибрации (рис. 3).

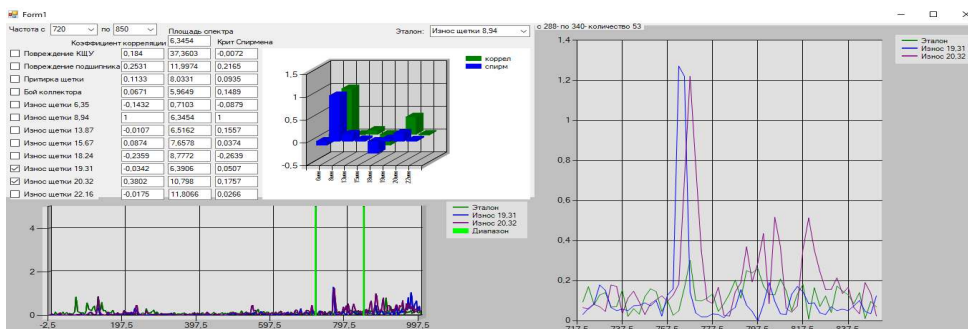


Рис. 3. Соответствие неисправностей частотам вибрации

Основные преимущества вибрационной диагностики:

- метод позволяет определять наличие скрытых дефектов;
- диагностика, считывание вибросигнала, как правило, не требует разборки оборудования;
- отмечается относительно небольшое время считывания необходимого спектра вибросигнала;
- есть возможность обнаружения неисправностей на этапе их зарождения;
- достигается снижение ожидаемого риска возникновения аварийной ситуации при эксплуатации оборудования.

После разработки методики вибродиагностики создана модель для оценки срока службы ЩКУ и всего электродвигателя постоянного тока [17, 18]. В методике использованы следующие критерии результатов сравнения эталонного и текущего спектров электродвигателей:

– коэффициент корреляции

$$r = \frac{\sum_1^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_1^n x_i) (y_i - \frac{1}{n} \sum_1^n y_i)}{\sqrt{\sum_1^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_1^n x_i)^2 \sum_1^n (y_i - \frac{1}{n} \sum_1^n y_i)^2}}; \quad (12)$$

– непараметрическая ранговая оценка Спирмена:

$$\rho_{x,y} = \frac{M[R_x R_y] - M[R_x] M[R_y]}{\sqrt{(M[R_x^2] - (M[R_x])^2)} \sqrt{(M[R_y^2] - (M[R_y])^2)}}; \quad (13)$$

– статистика знаков Фишера:

$$F_{\text{эмп}} = \frac{S_x^2}{S_y^2} = \frac{(\frac{1}{n_1}) \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{(\frac{1}{n_1}) \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}; \quad (14)$$

– Т-критерий Стьюдента:

$$t_{\text{эмп}} = \left| \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2 + \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{(n-1)n}}} \right|. \quad (15)$$

Благодаря предложенной математической модели выявлены определенные дефекты, степень износа щеток, остаточный ресурс узла. Оценка спектров сигналов вибрации показала наличие увеличения амплитуды в рассматриваемом диапазоне частот, выявляющих состояние коллекторно-щеточного узла.

Развитие методов вибродиагностики обуславливается не только наличием областей применения электродвигателей и требованием безаварийной работы систем, но и экономическими мотивами [19, 20].

Выводы. Задачи, поставленные в данной статье, решены и имеют перспективы дальнейшего научного развития. Разработанные методики и рекомендации могут быть использованы в научно-исследовательских учреждениях, конструкторских и проектных бюро, производственных предприятиях, на транспорте и в других организациях, занимающихся разработкой, производством и эксплуатацией как железнодорожных, так и других механических систем различного назначения.

Экономически обоснованный уровень надежности является основным критерием формирования системы ТО ЩКУ ЭДПТ. Недостаточная надежность в эксплуатации приводит к большому материальному ущербу. Экономически же эффект от повышения надежности ЩКУ проявляется в увеличении времени полезной работы ЩКУ, сокращение потребности в ПС, материалах, энергии и т.п. Более надежный ЩКУ ЭДПТ дешевле в эксплуатации, так как затраты для поддержания его работоспособного состояния меньше.

Библиографический список

1. Рылов Ю.А., Степанов Е.Л., Филина О.А. Исследование ресурса электрощёток тяговых электрических машин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 1. – С. 320–323.
2. Опыт эксплуатации электрощеток с повышенным ресурсом в реальных технологических условиях / А.Н. Хуснутдинов, Р.Г. Идиятуллин, А.Э. Аухадеев, О.А. Филина // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1(34). – С. 56–59.
3. Литвиненко Р.С., Аухадеев А.Э., Филина О.А. Исследование технической надежности городской электротранспортной системы // Транспорт: наука, техника, управление. – 2017. – № 8. – С. 60–71.
4. Филина О.А. Исследование эксплуатационного ресурса электрощеток электродвигателя постоянного тока подвижного состава // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 9–10. – С. 133–139.
5. Filina O.A., Tsvetkov A.N. Evaluation of the operational life of direct current motors // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. – P. 012016 (общий объем – 0,375 пл., личный вклад – 0,25 пл.).

6. Vibration model as a system of coupled oscillators in a direct current electric motor / O.A. Filina, A.N. Tsvetkov, P.P. Pavlov, D. Radu, V.M. Butakov // Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), E3S Web Conf. – 2019. – Vol. 124, 02002. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402002>
7. Лифшиц П.С., Бодров И.И., Кубарев В.Е. О некоторых итогах работ по повышению надёжности щёток // Промышленная энергетика. – 1985. – № 2. – С. 42–45.
8. Khusnutdinov A.N., Butakov V.M., Khusnutdinova E.M. Operation of brushes with increased service life on traction machines of electric vehicles // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 570. – P. 012053. DOI: 10.1088/1757-899X/570/1/012053
9. Исследование влияния эксплуатационных факторов на температурное поле обмотки якоря генератора ГП-311Б / А.Н. Хуснутдинов, Р.Г. Идиятуллин, А.М. Вдовин, А.В. Попов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск. – 2012. – № 1. – С. 437–438.
10. Оценка эксплуатационной надёжности тяговых генераторов / А.Н. Хуснутдинов, Р.Г. Идиятуллин, А.М. Вдовин, А.В. Попов, Л.Н. Киснеева // Проблемы энергетики. Известия высших учебных заведений. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2012. – № 11–12.
11. Анализ износа электрощёток локомотива / Н.И. Щуров, М.Е. Вильбергер, Б.В. Малозёмов, Е.Л. Степанов // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2010. – № 3(61).
12. Коршунов Г.М., Дербенёв В.А., Степанов В.П. К вопросу обеспечения надёжной работы узла токосъёма электрических машин // Электротехника. – 2001. – № 8. – С. 31–32.
13. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надёжность электрических машин. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.
14. Галкин В.Г., Парамзин В.П., Четвергов В.А. Надёжность тягового подвижного состава: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
15. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надёжность электрических машин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
16. Идиятуллин Р.Г. Надёжность тяговых электрических машин. – М.: Мехнат, 1987. – 152 с.
17. Кузнецов Н.Л. Надёжность электрических машин: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 432 с.

18. Статистическое исследование зависимости частоты отказов от качества коммутации тяговых электродвигателей / Ш.К. Исмаилов, В.В. Бублик [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 402–404.

19. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. – СПб., 1997. – С. 286.

20. Гиюев З.Г. Основы виброакустической диагностики электромеханических систем локомотивов: монография. – М.: Маршрут, 2006. – 273 с.

References

1. Rylov Iu.A., Stepanov E.L., Filina O.A. Issledovanie resursa elektroshchetok tiagovykh elektricheskikh mashin [Research of a resource of the electric brushes of the traction electric machines]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2010, no. 1, pp. 320-323.

2. Khusnutdinov A.N., Idiiatullin R.G., Aukhadeev A.E., Filina O.A. Opyt ekspluatatsii elektroshchetok s povyshennym resursom v real'nykh tekhnologicheskikh usloviakh [Operating experience of the electric brushes with the increased resource under the real technological conditions]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy*, 2017, no. 1(34), pp. 56-59.

3. Litvinenko R.S., Aukhadeev A.E., Filina O.A. Issledovanie tekhnicheskoi nadezhnosti gorodskoi elektrotransportnoi sistemy [Investigation of the city electrical transport system technical reliability]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, 2017, no. 8, pp. 60-71.

4. Filina O.A. Issledovanie ekspluatatsionnogo resursa elektroshchetok elektrodvigatel'ia postoiannogo toka podvizhnogo sostava [Research of an operating resource of the DC electric motor electric brushes of a rolling stock]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2017, vol. 19, no. 9-10, pp. 133-139.

5. Filina O.A., Tsvetkov A.N. Evaluation of the operational life of direct current motors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, p. 012016.

6. Filina O.A., Tsvetkov A.N., Pavlov P.P., Radu D., Butakov V.M. Vibration model as a system of coupled oscillators in a direct current electric motor. *Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), E3S Web Conf.*, 2019, vol. 124, 02002. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402002>

7. Lifshits P.S., Bodrov I.I., Kubarev V.E. O nekotorykh itogakh rabot po povysheniiu nadezhnosti shchetok [On some of the results of brush reliability improvement works]. *Promyshlennaiia energetika*, 1985, no. 2, pp. 42-45.

8. Khusnutdinov A.N., Butakov B.M., Khusnutdinova E.M. Operation of brushes with increased service life on traction machines of electric vehicles. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 570, p. 012053. DOI:10.1088/1757-899X/570/1/012053

9. Khusnutdinov A.N., Idiatullin R.G., Vdovin A.M., Popov A.V. Issledovanie vliianiia ekspluatatsionnykh faktorov na temperaturnoe pole obmotki iakoria generatora GP-311B [Investigation of the effect of operational factors on the temperature field of the GP-311B generator armature winding]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. Novosibirsk, 2012, no. 1, pp. 437-438.

10. Khusnutdinov A.N., Idiatullin R.G., Vdovin A.M., Popov A.V., Kisneeva L.N. Otsenka ekspluatatsionnoi nadezhnosti tiagovykh generatorov [Estimation of the traction generator operational reliability]. *Problemy energetiki. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii*. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2012, no. 11-12.

11. Shchurov N.I., Vil'berger M.E., Malozemov B.V., Stepanov E.L. Analiz iznosa elektroshchetok lokomotiva [Electric brush wear analysis of the locomotive]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 3(61).

12. Korshunov G.M., Derbenev V.A., Stepanov V.P. K voprosu obespecheniia nadezhnoi raboty uzla tokos"ema elektricheskikh mashin [To the issue of ensuring reliable operation of the electric machine slip-ring unit]. *Elektrotehnika*, 2001, no. 8, pp. 31-32.

13. Kotelenets N.F., Kuznetsov N.L. Ispytaniia i nadezhnost' elektricheskikh mashin [Testing and reliability of electrical machines]. Moscow: Vysshaia shkola, 1988. 232 p.

14. Galkin V.G., Paramzin V.P., Chetvergov V.A. Nadezhnost' tiagovogo podvizhnogo sostava [Reliability of traction rolling stock]. Moscow: Transport, 1981. 184 p.

15. Ermolin N.P., Zherikhin I.P. Nadezhnost' elektricheskikh mashin [Reliability of electrical machines]. Leningrad: Energiia, 1976. 248 p.

16. Idiatullin R.G. Nadezhnost' tiagovykh elektricheskikh mashin [Reliability of traction electric machines]. Moscow: Mekhnat, 1987. 152 p.

17. Kuznetsov N.L. Nadezhnost' elektricheskikh mashin [Reliability of electrical machines]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2006. 432 p.

18. Ismailov Sh.K., Bublik V.V. et al. Statisticheskoe issledovanie zavisimosti chastoty otkazov ot kachestva kommutatsii tiagovykh elektrodvigateli [Statistical study of frequency dependence of failures on switching quality of traction motors]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2009, no. 1, pp. 402-404.

19. Barkov A.V., Barkova N.A., Azovtsev A.Iu. Monitoring i diagnostika rotornykh mashin po vibratsii [Monitoring and diagnosis of rotary machines by vibration]. Saint Petersburg, 1997. 286 p.

20. Gioev Z.G. Osnovy vibroakusticheskoi diagnostiki elektromekhanicheskikh sistem lokomotivov [Basics of Vibroacoustic Diagnostics of Electromechanical Systems of Locomotives]. Moscow: Marshrut, 2006. 273 p.

Сведения об авторах

Филина Ольга Алексеевна (Казань, Россия) – старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Казанского государственного энергетического университета (420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51, e-mail: olga_yuminova83@mail.ru).

Цветков Алексей Николаевич (Казань, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Казанского государственного энергетического университета (420061, Казань, ул. Красносельская, д. 51, e-mail: tsvetkov9@mail.ru).

Хуснутдинов Азат Назипович (Казань, Россия) – старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Казанского государственного энергетического университета (420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51, e-mail: khusnutdinov.an.kgeu@mail.ru).

Логачева Алла Григорьевна (Казань, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Казанского государственного энергетического университета (420066, Казань, Красносельская, 51, e-mail: logacheva.alla@kgeu.ru).

About the authors

Filina Olga Alekseevna (Kazan, Russian Federation) is a Senior Lecturer Department of Electrotechnical Complexes and Systems Kazan State Energy University (420066, Kazan, 51, Krasnoselskaya str., e-mail: olga_yuminova83@mail.ru).

Tsvetkov Alexey Nikolaevich (Kazan, Russia) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Electrotechnical Complexes and Systems Kazan State Energy University (420066, Kazan, 51, Krasnoselskaya str., e-mail: tsvetkov9@mail.ru)

Khusnutdinov Azat Nazipovich (Kazan, Russian Federation) is a Senior Lecturer Department of Electrotechnical Complexes and Systems Kazan State Energy University (420066, Kazan, 51, Krasnoselskaya str., e-mail: khusnutdinov.an.kgeu@mail.ru).

Logacheva Alla Grigoryevna (Kazan, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Electrotechnical Complexes and Systems Kazan State Energy University (420066, Kazan, 51, Krasnoselskaya str., e-mail: logacheva.alla@kgeu.ru).

Получено 27.01.2020