ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(10-1):261–279
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.313.3 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_261

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

О. А. Филина[1], Б. В. Малозёмов[1], П. С. Лисицын[1]

[1] Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, 630073, Россия,

Аннотация: Карьерные самосвалы играют значительную роль в инфраструктуре угольных разрезов, перемещая различные горные породы, в том числе уголь, от мест добычи до потребителей. Они являются неотъемлемой частью технологического цикла при открытой добыче полезных ископаемых. Любой неожиданный выход из строя или неисправность оборудования и подсистем карьерного самосвала причиняет серьезные экономические убытки, включая расходы на восстановление работоспособности и упущенную выгоду из-за снижения производительности на добычном участке вследствие нарушения технологического цикла. Поэтому необходимо свести к минимуму количество и время непредвиденного ремонта. В статье представлен новый подход к диагностированию тяговых электродвигателей, включая щеточно-коллекторный узел и подшипники. Это позволяет расширить возможности диагностики узлов и элементов электродвигателей. В статье подробно рассмотрена методика, обеспечивающая достоверность диагностики, а также описана возможность дистанционного диагностирования и предложены способы автоматизации процесса. Также представлена математическая модель, используемая для мониторинга состояния щеточно-коллекторного узла. В отчете представлена методика прогнозирования остаточного ресурса электрощетки электродвигателя постоянного тока. Эта методика основана на использовании контролируемых показателей надежности, которые описаны в математической модели. Использование вибрационной диагностики в этой модели значительно повышает точность прогнозирования и возможность обнаружения отказов на электродвигателе постоянного тока. Приведена общая формула для расчета остаточного ресурса электрощетки, а также рассмотрены способы улучшения прогнозирования при использовании вибродиагностических методов для изучения ресурса электрощетки.

Ключевые слова: Карьерный самосвал, тяговый электродвигатель, коммутационная устойчивость, износ щеток, режимы работы, параметры диагностирования надежности, отказ, щеточно-коллекторный узел, эксплуатация, скорость износа.

Для цитирования: *Филина О. А., Малозёмов Б. В., Лисицын П. С.* Повышение эффективности диагностирования щеточно-коллекторного узла карьерных самосвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 10-1. — С. 261–279. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_261.

© О. А. Филина, Б. В. Малозёмов, П. С. Лисицын. 2023

Increasing the efficiency of diagnostics of the brush-collector assembly of mining dump trucks

O. A. Filina[1], B. V. Malozyomov[1], P. S. Lisitsyn[1]

[1] Novosibirsk State Technical University, K. Marx Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract: Quarry dump trucks play a significant role in the infrastructure of coal mines, moving various rocks, including coal, from mining sites to consumers. They are an integral part of the process cycle in surface mining. Any unexpected failure or malfunction of the equipment and subsystems of an open pit dump truck causes serious economic losses, including the cost of restoring serviceability and lost profits due to reduced productivity at the mine site due to the disruption of the process cycle. Therefore, it is necessary to minimize the number and time of unexpected repairs. This paper presents a new approach in diagnosing traction motors including brush-collector assembly and bearings. It allows to expand the possibilities of diagnostics of units and elements of electric motors. In the article the methodology providing reliability of diagnostics is considered in detail, and also the possibility of remote diagnostics is described and ways of automation of the process are offered. The mathematical model used for monitoring the condition of the brush-collector assembly is also presented. The report presents a methodology for predicting the residual life of the electric brush of a DC motor. This methodology is based on the use of monitored reliability indicators that are described in the mathematical model. The use of vibration diagnostics in this model significantly increases the accuracy of prediction and the ability to detect failures on the DC motor. The report also provides a general formula for calculating the remaining life of an electric brush, and discusses ways to improve prediction when using vibration diagnostic techniques to study the life of an electric brush.

Key words: Mining dump truck, traction motor, commutation stability, brush wear, operating modes.

For citation: Filina O. A., Malozyomov B. V., Lisitsyn P. S. Increasing the efficiency of diagnostics of the brush-collector assembly of mining dump trucks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):261–279. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_261.

1. Введение

Программа развития угольной отрасли России до 2035 года является стратегическим документом, определяющим государственную политику, задачи и мероприятия в данной отрасли. Угольная промышленность является важным сектором, который стал приоритетной задачей импортозамещения в свете сложившейся мировой ситуации [1].

Учитывая значительные запасы угля, предвидимость и доступность информации, угольная промышленность имеет все необходимые ресурсы для эффективного извлечения и использования угля, чтобы стабильно удовлетворять внутренние потребности в угольной продукции. Кроме того, развитие экспортных поставок также является одним из приоритетов данной программы [2].

Карьерные самосвалы играют важную роль в инфраструктуре угольных разрезов, отвечая за перевозку горных пород, включая уголь, от мест добычи до потребителей. Они представляют собой основную транспортную единицу в процессе добычи полезных ископаемых открытым методом. Потери, связанные со случайными простоями любой из систем карьерных само-

свалов, несут с собой экономические убытки, такие как расходы на восстановление работоспособности и потеря прибыли из-за ухудшения производительности участка в процессе добычи полезных ископаемых. Следовательно, необходимо уменьшить количество и длительность внеплановых ремонтов, чтобы минимизировать такие убытки.

Большегрузные карьерные машины, такие как самосвалы БЕЛАЗ, играют важную роль в транспортировке материалов внутри карьера. Однако они часто подвержены воздействию давления, которое создается в горнотехнических условиях, и это может оказывать негативное влияние на электродвигатели и электрооборудование, особенно с увеличением глубины карьера.

Из-за необходимости перемещения больших объемов горной массы (десятки или даже сотни миллионов кубических метров ежегодно) в результате открытой добычи полезных ископаемых были разработаны специальные комплектные тяговые электроприводы для этих крупногабаритных карьерных машин, включая самосвалы и самосвальные автопоезда. Это стало необходимым для удовлетворения потребностей современной добычи ресурсов и обеспечения эффективности работы.

Методы анализа спектра вибрации электрических машин постоянного тока для диагностики электромеханического и электрического оборудования электродвигателей активно используются в настоящее время. При этом необходимо разрабатывать системы, которые будут адаптированы под конкретное оборудование, а также обладать оптимальным набором программных и аппаратных возможностей для успешного решения основной задачи — повышения отказоустойчивости подсистем и узлов тягового электрического двигателя (ТЭД). Существуют различные способы прогнозирования надежности электродвигателей, которые применяются в различных отраслях. Они различаются по поставленным задачам и использованию аппарата анализа технической информации. В процессе эксплуатации электрических машин надежность механизма в целом зависит от надежности элементов. Основное технологическое и электрооборудование, к которым доступ в процессе эксплуатации самосвала ограничен по соображениям безопасности, отличаются усложненными конструктивными или эксплуатационными особенностями.

Основным методом диагностирования дефектов электродвигателей, которые вызывают дискретный спектр вибраций, является вибродиагностика. Для этого используется частотное распознавание вибрационных составляющих спектра [3], которые обусловлены дефектами и проявляются на определенных частотах. Значительно чаще уровни сигналов на боковых частотах превышают сигнал на основной частоте [4–6]. Для оценки текущего состояния щеточно-коллекторного узла (ЩКУ) и подшипников качения в системе применяются специализированные встроенные алгоритмы контроля.

Слуховое и зрительное восприятие является основным методом диагностирования ТЭД в настоящее время. Для этого используются независимые контрольно-измерительные модули, которые выполняют задачи ввода, анализа и обработки сигналов. Они также отображают рассчитанные значения и сигнализируют при превышении допустимых уровней по определенным параметрам. Наличие дефекта в неисправных или изношенных узлах ТЭД определяют по появлению шумов, вибраций и повышенной температуры, которые могут быть замечены [7–9].

2. Материалы и методы

Для определения действительного остаточного ресурса предлагается использовать вибрационную диагностику для определения ресурса не среднестатистической, а фактической щетки. Износ щеток исследовался на физической модели ЩКУ электродвигателей постоянного тока ДК-724, размещенной в ЗАО «ПТФК «ЗТЭО» (г. Набережные Челны) в обычных условиях эксплуатации. Внедрение этой системы позволяет исключить аварии, способные привести к крупным техногенным катастрофам, улучшить надежность и эффективность эксплуатации путем непрерывного мониторинга по вибрации и другим технологическим параметрам, своевременно обнаруживать рано возникающие неисправности с помощью адаптированных алгоритмов диагностики и обеспечивать контроль качества ремонтных работ.

Установка конструкции ТЭД ЭД 131 и ЭД 131А в ступице моторколеса на самосвалах ГП 120 т аналогична применяемой на иностранных самосвалах от фирм США и Японии. Полноприводное шасси самосвала БЕЛАЗ-7550, имеющее два ведущих моста и, соответственно, четыре ТЭД М1 — М4, обладает контурами, нагруженными на два идентичных последовательных контура, содержащих ТЭД М1, М2 переднего и М3, М4 заднего ведущих мостов.

Принципиальная структура системы мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов постоянных токовых электродвигателей представлена на рис. 1. Перед его широкомасштабным применением были проведены длительные исследования и разработки, направленные на повышение надежности самосвалов, точности диагностики и расширение перечня контролируемых параметров, соответствующих требованиям горнодобывающей промышленности. Большинство типов повреждений возможно обнаружить на основе их характерных частотных составляющих.

Вибродиагностика может быть осуществлена с использованием специальных датчиков, таких как пьезоэлементы или лазеры, которые измеряют вибрацию электродвигателя. Процедура мониторинга включает крепление промышленных акселерометров к месту измерения в течение нескольких минут. Это процесс, при котором полученные сигналы преобразуются из аналоговой в цифровую форму с использованием аналого-цифрового преобразователя. Затем эти цифровые сигналы обрабатываются вычислительными средствами для формирования спектров вибрации. Такой подход позволяет анализировать и интерпретировать полученные

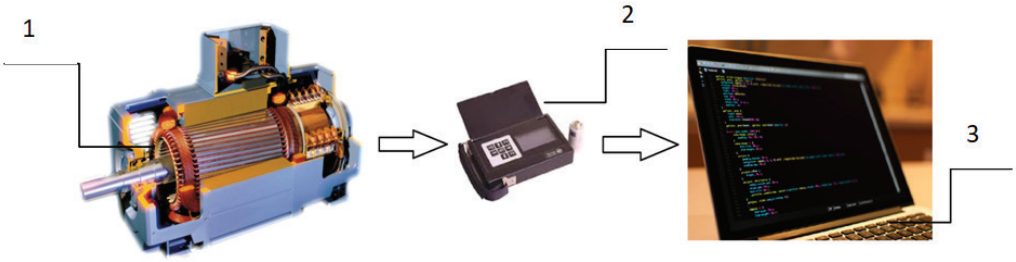

Рис. 1. Функциональная схема среды мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов: 1 — ТЭД; 2 — измеритель вибрации; 3 — компьютер

Fig. 1. Functional scheme of the vibration monitoring environment of brush-collector units: 1 — traction electric motors (TEM); 2 — vibration meter; 3 — computer

данные, чтобы определить наличие каких-либо неисправностей или проблем в работе оборудования. После этого проводится спектральный анализ и делается вывод о наличии дефектов. Это может быть полезным для прогнозирования надежности электродвигателей и предотвращения возможных отказов. Внедрение данного мониторинга может быть оправданно, если использовать датчик с двойной функцией, позволяющий измерять как вибрацию электродвигателя постоянного тока (ЭДПТ), так и сигналы подшипников. Также разработаны специальные датчики, которые способны измерять вибрацию на очень низких частотах, начиная с 0,5 Гц, и имеют возможность работать в условиях угольной добычи.

Программа содержит все функции, необходимые для просмотра и детального анализа вибрационных и параметрических данных за выбранный временной интервал. При этом программа предоставляет различные возможности для анализа вибрации оборудования. В ней доступны одиночные, групповые, параметрические и полосовые тренды, которые позволяют вам отслеживать изменения вибрации во времени и выявлять наличие каких-либо аномалий. Также доступны спектры и каскады спектров, которые помогают исследовать частотные характеристики вибрации и определить причину неисправности. Кроме того, в программе есть возможность анализировать разгоны и выбеги самосвала, что может быть полезно для определения оптимальных параметров работы оборудования. Все эти функции помогают вам более эффективно управлять обслуживанием и предотвращать возможные поломки и проблемы. На блок-

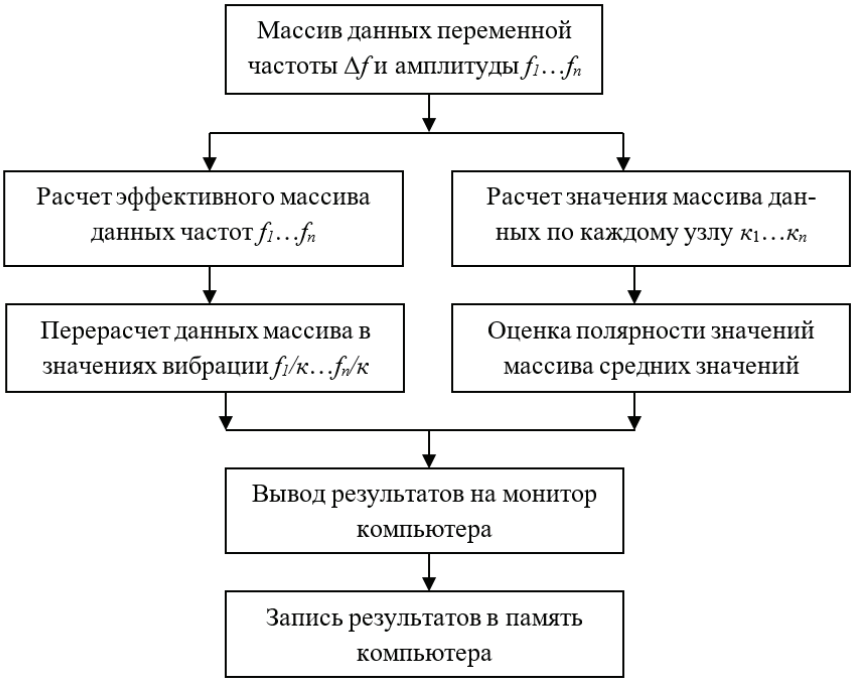

Рис. 2. Блочно-функциональная схема мониторинга
Fig. 2. Block-functional monitoring scheme

схеме мониторинга, представленной на рис. 2, изображены функциональные блоки программы.

Для диагностирования и прогнозирования состояния щеточно-коллекторного узла и подшипников электродвигателей постоянного тока используется метод измерения параметров вибрации при помощи виброметра, включающего в себя вибродатчик (лазер и пьезо-элемент). Чтобы задать условия нормального режима работы электродвигателя, вводится массив данных. Система включает электронное устройство с вычислителем спектра вибропроцесса и блоком настроечных данных. В блоке настроечных данных содержатся значения частоты вращения и амплитуды виброускорений в спектре измеряемого вибропроцесса с расчетными значениями частоты Δf, а также проводится последующий анализ полученных данных измерений.

Осуществлен сбор массива данных переменной частоты Δf и амплитуды $f_1 \ldots f_n$ каждого узла электродвигателя, на основе которого был проведен расчет для каждого узла $к_1 \ldots к_n$ и частоты $f_1 \ldots f_n$, а также последующая обработка диагностической информации $f_1/к \ldots f_n/к$. Далее на экран ПК выводится полученный сигнал в цифровой форме. Самосвал с ЭДПТ имеет операторское окно, в котором показана схема контролируемых узлов, а также текущие измеряемые параметры. Важно отметить, что окно оборудовано цветовой сигнализацией, которая показывает состояние узлов как «желтый» или «красный» в координатах f, Гц — частота спектра вибрации от $k_д$, о.е. — коэффициент степени развития дефекта (рис. 3).

Определение технического состояния электродвигателя требует проведения испытаний и экспериментов, в ходе которых регистрируются сбои и дефекты в его компонентах. Вибрационные характеристики, выраженные в числовых значениях, являются выходными параметрами вибродиагностики электродвигателя. Они определяют состояние и возможности его функционирования, а также качество изделия. Экспертный модуль также наряду с клиентской частью может усиливать результат принятия решения и автоматизировать диагностику и прогнозировать остаточный ресурс ЩКУ. Этот модуль настраивается индивидуально с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей электродвигателя самосвала. Во многих промышленных отраслях, особенно в горной промышленности, электродвигатели эксплуатируются круглосуточно, семь дней в неделю. Расчётная оценка дефектов на электродвигателях постоянного тока может быть осуществлена на основе анализа частот, составляющих вибрацию, как представлено в табл. 1. Это позволит подтвердить наличие основных признаков дефектов.

Вибрационные воздействия на электродвигатель зависят от его конструктивного исполнения и системы управления. С увеличением частоты вибрации виброускорение может не уменьшиться до поступления следующего импульса, из-за чего происходит сложение остаточного значения предыдущего ускорения с последующим или его вычитание, в зависимости от направления вибраций. В результате при высоких частотах вибрации ($f_c \geqslant 25$Гц) периодический характер частоты может быть искажен.

Основная причина вибрации электродвигателя связана с его конструкцией и способом управления. Когда частота вибрации становится выше определенного значения, скорость изменения вибраций не успевает снизиться до поступления следующего импульса и происходит суммирование остаточ-

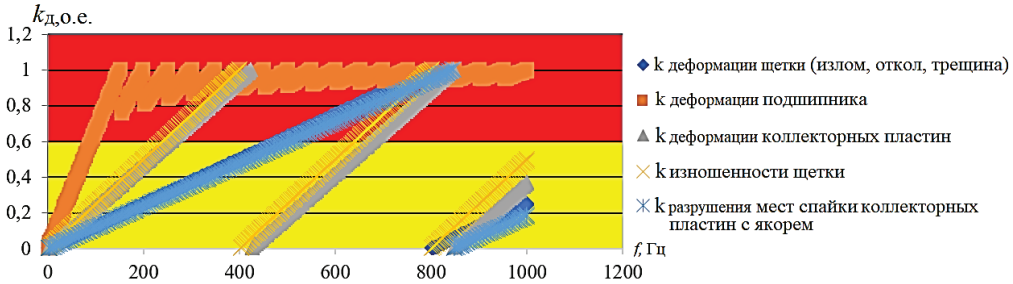

Рис. 3. Мнемосхема контролируемых узлов ЭДПТ самосвала
Fig. 3. Mnemonic diagram of the controlled units of the DC electric motor of dump truck

Таблица 1
Частоты спектра вибрации для диагностики ТЭД
Vibration spectrum frequencies for TEM diagnostics

Наименование дефекта	Приращение вибрационных гармоник	Примечание
Полюсный зазор и перекос полюсов	f_{zn}, f_{zv} R или T	Увеличение вибрации при нагрузке
Повреждения якорных обмоток и коллекторных пластин	$2p\,f_n$ $kf_{zn} \pm k_1 f_n$ $kf_{zv} \pm 2p\,f_n$ R или T	–
Коммутационные повреждения	kf_{zv} R или T	Увеличение при нагрузке
Изменение геометрических размеров щеток и коллектора	$k_1 f_{zv} \pm k_2 f_n$ R или T	–
Несоответствие уровня питающего напряжения и пульсации	kf_1 R или T	–

Примечание: $f_1, f_n, f_{zn} = f_n Z_n$ – частоты питающего источника, вращения якоря и зубцовая соответственно, Гц; Z_n — количество пазов якоря; $f_{zv} = f_n Z_v$ – частота вибрации на коллекторе, Гц; Z_v — количество коллекторных пластин; p — количество пар полюсов; k, k_1, k_2 – коэффициенты появления отказа подшипников, коллектора и щеток соответственно (0 — отсутствие дефекта, 1 — наличие дефекта); R – радиальная вибрация и T – тангенциальная вибрация.

ного значения предыдущей вибрации с новым импульсом или их разность. Это зависит от того, совпадают они по направлению или нет. Это приводит к искажению периодичности частоты при частотах вибрации $f_c \geqslant 30$ Гц.

3. Результаты и обсуждение

Вибрационные колебания электродвигателя самосвала могут быть вызваны разными компонентами привода и структурными деталями двигателя. Для проведения измерений требуется всего лишь один акселерометр и один бюджетный кабель для подключения к каждому подшипнику. В табл. 1 представлены основные диагностические параметры для расчетного определения дефектов, возникающих в ТЭД. В табл. 2 вводятся входные параметры основных узлов электродвигателя, которые будут использоваться для расчетной части диагностики.

В результате исследований диагностических параметров ТЭД была разработана математическая модель мониторинга состояния ЩКУ, в которой использованы расчетные критерии частоты (от 1 до 6) для построения диаграммы спектра вибрации. Эта модель позволяет выявить развивающиеся дефекты ТЭД, такие как поломки подшипников, коллектора и якоря, путем анализа частот спектра.

Динамические изменения при ударных нагрузках на конструкцию тягового электродвигателя, его вибрация и изменение шума окружающей среды не могут диагностироваться традиционными способами статических данных. Однако использование технологии метода ударных импульсов позволяет оценить состояние вращающихся элементов подшипника на БЕЛАЗе. Высокочастотные сигналы вибрации указывают на наличие повреждений подшипника и ЩКУ задолго до поломки этих узлов, что дает возможность запланировать ремонтные работы заранее и избежать неожиданных аварий.

В случае получения предупредительного сигнала необходимо осуществить анализ измерительных сигналов, передаваемых непосредственно сенсором приборов. Это позволит провести более подробный анализ вибрации, включая анализ спектра. Расчетная частота вибрации, при которой происходят коммутационные перенапряжения при включении ТЭД, f_1 (Гц):

Таблица 2
Входные данные электродвигателя
Input data of the electric motor

Характеристики электродвигателя	Значения	Вид измерения
Мощность	560	кВт
Количество коллекторных пластин	1350	шт.
Количество щеток	12	шт.
Число пар полюсов	4	ед.
Частота сети	50	Гц
Коэффициент рабочего двигателя	0,47	нет
Коэффициент допустимого износа	0,72	нет
Частота вращения электродвигателя	1850	об/мин
Напряжение	220	В
Количество подшипников	2	шт.
Частота якоря	25	Гц

$$f_1 = 0.7 \cdot f_{вкл}, \quad (1)$$

где f_1 — вибрационная частота при коммутационных перенапряжениях; 0.7 — понижающий коэффициент вибрации элементов ТЭД до начальной частоты (коллектор, якорь, подшипники); $f_{вкл}$ — расчетная частота вибрации при включении ТЭД.

Процесс мониторинга проводится без внедрения в электродвигатель внешних компонентов, что исключает возможность дополнительных помех при анализе вибрации. В данном случае каждый диапазон спектра вибрации соответствует определенной частоте, которая указывает на возникновение дефекта в конкретном компоненте. Наличие дефектов на щетках можно диагностировать на характерных частотах, которые могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$f_2 = f_c \cdot к_{эщ} \cdot к_1 + f / к_д, \quad (2)$$

где f_2 — частота вибрации на щетках при их повреждениях; f_c – частота источника питания; $к_{эщ}$ — количество щеток в ТЭД; $к_1$ =1…n — коэффициенты развития повреждения, определяющие его стадию; f — частота вибрации; $к_д$ — коэффициент, определяющий количество повреждений на щетках.

Наличие дефектов подшипников определяется следующим образом:

$$f_3 = f_c \cdot к_{подш} \cdot к_3 + f / к_д, \quad (3)$$

где f_3 — частота присутствия дефектов элементов подшипников; $к_{подш}$ — количество подшипников; $к_3$ – коэффициент, определяющий стадию проявление неисправности подшипника.

Наличие неисправности на коллекторе определяется на частотах вибрации:

$$f_4 = f_c \cdot K \cdot к_4 - f \cdot 2p, \quad (4)$$

где f_4 — частота вибрации, при которой наблюдается неисправность коллектора; K — количество пластин на коллекторе; $2p$ — количество полюсных пар; $к_4$ — коэффициент проявления неисправностей коллектора.

Бой коллектора определяется на частотах вибрации:

$$f_5 = f \cdot 2p - f_к \cdot к_{эщ}, \quad (5)$$

где f_5 — частота вибрации при разбалансировке коллектора; $f_к$ –частота вибрации на коллекторе.

Превышение допустимого износа щеток определяется на частотах вибрации:

$$f_6 = f_я \cdot к_2 - f \cdot к_{эщ.о.}, \quad (6)$$

где f_6 — характерная частота вибрации наличия недопустимого износа щеток; $f_я$ — частота вращения якоря; $к_2$ =2 — количество мест крепления пластин коллектора к якорной обмотке; $к_{эщ.о.}$ — количество щеток в ЩКУ.

Для эффективного обнаружения различных электромагнитных проблем, возникающих в электрических двигателях и генераторах, необходимо использовать анализатор спектров вибрационных сигналов. Авторы исследования определили основные частоты, которые указывают на неисправности в компонентах ТЭД. Путем анализа частот вращения основных элементов электродвигателя (таких как якорь, подшипники и коллектор) можно провести «фильтрацию» спектра вибрационного сигнала, чтобы выделить пиковые амплитуды колебаний, соответствующие моментам соударений в местах дефектов. Затем, используя полученные данные, проводится анализ характера и степени развития дефекта ТЭД, что также позволяет выявить начинающиеся неисправности.

Для эффективного обнаружения электрических и механических неисправностей в электродвигателе рекомендуется проводить регулярные измерения и анализ характеристических

гармоник. При помощи созданной базы данных можно определить уровень износа оборудования на основе изменения характерных частот сигнала и принять решение о замене или ремонте для минимизации рисков отказа. Этот подход помогает определить неисправности и позволяет принимать меры по исправлению проблем, а также планировать замену или ремонт оборудования заранее. На рис. 3 показан спектр вибрации нового исправного электродвигателя при частоте вибрации от 0 до 1.2 кГц. Этот спектр используется в дальнейшем. Вибрации ТЭД, не связанные с дефектами, несут частоту, удвоенную относительно частоты питающей сети, то есть 100 Гц (на рис. 4 это первый всплеск вибрации). При обнаружении участков, которые отличаются от идеального спектра, был сделан вывод о несоответствии спектра идеальному. Затем были выделены характерные частоты, отвечающие за определенные неисправности; характер и степень развития этих неисправностей были определены путем сравнения значений амплитуд с идеальными значениями. Если разница между амплитудами была меньше заданной величины, то имеют место отказы при определенной частоте вибрации. В предложенном изобретении для мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов электродвигателей используется штатный датчик-анализатор, который закреплен на корпусе электродвигателя и применяется для получения спектра. Спектральный анализ используется для исследования сигналов путем сравнения реальных и эталонных спектров. При анализе выявляются дефекты и делается прогноз их развития (см. рис. 4). Увеличение амплитуды электромагнитных гармоник сверх определенного уровня указывает на наличие дефекта. Этот уровень считается предельным для нормального состояния самосвала. При чрезмерно высокой вибрации определяются частоты пиков в вибрационном спектре, чтобы выявить основную причину ее появления.

Метод, описанный выше, основан на анализе спектра вибрации электродвигателя для определения его неис-

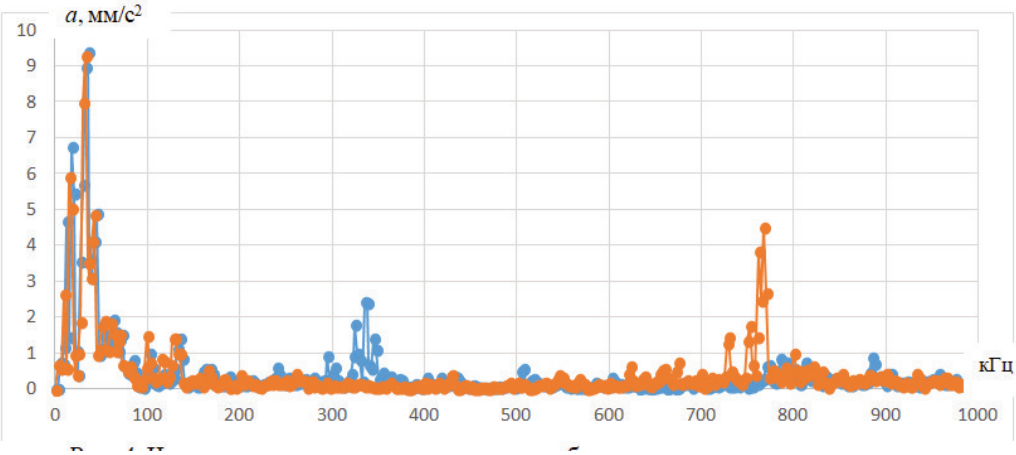

Рис. 4. Частотная характеристика спектра вибрации электродвигателя: красная линия показывает дефекты на ЩКУ, синяя — повреждения подшипников
Fig. 4. Frequency characteristics of the electric motor vibration spectrum: the red line shows defects on the BC, blue — damage to the bearings

правностей. В спектре вибрации можно обнаружить характерные гармоники, которые соответствуют различным видам неисправностей. На рис. 5 показана частотная характеристика спектра вибрации электродвигателя с дефектами в щеточно-коллекторном узле и в подшипниках. При дефектах в стали ТЭД появляются вторая и третья гармоники электромагнитной частоты $F_{ЭМ}$, соответствующие 210 Гц и 320 Гц. Через анализ характеристических гармоник вибрации можно выявить различные электрические и механические неисправности, которые возникают в работе электродвигателя. Эти гармоники могут быть использованы для идентификации и диагностики проблем в работе электродвигателя.

При диагностировании аналоговый сигнал преобразуется в цифровую

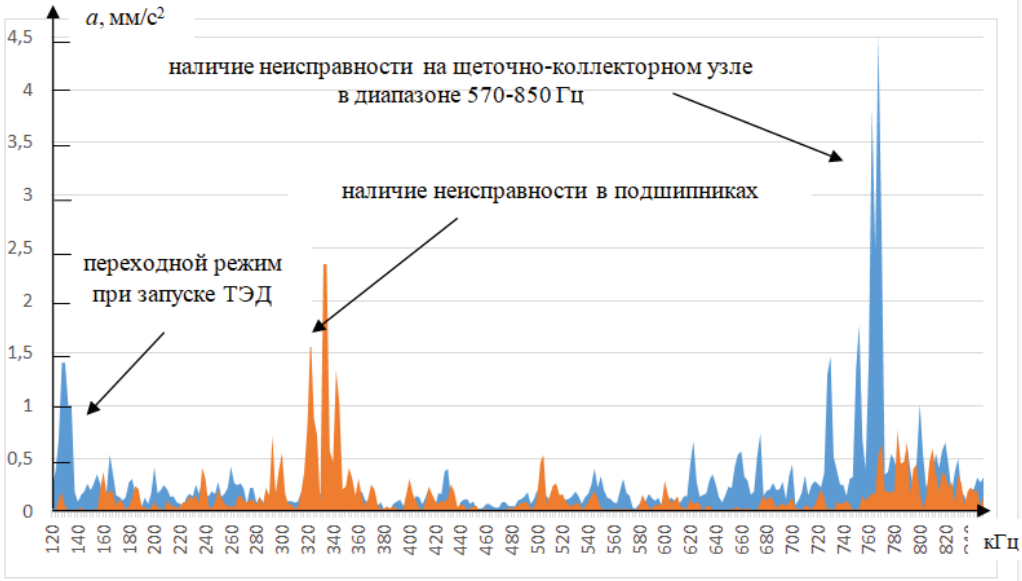

Рис. 5. Диаграмма вибрации проявляющихся дефектов на ТЭД
Fig. 5. Vibration diagram of manifested defects on TEM

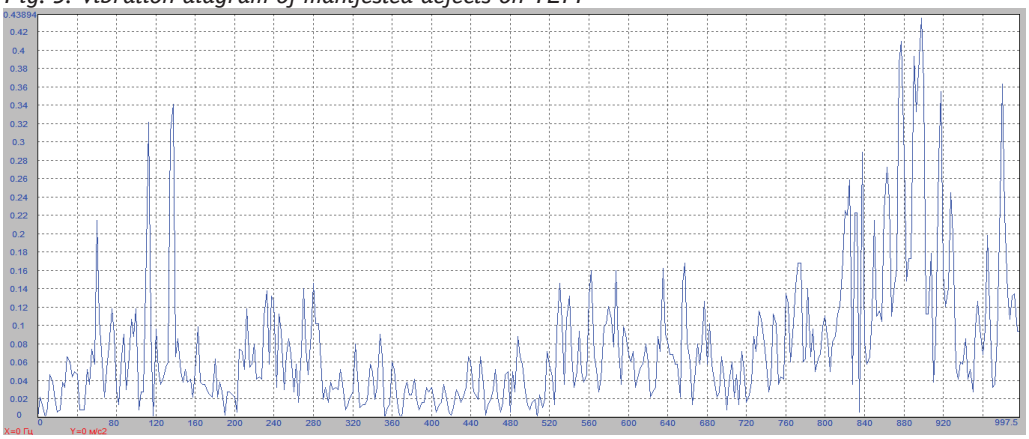

Рис. 6. Аналоговая форма сигнала спектра вибрации электродвигателя
Fig. 6. Analogue shape of the electric motor vibration spectrum signal

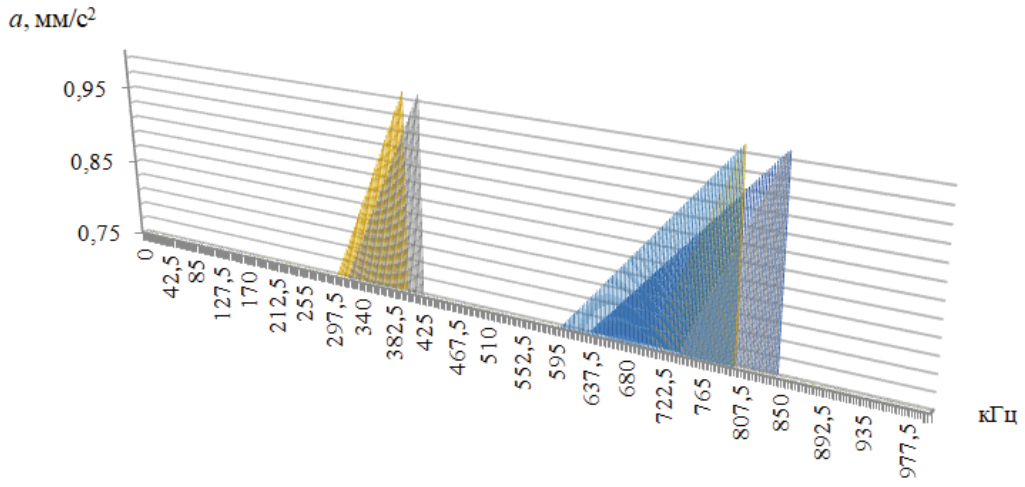

Рис. 7. Вибросигнал на подшипнике электродвигателя
Fig. 7. Spectrum of the vibration signal registered on the motor bearing

форму (рис. 6). Для примера на рис. 7 приведен спектр вибросигнала, зарегистрированного на подшипнике электродвигателя, имеющего номинальную частоту вращения якоря, равную n_0 = 1480 об/мин.

Для проведения диагностики электродвигателя сначала необходимо преобразовать полученный сигнал из аналоговой формы в цифровую. Это можно сделать с помощью аналого-цифрового преобразователя.

На рис. 6 показан процесс преобразования сигнала. Аналоговый сигнал (вибросигнал) поступает на вход преобразователя, где он дискретизируется и квантуется, т.е. представляется в виде последовательности чисел (цифровой сигнал).

Затем полученный цифровой сигнал можно анализировать для определения наличия неисправностей в электродвигателе. Для этого обычно используется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), который позволяет представить сигнал в частотной области.

На рис. 7 показан сигнал, полученный на подшипнике электродвигателя. Спектр представляет собой график зависимости амплитуды от частоты. В данном примере приведен спектр для электродвигателя с номинальной частотой вращения якоря, равной n_0 = 1460 об/мин.

Анализ спектра позволяет выявить характерные гармоники, которые соответствуют различным видам неисправностей. Например, на спектре могут быть видны гармоники, соответствующие частоте вращения якоря, подшипниковой частоте, электромагнитной частоте и т.д. Таким образом, анализ спектра вибросигнала позволяет идентифицировать различные неисправности в электродвигателе.

Программа для оценки срока службы ЩКУ основана на методике вибродиагностики. В результате мониторинга и спектрального анализа работающего электродвигателя постоянного тока программа определяет изменения параметров технического состояния ЩКУ. При наличии возможности непрерывного контроля параметров программа использует упрощенные методы для прогнозирования состояния ЩКУ:

– при статическом нагружении щеточно-коллекторного узла про-

грамма проводит расчет по уменьшению высоты щетки. Это позволяет оценить степень износа щетки и прогнозировать срок ее службы;

– для щеточно-коллекторного узла с накопленным объемом диагностической информации программа проводит расчет по изменению этих параметров до предельных значений и строит график изменения ресурса ЩКУ. Это позволяет оценить состояние различных узлов ЩКУ и прогнозировать срок их службы.

Программа также использует спектральный анализ вибрации, где каждый диапазон спектра является индикатором неисправности узлов и элементов ЩКУ. Путем анализа спектра вибрации программа определяет наличие дефектов и прогнозирует срок службы ЩКУ.

В результате работы авторов статьи была создана программа, которая позволяет оценить срок службы ЩКУ на основе мониторинга, спектрального анализа и анализа функциональных параметров (рис. 8).

Программа осуществляет контроль функционирования и оценку состояния ТЭД по входным параметрам ТЭД (см. табл. 2), произведенным расчетам по каждому узлу и соответствующим измеренным спектрам вибрации (рис. 9).

Целю данной программы является определение неисправностей ЩКУ и величины изменения геометрии щеток электродвигателя на основе анализа спектров вибрации. Она позволяет получать спектры вибрации от измерителя вибрации по сети, накапливать эталонные спектры и выявлять частотные диапазоны вибрации, присутствующие при различных видах неисправностей.

Далее программа определяет характерные неисправности узлов электродвигателя и визуализирует спектры вибрации с сопоставлением эталонов и результатов алгоритмов выявления неисправностей, указывая характерные частоты.

Также в программе присутствует большая база накопленных спектров вибрации различных двигателей с разной степенью износа щеток, что позволяет сравнивать полученные спектры и выявлять типовые неисправности в режиме реального времени.

В результате эта программа поможет быстро и эффективно диагностировать неисправности щеточно-коллекторных

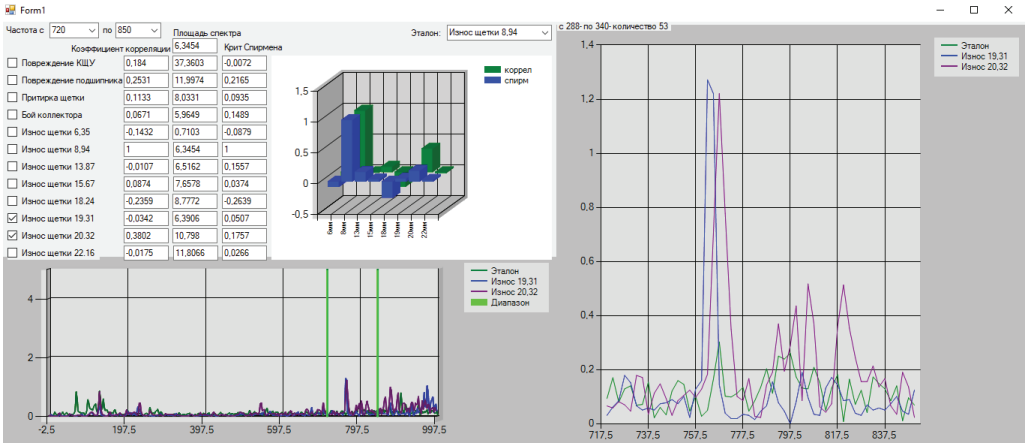

Рис. 8. Интерфейс программы комплексного определения спектров вибрации ТЭД
Fig. 8. Interface of the program for the complex determination of vibration spectra TEM

Рис. 9. Программа по выявлению дефектов в ТЭД
Fig. 9. Program to identify defects in EDPT

узлов и определить степень износа щеток электродвигателя на основе анализа спектров вибрации.

Программа мониторинга вибрации щеточно-коллекторных узлов электродвигателей позволяет определить характерные частоты вибрации, связанные с определенными дефектами [12]. При этом частота биения из-за неоднородности коллектора лежит в области от 713 до 865 Гц, неисправности подшипников — от 130 до 525 Гц, а неисправности на полюсах и в статоре — от 220 до 470 Гц. Важно отметить, что для выявления характера неисправности необходимо сравнивать значения амплитуд [13—15].

Разработанный мониторинг оборудования на БЕЛАЗе имеет ряд преимуществ. Во-первых, он позволяет контролировать наиболее важные параметры рабочего состояния оборудования постоянно и в режиме реального времени [16, 17]. Благодаря этому возникающие проблемы или отклонения от нормы могут быть обнаружены немедленно, что позволяет оперативно реагировать и принимать необходимые меры. Во-вторых, система мониторинга предупреждает о выходе результатов измерений за допустимые значения. Это позволяет предотвратить поломку или повреждение оборудования, поскольку операторы получают предупреждение о возможных проблемах заранее и могут принять меры для их устранения [18, 19].

В-третьих, такая система помогает прогнозировать состояние оборудования и электродвигателей, а также планировать ремонтные работы. Благодаря

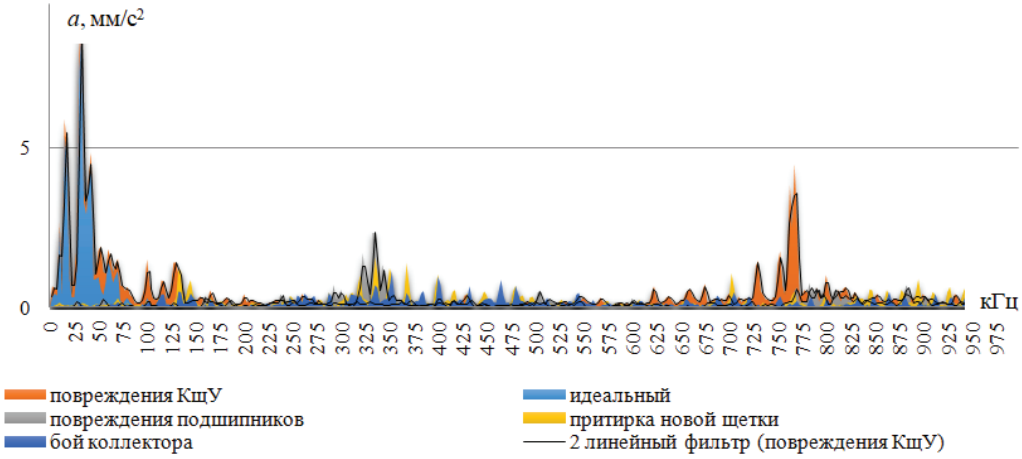

Рис. 10. Частотно-спектральная диаграмма комплексной вибродиагностики
Fig. 10. Frequency-spectral diagram of comprehensive vibration diagnosis

этому можно выполнять ремонтные работы вовремя и предупреждать неплановые остановки оборудования, что значительно повышает его эффективность и продлевает сроки его эксплуатации [20, 21].

Также использование системы мониторинга позволяет перейти от планового ремонта к профилактическому техническому обслуживанию. Благодаря постоянному контролю и предупреждению о возможных проблемах можно выполнять ремонтные работы заранее, что позволяет избежать аварийной остановки оборудования и увеличивает его надежность [22].

В итоге система мониторинга позволяет эффективно контролировать и управлять оборудованием, предотвращать неплановые поломки и увеличивать его надежность и сроки эксплуатации [23].

4. Заключение

1. Внедрение комплекта по прогнозированию остаточного ресурса электрощеток на электродвигателях запланировано для новых карьерных самосвалов, производимых ОАО «БЕЛАЗ», а также для эксплуатирующих предприятий, которые модернизируют свои парки самосвалов с электроприводом, имеющих проблемы с техническими характеристиками или вышедших из строя.

2. Для повышения достоверности диагностических оценок осуществляется контроль фактических режимов эксплуатации и мониторинг диагностических параметров, таких как вибрация, износ, биение и сила нажатия на электрощетки. Разработан способ мониторинга вибрации электрощетки в составе ЩКУ.

3. Анализ данных показал, что основными причинами отказов тяговых электродвигателей ЭДП-720 является износ щетки. Для каждого типа и условий использования электродвигателей были разработаны оптимальные показатели безотказности и долговечности. Использование математической модели позволяет более точно предсказывать время износа щетки, оценить скорость износа в зависимости от времени эксплуатации и определить степень износа и текущий износ щетки. Вместе с этим, можно определить вероятность безотказной работы ЩКУ и его поток отказов, что позволяет планировать замену щетки заранее и избежать простоя транспорта.

4. На основе предложенного способа диагностики и мониторинга ТЭД разработан эффективный и удобный метод, который расширяет арсенал методов диагностики электродвигателей. Одним из ключевых преимуществ данного способа является повышение точности диагностирования коллекторных узлов. Это позволяет более надежно определить наличие возможных проблем и предпринять необходимые меры по их предотвращению или ремонту. Другим важным преимуществом является возможность дистанционного диагностирования. Это означает, что теперь не требуется физического присутствия специалиста для проведения диагностики. Таким образом, сокращаются время и затраты на проведение диагностики, а также повышается удобство для пользователя. Также заметно упрощена процедура диагностирования, так как сейчас нет необходимости отключать электродвигатель для проведения диагностики. Это не только экономит время, но и позволяет избежать потери производительности во время проведения диагностики. Предложенный способ диагностики обеспечивает возможность полной автоматизации процесса диагностики. Это означает, что все этапы диагностики могут быть выполнены без участия человека, что

повышает эффективность и надежность процесса. В целом, данная разработка представляет собой значимый шаг в области диагностики и мониторинга электродвигателей. Ее преимущества включают повышение точности диагностики, возможность дистанционного диагностирования, упрощение процедуры диагностирования и полную автоматизацию процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wu X.*, *Kukartsev V. V.*, *Tynchenko V. S.*, *Bukhtoyarov V. V.*, *Tyncheko Y. A.*, *Kukartsev V. A.* Overview of Methods for Enhanced Oil Recovery from Conventional and Unconventional Reservoirs // Energies. 2023, vol. 16, 4907. DOI: 10.3390/en16134907.

2. *Сычев Ю. А.*, *Костин В. Н.*, *Сериков В. А.*, *Аладьин М. Е.* Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 1. — С. 159–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159.

3. *Хазин М. Л.*, *Апакашев Р. А.* Карьерные самосвалы на водородном топливе // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 47–59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_47.

4. *Filina O.*, *Yashagina A.*, *Salnikova O.* Determination of the characteristic points of approximation for traction electric machines of electric rolling stock // Proceedings — 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021. 2021, pp. 791–796.

5. *Шешко О. Е.* Эколого-экономическое обоснование возможности снижения нагрузки на природную среду от карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 2. — С. 241–252.

6. *Абрамов Б. И.*, *Иванов А. Г.*, *Шиленков В. А.*, *Кузьмин И. К.*, *Шевырев Ю. В.* Электропривод современных шахтных подъёмных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5–2. — С. 145–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

7. *Filina O.*, et al. Vibration diagnostics of the brush-collector assembly, as means of assessing // Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022. DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731424.

8. *Щуров Н. И.* и др. Исследование работы коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей на математических моделях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2010. — № 1. — С. 326–329.

9. *Степанов Е. Л. Методы и средства повышения ресурса щёток тяговых электродвигателей. Дис. канд. техн. наук: 05.09.01: 2010. — Новосибирск, 2010. — 214 с.*

10. *Sorokova S. N.*, *Efremenkov E. A.*, *Valuev D. V.*, *Qi M.* Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport // Mathematics. 2023, vol. 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317.

11. *Андреева Л. И.* Выбор стратегии ремонтного обслуживания горной техники // Известия высших учебных заведений // Горный журнал. — 2021. — № 4. — С. 83–91. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-83–91.

12. *Герике П. Б.*, *Герике Б. Л.* Формирование единого диагностического критерия для оценки технического состояния горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. — 2021. — № 2. — С. 17–22. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-217–22.

13. *Voitovich E. V.*, *Kononenko R. V.*, *Konyukhov V. Y.*, *Tynchenko V.*, *Kukartsev V. A.*, *Tynchenko Y. A.* Designing the Optimal Configuration of a Small Power System for Autonomous Power Supply of Weather Station Equipment // Energies. 2023, vol. 16, 5046. DOI: 10.3390/en16135046.

14. *Герике П. Б.* О едином диагностическом критерии для выявления дефектов электрических машин по параметрам механических колебаний // Известия Уральского государственного горного университета. — 2019. — № 2 (54). — С. 100–106.

15. Абу-*Абед Ф. Н.*, *Мартынов Д. В.*, *Сергиенко С. В.*, *Кордюков Р. Ю.* Имитационная модель оценки производительности ремонтно-диагностического комплекса // Программные продукты и системы. — 2015. — № 5. — С. 107–116. DOI: 10.15827/0236—235X.109.107–116

16. *Aldannawy H.*, *Rouabhi A.*, *Gerbaud L.* Percussive drilling: Experimental and numerical investigations // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2022, vol. 55, no. 3, pp. 1555–1570. DOI: 10.1007/s00603-021-02707-5.

17. *Виноградов А. Б.*, *Гнездов Н. Е.*, *Журавлев С. В.*, *Сибирцев А. Н.* Результаты разработки и испытаний комплекта электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 240 т // Электротехника. — 2015. — № 3. — С. 38–45.

18. *Хазин М. Л.* Электрифицированный автотранспорт для подземных и открытых горных работ // Известия Уральского государственного горного университета. — 2019. — № 1(53). — С. 128–135. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-1-128–135.

19. *Khalikov I. H.*, *Kukartsev V. A.*, *Kukartsev V. V.*, *Tynchenko V. S.*, *Tynchenko Y. A.*, *Qi M.* Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption // Energies. 2023, vol. 16, 729. DOI: 10.3390/en16020729.

20. *Shchurov N. I.*, *Dedov S. I.*, *Malozyomov B. V.*, *Shtang A. A.*, *Klyuev R. V.*, *Andriashin S. N.* Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex // Energies. 2021, vol. 14, 8072. https://doi.org/10.3390/en14238072.

21. *Martyushev N. V.*, *Malozyomov B. V.*, *Sorokova S. N.*, *Efremenkov E. A.*, *Qi M.* Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles // Mathematics. 2023, vol. 11, 536. https://doi.org/10.3390/math11030536.

22. *Zhang Wei, Yang J.*, *Zhang W.*, *Ma F.* Research on regenerative braking of pure electric mining dump truck // World Electric Vehicle Journal. 2019, vol. 10, pp. 39. DOI: 10.3390/ wevj10020039.

23. *Oparina T. A.*, *Zagorodnii N. A.*, *Efremenkov E. A.*, *Qi M.* Mathematical Analysis of the Reliability of Modern Trolleybuses and Electric Buses // Mathematics. 2023, vol. 11, 3260. DOI: 10.3390/math11153260. ГИАБ

REFERENCES

1. Wu X., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Bukhtoyarov V. V., Tyncheko Y. A., Kukartsev V. A. Overview of Methods for Enhanced Oil Recovery from Conventional and Unconventional Reservoirs. Energies. 2023, vol. 16, 4907. DOI: 10.3390/en16134907.

2. Sychev Y. A., Kostin V. N., Serikov V. A., Aladyin M. E. Analysis of non-sinusoidal modes in power supply systems of mining enterprises with nonlinear load and capacitor units. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 1, pp. 159–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159.

3. Khazin M. L., Apakashev R. A. Quarry dump trucks on hydrogen fuel. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 47–59. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_47.

4. Filina O., Yashagina A., Salnikova O. Determination of the characteristic points of approximation for traction electric machines of electric rolling stock. *Proceedings 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021.* 2021, pp. 791–796.

5. Sheshko O. E. Ecological and economic substantiation of the possibility of reducing the load on the natural environment from quarry transportation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 2, pp. 241–252. [In Russ].

6. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuzmin I. K., Shevyrev Yu. V. Electric drive of the modern mine hoisting machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5–2, pp. 145–162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

7. Filina O., et al. Vibration diagnostics of the brush-collector assembly, as means of assessing. *Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022*. DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731424.

8. Shchurov N. I., et al. Investigation of the collector-brush unit operation of the traction electric motors on the mathematical models. *Scientific problems of transport of Siberia and the Far East*. 2010, no. 1, pp. 326–329. [In Russ].

9. Stepanov E. L. Methods and means of increase of a resource of brushes of traction electric motors Cand. Sci., 05.09.01, 2010, Novosibirsk. 2010, 214 p. [In Russ].

10. Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport. Mathematics. 2023, vol. 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317.

11. Andreeva L. I. The choice of a strategy for the maintenance of mining equipment. News of higher educational institutions. Mining Journal, 2021, no. 4, pp. 83–91. [In Russ]. DOI: 10.21440. 0536-1028-2021-4-83–91.

12. Gericke P. B., Gericke B. L. Formation of a unified diagnostic criterion for assessing the technical condition of mining equipment. *Mining equipment and electromechanics*. 2021, no. 2, pp. 17–22. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-217–22.

13. Voitovich E. V., Kononenko R. V., Konyukhov V. Y., Tynchenko V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Designing the Optimal Configuration of a Small Power System for Autonomous Power Supply of Weather Station Equipment. Energies. 2023, vol. 16, 5046. DOI: 10.3390/en16135046.

14. Gericke P. B. On a unified diagnostic criterion for identifying defects of electrical machines by the parameters of mechanical vibrations. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2019, no. 2 (54), pp. 100–106. [In Russ].

15. Abu-Abed F. N., Martynov D. V., Sergienko S. V., Kordyukov R. Yu. Simulation model for estimating the productivity of the repair and diagnostic complex. *Software Products and Systems*. 2015, no. 5, pp. 107–116. [In Russ]. DOI:10.15827/0236— 235X.109.107–116.

16. Aldannawy H., Rouabhi A., Gerbaud L. Percussive drilling: Experimental and numerical investigations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, vol. 55, no. 3, pp. 1555–1570. DOI: 10.1007/s00603-021-02707-5.

17. Vinogradov A. B., Gnezdov N. E., Zhuravlev S. V., Sibirtsev A. N. Results of the development and testing of the electrical equipment set of the 240 t dump truck. *Electrical engineering*. 2015, no. 3, pp. 38–45. [In Russ].

18. Khazin M. L. Electrified motor transport for underground and open-pit mining. *Izvestia Ural State Mining University*. 2019, no. 1(53) pp. 128–135. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-1-128–135.

19. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. Energies. 2023, vol. 16, 729. DOI: 10.3390/en16020729.

20. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021, vol. 14, 8072. https://doi.org/10.3390/en14238072.

21. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. Mathematics. 2023, vol. 11, 536. https://doi.org/10.3390/math11030536.

22. Zhang Wei, Yang J., Zhang W., Ma F. Research on regenerative braking of pure electric mining dump truck. *World Electric Vehicle Journal*. 2019, vol. 10, pp. 39. DOI: 10.3390/ wevj10020039.

23. Oparina T. A., Zagorodnii N. A., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Analysis of the Reliability of Modern Trolleybuses and Electric Buses. Mathematics. 2023, vol. 11, 3260. DOI: 10.3390/math11153260.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Филина Ольга Алексеевна — ст. преп. кафедра электротехнических комплексов и систем. Количество опубликованных научных работ — 188. Область научных исследований — Диагностика и надежность, электродвигатели подвижной состав, Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: olga_yuminova83@mail.ru;
Малозёмов Борис Витальевич — канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов. Количество опубликованных научных работ — 154. Область научных исследований — Диагностика и надежность, Компьютерные, сетевые и информационные технологии, Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. e-mail: mbv5@mail.ru;
Лисицын Павел Сергеевич — ассистент кафедры «Электротехнических комплексов» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ-НЭТИ), магистр.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Filina O. A., senior prep. Department of Electrical Complexes and Systems. The number of published scientific works is 188. Field of research — Diagnostics and reliability, electric motors rolling stock. State Budgetary Educational Institution of Higher Education Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: olga_yuminova83@mail.ru;
Malozyomov B. V., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering Complexes. The number of published scientific works is 154. Field of research — Diagnostics and reliability, Computer, network and information technologies. Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: mbv5@mail.ru, +79658255983
Lisitsyn P. S., assistant of the department of “Electrotechnical complexes” of the Novosibirsk State Technical University (NSTU-NETI), master.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 02.06.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 18.04.2023; received after the review 02.06.2023; accepted for printing 10.10.2023.