

УДК 621.313

DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-23-28

**В. В. ХАРЛАМОВ**  
**С. Н. НАЙДЕН**  
**П. К. ШКОДУН**  
**П. Г. ПЕТРОВ**  
**А. С. ХЛОПЦОВ**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КОММУТАЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье изложена методика оценки состояния коммутации тяговых электродвигателей постоянного тока карьерных самосвалов БелАЗ, основанная на обработке данных, полученных с помощью автоматизированного видеоизмерительного комплекса оценки коммутации. Приведен разработанный алгоритм формирования значения интенсивности искрения по видеоизображению, определены критерии оценки коммутации, выполнен анализ режимов и качества работы тяговых электродвигателей в зависимости от режима эксплуатации карьерного самосвала. Обработка входных и выходных данных проведена в программе MATLAB 2017.

**Ключевые слова:** карьерный самосвал, двигатель постоянного тока, коммутация, интенсивность искрения, алгоритм обработки видеоизображения, пиксель, матрица изображения, графические фильтры, цикл, синхронизация данных, коэффициент пульсации, коэффициент ослабления поля.

В карьерных самосвалах БелАЗ серий 75131, 75135, 75137, 75302, 75306 используется тяговый электропривод (ТЭП) переменного-постоянного тока [1], функциональная схема которого приведена на рис. 1.

Тяговый синхронный генератор переменного тока (ТГ) приводится во вращение дизельным двигателем (Д). Статорная обмотка ТГ состоит из двух электрически не связанных между собой трехфазных обмоток, каждая из которых соединена в звезду. На статоре ТГ расположена также однофазная вспомогательная обмотка самовозбуждения, которая подключена через внешний тиристорный регулятор возбуждения (ТРВГ) и контактные кольца к обмотке возбуждения (ОВГ), размещенной на его роторе. Силовые выпрямители (UZ1, UZ2) представляют собой две трехфазные мостовые не-

управляемые схемы. К входным зажимам выпрямителей подключены статорные трехфазные обмотки ТГ. Выпрямители выполнены на силовых диодах с охладителями и расположены в центральном отсеке шкафа с пускорегулирующей аппаратурой. Тяговые электродвигатели (ТЭД) каждого электромотор-колеса (M1, M2) подключены к выходным зажимам выпрямителей. ТЭД являются реверсивными, работают в двигательном и в генераторном режиме (при электрическом торможении на тормозные резисторы RB1 и RB2), при этом имеют последовательное возбуждение, принудительную нагнетательную вентиляцию и оборудованы датчиками частоты вращения и контроля температуры.

Система управления осуществляет регулирование и контроль электромеханических параметров ТЭП переменного-постоянного тока автосамосвалов

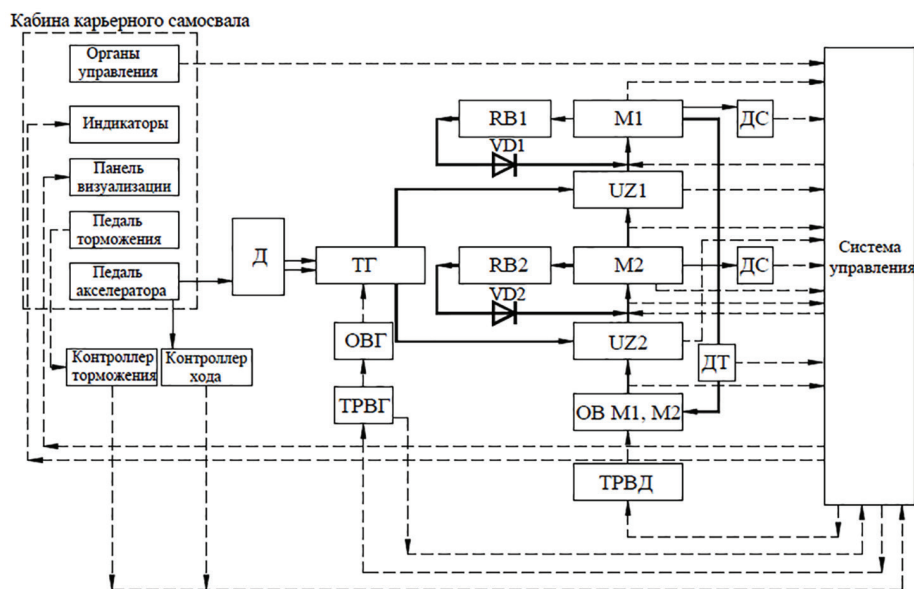


Рис. 1. Функциональная схема управления тяговым электроприводом

марки БелАЗ грузоподъемностью 120–220 тонн. Система обеспечивает управление процессом преобразования механической энергии, вырабатываемой дизелем, в электрическую энергию и обратного преобразования электрической энергии в механическую, которая используется в виде регулируемых тяговых и тормозных усилий на ведущих колесах. Система управления ТЭП состоит из органов управления, сигнализации и панели оператора, расположенных в кабине карьерного самосвала; датчиков теплового состояния и частоты вращения; шкафа управления; тиристорного регулятора возбуждения генератора; тиристорного регулятора возбуждения двигателей; блока управления мощностью; блока управления тиристорами; двух модулей высоковольтных сенсоров; блока управления возбуждения генератора; блоков электронных ключей; блока переключения режимов работы; силовой коммутационной аппаратуры; элементов защиты.

Основная часть отказов карьерного автотранспорта обусловлена влиянием условий эксплуатации. Для автосамосвалов БелАЗ с трансмиссией переменного-постоянного тока на долю электропривода приходится до 30 % всех отказов, из них половина — это выходы из строя ТЭД. В табл. 1 приведены статистические данные о причинах отказов ТЭД, выявленных при эксплуатации электродвигателей за период с 2012 по 2017 гг.

Анализ статистических данных, приведенных в табл. 1, показывает, что основная часть отказов ТЭД связана с повышенным износом щеток, круговым огнем и радиальным биением коллектора. Повышенный износ щеток и биение коллектора приводят к неудовлетворительной коммутации электрических щеток в ТЭД, а при их совместном влиянии — приводят к ускорению процессов электроэрозионного и механического износа элементов коллекторно-щеточного узла [2, 3]. В свою очередь, неудовлетворительная коммутация создает условия возникновения кругового огня [4]. Результатами осмотров тяговых электродвигателей подтверждено, что на щетках ТЭД имеются следы повышенного искрения. Таким образом, для улучшения надежности и технико-экономических показателей ТЭД актуальной является разработка мероприятий, на-

Таблица 1

## Статистика отказов тяговых двигателей постоянного тока

| №  | Неисправность                       | Процентное отношение, % |
|----|-------------------------------------|-------------------------|
| 1  | 2                                   | 3                       |
| 1  | Повышенный износ щеток              | 39,1                    |
| 2  | Круговой огонь по коллектору        | 14,3                    |
| 3  | Радиальное биение коллектора        | 11,8                    |
| 4  | Прогар коллектора                   | 8,1                     |
| 5  | Повреждение щеткодержателя          | 4,3                     |
| 6  | Механическое повреждение коллектора | 3,1                     |
| 7  | Короткое замыкание обмотки якоря    | 2,5                     |
| 8  | Потемнение коллектора               | 1,2                     |
| 9  | Пробой дополнительного полюса       | 0,6                     |
| 10 | Прогар обмотки статора              | 0,6                     |
| 11 | Перегрев подшипников                | 0,6                     |
| 12 | Другие причины                      | 13,8                    |

правленных на выявление режимов работы ТЭД карьерного самосвала, в которых наблюдается неудовлетворительная коммутация и повышенное искрение под щетками.

Для оценки работы ТЭД постоянного тока, используемых в карьерных самосвалах БелАЗ грузоподъемностью 120–220 тонн, использован универсальный автоматизированный видеоизмерительный комплекс оценки состояния коммутации (АВК-ОК), позволяющий исследовать работу коллекторно-

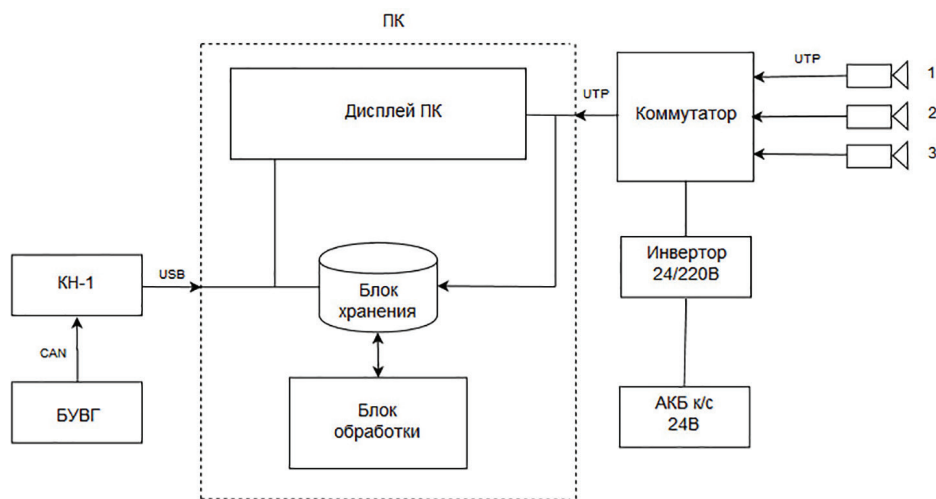


Рис. 2. Структура видеоизмерительного комплекса оценки состояния коммутации

щетоchnого узла при эксплуатации автосамосвала (рис. 2), и представленный в [5].

Для получения видеосигнала использованы IP видеокамеры и коммутатор; для получения данных от системы управления БЕЛАЗ по CAN шине применен комплект наладчика КН-1. Видеоинформация с помощью программы VideoSurveillanceSoftware в режиме реального времени отображается на экране персонального компьютера и сохраняется в его памяти. Программное обеспечение CANmonitor (StrimSoftware) позволяет получать системные сообщения по CAN шине и в режиме реального времени выполнять построение графиков тока, напряжения, скорости движения и др., а также сохранять их в оригинальном формате \*.csmtd и экспортировать в формат \*.mat [6]. Функция экспорта данных в \*.mat позволяет провести детальное исследование электромагнитных процессов ТЭД с применением программы MATLAB.

В процессе опытной поездки карьерного самосвала в памяти устройства сохраняется видеоархив и переменные, полученные от системы управления, а после проведения оператором обработки — хранятся ее результаты. Блок обработки представляет собой программный блок, в котором происходит синхронизация, обработка и анализ сохраненных данных. Для реализации блока обработки переменных и видеофайлов разработана методика оценки состояния коммутации по видеоизображению.

Обработка видеоизображения проводится с целью присвоения класса коммутации и построения графика интенсивности искрения от времени  $V_i(t)$ . Методика оценки интенсивности искрения по видеоизображению позволяет автоматизировать процесс обработки исходных данных и исключить субъективную составляющую. Графическая схема алгоритма оценки коммутации ТЭД по видеоизображению, реализующая методику, приведена на рис. 2, алгоритм реализован в программе MATLAB R2017b [7].

На первом этапе осуществления методики выполняется загрузка видеофайла (блок 1) и переменных от системы управления БелАЗ (блок 2). Для программы видеофайл представляет собой последовательность кадров — набор растровых изображений с разрешением  $1280 \times 720$  пикселей и частотой следования 25 кадр/с. С математической точки зрения, цифровое изображение представля-

ет собой двумерную матрицу  $frame(x, y)$  размера  $[DimX \times DimY]$ , где  $x$  — целое число от 0 до  $DimX - 1$ , описывающее номер элемента в строке матрицы,  $y$  — целое число от 0 до  $DimY - 1$ , описывающее номер строки матрицы, в которой расположен данный элемент [8]. Каждый пиксель представляет собой оттенок цвета и задан кодом RGB в диапазоне от 0 до 255 (рис. 3).

После загрузки видеофайла в программу получаем некоторое количество матриц  $N$ , которое определяется командой "nFrames" (блок 4) или по формуле:

$$N = t \cdot f, \quad (1)$$

где  $t$  — это время видеозаписи,  $s$ ;  $f$  — частота следования кадров в видеозаписи, кадр/с.

Для определения искрения в кадре и присвоения класса коммутации в соответствии с ГОСТ 183–74 каждый кадр обрабатывается согласно порядку в теле цикла (блок 5).

Для снижения различных помех (бликов от источника освещения и шумов) проводится операция попиксельного вычитания из матрицы кадра  $K$  матрицы кадра  $Z$  (блок 6):

$$frame(K) = frame(K) - frame(Z), \quad (2)$$

где  $K$  — порядковый номер кадра;  $Z$  — номер кадра, на котором отсутствует искрение, при этом такой кадр определяет оператор при обработке видеофайла. Автоматическое определение кадра с темной коммутацией значительно увеличивает время обработки видеофайла, поэтому такой способ нерацionalен.

Путем попиксельного вычитания определяемой оператором константы ( $0 \times 60$ ) из матрицы кадра  $K$  производится устранение шумов (блок 7):

$$frame(K) = 0 \times 8(frame(K)) - 60. \quad (3)$$

Для компьютерного зрения искра представляет собой белый цвет или близкой к нему, т. е. числовое обозначение RGB стремится к максимальным значениям (255, 255, 255). Для ускорения и упрощения обработки производится конвертация в черно-белое изображение, в котором белые пиксели обозначаются логической единицей, а черные — логическим

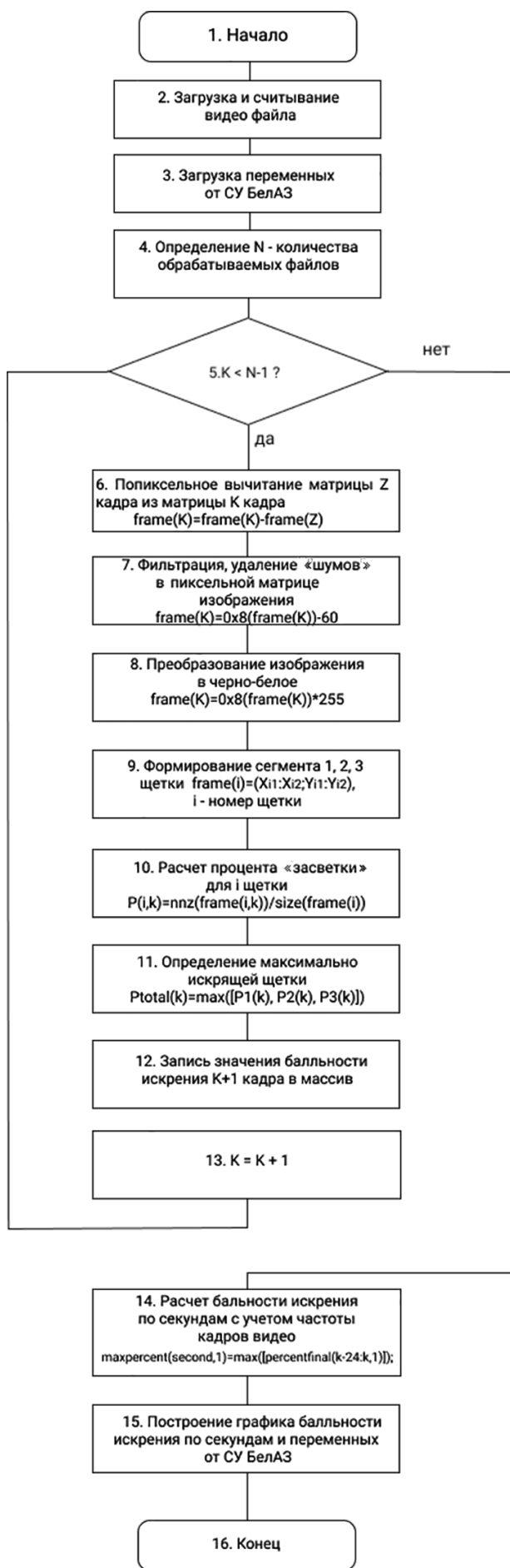


Рис. 3. Алгоритм оценки коммутации по видеозображению

нулем (блок 8) [9]. Таким образом, после фильтрации на кадре с проявлением коммутации остается только черный фон и искрение в виде белых пикселей:

$$frame(K) = 0 \times 8 (frame(K)) : 255. \quad (4)$$

Поскольку в каждом щеткодержателе установлено три щетки, то, соответственно, оценка проводилась по каждой из них и оператору требуется выделить все зоны контакта (блок 9):

$$frame(i) = (X_{i1}; X_{i2}; Y_{i1}; Y_{i2}), \quad (5)$$

где  $i$  — номер щетки в щеткодержателе.

В качестве критерия оценки интенсивности искрения принято отношение количества белых пикселей к размеру зоны контактирования под  $i$ -ой щеткой — процент «засветки» (блок 10), что соответствует рекомендациям ГОСТ 183–74 при визуальной оценке.

$$P_i(K) = nnz(frame_i(K)) / size(frame_i(K)) \cdot 100\%, \quad (6)$$

где  $nnz(frame_i(K))$  — количество белых пикселей в зоне контактирования  $i$ -ой щетки в  $K$ -ом кадре;  $size(frame_i(K))$  — размер зоны контактирования  $i$ -ой щетки.

Программа рассчитывает процент «засветки» под каждой щеткой, и для присвоения класса коммутации выбирается наибольшее значение (блок 11):

$$P_{\max}(K) = \max([P_1(K), P_2(K)], P_3(K)). \quad (7)$$

Следующим шагом алгоритма является присвоение  $K$ -ому кадру соответствующего класса коммутации (блок 12)  $Vi(K)$ . Предварительно методом экспертных оценок выделены кадры с интенсивностью искрения от  $1\frac{1}{4}$  до 2 и для каждого из них рассчитан граничный процент «засветки» (табл. 2).



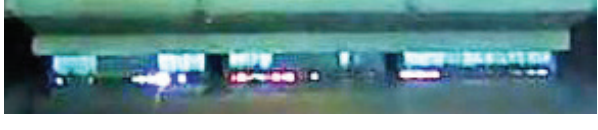

Таким способом обрабатывается каждый кадр видеозображения и формируется матрица значений балла искрения от времени  $Vi(t)$  (блок 14).

Конечным этапом методики является построение графиков интенсивности искрения в баллах ГОСТ 183-74 (рис. 4) и синхронизированных во времени сигналов тока, напряжения и частоты вращения ТЭД, полученных от системы управления карьерным самосвалом. Для анализа причин искрения ТЭД дополнительно рассчитаны коэффициенты пульсации ( $K_p$ ) и ослабления магнитного потока ( $K_{op}$ ), характеризующие электромеханические процессы в электродвигателе.

По полученным данным оператор и другие заинтересованные специалисты могут дать качественную оценку работы ТЭД в рассмотренных условиях эксплуатации, а при необходимости — разработать мероприятия, направленные на улучшение коммутации.

Проведенные исследования показали, что наблюдается коммутация класса 2 и выше в режиме электродинамического торможения при скоростях движения карьерного самосвала 42–45 км/ч для всех типов двигателей. Установлено, что повышенная интенсивность искрения  $1\frac{1}{2}$  проявляется в двигательном режиме работы ТЭД всех производителей при ослаблении поля, а коммутация тем хуже, чем глубже ослабление и больше коэффициент пульсации. В результате происходит снижение маг-

## К определению критерия оценки интенсивности искрения

| Фрагмент видеокadra у сбегающего края электрической щетки                         | Характеристика степени искрения                     | Класс коммутации | Процент «засветки», % |
|---|---|------------------|-----------------------|
|  | Отсутствие искрения                                 | 1                | $Bi(K) < 2$           |
|  | Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки | 1j               | $2 < Bi(K) < 30$      |
|  | Слабое искрение под большей частью щетки            | 1S               | $30 < Bi(K) < 75$     |
|  | Искрение под всем краем щетки                       | 2                | $Bi(K) > 75$          |

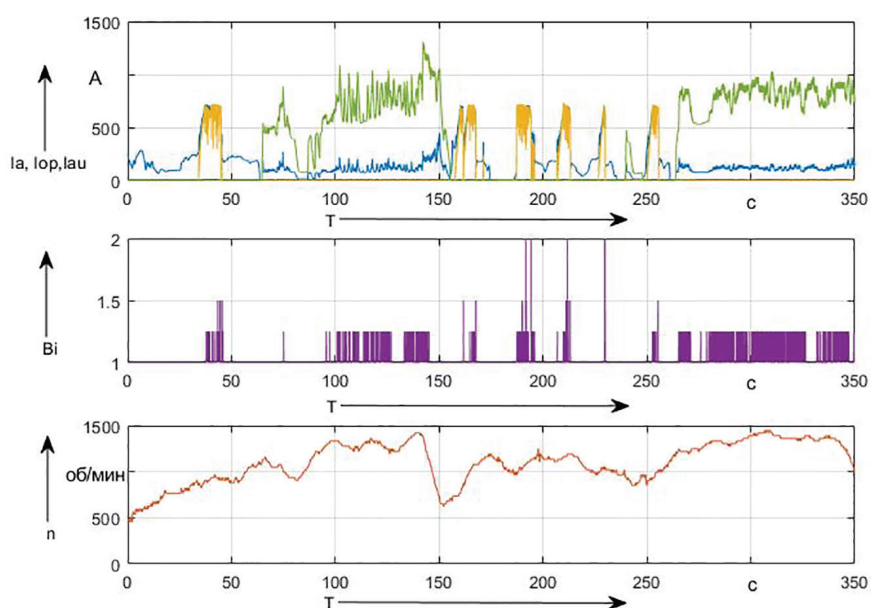


Рис. 4. Графики электромеханических параметров ТЭД

нитного потока вплоть до 90 % и пульсации в ряде измерений превысили 20 %, что затрудняет работу добавочных полюсов и приводит к недокомпенсации ЭДС самоиндукции в зоне контакта щетка-коллектор [10].

Полученные в ходе настоящего исследования результаты могут быть полезны эксплуатирующим организациям, заводам изготовителям ТЭД постоянного тока и разработчикам систем управления тяговым электроприводом для карьерного самосвала БелАЗ. Для эксплуатирующей организации предложенная методика оценки состояния коммутации позволит выработать рекомендации для выбора ре-

жимов эксплуатации карьерных самосвалов, предусматривающих ограничение электромеханических параметров ТЭД, негативно влияющих на состояние коммутации. Предложенные рекомендации позволят снизить риск внепланового ремонта и увеличить срок службы коллектора и электрических щеток ТЭД. Для производителей электродвигателей полученные данные позволят учесть особенности эксплуатации на этапе проектирования и при настройке выпускаемой продукции. Информация о состоянии коммутации позволит разработчикам системы управления: определить режимы, которые негативно влияют на работу ТЭД и вызывают по-

вышенное искрение; осуществить рациональную настройку тягового электропривода карьерного самосвала.

#### Библиографический список

1. Руководство по эксплуатации на электропривод переменного тока карьерных самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 120–220 тонн с электроприводом 75131-2100030 РЭ. Жодино: ОАО «БЕЛАЗ», 2018. 48 с.
2. Лившиц П. С. Скользящий контакт электрических машин. М.: Энергия, 1974. 272 с.
3. Нэлин В. И., Богатырев Н. Я., Ложкин Л. В. [и др.]. Механика скользящего контакта. М.: Транспорт, 1966. 255 с.
4. Коммутация в тяговых электродвигателях и других коллекторных машинах: сб. ст. / Отв. ред.: М. Ф. Карасев, В. Н. Козлов. Омск: Изд-во ОмИИТ, 1974. 97 с.
5. Найден С. Н. Видеоизмерительный комплекс оценки состояния коммутации тяговых электродвигателей карьерного самосвала БелАЗ 75306 в условиях эксплуатации // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2018. С. 88–94. ISBN 978-5-949-41213-8.
6. Стрим интерфейс. Руководство оператора ВУ/112.28330147.00002–02 34 02; 2007. Могилев: ОДО «СТРИМ», 2017. 63 с.
7. MathWorks — Makers of MATLAB and Simulink. URL: <https://ch.mathworks.com/> (дата обращения: 23.04.2019).
8. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В. [и др.]. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: моногр. М.: Физматкнига, 2010. 672 с. ISBN 978-5-89155-201-2.
9. Дёмин А. Ю. Основы компьютерной графики. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 191 с.
10. Харламов В. В., Чупрына Е. Ю., Сергеев Р. В. [и др.]. Повышение коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 7. С. 138–147.

**ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: hvv-omgups@mail.ru

**НАЙДЕН Сергей Николаевич**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

Адрес для переписки: Sergeynayden@gmail.com

**ШКОДУН Павел Константинович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 4887-3420

Адрес для переписки: emoe@omgups.ru

**ПЕТРОВ Павел Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 9236-9284

Адрес для переписки: petrovomgups@mail.ru

**ХЛОПЦОВ Андрей Сергеевич**, кандидат технических наук, инженер кафедры «Автоматика и системы управления».

SPIN-код: 1089-9182

Адрес для переписки: khloptsov@mail.ru

#### Для цитирования

Харламов В. В., Найден С. Н., Шкодун П. К., Петров П. Г., Хлопцов А. С. Методика оценки состояния коммутации тяговых электродвигателей карьерных самосвалов в условиях эксплуатации // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 23–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-23-28.

Статья поступила в редакцию 17.06.2019 г.

© В. В. Харламов, С. Н. Найден, П. К. Шкодун, П. Г. Петров, А. С. Хлопцов