

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕХАТРОННОЙ ТРАНСМИССИИ АВТОСАМОСВАЛА БЕЛАЗ-90

С.И. Малафеев^{1,2}, В.И. Коняшин², А.А. Новгородов²

¹ Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, Россия, e-mail: simalafeev@gmail.com,

² ООО Компания «Объединенная Энергия», Москва, Россия

Аннотация: Представлены результаты проектирования, исследования и внедрения нового технического решения мехатронной трансмиссии переменного тока для автосамосвала БелАЗ-90. Энергетическая установка системы содержит дизельный двигатель внутреннего сгорания, вал которого соединен с ротором синхронного тягового генератора с электромагнитным возбуждением. Две трехфазные статорные обмотки синхронного тягового генератора подключены к двум диодным мостам, образующим 12-пульсную схему выпрямления для электропитания звена постоянного тока. Тяговые асинхронные двигатели левого и правого ведущих мотор-колес подключены к выходам соответствующих автономных инверторов напряжения, реализованных на IGBT-транзисторах пятого поколения FF1800R17P5. Блоки управления силовых преобразователей тяговых двигателей формируют сигналы задания момента на каждое мотор-колесо и сигналы выбора режима работы (режим удержания, режим круиз-контроля, специальные сервисные режимы). Управление напряжением звена постоянного тока осуществляется путем регулирования тока возбуждения генератора с помощью трехконтурной системы регулирования с обратными связями по току и напряжению звена постоянного тока и выходному напряжению генератора. В мехатронной трансмиссии реализованы антипробуксовочные и антиблокировочные функции, а также режимы удержания автосамосвала при нулевой скорости и стабилизации скорости при движении (круиз-контроль). Информационно-диагностическая система выполняет непрерывную запись основных параметров в журнал работы и сохранение предыстории аварийных процессов на SD-карте. Испытания мехатронной трансмиссии на Сафоновском электромашиностроительном заводе и промышленная эксплуатация самосвала «БЕЛАЗ 75583» на разрезе «Березовский» (АО «Стройсервис») подтвердили высокие технические характеристики разработанной системы.

Ключевые слова: автосамосвал, трансмиссия, мехатроника, управление, мотор-колесо, преобразователь, генератор, двигатель.

Для цитирования: Малафеев С. И., Коняшин В. И., Новгородов А. А. Проектирование и реализация мехатронной трансмиссии автосамосвала БЕЛАЗ-90 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №9. – С. 169–179. DOI:10.25018/0236_1493_2022_9_0_169.

Mechatronic transmission design and implementation for dump truck BelAZ-90

S.I. Malafeev^{1,2}, V.I. Konyashin², A.A. Novgorodov²

¹ A. and N. Stoletovs Vladimir State University, Vladimir, Russia, e-mail: simalafeev@gmail.com

² «Joint Power» Company, Ltd, Moscow, Russia

Abstract: The article describes design, investigation and introduction of a new engineering solution for a mechatronic alternating current transmission for dump truck BelAZ-90. The power system of the transmission contains a Diesel combustion engine connected via a shaft with a rotor of an electromagnetically driven traction alternator. Two three-phase stator windings of the traction alternator are connected with two diode bridges which generate a 12-pulse rectification circuit for DC link supply. Asynchronous tractive motors of the left and right driving power-wheels are connected to the outlets of the appropriate self-excited inverters on fifth-generation IGBT transistors FF1800R17IP5. The controls of the power converters of the tractive motors generate the momentum signals for each power-wheel and the mode select lights (hold, cruise control, service modes). DC link voltage control includes adjustment of the alternator drive current using the three-flow regulation system with the DC link current and voltage feedback and with the alternator output voltage feedback. The mechatronic transmission implements anti-slipping and anti-locking functions, as well as the modes of holding the dump truck at zero velocity and speed stabilization (cruise control). The information and diagnosis system performs continuous logging of the main operating parameters and stores the accident pre-history on a SD card. The mechatronic transmission testing at Safonovsky Electric Machine Building Plant and the commercial operation of dump truck BelAZ 75583 at Berezovsky open pit mine, Stoiservis JSC proved high performance capabilities of the design.

Key words: dump truck, transmission, mechatronics, control, power-wheel, inverter, alternator, motor.

For citation: Malafeev S. I., Konyashin V. I., Novgorodov A. A. Mechatronic transmission design and implementation for dump truck BelAZ-90. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(9):169-179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_169.

Введение

На карьерных автосамосвалах БелАЗ преимущественное использование получила электромеханическая трансмиссия переменного-переменного тока с асинхронными приводными двигателями [1 – 4]. В настоящее время в России на автосамосвалах грузоподъемностью 90 т применяются системы, разработанные ПАО «Силовые машины» и концерном «Русэлпром» [5 – 6]. Опыт эксплуатации машин в различных климатических условиях на предприятиях России и за рубежом свидетельствует об эффективности технических решений электро-трансмиссии [5 – 7]. Актуальные направления дальнейшего совершенствования мехатронных систем для автосамосва-

лов — это достижение максимальных скоростных и энергетических характеристик, применение новых электромеханических и электронных компонентов, повышение качества автоматических систем управления, в том числе при проскальзывании и блокировке мотор-колес, увеличение надежности [8 – 10].

Для решения указанных задач концерном Русэлпром совместно с Компанией «Объединенная Энергия» разработано новое техническое решение системы управления электромеханической трансмиссией переменного-переменного тока. В настоящей статье приведены основные результаты выполненных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Структура мехатронной трансмиссии автосамосвала БелАЗ-90

Функциональная схема мехатронной системы автосамосвала показана на рис. 1. Энергетическая установка системы содержит дизельный двигатель внутреннего сгорания ДВС, вал которого соединен с ротором синхронного тягового генератора СТГ (СГТ-700-8УХЛ2) с электромагнитным возбуждением. Две трехфазные статорные обмотки СГТ, напряжения которых сдвинуты по фазе на угол $\pi/6$, подключены к двум диодным мостам, образующим 12-пульсную схему выпрямления для электропитания звена постоянного тока. Емкостный фильтр звена постоянного тока (С1 и С2) выполнен с использованием пленочных конденсаторов, соединенных

многослойной ламинированной шиной. Тяговые асинхронные двигатели ТАД (ТАД-320-6В3) левого и правого бортов подключены к выходам автономных инверторов напряжения ТП1 и ТП2. Инверторы реализованы на IGBT транзисторах пятого поколения FF1800R17IP5 [11]. Эти полупроводниковые компоненты фирмы Infineon отличаются низкими тепловыми потерями в кристаллах, эффективным охлаждением кристаллов, а также надежными и термостабильными медными шинами, соединяющими кристаллы в приборах. За счет новых технологий удельная мощность полупроводниковых приборов увеличена на 25%; тепловые потери уменьшены на 30... 35%, а срок службы транзисторов (количество циклов «нагрев – охлаждение») повышен в 5 раз по сравнению с

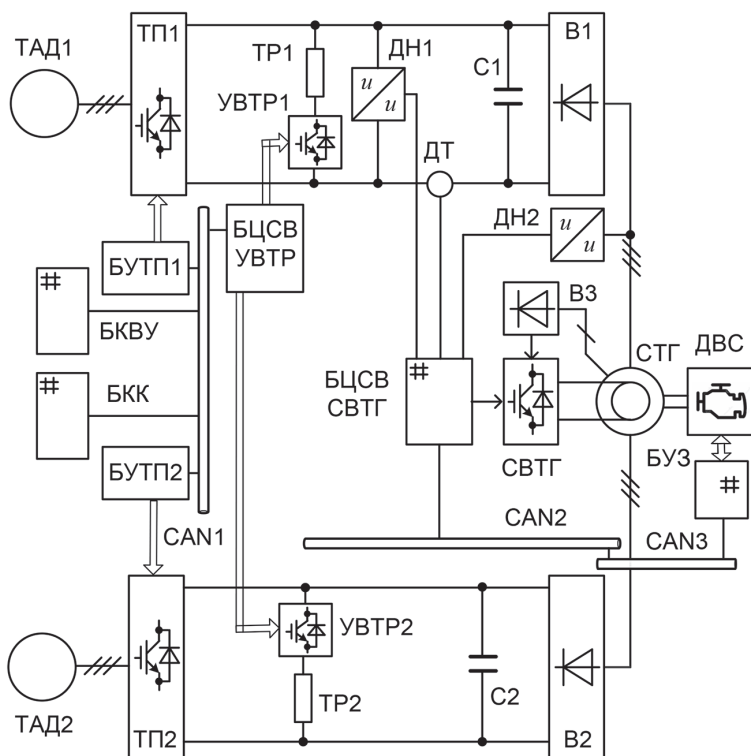


Рис. 1. Функциональная схема мехатронной трансмиссии автосамосвала

Fig. 1. Function chart of mechatronic transmission of dump truck

традиционными приборами [12]. Блоки управления силовых преобразователей тяговых двигателей формируют сигналы задания момента на каждое мотор-колесо и сигналы выбора режима работы (режим удержания, режим круиз-контроля, специальные сервисные режимы). Сигналы управления силовыми транзисторами инверторов формируются в БУТП с использованием метода векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с переменной частотой коммутации, которые через блок гальванической развязки транслируются в драйверы IGBT-модулей.

Управление напряжением звена постоянного тока осуществляется путем регулирования тока возбуждения СТГ с помощью транзисторного преобразователя СВТГ с трехконтурной системой регулирования (устройство БЦСВ СВТГ). В системе организованы обратные связи по току возбуждения, напряжению звена постоянного тока и выходному напряжению СТГ с помощью датчиков соответственно тока ДТ и напряжений ДН1 и ДН2. Электропитание преобразователя осуществляется от дополнительной однофазной статорной обмотки и диодного выпрямителя ВЗ. В звене постоянного тока предусмотрены устройства сброса энергии при рекуперации — тормозные резисторы TR, коммутируемые с помощью транзисторных ключей УВТР. Управление транзисторами тормозных прерывателей (устройство БЦСВ УВТР) — релейное, с гистерезисом.

Формирование аналогового задания оборотов дизельного двигателя выполняется блоком управления заслонкой (БУЗ) сигналом от блока кабинного контроллера (БКК) по CAN-сети. Блок кабинного контроллера (БКК) обеспечивает формирование управляющей и диагностической информации, ретранслируемой в БКВУ и на электронную панель приборов соответственно, формирова-

ние сигналов включения фонарей электродинамического торможения, зуммера и фонарей заднего хода, а также формирование сигналов управления выходным реле включения напряжения питания системы управления, размещенной в шкафу преобразователей и системы управления (ШПСУ).

Управление электромеханической трансмиссией производится контроллером верхнего уровня БКВУ. Этот контроллер обеспечивает обработку сигналов от органов управления и датчиков подсистем самосвала, управление оборотами ДВС, регулирование потребляемой мощности мотор-колесами, реализует алгоритмы управления движением, включая специальные режимы и функции (противооткатный, антибукс, антиюз), формирование сигналов включения фонарей электродинамического торможения, зуммера и фонарей заднего хода, автоматическую настройку блоков ШПСУ при их замене. Принудительная автонастройка выполняется при отличии сохраненных коэффициенты в flash-памяти заменяемого блока управления от коэффициентов, сохраненных в flash-памяти БКВУ.

Обмен данными с подсистемами самосвала, а также с блоками ШПСУ осуществляется по каналу CAN. В целях обеспечения надежности и бесперебойной работы на самосвале организовано три независимых CAN-канала:

- CAN 1, физически расположенный в ШПСУ и обеспечивающий взаимодействие находящихся в нем устройств;
- CAN 2, связывающий ШПСУ и кабину самосвала (обмен данными между БКВУ и кабинным контроллером);
- CAN 3 — дополнительный интерфейс CAN, который может общаться с устройствами самосвала посредством стандартного протокола J1939 БКК.

Каждый из блоков в составе ШПСУ в процессе работы транслирует через

CAN-сеть в БКВУ текущие значения переменных электропривода и флаги состояния устройств, входящих в состав трансмиссии. БКВУ обеспечивает диспетчеризацию системы защит и диагностику состояния КТЭО до функционального узла и непрерывную запись логов состояния КТЭО на SD-карту. В кабине водителя установлен блок кабинного контроллера (БКК), считывающий цифровые (сухие контакты: кнопки, тумблеры, реверсор, релейные сигналы) и аналоговые (педаль газа и тормоза) сигналы внутри кабины. Блок кабинного контроллера также выводит диагностическую информацию в электронную панель приборов (ЭПП).

Для контроля состояния и выявления аварийных ситуаций каждый из блоков управления выполняет проверку наличия в его CAN-сети необходимых ему блоков. При потере связи с БКВУ по CAN-сети БУТП переходит систему управления в режим удержания самосвала в нулевой скорости. При потере связи БЦСВ СВТГ по CAN-сети с модулями БКВУ, БЦСВ, БСПС происходит его отключение. При различных аварийных ситуациях обеспечивается возможность остановки или движения на одном исправном мотор-колесе.

В мехатронной трансмиссии реализованы антипробуксовочные и антиблокировочные функции, режим ограничения дифференциала, а также режимы удержания автосамосвала при нулевой скорости и стабилизации скорости при движении (круиз-контроль). Для включения указанных режимов на панели водителя установлены два тумблера: «АБС» и «Контроль дифференциала».

Антиблокировочная система реализована на основе типового алгоритма и предотвращает блокировку ведущих колес самосвала во время торможения [13, 14]. Алгоритм работает индивидуально для каждого колеса и основан на изме-

рении и контроле ускорения и скольжения. Независимая антиблокировка для каждого тормозящего колеса совместно с ограничением дифференциала предотвращает боковое смещение при торможении. Простейший вариант реализации алгоритма не требует дополнительных датчиков скорости транспортного средства. Однако в этом случае система имеет сравнительно низкую эффективность на скользком льду и при больших скоростях движения автосамосвала. При наличии информации о линейной скорости самосвала (скорости неведущих, неблокируемых колес) этот алгоритм легко модифицируется путем добавления параметра скольжения. Благодаря этому повышается устойчивость автосамосвала и снижается тормозной путь на различных типах дорожного покрытия, особенно на скользком льду.

В системе управления мотор-колесами реализован алгоритм ограничения дифференциала. Если разность между скоростями колес превышает заданную величину, происходит снижение тягового усилия с колеса, которое вращается с большей скоростью. Скорость колеса ограничивается. Это позволяет сохранять устойчивость самосвала при движении в тяговом режиме по скользкой, неоднородной поверхности, однако суммарное тяговое усилие может снижаться и при некоторых условиях оказаться недостаточным. Фактически этот алгоритм является частью системы антипробуксовки без учета ускорения ведущих и скорости неведущих колес.

При включении (переключении) кнопки «Контроль дифференциала» система управления отключает ограничение дифференциала. Получается открытый дифференциал с заданным распределением суммарного момента. Это в некоторых случаях позволяет повысить тяговое усилие самосвала в ущерб устойчивости.

Совместная работа ограничений дифференциала и ускорения дает очень хороший практический результат — пробуксовка происходит только в статике, когда оба колеса проскальзывают из-за недостаточного сцепления и отсутствует информация о реальной линейной скорости движения самосвала.

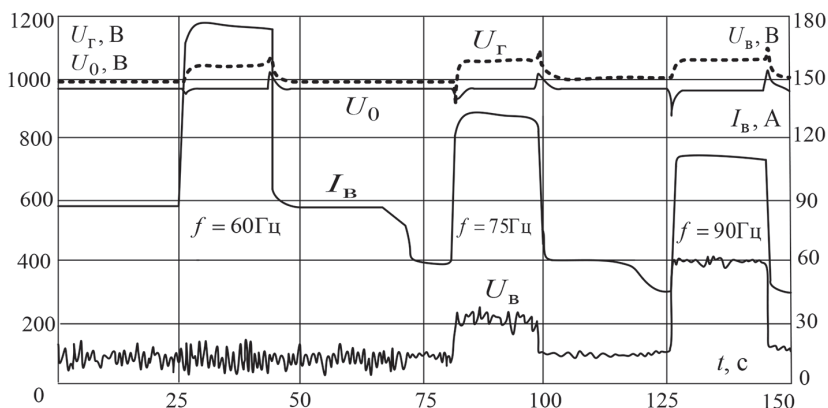
Мехатронная трансмиссия содержит информационно-диагностическую систему [15]. Мониторинг выполняется с непрерывной записью основных параметров в журнал работы, предыстория аварийных процессов сохраняется на встроенной в БКВУ SD-карте. При этом предусмотрено блокирование развития аварийных процессов. При заполнении памяти БКВУ стирает наиболее старый файл логов и вместо него начинает запись нового.

Диагностическая информация и переменные состояния привода каждого мотор-колеса через CAN-сеть и БКВУ ретранслируются в роутер, а оттуда на удаленный сервер. Таким образом возможно отслеживание работы самосвала дистанционно из любой точки контроля. Также роутер создает локальную

WiFi-сеть самосвала, позволяя подключиться к локальной сети самосвала дистанционно, без использования Ethernet-кабеля. Если роутер отсутствует, к БКВУ можно подключиться напрямую соединением точка — точка при помощи пачкорда (стандартного провода Ethernet).

Результаты стендовых испытаний оборудования

Испытания ШПСУ проводились на стенде в Испытательном центре Сафоновского электромашиностроительного завода в январе 2021 г. Стенд содержит силовую электромашинную установку, включающую два асинхронных двигателя типа ТАД-320-6ВЗ, соединенных механически через моментную муфту, синхронный генератор типа СГТ-700 и соединенный с ним механически третий гонный асинхронный двигатель типа АДБС-1000-6У2, имитирующий дизельный двигатель. Управление гонным асинхронным двигателем осуществляется от преобразователя частоты фирмы VACON. Асинхронные машины и синхронный генератор подключаются к испытываемому ШПСУ. Испытания проводились ме-



$U_{Г}$ — амплитудное значение напряжения генератора; U_0 — выпрямленное напряжение; $U_{В}$ — выпрямленное напряжение самовозбуждения СТГ; $I_{В}$ — ток возбуждения СТГ

Рис. 2. Оциллограммы процессов для синхронного генератора при включении активной нагрузки 680 кВт при разных частотах напряжения СТГ: $f = 60$ Гц, $f = 75$ Гц, $f = 95$ Гц

Fig. 2. Oscillograms for alternator in actuation of active load 680 kW at different frequencies: $f = 60$ Hz, $f = 75$ Hz, $f = 95$ Hz

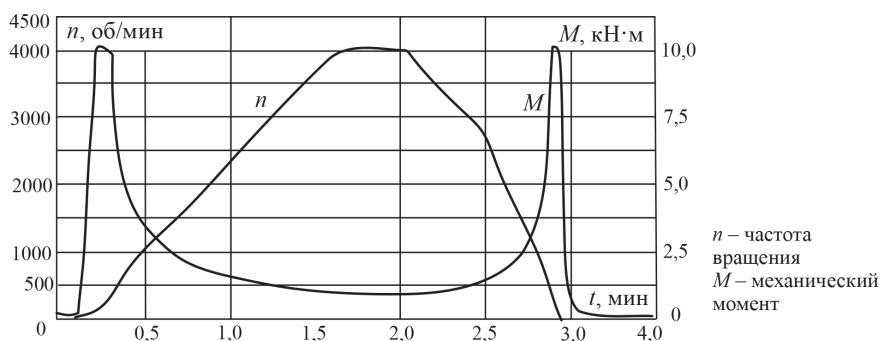


Рис. 3. Осциллограмма разгона и торможения привода

Fig. 3. Oscillogram of engine acceleration and braking

тодом взаимной нагрузки [16]. Одна из машин работает двигателем, а вторая генератором, обеспечивающим электропитание первой машины. Обмен энергией между двумя асинхронными двигателями осуществляется через общее звено постоянного тока преобразователей. Измерение параметров процессов производится с помощью информационно-диагностической системы ШПСУ, а также цифровых и аналоговых электроизмерительных приборов.

На рис. 2 представлены осциллограммы работы синхронного генератора при включении активной нагрузки 680 кВт при частотах выходного напряжения 60, 75 и 95 Гц. При всех частотах система управления обеспечивает необходимую стабилизацию напряжения в звене постоянного тока. Экспериментальные осциллограммы для скорости и момента двигателя при разгоне и торможении представлены на рис. 3. На рис. 4 приведена тяговая характеристика привода.

Стендовые испытания подтвердили соответствие всех характеристик системы техническим требованиям и результатам теоретических расчетов и моделирования.

Результаты промышленной эксплуатации

Исследование мехатронной трансмиссии в условиях промышленной эксп-

луатации самосвала БелАЗ 75583 проводились на разрезе «Березовский» (АО «Стройсервис»).

При проведении испытаний производилась проверка различных алгоритмов совместного управления приводом и дизельным генератором. На рис. 5 представлена осциллограмма мощности СТГ. Экспериментальным путем было выявлено, что рабочая мощность привода, отбираемая от синхронного генератора, составляет 630 кВт при номинальном значении 700 кВт. Это также подтверждается опытом по нагрузке дизельного двигателя УВТР. Объем энергии, преобразуемой в теплоту на УВТР, составил

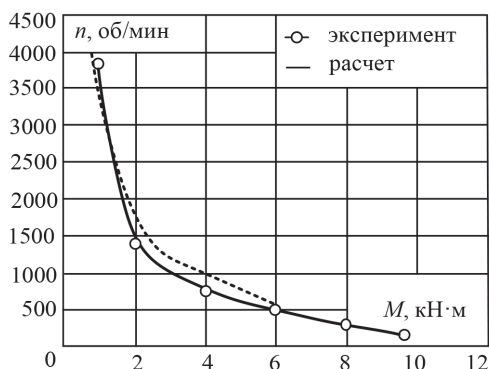


Рис. 4. Экспериментальная и расчетная (установленная техническими требованиями) тяговые характеристики привода

Fig. 4. Experimental and rated (specifications) traction performance of engine

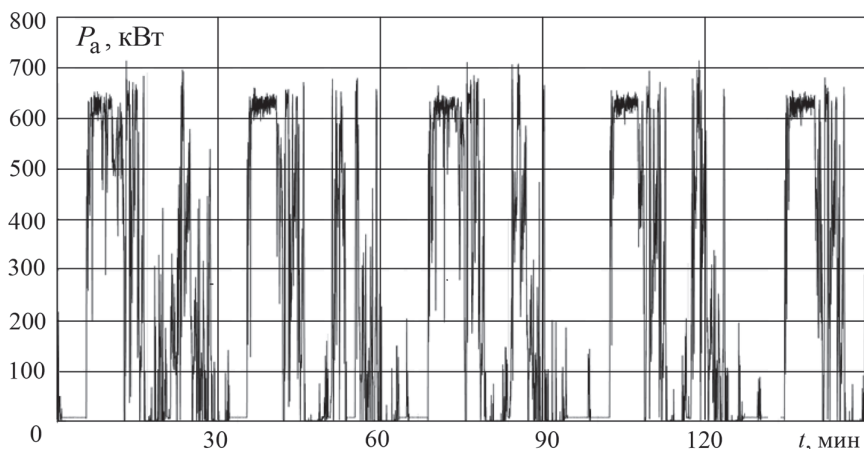


Рис. 5. Осциллограмма мощности СТГ
Fig. 5. Alternator capacity oscillogram

25% от энергии, потребленной дизельным генератором.

При проведении испытаний регистрировалась температура силовых модулей и конденсаторных батарей. Максимальная зарегистрированная температура силового модуля составила 58 °С, конденсаторной батареи — 43 °С при температуре окружающей среды 31 °С.

Максимальная температура двигателя мотор-колеса не превысила 106 °С.

На рис. 6 показан главный экран удаленного мониторинга мехатронной системы.

Заключение

Результаты стендовых и объектных испытаний новой мехатронной транс-

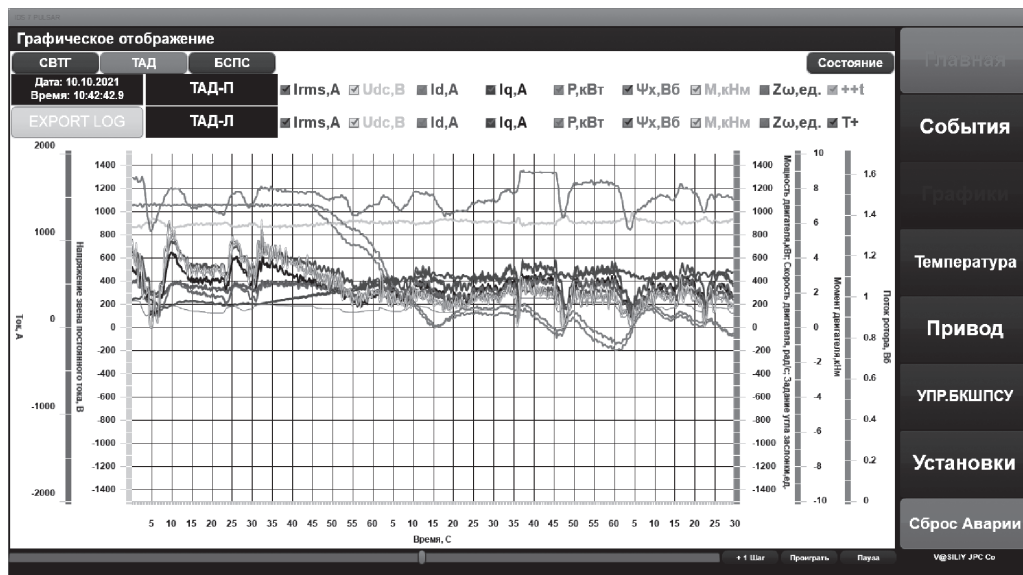


Рис. 6. Экран удаленного мониторинга
Fig. 6. Remote monitoring display

миссии автосамосвала БелАЗ подтвердили повышенные технические характеристики системы. С октября 2021 г. на угольных предприятиях Кузбасса эксплуатируются 2 самосвала с новым комплектом тягового электрооборудования. Пробеги самосвалов на март 2022 г. составили более 60 тыс. км. Коэффициент технической готовности самосвалов составил 0,95 и выше. По результатам испытаний и экспертным оценкам специалистов эксплуатирующей организации тягово-динамические характеристики полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к самосвалам с электромеханической трансмиссией. В настоящее время завершены работы по подготовке серийного производства новой

модели ШПСУ для БелАЗ-90. В первом квартале 2022 г. на основании разработанной проектной документации изготовлено 5 ШПСУ. Два экземпляра устройств прошли успешные испытания на полигоне БелАЗ в апреле 2022 г.

Авторы выражают благодарность сотрудникам концерна «Русэлпром»: руководителю программы «Карьерный транспорт» А.А. Бычкову, главному конструктору, руководителю технического центра Сафоновского электромашиностроительного завода Ю.А. Сафроненкову и руководителю проектов программы «Карьерный транспорт» Г.С. Назаровой за помощь в реализации проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козярук А. Е., Камышьян А. М. Повышение энергетической эффективности электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала // Записки Горного института. — 2019. — Т. 239. — С. 576–582. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.576.
2. Дубинкин Д. М., Пашков Д. А., Архицкий Н. А. Обоснование конструктивного решения трансмиссии автономного карьерного самосвала грузоподъемностью до 90 тонн // Горное оборудование и электромеханика. — 2021. — № 3. — С. 12–19. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-12-19.
3. Feng Y., Dong Z., Yang J., Cheng R. Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks / 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/MESA.2016.7587102.
4. Liang J., Xu X., Dong P., Feng T., Guo W., Wang S. Energy management strategy of a novel electric dual-motor transmission for heavy commercial vehicles based on APSO algorithm // Sustainability. 2022, vol. 14, article 1163. DOI: 10.3390/su14031163.
5. 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.
6. Казубенко А. Ф. Самосвалы БелАЗ с электромеханической передачей // Уголь. — 2019. — № 5. — С. 5–51.
7. 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.
8. 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.
9. Sistik V., Pikilnyak A. The wheeled vehicle forced additional turn analytical study // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2019, vol. 63, no. 3, pp. 165–170. DOI: 10.3311/PPme.11103.

10. Lagunova Y. A., Khoroshavin S. A., Kalyanov A. E. Durability increase of mining dump trucks through the use of protective coatings of the body // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 862, article 032029, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032029.

11. Малафеев С. И., Коняшин В. И., Новгородов А. А. Экскаватор ЭКГ-20: новое техническое решение мехатронного комплекса // Уголь. – 2019. – № 7. – С. 4–7. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-4-7.

12. Abuelnaga A., Narimani M., Bahman A. S. A review on IGBT module failure modes and lifetime testing // IEEE Access. 2021, vol. 9, pp. 9643–9663. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3049738.

13. Kiencke U., Nielsen L. Automotive control systems for engine, driveline, and vehicle. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2005, 512 p.

14. Kost F., Ehret T., Wagner J., Papert U., Heinen F., Eberspächer P., Schuh J., Koch-Dücker H.-J., Niewels F. Antilock Braking System (ABS) / Automotive Mechatronics. Bosch Professional Automotive Information. Springer Vieweg, Wiesbaden. 2015, pp. 354–369. DOI: 10.1007/978-3-658-03975-2_14.

15. Малафеев С. И., Малафеев С. С. Информационные и управляющие компоненты электрических карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 33–45. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33.

16. Malafeev S. I., Novgorodov A. A., Konyashin V. I. Bench tests of the quarry excavators main electric drives / XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). Saint-Petersburg, 2020. DOI: 10.1109/icepds47235.2020.9249257. **PLAB**

REFERENCES

1. Kozyaruk A. E., Kamyshyan A. M. Improving the energy efficiency of the electromechanical transmission of a quarry dump truck. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 576–582. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.576.

2. Dubinkin D. M., Pashkov D. A., Architsky N. A. Transmission design solution justification of autonomous mining dump truck lifting capacity up to 90 tons. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2021, no. 3, pp. 12–19. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-12-19.

3. Feng Y., Dong Z., Yang J., Cheng R. Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks. *12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*. 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/MESA.2016.7587102.

4. Liang J., Xu X., Dong P., Feng T., Guo W., Wang S. Energy management strategy of a novel electric dual-motor transmission for heavy commercial vehicles based on APSO algorithm. *Sustainability*. 2022, vol. 14, article 1163. DOI: 10.3390/su14031163.

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

6. Kazubenko A. F. BelAZ dump trucks with electromechanical transmission. *Ugol'*. 2019, no. 5, pp. 5–51. [In Russ].

7. Khazin M. L. Electric trucks for underground and open pit mining. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2019, no. 1(53), pp. 128–135. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-1-128-135.

8. 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.

9. Sistuk V., Pikilnyak A. The wheeled vehicle forced additional turn analytical study. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2019, vol. 63, no. 3, pp. 165–170. DOI: 10.3311/PPme.11103.

10. Lagunova Y. A., Khoroshavin S. A., Kalyanov A. E. Durability increase of mining dump trucks through the use of protective coatings of the body. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 862, article 032029, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032029.

11. Malafeev S. I., Konyashin V. I., Novgorodov A. A. Excavator EKG-20: new technical solution of mechatronic complex. *Ugol'*. 2019, no. 7, pp. 4–7. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-4-7.

12. Abuelnaga A., Narimani M., Bahman A. S. A review on IGBT module failure modes and lifetime testing. *IEEE Access*. 2021, vol. 9, pp. 9643–9663. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3049738.

13. Kiencke U., Nielsen L. *Automotive control systems for engine, driveline, and vehicle*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2005, 512 p.

14. Kost F., Ehret T., Wagner J., Papert U., Heinen F., Eberspächer P., Schuh J., Koch-Dücker H.-J., Niewels F. Antilock Braking System (ABS). *Automotive Mechatronics. Bosch Professional Automotive Information*. Springer Vieweg, Wiesbaden. 2015, pp. 354–369. DOI: 10.1007/978-3-658-03975-2_14.

15. Malafeev S. I., Malafeev S. S. Information and control elements of electric mining shovels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4, pp. 33–45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33.

16. Malafeev S. I., Novgorodov A. A., Konyashin V. I. Bench tests of the quarry excavators main electric drives. *XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. Saint-Petersburg, 2020. DOI: 10.1109/icepds47235.2020.9249257.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Малафеев Сергей Иванович – доктор техн. наук,
профессор, e-mail: simalafeev@gmail.com,
Владимирский государственный университет
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, 600000,

Коняшин Владимир Игоревич¹ – канд. техн. наук,
e-mail: solytonik@yandex.ru,

Новгородов Андрей Александрович¹ – инженер,
e-mail: novgorodov@jpc.ru,

¹ ООО Компания «Объединенная Энергия».

Для контактов: Малафеев С.И., e-mail: simalafeev@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.I. Malafeev, Doctor Sci (Eng.), Professor,
e-mail: simalafeev@gmail.com,
A. and N. Stoletovs Vladimir State University,
600000, Vladimir, Russia,

V.I. Konyashin¹, Cand Sci (Eng.),
e-mail: solytonik@yandex.ru,

A.A. Novgorodov¹, Engineer,
e-mail: novgorodov@jpc.ru,

¹ «Joint Power» Company, Ltd,
111672, Moscow, Russia,

Corresponding author: S.I. Malafeev, e-mail: simalafeev@gmail.com.

Получена редакцией 25.04.2022; получена после рецензии 07.07.2022; принята к печати 10.08.2022.

Received by the editors 25.04.2022; received after the review 07.07.2022; accepted for printing 10.08.2022.