

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 622.684

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-3-11

Виноградов Анатолий Брониславович, Сибирцев Андрей Николаевич,
Чистосердов Валерий Львович, Гнездов Николай Евгеньевич,
Коротков Александр Александрович, Ермаков Кирилл Константинович *

НТЦ Электропривода «Вектор»

* для корреспонденции: info@vectorgroup.ru

РАСШИРЕННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ



Информация о статье

Поступила:

06 марта 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

30 июня 2025 г.

Принята к печати:

01 августа 2025 г.

Опубликована:

28 августа 2025 г.

Ключевые слова:

ленточный конвейер, частотно-регулируемый привод, многодвигательный электропривод, прямое управление моментом, система автоматического управления, регулирование скорости, синусоидальный профиль, моделирование

Аннотация.

В статье представлена новая разработка научно-технического центра электропривода «Вектор» в области построения системы управления для карьерных самосвалов грузоподъемностью 90-240 тонн. Ее отличительными особенностями от аналогов, представленных на российском рынке, являются: высокая надежность, высококачественное и энергетически эффективное управление всеми режимами движения самосвала как с использованием, так и без использования датчика скорости на валу тягового двигателя, повышенная ремонтпригодность, импортонезависимость по основным силовым компонентам, развитые мониторинговые, диагностические и сервисные функции, построенные на основе современных информационных технологий. В работе подробно рассмотрены новые конструктивные решения и алгоритмы управления без использования датчиков на валу тяговых электродвигателей карьерных самосвалов. Новая рациональная конструкция и компоновка элементов шкафа преобразователей и систем управления для всей линейки самосвалов грузоподъемностью 90-240 тонн обеспечила минимизацию паразитных параметров, ощутимое снижение себестоимости, повышение надежности, ремонтпригодности и технологичности изготовления. Представленные в работе характеристики системы управления самосвалом были подтверждены результатами стендовых, заводских (на площадке ОАО «БЕЛАЗ») и эксплуатационных испытаний в составе карьерного самосвала грузоподъемностью 90 тонн. Представлены результаты испытаний электротрансмиссии в реальных условиях эксплуатации, ее новые функциональные возможности, особенности конструктивного исполнения ее системы управления и организации сервисного обслуживания на местах. Внедрение и серийное производство разработанной системы управления обеспечит бесперебойную максимально независимую от поставок импортных комплектующих работу оборудования добывающей промышленности, а также снижение себестоимости оборудования и повышение надежности без снижения качества управления.

Для цитирования: Виноградов А.Б., Сибирцев А.Н., Чистосердов В.Л., Гнездов Н.Е., Коротков А.А., Ермаков К.К. Расширенные функциональные возможности и импортозамещение в тяговом электрооборудовании карьерных самосвалов // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 4 (180). С. 3-11. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-3-11, EDN: ZGLETO

Введение

Обеспечение бесперебойной, энергоэффективной и максимально независимой от поставок импортных комплектующих работы оборудования

добывающей промышленности особенно важно в текущей экономической ситуации. Достичь этого можно внедрением инновационных решений и в конструкцию, и в алгоритмы работы оборудования.

В последнее десятилетие наблюдается явная тенденция к увеличению грузоподъемности (90 тонн и выше) вводимых в эксплуатацию карьерных самосвалов с электромеханической трансмиссией [1]. В современных условиях к ней предъявляются следующие основные требования:

- высококачественное, энергетически эффективное управление всеми режимами движения самосвала в широком диапазоне изменения скоростей и нагрузок в условиях больших вариаций параметров электрических машин, ограничений на массогабаритные и стоимостные показатели оборудования;
- высокая надежность и ремонтпригодность элементов комплекта тягового электрооборудования (КТЭО);
- импортнезависимость основных компонентов КТЭО;
- высокая эффективность, низкая стоимость и удобство сервисного обслуживания КТЭО.

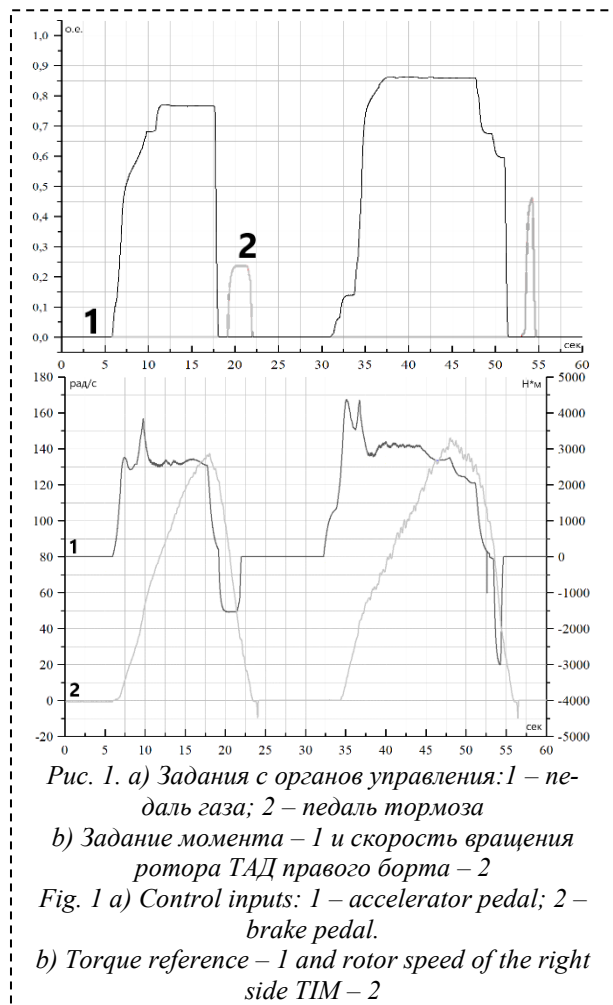
В новых изделиях, разработанных в Научно-техническом центре Электропривода «Вектор» на основе многолетнего опыта эксплуатации сотен экземпляров КТЭО самосвалов грузоподъемностью 90-240 тонн, наших предыдущих разработок совместно с концерном «Русэлпром», вышеперечисленные требования достигаются за счет комплекса программных, схмотехнических, конструктивных и организационных решений, среди которых:

- поддержка режимов работы с датчиком и без датчика скорости на валу тягового асинхронного двигателя (ТАД) в рамках единой системы управления с возможностью перехода между ними «на лету», т. е. в процессе движения самосвала;
- повышение безопасности эксплуатации, управляемости и производительности самосвала за счет опционального введения функции форсированного торможения (эффективность торможения на самосвалах грузоподъемностью 90 тонн повышена более чем на 80% в диапазоне скоростей 15-50 км/ч) и повышения эффективности работы системы ABS как с использованием, так и без использования информации с датчиков скорости передних колес;
- повышение удобства эксплуатации, снижение сроков техобслуживания и ремонта за счет совершенствования сервисных функций диагностики и мониторинга, включая дистанционное получение и обработку информации о состоянии КТЭО, дистанционное обновление программного обеспечения узлов и блоков;
- поддержка современных онлайн-инструментов (сервисов) для обслуживания КТЭО карьерных самосвалов, включающих в себя: «облако» и ресурсный центр НТЦ Электропривода «Вектор» для доступа к актуальному ПО и документации, чат-бот мессенджера Telegram для круглосуточной поддержки сервиса на местах, а также современное инструментальное программное обеспечение для ПК;
- использование в изделиях импортозамещенных интегральных силовых модулей (ИСМ) собственной разработки, не уступающих по своим характеристикам лучшим мировым аналогам;
- оптимизация конструкции шины звена постоянного тока (ЗПТ) и совершенствование системы охлаждения (СОХ) шкафа преобразователей и систем управления (ШПСУ);
- повышение надежности за счет поддержки функций защиты устройств вентилируемых тормозных резисторов (УВТР) от потери вентиляции.

Ниже более подробно рассмотрены вышеуказанные технические решения, отличающие новую разработку НТЦ Электропривода «Вектор» от представленных в литературе и на рынке импортных и отечественных аналогов [2-10].

Новые функциональные возможности КТЭО

Основные принципы построения и результаты исследования систем векторного управления асинхронным электроприводом без датчика скорости, включая его тяговое исполнение, а также результаты стендовых (21-26 марта 2021 года) и заводских (18-28 января 2022 года) испытаний первого образца КТЭО и самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 90 тонн, поддерживающего функции бездатчикового управления, форсированного торможения, улучшенной ABS, представлены в [11, 12]. Ниже рассматриваются результаты эксплуатации самосвала с таким КТЭО, которая осуществляется с мая 2023 года и по настоящее время.



Новое программное обеспечение (ПО), поддерживающее вышеуказанные функции, было установлено на серийный самосвал БЕЛАЗ-75585 (шасси 336), первоначально введенный в эксплуатацию со штатным ПО в июле 2019 года, в связи с неисправностью канала измерения скорости, которую не удалось устранить регулировкой и заменой датчика, что в результате потребовало бы дорогостоящего капитального ремонта либо замены ТАД. Заключительная стадия эксплуатационных испытаний самосвала проходила на участке поля Осинниковское (ООО «ТалТЭК») Кемеровской области в октябре 2023 года в условиях движения по сухой технологической дороге при температуре окружающего воздуха +10 градусов, в результате которой были успешно пройдены следующие испытания на груженом и порожнем самосвале:

- Разгон и торможение самосвала по горизонтальному участку дороги.
- Включение удержания самосвала при остановке с последующим возобновлением движения на различных уклонах дороги.
- Торможение при движении на спуске с последующей остановкой и возобновлением движения.
- Сравнение эффективности торможения с базовой и «форсированной» тормозной характеристиками.

На Рис. 1 изображены полученные в процессе испытаний временные диаграммы движения самосвала на уклон с остановкой и последующим возобновлением движения.

На Рис. 2 показаны процессы торможения порожнего самосвала с максимальной интенсивностью с базовой (применяемой в серийных изделиях) и форсированной тормозными характеристиками, совмещенные по оси времени.

Оценка замедления самосвала на заданном временном интервале (отмечен пунктирными линиями), выбранном по условию малого проскальзывания колес, показывает эффективность форсированной характеристики в 1,8 раз по сравнению с базовой.

По результатам эксплуатации самосвала сделаны следующие корректировки алгоритмов его управления:

- Системы управления с использованием и без использования информации с датчиков скорости ТАД реализованы в рамках единого структурного подхода с общим наблюдателем состояния и с возможностью переключения между ними «на лету» (без остановки самосвала) по факту накопления критического значения интенсивности ошибок, регистрируемых в каналах измерения скорости.
- Положение точки безударного перехода от векторного к частотному управлению смещено в область ограничения по напряжению (второй зоны регулирования скорости) и выбирается исходя из чувствительности обеих систем к точности настройки наблюдателя на эквивалентную индуктивность рассеяния ($\square L_s$) на зажимах статора

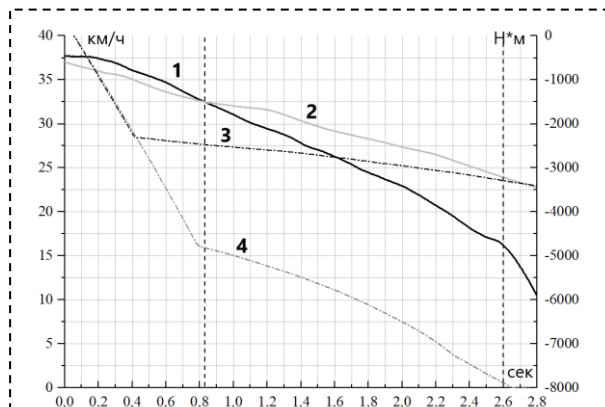


Рис. 2. Задания моментов 3 и 4, скорости самосвала 1 и 2 для базовой и форсированной предельной тормозной характеристики соответственно

Fig. 2. Braking Torque reference 3 and 4, dump truck speeds 1 and 2 for the basic and forced maximum braking characteristics, respectively

ТАД и их устойчивости к резким снижениям напряжения ЗПТ.

- С целью компенсации ошибок в задании момента, которые могут появляться в системе частотного управления из-за параметрических, структурных и сигнальных возмущений, в ее структуру добавлен ПИ-регулятор момента;
- С целью повышения эффективности режимов начала движения груженого самосвала на и под уклон, особенно в условиях скользкого дорожного покрытия, режим электрического удержания самосвала заменен удержанием посредством автоматического управления погрузочным тормозом.
- В наблюдатель состояния добавлен алгоритм вычисления знака оценки скорости ТАД по углу между векторами заданного напряжения и измеренного тока статора, что существенно улучшило качество работы самосвала в области малых скоростей.
- Для реализации возможности автоматической настройки системы управления на параметры ТАД при его замене на изделие альтернативного производителя опционально обеспечивается автоматическое определение параметров схемы замещения ТАД в режиме неподвижного вала.

Модифицированная система управления успешно прошла стендовые испытания с комплектами тягового электрооборудования для типоразмеров самосвалов грузоподъемностью 90 и 136 тонн. Планируются стендовые испытания системы с КТЭО Б240 и выход на ходовые испытания для всей линейки типоразмеров.

Совершенствование конструкции ШПСУ

Параллельно с расширением функциональных возможностей КТЭО идет постоянный процесс совершенствования конструкции основных элементов ее системы управления, в основании которого также лежит многолетний опыт авторского и сервисного сопровождения эксплуатации самосвалов с

КТЭО предыдущих разработок НТЦ Электропривода «Вектор» и отзывы эксплуатирующих организаций. Основная цель этих мероприятий – повышение надежности, технологичности изготовления, удешевление ШПСУ, снижение эксплуатационных расходов на ремонт. Основные направления совершенствования конструкции:

1) Оптимизация конструкции шины ЗПТ (Рис. 3) позволяет получить следующие преимущества:

а) максимально расширить область безопасной работы IGBT-модулей, снизить потери и повысить надежность системы в предельных и аварийных режимах работы без превышения типоразмера используемых модулей и их стоимости;

б) исключить возникновение паразитных осцилляций тока в промежуточных соединениях шины, снизить динамические потери и повысить стойкость IGBT в режимах перегрузки и коротких замыканий за счет использования единственной шины ЗПТ копланарной конструкции, общей для обоих инверторов;

с) отказаться от использования снабберных конденсаторов и минимизировать потери в инверторах за счет минимизации величины распределенной паразитной индуктивности и симметрии параллельных силовых цепей.

д) получить конструкцию копланарной шины минимальных размеров и не имеющей горизонтальных поверхностей, что значительно снижает риск оседания конденсата на проводящих элементах и повреждения изоляции шины тлеющим разрядом.

2) Использование интегральных силовых модулей (ИСМ) собственной разработки позволяет:

а) применять стандартные IGBT в факторе ECONO-Dual, которые поставляются не менее чем десятком дружественных производителей (в том числе отечественных);

б) легко получать широкий типоразмерный ряд по токам и напряжениям и конфигурацию фазы инвертора с требуемым выходным током и полным набором защитных функций (от К.З., «сквозного тока», перегрузки по току, перенапряжений, потери питания цепей управления, перегрева);

с) минимизировать количество межблочных соединений и упростить электромонтаж шкафа;

д) обеспечить минимальное время и трудоемкость замены неисправных IGBT, драйверов, датчиков (менее 15 минут) даже в «полевых» условиях, без использования специальных материалов и инструментов;

е) обеспечить независимость производства от поставок из недружественных стран.

ф) обеспечить высокую ремонтопригодность изделия за счет комплектации доступной элементной базой от различных производителей.

3) Использование системы охлаждения с внутренним жидкостным контуром обеспечивает:

а) возможность использовать IGBT минимальных типоразмеров и стоимости, добиться максимальной симметрии параллельных цепей и минимальный тепловой разброс параметров, упростить конструкцию шкафа, его сборку и монтаж,

выполнение требований по его защите от проникновения пыли и влаги;

б) оптимизацию внешней компоновки шкафа, повышение удобства его эксплуатации и техобслуживания за счет реализации наилучших компоновочных решений для узлов и блоков ШПСУ (Рис. 4);

с) снижение затрат на элементы СОХ за счет использования последовательной схемы соединения радиаторов ИСМ, что исключает необходимость коллекторов и быстроразъемных соединений;

Современный отечественный интегральный силовой модуль

Предыдущая линейка типоразмеров ШПСУ разработки НТЦ Электропривода «Вектор» для самосвалов грузоподъемностью 90-240 тонн была ориентирована на использование IGBT модулей немецкой фирмы Semikron [8]. После отказа официально поставлять эту продукцию в Россию было принято решение о разработке собственного интегрального силового модуля, не уступающего по характеристикам импортным аналогам.

Разработанные модули оптимизированы под транспортное применение и позволяют снизить потери, повысить надежность и обеспечить расширенные диагностические возможности системы управления КТЭО.

В ИСМ входят:

- 3 или 4 IGBT субмодуля конфигурации «полумост», включенных параллельно, в зависимости от типоразмера;
- интегрированный драйвер IGBT с полным набором защит;
- интегрированные датчики тока, напряжения шины DC, а также температуры подложки;
- высокоэффективный жидкостный охладитель уникальной конструкции;
- защитный кожух, терминалы подключения силовых шин и контроллера.

На момент написания текста статьи

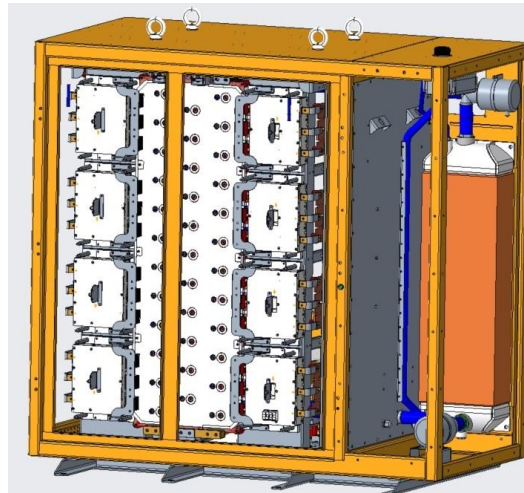


Рис. 3. Силовая часть ШПСУ с ИСМ-3 для самосвала грузоподъемностью 90 тонн

Fig. 3. Power section of the control systems cabinet with IPM-3 for a 90-ton dump truck



Рис. 4. Расположение блоков управления и защиты ШПСУ

Fig. 4. Arrangement of control and protection units in the control systems cabinet

производится два типоразмера интегральных силовых модулей: ИСМ-3 (1800А/1700В) и ИСМ-4 (2400А/1700В). Это позволяет строить на их основе тяговые инверторы КТЭО для карьерных самосвалов грузоподъемностью от 90 до 240 тонн.

Онлайн-сервис карьерных самосвалов

Для повышения эффективности и удобства сервисного обслуживания КТЭО разработан ряд современных онлайн-инструментов, объединенных в единый ресурс для технического обслуживания электротрансмиссии карьерного самосвала. Рабочее название – «Ресурсный центр НТЦ Электропривода «Вектор» (Рис. 5). Доступ пользователей (сотрудников сервисных служб предприятий) организован через систему логина и паролей [13].

Авторизованным пользователям доступен следующий функционал:

- получение актуальной документации, руководств по эксплуатации оборудования;
- доступ к новым версиям инструментального программного обеспечения, файлам программных кодов контроллеров ШПСУ и контроллера верхнего уровня;
- загрузка файлов с результатами испытаний и диагностики КТЭО в облачное хранилище для дальнейшей обработки, анализа и архивирования данных;
- организация канала удаленной диагностики как отдельных блоков ШПСУ, так и КТЭО в целом;
- обратная связь с разработчиком, диалог с чат-ботом мессенджера Telegram.

Данный информационный ресурс не имеет публичных аналогов у отечественных производителей КТЭО карьерных самосвалов и представляет собой единую работу следующих информационных технологий:

- файловое хранилище (FTP-сервер);
- облачное хранилище;
- веб-сайт с поддержкой веб-репозитория и системой контроля версий программного обеспечения;
- чат-бот мессенджера Telegram;
- серверное программное обеспечение собственной разработки для организации удаленного канала онлайн-диагностики [14].

FTP-сервер предоставляет доступ к актуальной документации, руководствам по обслуживанию, программированию и эксплуатации КТЭО. Содержит файлы-пакеты установки инструментального программного обеспечения и файлы программных кодов контроллеров.

Облачное хранилище предоставляет возможность для загрузки аварийных логов и файлов с результатами испытаний КТЭО, предназначенных для оперативного анализа текущего состояния и истории всех событий, выявления и принятия решения по устранению неисправности. Облачное хранилище взаимодействует с FTP-сервером и обеспечивает современный, удобный, альтернативный доступ к его ресурсам. Преимущество использования облачной технологии – работа с данными через любой браузер без установки дополнительного ПО [15].

На текущий момент основная задача веб-сайта заключается в поддержке работы системы контроля версий программного обеспечения и организации работы веб-репозитория [16] для автоматического обновления инструментального ПО разработки НТЦ Электропривода «Вектор».

Круглосуточная поддержка сервиса на местах организована посредством работы чат-бота популярного мессенджера Telegram. Данная программа является виртуальным ассистентом, предоставляющим интерактивный доступ к описанию событий КТЭО, причин их возникновения и рекомендуемых действий по устранению неисправностей, новостные оповещения о новейших разработках и пошаговое сопровождение с текстовым описанием и медиа-данными для выполнения стандартных сервисных операций.

Для повышения удобства сервисного обслуживания и диагностики состояния КТЭО разработан адаптер беспроводной сети, обеспечивающий доступ к параметрам системы управления по Wi-Fi/Bluetooth, накопление диагностической информации на протяжении определенного времени работы самосвала. Использование адаптера открывает возможность работы с системой управления электротрансмиссии через смартфон с предустановленным приложением сервиса. Функция накопления данных позволяет исключить использование сервисного ПК для записи результатов испытаний режимов работы КТЭО.

Перспективные проекты и направления

Представленные результаты разработки НТЦ Электропривода «Вектор» активно применяются в качестве основы для экспериментальных изделий. В частности, КТЭО карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн, зарекомендовавшее себя



на отечественном рынке как наиболее надежное и открытое для модификации изделие, используется в новой разработке беспилотного карьерного самосвала КАМАЗ. Все произведенные по нашей разработке КТЭО адаптированы для работы с различными ДВС, в том числе с газотопливными двигателями китайской фирмы Weichai и электрическими машинами различных отечественных производителей, приспособлены к работе в условиях высокого горья, холодного и жаркого климата. Также совместно с предприятиями группы компаний «Трансмашхолдинг» ведутся активные работы по применению системы управления электротрансмиссией в проектах по разработке энергоэффективных карьерных самосвалов, построенных с использованием накопителей энергии, которые наряду со значительной экономией топлива позволяют улучшить тягово-динамические характеристики, т. е. повысить производительность самосвала.

Выводы

Разработанная в НТЦ Электропривода «Вектор» новая линейка систем управления карьерными самосвалами обладает значительными преимуществами перед представленными в настоящее время на отечественном рынке аналогами, обеспечивает высокую надежность и качественные характеристики управления движением как с датчиком, так и без датчика скорости в сочетании с умеренной ценой и высокоэффективной организацией сервисного обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казубенко А. Ф. Применение электромеханической трансмиссии на карьерных самосвалах БЕЛАЗ // Горная промышленность. 2018. № 6(142). С. 21. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-6-142-21-23. EDN YUOKER.
2. Карьерные самосвалы мировых производителей // Горная промышленность. 2007. № 3(73). С. 54–60. EDN KWLXAD.
3. Komatsu electric drive mining trucks. URL: <https://www.komatsu.com/en/products/trucks/electric-drive-mining-trucks/> (дата обращения: 23.08.2024).
4. Caterpillar Mining Trucks. URL: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks.html (дата обращения: 23.08.2024).

5. Liebherr mining trucks. URL: <https://www.liebherr.com/en/deu/products/mining-equipment/mining-trucks/mining-trucks.html> (дата обращения: 23.08.2024).

6. Микешин В. А., Смолинец В. В., Кудин С. Н. Комплексный привод переменного-переменного тока самосвала БЕЛАЗ-75131 // Горное оборудование и электромеханика. 2007. № 2. С. 23–24. EDN NYMQFP.

7. Васильев Б. Ю., Григорьев П. С. Ресурсосберегающая электромеханическая трансмиссия карьерного самосвала // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 2(142). С. 15–21. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-2-15-21. EDN ZRIBKT.

8. Виноградов А. Б., Гнездов Н. Е., Коротков А. А., Чистосердов В. Л. Особенности тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 90 тонн // Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018 : Материалы докладов конференции, Новочеркасск, 03–06 октября 2018 года. Новочеркасск : ООО «Лик», 2018. С. 194–197. EDN YQMSDR.

9. Анучин А. С., Котельников М. К., Остриров В. Н. [и др.] Комплект тягового электрооборудования для БЕЛАЗ-90 на базе вентильно-индукторного электродвигателя с независимым возбуждением // Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018 : Материалы докладов конференции, Новочеркасск, 03–06 октября 2018 года. Новочеркасск : ООО «Лик», 2018. С. 218–224. EDN YQMSFF.

10. Малафеев С. И., Коняшин В. И., Новгородов А. А. Проектирование и реализация мехатронной трансмиссии автосамосвала БЕЛАЗ-90 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 9. С. 169–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_169. EDN KMLTSV.

11. Виноградов А. Б., Глебов Н. А. Системы управления моментом в асинхронном электроприводе без датчика скорости // Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018 : Материалы докладов конференции, Новочеркасск, 03–06 октября 2018 года. Новочеркасск : ООО «Лик», 2018. С. 85–90. EDN YQMRWX.

12. Виноградов А. Б., Сибирцев А. Н., Чистосердов В. Л. [и др.] Алгоритмы управления и технические решения в тяговом электроприводе карьерных самосвалов // Электричество. 2023. № 2. С. 60–68. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-2-60-68. EDN RPJCPO.

13. Wang Jie. Computer Network Security Theory and Practice, Higher Education Press, Beijing. 2009.

14. Vinogradov A., Ermakov K., Korotkov A. Wireless Technologies in Service Maintenance of Mining Dump Trucks Traction Electric Drive // 2023 XIX International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Ekaterinburg, Russian Federation. 2023. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ACED57798.2023.10143450.

15. Bataev A. V., Rodionov D. G., Andreyeva D. A. Analysis of world trends in the field of cloud technology //

2018 International Conference on Information Networking (ICOIN), Chiang Mai, Thailand. 2018. Pp. 594–598. DOI: 10.1109/ICOIN.2018.8343188.

16. He R., He H., Zhang Y., Zhou M. Automating Dependency Updates in Practice: An Exploratory Study on GitHub Dependabot // IEEE Transactions on Software Engineering. 2023. Vol. 49. № 8. Pp. 4004–4022. DOI: 10.1109/TSE.2023.3278129.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Виноградов Анатолий Брониславович, научный руководитель, НТЦ Электропривода «Вектор», (153021, Россия, г. Иваново, ул. Лебедева-Кумача, 2А), доктор техн. наук, профессор, e-mail: info@vectorgroup.ru

Сибирцев Андрей Николаевич, главный конструктор, НТЦ Электропривода «Вектор», (153021, Россия, г. Иваново, ул. Лебедева-Кумача, 2А), e-mail: info@vectorgroup.ru

Чистосердов Валерий Львович, ведущий программист, НТЦ Электропривода «Вектор», (153021, Россия, г. Иваново, ул. Лебедева-Кумача, 2А), кандидат техн. наук, доцент кафедры ЭПиАПУ, e-mail: info@vectorgroup.ru

Гнездов Николай Евгеньевич, инженер-программист, НТЦ Электропривода «Вектор», (153021, Россия, г. Иваново, ул. Лебедева-Кумача, 2А), кандидат техн. наук, доцент кафедры ЭПиАПУ, e-mail: info@vectorgroup.ru

Коротков Александр Александрович, инженер-программист, НТЦ Электропривода «Вектор», (153021, Россия, г. Иваново, ул. Лебедева-Кумача, 2А), кандидат техн. наук, доцент кафедры ЭПиАПУ, e-mail: info@vectorgroup.ru

Ермаков Кирилл Константинович, инженер-программист, НТЦ Электропривода «Вектор», (153021, Россия, г. Иваново, ул. Лебедева-Кумача, 2А), аспирант, старший преподаватель кафедры ЭПиАПУ, e-mail: nice.ermakov19@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Виноградов Анатолий Брониславович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Сибирцев Андрей Николаевич – концептуализация исследования, анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста, участие в постановке экспериментов.

Чистосердов Валерий Львович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования в области разработки ПО, анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, аналитические расчеты.

Гнездов Николай Евгеньевич – научный менеджмент, обзор литературы в области алгоритмов управления, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста, участие в постановке экспериментов, аналитические расчеты.

Коротков Александр Александрович – сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, написание текста, участие в постановке экспериментов, аналитические расчеты.

Ермаков Кирилл Константинович – обзор литературы в области программных средств, сбор и анализ данных работы программного обеспечения, написание текста, участие в постановке экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-3-11

Anatoly B. Vinogradov, Andrey N. Sibirtsev, Valery L. Chistoserdov, Nikolay E. Gnezdov, Alexandr A. Korotkov, Kirill K. Ermakov*

Electrical Drive Research and Technical Center “Vector”

* for correspondence: info@vectorgroup.ru

ENHANCED FUNCTIONALITY AND IMPORT SUBSTITUTION IN TRACTION ELECTRICAL EQUIPMENT FOR MINING DUMP TRUCKS



Article info

Abstract.

The article introduces a new development by the Electrical Drive Research and Technical Center “Vector” in the field of control systems for mining dump trucks with a payload capacity of 90–240 tons. Compared to similar systems available on the Russian market, it stands out due to its high reliability, high-quality and energy-efficient control across all driving modes

Received:
06 March 2025

Accepted for publication:
30 June 2025

Accepted:
01 August 2025

Published:
28 August 2025

Keywords: dump truck, traction electrical drive, import substitution, control system, sensorless control, vector control.

both with and without a speed sensor on the traction motor shaft, enhanced maintainability, independence from imported key power components, and advanced monitoring, diagnostic, and service functions based on modern information technologies. The paper provides a detailed analysis of new design solutions and control algorithms that operate without sensors on the shafts of the mining truck's traction motors. The new rational design and layout of control systems cabinet elements for the entire range of 90–240-ton dump trucks have minimized parasitic parameters, significantly reduced production costs, and improved reliability, maintainability, and manufacturability. The truck control system characteristics presented in this study have been validated through bench, factory (at the OJSC "BELAZ"), and operational tests as part of a 90-ton mining dump truck. The article includes test results of the electric transmission in real operating conditions, its new functional capabilities, unique design features of its control system, and the organization of on-site service support. The implementation and mass production of the developed control system will ensure uninterrupted operation of mining industry equipment with minimal dependence on imported components, while also reducing equipment costs and enhancing reliability without compromising control quality.

For citation: Vinogradov A.B., Sibirtsev A.N., Chistoserdov V.L., Gnezdov N.E., Korotkov A.A., Ermakov K.K. Enhanced functionality and import substitution in traction electrical equipment for mining dump trucks. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2025; 4(180):3-11 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-3-11, EDN: ZGLETO

REFERENCES

1. Kazubenko A.F. Electromechanical transmission application on BELAZ dump trucks. *Gornaya promyshlennost*. 2018; 6(142):21. DOI: 10.30686/1609-9192-2018-6-142-21-23. EDN YUOKEP.
2. Mining Dump Trucks of Global Manufacturers. *Mining Industry*. 2007; 3(73):54–60. EDN KWLXAD.
3. Komatsu electric drive mining trucks [Online]. Available: <https://www.komatsu.com/en/products/trucks/electric-drive-mining-trucks/>.
4. Caterpillar Mining Trucks. [Online]. Available: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks.html.
5. Liebherr mining trucks. [Online]. Available: <https://www.liebherr.com/en/deu/products/mining-equipment/mining-trucks/mining-trucks.html>.
6. Mikeshin V.A., Smolinets V.V., Kudin S.N. Komplektniy privod peremennno-peremennogo toka samosvala BelAZ-75131 [Complete AC-AC Drive for the BelAZ-75131 Dump Truck]. *Gornoe Oborudovanie i Elektromekhanika*. 2007; 2:23–24. EDN HYMQFP.
7. Vasiliev B.Yu., Grigoriev P.S. Resursosberegayushchaya elektromekhanicheskaya transmissiya kar'ernogo samosvala [Resource-Saving Electromechanical Transmission for Mining Dump Trucks]. *Gornoe Oborudovanie i Elektromekhanika*. 2019; 2(142), 15–21. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-2-15-21. EDN ZRIBKT.
8. Vinogradov A.B., Gnezdov N.E., Korotkov A.A., Chistoserdov V.L. Osobennosti tyagovogo elektrooborudovaniya kar'ernogo samosvala gruzopod'yomnost'yu 90 tonn [Features of the Traction Electrical Equipment of a 90-Ton Mining Dump Truck]. In *Proceedings of the 10th International Conference on Automated Electric Drive Systems ICEPDS 2018*. Novocherkassk: OOO "Lik"; 2018. EDN YQMSDR.
9. Anuchin A.S., Kotelnikov M.K., Ostrovirov V.N. [et al.] Komplekt tyagovogo elektrooborudovaniya dlya BELAZ-90 na baze ventil'no-induktnogo elektrodvigatelya s nezavisimym vozbuzhdeniem [Traction Electrical Equipment Kit for BELAZ-90 Based on a Switched Reluctance Motor with Independent Excitation]. In *Proceedings of the*

10th International Conference on Automated Electric Drive Systems ICEPDS 2018. Novocherkassk, October 3-6, 2018 (pp. 218-224). Novocherkassk: OOO "Lik"; 2018. EDN YQMSFF.

10. Malafeev, S.I., Konyashin V.I., Novgorodov A.A. Proektirovanie i realizatsiya mekhatronnoy transmissii avtosamosvala BELAZ-90 [Design and Implementation of the Mechatronic Transmission of the BELAZ-90 Dump Truck]. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'*. 2022; 9:169–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_169. EDN KMLTSV.

11. Vinogradov A.B., Glebov, N.A. Sistemy upravleniya momentom v asinkhronnom elektropivode bez datchika skorosti [Torque Control Systems in an Induction Drive without a Speed Sensor]. In *Proceedings of the 10th International Conference on Automated Electric Drive Systems ICEPDS 2018*. Novocherkassk: OOO "Lik"; 2018. EDN YQMRWX.

12. Vinogradov A.B., Sibirtsev A.N., Chistoserdov V.L. [et al.] Algoritmy upravleniya i tekhnicheskie resheniya v tyagovom elektropivode kar'ernykh samosvalov [Control Algorithms and Technical Solutions in the Traction Electric Drive of Mining Dump Trucks]. *Elektrichestvo*. 2023; 2:60–68. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-2-60-68. EDN RPJCPO.

13. Wang Jie. Computer Network Security Theory and Practice, Higher Education Press, Beijing. 2009.

14. Vinogradov A., Ermakov K., Korotkov A. Wireless Technologies in Service Maintenance of Mining Dump Trucks Traction Electric Drive. *2023 XIX International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*. Ekaterinburg, Russian Federation, 2023. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ACED57798.2023.10143450.

15. Bataev A.V., Rodionov D.G., Andreyeva D.A. Analysis of world trends in the field of cloud technology. *2018 International Conference on Information Networking (ICOIN)*. Chiang Mai, Thailand, 2018. Pp. 594–598. DOI: 10.1109/ICOIN.2018.8343188.

16. He R., He H., Zhang Y., Zhou M. Automating Dependency Updates in Practice: An Exploratory Study on GitHub Dependabot. *IEEE Transactions on Software Engi-*

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Anatoly B. Vinogradov, scientific director, Electric drive department, Electrical Drive Research and Technical Center «Vector», (153021, Russian Federation, Ivanovo, Lebedeva-Kumacha street, 2A), doctor of technical sciences, professor, e-mail: info@vectorgroup.ru

Andrey N. Sibirtsev, chief designer, Electric drive department, Electrical Drive Research and Technical Center «Vector», (153021, Russian Federation, Ivanovo, Lebedeva-Kumacha street, 2A), e-mail: info@vectorgroup.ru

Valery L. Chistoserdov, lead programmer, Electric drive department, Electrical Drive Research and Technical Center «Vector», (153021, Russian Federation, Ivanovo, Lebedeva-Kumacha street, 2A), PhD candidate, associate professor, e-mail: info@vectorgroup.ru

Nikolay E. Gnezdov, software engineer, Electric drive department, Electrical Drive Research and Technical Center «Vector», (153021, Russian Federation, Ivanovo, Lebedeva-Kumacha street, 2A), PhD candidate, associate professor, e-mail: info@vectorgroup.ru

Alexandr A. Korotkov, software engineer, Electric drive department, Electrical Drive Research and Technical Center «Vector», (153021, Russian Federation, Ivanovo, Lebedeva-Kumacha street, 2A), PhD candidate, associate professor, e-mail: info@vectorgroup.ru

Kirill K. Ermakov, software engineer, Electric drive department, Electrical Drive Research and Technical Center «Vector», (153021, Russian Federation, Ivanovo, Lebedeva-Kumacha street, 2A), postgraduate student, senior lecturer, e-mail: nice.ermakov19@gmail.com

Contribution of the authors:

Anatoly B. Vinogradov – research problem statement; scientific management; conceptualisation of research; drawing the conclusions, writing the text.

Andrey N. Sibirtsev – conceptualisation of research, data collection, data analysis, reviewing the relevant literature, drawing the conclusions, writing the text, participation in experiments.

Valery L. Chistoserdov – research problem statement; scientific management, conceptualisation of research in software development, data analysis, reviewing the relevant literature, drawing the conclusions, analytical calculations.

Nikolay E. Gnezdov – scientific management, reviewing the relevant literature in control algorithms; conceptualisation of research, data collection, data analysis, drawing the conclusions, writing the text, participation in experiments, analytical calculations.

Alexandr A. Korotkov – data collection, data analysis, reviewing the relevant literature, writing the text, participation in experiments, analytical calculations.

Kirill K. Ermakov – reviewing the relevant literature in software; conceptualisation of research, software data collection, data analysis, writing the text, participation in experiments

The claimed contribution of the authors:

Authors have read and approved the final manuscript.

