

5. Dyson G. Exploring Factors that Affect Reliability of Open Pit Heavy Mining Dump Trucks: A Case of Bisha Mining Share Company, Eritrea. *International Journal of Science and Research*. 2020. Vol. 9, Iss. 6. pp. 206–219.
6. Kuzin E. G., Pudov E. Yu., Dubinkin D. M. Analysis of failures of mining dump truck components under operating conditions. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2021. No. 2(154). pp. 55–61.
7. Anitsratov K. Yu. (Ed.). Open pit mining – The 21st century. Reference book. Moscow : Sistema maksimum, 2019. Vol. 1. 640 p.
8. Dadonov M. V., Sobolenko M. A. Nature of cracking in frames of BelAZ-7555 dump trucks in operating conditions of Salek JSC, Kiselevsk. *Russia the Young : Proceeding of XIII All-Russian Conference with International Participation*. Kemerovo : Kuzbasskiy gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni T. F. Gorbacheva, 2021.
9. Brillkov M. N., Lomov A. A., Danchenko I. A. Effect of operational parameters on technical state of dump trucks in open pit mines. *Russia the Young : Proceeding of XIII All-Russian Conference with International Participation*. Kemerovo : Kuzbasskiy gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni T. F. Gorbacheva, 2021.
10. Zhuravlev A. G. The issues of optimization parameters of quarry transport systems. *GIAB*. 2020. No. 3-1. pp. 583–601.
11. Zakharov N. S., Akzhol A., Tenkovskaya S. A. Factors affecting the reliability of tip trucks working in the conditions of Western Siberia. *Transportnoe delo Rossii*. 2018. No. 4. pp. 130–132.
12. Gryaznov M. V., Antropova E. M., Balikova E. A. Reduction in cost of maintenance and repair of dump trucks in open pit mines. *Theory and Practice of Trucking and Transport Logistics : Transactions of the Transport Management and Control Department in the framework of the International Conference*. Omsk : SibADI, 2016. pp. 36–41.
13. Klebanov A. F., Sizemov D. N., Kadochnikov M. V. Integrated Approach to Remote Monitoring of Technical and Operating Conditions of Mine Dump Trucks. *Gornaya promyshlennost*. 2020. No. 2. pp. 75–81.
14. Machulov V. N. Control of mining-and-haulage systems. *Gornaya promyshlennost*. 2013. No. 6. p. 88.
15. Bochkarev Yu. S., Vikulov M. A., Ishkov A. M., Sedalishchev I. I. Research of the exploitation of dump trucks BelAZ-7540 in conditions of the North. *GIAB*. 2015. No. 7. pp. 151–157.
16. Ishkov A. M. Mathematical rhythmology in working efficiency of machinery in the North. Yakutsk : Izdatelstvo YaNTs SO RAN, 2000. 319 p.
17. Khabibullin R. G., Makarova I. V., Mukhametdinov E. M. Effect of the seasonality factor the technical state of vehicles. *Advanced Technologies in Transport Systems : Proceedings of VII Russian Conference*. Orenburg : Orenburgskiy gosudarstvennyi universitet, 2005. pp. 320–327.
18. Zakharov N. S., Abakumov G. V., Voznesenskiy A. V. Seasonal effects on use of resources in operation of vehicles. Tyumen : TyumGNGU, 2011. 115 p.
19. Dovbnya B. E., Zakharov N. S. Seasonal effects on industrial scheduling of maintenance of vehicles. *Problems of Operation of Cars, and Construction, Road-Making and Hoisting and Transport Machines : Inter-University Collection of Papers*. Tyumen : Tyumenskiy gosudarstvennyi neftegazoviy universitet, 2001. pp. 18–25.
20. Zakharov N. S., Rakitin A. N., Orlov S. M. Seasonal effects on reliability and spare capacity of vehicles. *Operation of Transport Systems under Severe Conditions : International Conference Proceedings*. Tyumen : Tyumenskiy industrialnyi universitet, 2002. pp. 113–115.
21. Desherevskii A. V., Zhuravlev V. I., Nikolskiy A. N., Sidorin A. Ya. Problems in Analyzing Time Series with Gaps and Their Solution with the WinABD Software Package. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 53, No. 7. pp. 659–678.

УДК 622.684

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИИ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**А. Б. ВИНОГРАДОВ**, научный руководитель, проф., д-р техн. наук  
**Н. Е. ГНЕЗДОВ**, инженер-программист, канд. техн. наук, gnezdov@list.ru  
**В. Л. ЧИСТОСЕРДОВ**, начальник сектора программирования, канд. техн. наук  
**А. А. КОРОТКОВ**, инженер-программист, канд. техн. наук

НТЦ Электропривода «Вектор», Иваново, Россия

### Введение

Транспортирование грунта и полезных ископаемых при их открытой разработке выполняют преимущественно карьерными самосвалами. По данным ОАО «БЕЛАЗ» — одного из крупнейших в мире производителей карьерных самосвалов и основного их поставщика на российский рынок, доля выпускаемых самосвалов особо большой грузоподъемности (90 т и выше) растет последние несколько лет на 20–40 % в год и за 5 лет увеличилась почти в два раза, достигнув 64 % [1, 2]. Это свидетельствует о перевооружении добывающих предприятий техникой особо большой грузоподъемности. В таких самосвалах в большинстве случаев используют электромеханические трансмиссии (ЭМТ) [3].

Как правило, режим работы самосвалов — круглосуточный, круглогодичный, с остановками только на техническое обслуживание в соответствии с регламентом. Основными регионами добычи полезных ископаемых открытым способом в РФ являются юг Западной и Восточной Сибири, Дальний Восток. Условия континентального климата Сибири предполагают изменение температуры, влажности, давления воздуха в широком диапазоне в течение года, а также их резкое колебание за короткое

Представлены результаты четырехлетней эксплуатации самосвалов грузоподъемностью 90 и 240 т с электромеханической трансмиссией. Перечислены изменения в конструкции, алгоритмах управления, процессе производства и испытаний тягового электрооборудования.

**Ключевые слова:** карьерный самосвал, электротрансмиссия, испытания, эксплуатация, анализ результатов, тяговый электропривод, системы управления

**DOI:** 10.17580/gzh.2022.04.16

время, например в течение суток [4]. Дорожные условия — уклон, твердость, неровность покрытия, протяженность маршрута, перепад высот — существенно отличаются на разных карьерах. Следует учитывать и повышенную запыленность воздуха, в том числе токопроводящей угольной или металлосодержащей пылью. При этом для достижения максимальной экономической эффективности стараются обеспечить максимальную скорость движения, т. е. тяговое электрооборудование работает преимущественно в режимах максимальной тяги или торможения. Кроме того, имеют место перегрузы самосвалов, нарушение регламента технического обслуживания, несоблюдение правил эксплуатации.

В целом множество и разнообразие перечисленных факторов невозможно учесть при разработке и на этапе испытаний. Необходимо в процессе эксплуатации накапливать, анализировать опыт и совершенствовать все составляющие электротрансмиссии или, как принято ее называть у производителей, комплекта тягового

электрооборудования (КТЭО): аппаратную часть и программное обеспечение (ПО), документацию, процесс производства и испытаний, сервисное сопровождение и др.

Публикации по электротрансмиссиям карьерных самосвалов освещают моделирование, разработку, стендовые и ходовые испытания [5–10]. При этом, как правило, сообщают об успехах и резюмируют, что «испытания подтвердили достоверность теоретических положений и верность конструкторских решений». В статьях, касающихся эксплуатации самосвалов, рассмотрены вопросы организационно-экономического плана [11–13], общие технические вопросы (надежность, производительность и т. п.) [14–16]. Например, в [16] отмечено, что наибольшие доли отказов самосвалов БЕЛАЗ-75581 (грузоподъемность 90 т) на разрезах Кузбасса в 2016–2018 гг. приходятся на редукторы мотор-колес (30 %), двигатели внутреннего сгорания (ДВС) (25 %) и КТЭО (18 %). Статьи о повышении надежности ДВС, механических и гидравлических систем появляются регулярно [17, 18]. Публикаций же о результатах длительной эксплуатации именно КТЭО практически нет. Так, в [19] представлены результаты шестимесячной эксплуатации самосвала с вентильно-индукторным реактивным приводом. Однако указаны лишь эксплуатационные преимущества по отношению к самосвалу с тяговым приводом постоянного тока. Между тем общение «на местах» с работниками эксплуатирующих организаций показывает, что «слабые места» выявляются у КТЭО всех производителей. Иногда это довольно серьезные просчеты, а последствия достигают существенных масштабов. По мнению авторов, описание проблем, возникающих при эксплуатации КТЭО вследствие действия климатических, механических, ресурсных и человеческого факторов, а также путей их решения представляет интерес как для разработчиков систем электроприводов, так и для эксплуатирующих организаций.

Российский электротехнический концерн «Русэлпром» – ведущий в стране разработчик, производитель и поставщик электрических машин для всех отраслей промышленности и сельского хозяйства, лидер по экспорту электродвигателей и входит в топ-400 крупнейших предприятий страны [20]. С 2017 г. на предприятиях концерна выпускают КТЭО для карьерных самосвалов грузоподъемностью 90 и 240 т. В настоящей статье представлены результаты эксплуатации самосвалов БЕЛАЗ с КТЭО производства «Русэлпром» в течение 4 лет и связанные с ними изменения, внесенные в конструкцию, алгоритмы управления, документацию и процесс производства и испытаний КТЭО.

### Описание комплекта электрооборудования

Основные технические характеристики КТЭО БЕЛАЗ-240 и БЕЛАЗ-90 представлены в **табл. 1**. Структура КТЭО представлена на **рис. 1** и включает устанавливаемый на валу ДВС синхронный тяговый генератор (СТГ) с электромагнитным возбуждением, питающий через неуправляемые выпрямители шину DC шкафа преобразователей и систем управления (ШПСУ, **рис. 2**), из постоянного напряжения которой автономные инверторы формируют переменное напряжения для тяговых асинхронных двигателей (ТАД) левого и правого борта.

**Таблица 1. Основные технические характеристики КТЭО**

Параметр	БЕЛАЗ-90	БЕЛАЗ-240
Мощность на выходе генератора, кВт, не более	900	1550
Напряжение на шине постоянного тока (на выходе выпрямителей), В, не более: в тяговом режиме в тормозном режиме	1000 1200	1100 1200
Мощность тормозной резисторной установки, кВт	2×600	2×1200
Мощность на валу асинхронного двигателя, кВт, не более: в тяговом режиме в тормозном режиме	382 540	700 1200
Максимальный пусковой момент на валу двигателя, Н·м	9850	30000
Максимальная скорость вращения асинхронного двигателя, мин <sup>-1</sup> (при скорости самосвала 65 км/ч)	3968	2871

Система управления состоит из контроллера верхнего уровня (КВУ) и контроллеров на нижнем уровне: силовых преобразователей (КСП), системы возбуждения тягового генератора (КСВТГ) и инвертора привода системы охлаждения (КИП СОХ). Отличие КТЭО БЕЛАЗ-240 и БЕЛАЗ-90 заключается в системе охлаждения силовых приборов ШПСУ. В первом случае она жидкостная с собственным IGBT-инвертором (ИПСОХ) для управления асинхронным двигателем циркуляционного насоса, а во втором – полностью воздушная. Групповое принудительное воздушное охлаждение теплообменников, а также обмоток СТГ и ТАД выполняется крыльчаткой вентилятора, установленного на валу СТГ.

Состав КТЭО принято делить:

- по типу преобразования энергии: на электромеханическую (ТАД и СТГ) и электрическую (ШПСУ) части;
- по функционалу элементов ШПСУ: на преобразовательную (силовую) часть и систему управления (контроллер);
- по уровню управления: на нижний (КСП, КСВТГ, КИП СОХ) и верхний (КВУ) уровни.

Подробное описание КТЭО, результаты стендовых испытаний, алгоритмы систем управления тяговыми приводами, СВТГ и движением самосвала в целом представлены в предыдущих публикациях авторов [21–23].

### Результаты эксплуатации

На текущий момент выпущены 102 КТЭО БЕЛАЗ-90 и 16 – БЕЛАЗ-240. Практически все они установлены на самосвалы и введены в эксплуатацию. Первый из них, опытный образец БЕЛАЗ-75585 грузоподъемностью 90 т, был введен в эксплуатацию 03.03.2018 г., т. е. отработал 4 года. Еще три самосвала БЕЛАЗ-75585 установочной серии были введены в эксплуатацию в мае, июне и августе 2018 г. Затем был перерыв, обусловленный проведением квалификационных испытаний и запуском серийного производства КТЭО (закупка комплектующих, организация производства). С июля 2019 г. начат массовый ввод в эксплуатацию серийных самосвалов БЕЛАЗ-75585. Первый образец БЕЛАЗ-75318 грузоподъемностью 240 т был

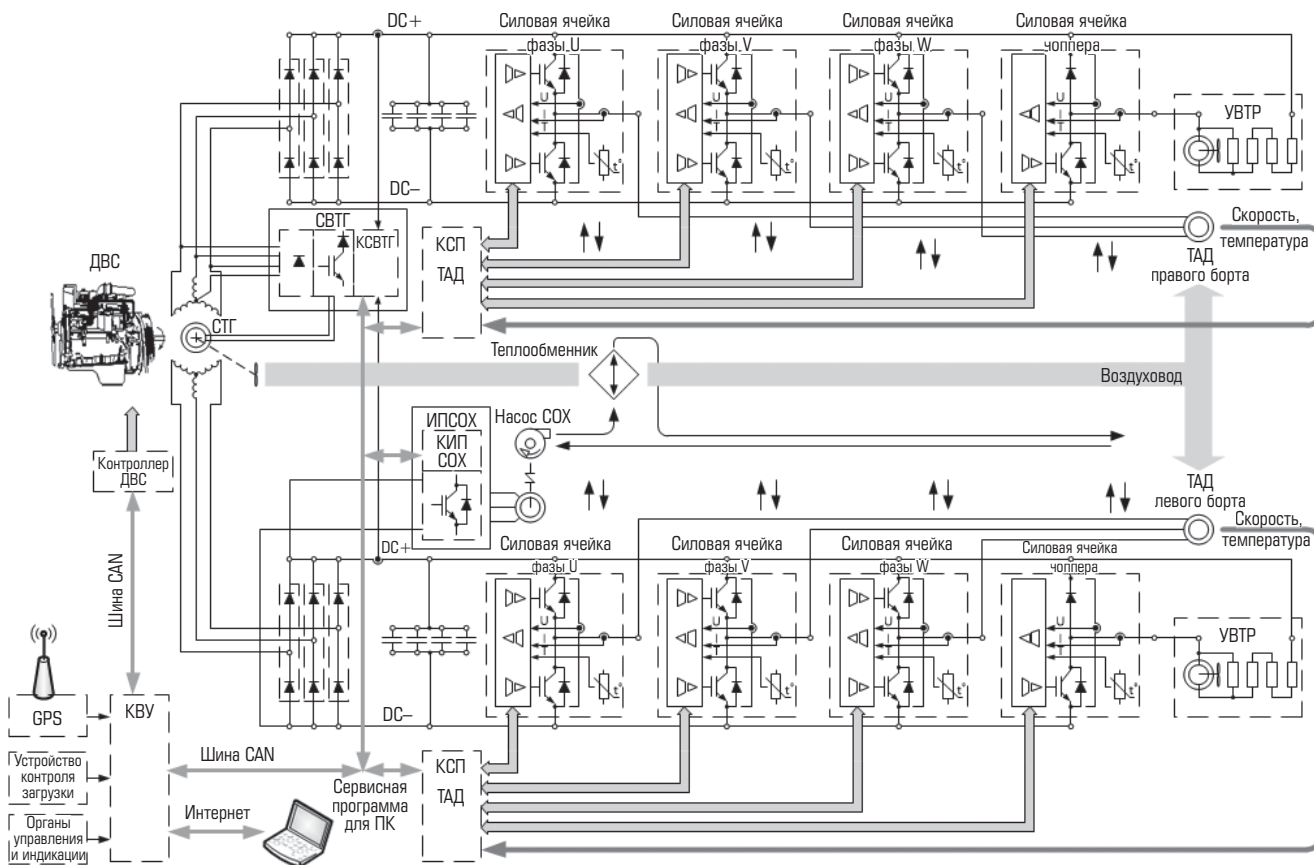


Рис. 1. Функциональная схема КТ30 БЕЛАЗ-240

введен в эксплуатацию 05.06.2018 г. Затем в 2019 и 2021 гг. были выполнены два проекта модернизации: замена вышедшего из строя тягового электрооборудования производства «Силовых машин» и Siemens на КТ30 производства «Русэлпром» на карьерных самосвалах БЕЛАЗ грузоподъемностью 240 т в разрезах «Первомайский» и «Черниговец» (Кемеровская обл.). С ноября 2021 г. начат массовый ввод в эксплуатацию серийных самосвалов БЕЛАЗ-75318.

С октября 2018 г. стали выпускать модификацию БЕЛАЗ-75585-05 с ДВС повышенной (с 1050 до 1200 л. с.) мощности. Она обладает большей эффективностью (выше средняя скорость и масса, перевезенная за единицу времени) при почти такой же стоимости эксплуатации. Отметим, что переход на новую модификацию самосвала не потребовал изменений конструкции или программного обеспечения КТ30, поскольку еще в техническом задании (ТЗ) на КТ30 была учтена такая возможность. Результаты разработки и стендовых испытаний подтвердили выполнение требований ТЗ [21].

География эксплуатации самосвалов включает более 10 угольных разрезов Кемеровской, Новосибирской, Иркутской областей, а также Якутии, 2 металлургических карьера Красноярского края и 1 – в Армении. На разных предприятиях недельный пробег самосвала при условии отсутствия длительных простоев составляет от 1,5 до 2,9 тыс. км, а средняя скорость движения – от 9 до 17 км/ч. В табл. 2 представлены типовые значения пробега,

наработки и средней скорости некоторых самосвалов. Максимальный пробег одного самосвала (опытный образец БЕЛАЗ-75585) составляет 302 тыс. км при наработке 26,9 тыс. моточасов, суммарный пробег всех самосвалов – более 6000 тыс. км при наработке более 510 тыс. моточасов. При этом, по информации производителя КТ30, полученной от представителей ОАО «БЕЛАЗ» и эксплуатирующих организаций, достигнуты как экономический эффект – до 15 % экономии топлива и до 40 % снижения затрат на техническое обслуживание, так и технические преимущества – 20%-ное увеличение тяговой мощности и 15%-ное увеличение тормозного усилия по отношению к самосвалам с приводами других производителей [24].

Для получения и анализа результатов наиболее показательна эксплуатация 10 самосвалов БЕЛАЗ-75585 на участке «Коксовый» (г. Киселёвск, Кемеровская обл.). За счет относительно короткого, но с большими уклонами маршрута типовые недельные показатели в этом разрезе следующие: пробег около 2400 км, наработка 160 моточасов и средняя скорость 15 км/ч, т. е. самосвалы практически непрерывно движутся в предельных режимах. За первые полгода такой эксплуатации имели место следующие неисправности КТ30:

- выход из строя двух силовых ячеек, по одной в разных самосвалах; причина – короткое замыкание в ламинированной шине DC ячейки вследствие попадания в секцию шкафа влаги и проводящей пыли;



**Рис. 2. Внешний вид ШПСУ БЕЛАЗ-90 (а) и БЕЛАЗ-240 (б)**

- выход из строя блока СВТГ – имел место одновременно с выходом из строя силовой ячейки;
- разрушение опорных подшипников тяговых асинхронных двигателей на трех самосвалах; причина – контрафактная партия подшипников;
- мелкие неисправности, например разряд батареи в блоке системы управления микроклиматом (СУМК), выход из строя микросхемы FRAM в блоке КВУ, линейного стабилизатора в блоке КСП («серая» партия микросхем).

Среди неисправностей КТЭО других самосвалов следует отметить:

- на первых экземплярах КТЭО БЕЛАЗ-240 имел место поверхностный пробой шины ДС вследствие попадания влаги внутрь шкафа. В серийных экземплярах устранено усилением внешней изоляции шины и герметизации шкафа;
- обрыв, затем замыкание на корпус силового кабеля одной из фаз ТАД. Причина – излом и перетирание в месте ввода кабеля

**Таблица 2. Типовой недельный пробег, наработка и средняя скорость движения некоторых самосвалов**

Номер шасси, тип КТЭО	Место эксплуатации	Дата	Недельные значения		
			Пробег, км	Нароботка, моточас	Средняя скорость, км/ч
9045, Б-240	Разрез «Восточный» ЗАО «Салек», Кемеровская обл.	17.01.2019	2065	168	12,29
		24.01.2019	2699	166	16,26
		31.01.2019	2069	165	12,54
		07.02.2019	1920	156	12,31
		14.02.2019	1900	180	10,56
164, Б-90	Разрез «Большая Талда», Кемеровская обл.	29.11.2018	2187	155	14,11
		06.12.2018	2056	179	11,49
		13.12.2018	1969	153	12,87
		20.12.2018	2226	164	13,57
		27.12.2018	1995	167	11,95
262, Б-90	Горевское месторождение, Красноярский край	17.10.2019	2064	146	14,14
		24.10.2019	2102	157	13,39
		31.10.2019	1778	168	10,58
		07.11.2019	1373	122	11,25
		14.11.2019	1716	132	13,00
335, Б-90	Участок «Коксовый», Кемеровская область	26.08.2021	3089	184	16,79
		02.09.2021	2159	137	15,76
		09.09.2021	2664	179	14,89
		16.09.2021	1924	121	15,90
		24.09.2021	2774	171	16,22

в задний отсек самосвала. Корректно сработавшие программные защитные средства предотвратили выход из строя элементов КТЭО;

- выход из строя IGBT-модуля силовой ячейки из-за ненадежной фиксации винтов крепления шины к силовым терминалам (брак при сборке ячейки);
- отказ блока СВТГ – отсутствие коммутации силовых ключей. Причина – плохая пайка микросхемы интерфейса с драйвером силового модуля;
- неисправности сигнальных цепей измерения температур СТГ и ТАД. Причины – пропадание контакта в разъеме вследствие вибраций, некачественная сборка разъема на производстве, повреждение разъема при проведении регламентных работ с ТАД;
- выход из строя датчика температуры радиатора одной из фаз инвертора в ШПСУ;
- ошибки сигнала датчика скорости ТАД в КТЭО Б-240; причина – недостаточная помехозащищенность датчика и сигнального кабеля;
- выход из строя привода воздушной заслонки; причина – внешнее силовое воздействие (провернули вручную);
- нестабильное соединение КВУ с внешней flash-памятью.

Таким образом, можно констатировать небольшой процент аварий (выходов из строя силовых ячеек) КТЭО: три случая на более чем 100 самосвалов за 4 года эксплуатации. Причинами являлись брак, нарушение технологии при производстве (сборке ШПСУ) либо нарушение герметичности шкафа. Такого результата удалось добиться, в том числе, благодаря использованию

в силовых ячейках интеллектуальных силовых модулей 4-го поколения SKiiP-4 компании Semikron с увеличенной до +175 °С температурой чипов и в 5 раз повышенной стойкостью к термостратированию, а также двойной пассивацией, повышающей влагостойкость. Эксплуатация самосвалов БЕЛАЗ-75585-05 (с ДВС повышенной мощности) в жаркое время года (температура воздуха выше +30 °С) и на больших высотах (на месторождении в Армении около 2000 м над уровнем моря) подтвердила необходимость реализованного в КСП частотно-зависимого температурного дерейтинга (ограничение тока, момента). Данная функция ограничивает максимальную величину выходного тока инвертора (электромагнитного момента тягового двигателя) в зависимости от текущего значения выходной частоты переменного тока и температуры IGBT-модуля таким образом, чтобы не было превышено предельное значение этой температуры. Действие функции дерейтинга неоднократно наблюдалось в жаркие дни на крутых участках маршрута. Это позволило предотвратить выход из строя силовых ключей при максимальном использовании их возможностей.

В целом система защит КТЭО контролирует более ста параметров, многие защиты являются двухуровневыми, что позволило предупредить аварийные ситуации, локализовать места их возникновения до функционального элемента. Непрерывная запись в журнале работы, ведение истории срабатывания защит, их хранение в энергонезависимой памяти обеспечили мониторинг и выявление причин нештатных ситуаций. Установлено, что многие ситуации срабатываний защит связаны с неисправностями сигнальных цепей датчиков, некачественными комплектующими либо грубым, неквалифицированным использованием. Пути решения этих проблем очевидны: повышение качества производства, работа с поставщиками комплектующих, выбор других типов датчиков, разъемов, кабелей.

Также выявлены следующие особенности наладки, эксплуатации и ремонта КТЭО, требующие совершенствования:

- избыточная производительность насоса системы охлаждения КТЭО БЕЛАЗ-240;
- пожелания водителей повысить тормозной момент на скоростях движения выше 15 км/ч;
- пожелания наладчиков автоматизировать процесс фазировки тяговых приводов, повысить удобство диагностики КТЭО с ноутбука, ввести режимы заполнения жидкостной системы охлаждения, нагрузки ДВС на тормозные резисторы (УВТР), ручного управления воздушной заслонкой.

По обобщенным результатам эксплуатации были определены следующие направления совершенствования КТЭО:

- повышение качества производства;
- изменение конструкции: повышение надежности отдельных элементов, улучшение герметизации ШПСУ, оптимизация состава КТЭО;
- обеспечение возможности движения самосвала при срабатывании защит элементов КТЭО, в том числе по датчикам температуры, скорости, по СОХ;
- повышение живучести КТЭО при неквалифицированном управлении («защита от дурака»);

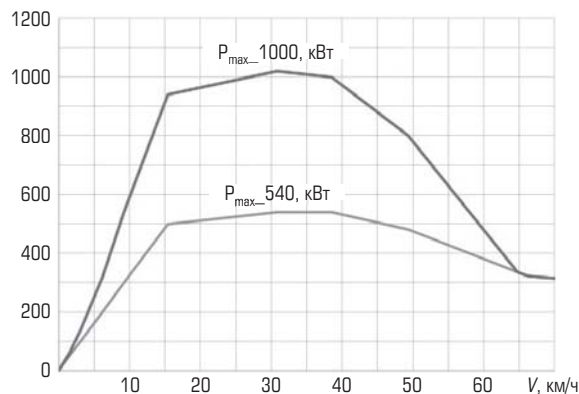


Рис. 3. Номинальная ( $P_{\max}=540$ ) и повышенная ( $P_{\max}=1000$ ) тормозные характеристики КТЭО БЕЛАЗ-90

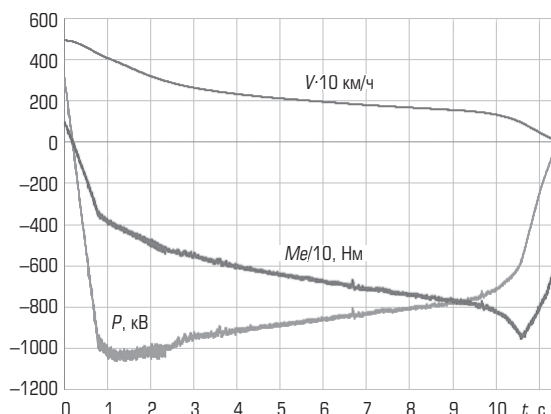


Рис. 4. Изменение скорости ( $V$ ), электромагнитного момента ( $Me$ ) и мощности ( $P$ ) тягового электропривода при торможении груженого самосвала с КТЭО БЕЛАЗ-90

- расширение функциональных возможностей КТЭО;
- повышение удобства диагностики и наладки КТЭО на самосвале.

### Изменения в КТЭО

По результатам эксплуатации выполнены следующие мероприятия:

- усилен контроль качества производства ШПСУ и электрических машин, введены дополнительные этапы проверки (контроль затяжки резьбовых соединений, проверка ШПСУ в сборе и др.), скорректированы программа и методика испытаний (ПМИ); создана независимая группа инженеров, выполняющая приемосдаточные и периодические испытания;
- внесены изменения в конструкцию КТЭО: изменены тип разъемов сигнальных цепей на электрических машинах, модель привода воздушной заслонки, тип уплотнителя дверей ШПСУ; исключены входные фильтры; усилена герметизация крыши;
- в КТЭО БЕЛАЗ-240 перепроектирована система охлаждения: теплообменник, насос, жидкостные коллекторы, марка

антифриза; в результате почти в 3 раза снижена мощность двигателя насоса при сохранении требуемой эффективности системы охлаждения; исключена воздушная заслонка, вместо нее установлен трехходовой кран байпаса теплообменника СОХ;

- определен состав системы управления микроклиматом в зависимости от региона поставки: необходимые в конкретных случаях элементы подогрева, охлаждения, осушения, перемешивания воздуха внутри ШПСУ;

- скорректирован (в основном сокращен) состав комплекта запасных частей и принадлежностей;

- для расширения возможности движения самосвала разрешена работа тяговых приводов в ограниченных по мощности и длительности режимах при блокировке ИПСОХ (отсутствии охлаждения), реализованы алгоритмы перезапуска приводов в определенных ситуациях с ограничением числа попыток сброса защит за определенный промежуток времени индивидуально для каждой защиты;

- реализованы защиты от неисправности датчиков напряжения генератора, от отсутствия охлаждения тормозных резисторов;

- повышена до 1 МВт мощность кратковременного тормозного режима работы каждого из тяговых приводов КТЭО БЕЛАЗ-90 (рис. 3, 4);

- реализована и успешно прошла ходовые испытания бездатчиковая система управления тяговыми электроприводами, с возможностью перехода между системами с датчиком скорости и без него на валу ТАД;

- скорректированы алгоритмы антипроскальзывания ведущих (задних) колес самосвала при использовании информации с датчиков скорости передних колес;

- расширены диагностические функции КТЭО: введена запись кольцевых буферов аварий (КБА) при появлении предупреждений, увеличены КБА СВТГ и ИПСОХ, реализованы запись КБА на внутреннюю flash-память КВУ и передача информации по сотовым сетям;

- реализовано отображение состояния и управление специальными режимами работы КТЭО на дисплее Bosch Rexroth DI4;

- созданы сервисная оболочка для ПК (ноутбука) и специальные режимы в ПО контроллеров КТЭО (автофазировка, прокатка СОХ, нагрузка ДВС на тормозные резисторы), облегчающие ввод самосвала в эксплуатацию и диагностику его состояния, а также обновление ПО;

- скорректированы руководство по эксплуатации КТЭО, инструкция водителя, перечень кодов событий и рекомендуемые действия водителя в нестандартных ситуациях, инструкции по программированию контроллеров КТЭО.

### Заключение

Небольшое число отказов при эксплуатации и высокий коэффициент готовности самосвалов с электротрансмиссией производства концерна «Русэлпром» свидетельствуют о квалифицированно выполненном цикле разработки и испытаний. Описанные изменения конструкции, алгоритмов управления, документации, процесса производства и испытаний направлены преимущественно на снижение себестоимости и улучшение технических характеристик, т. е. на повышение конкурентоспособности продукта.

Полученные наработки используются при создании комплектов тягового электрооборудования для самосвалов других грузоподъемностей (136, 180, 360 т).

### Библиографический список

1. Потребители техники БЕЛАЗ / ОАО «БЕЛАЗ». URL: <https://belaz.by/about/consumers/> (дата обращения: 15.12.2021).
2. Техника БЕЛАЗ / ОАО «БЕЛАЗ». URL: <https://belaz.by/products/products-belaz/> (дата обращения: 15.12.2021).
3. Казубенко А. Ф. Самосвалы БЕЛАЗ с электромеханической передачей // Уголь. 2019. № 5. С. 50–51.
4. Семенченко Б. А. Континентальный климат // Большая Российская Энциклопедия. URL: <https://bigenc.ru/geography/text/2093254> (дата обращения: 15.12.2021).
5. Zhang Y. J., Zhang J., Chen X. K. A DSP-Based Transmission Control System of 154t Electrical Wheels Autonomous Dump Truck // Proceedings of the 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems. – Nanjing, 2005. Vol. 2. P. 1650–1654.
6. Козьярук А. Е., Таранов С. И. Применение унифицированной системы управления электроприводами самосвала и экскаватора и способы ее диагностики // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 1. С. 104–108.
7. Bing Yu, Dongmei Wang. Simulating Calculation of Six Phase Synchronous Generator for Motorized Wheel Dump Truck // Proceedings of the 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. – Beijing, 2014. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941281
8. Анучин А. С., Котельников М. К., Остриров В. Н., Лашкевич М. М., Подлесный М. В. и др. Комплект тягового электрооборудования для БелАЗ-90 на базе вентильно-индукторного электродвигателя с независимым возбуждением // АЭП 2018 : тр. X Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу. – Новочеркасск : Лик, 2018. С. 218–224.
9. Васильев Б. Ю., Григорьев П. С. Ресурсосберегающая электромеханическая трансмиссия карьерного самосвала // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 2(142). С. 15–21.
10. Dvornikovs I., Marinbals M., Zarembo J., Groza E., Ketners K. Investigation of traction motor dynamic using computer simulation and method of mutual loading of two pair motors // Proceedings of the 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems. – Varna, 2019. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771518
11. Toha M., Prastyo D. E., Adi Saptari. A Comparison of Continuous and Periodic Review on Inventory Components of Dump Trucks // Proceedings of the 2019 International Conference on Sustainable Engineering and Creative Computing. – Bandung, 2019. P. 364–368.
12. Husniah H., Pasaribu U. S., Iskandar B. P. Optimal Preventive Maintenance for a Fleet of Dump Trucks with Two-Dimensional Lease Contract // Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. – Singapore, 2015. P. 1067–1071.
13. Shrivastava A., Goswami S., Rao L. M. Monitoring the Utilization of Dump truck in Coal Mines Using Internet of Thing (IoT) // Proceedings of the 2019 IEEE Global Conference for Advancement in Technology. – Bangaluru, 2019. DOI: 10.1109/GCAT47503.2019.8978465
14. Bolshunova O., Kamyshian A., Bolshunov A. Diagnostics of career dump truck traction induction motors technical condition using wavelet analysis // Proceedings of the 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk, 2016. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818988
15. Пархомчик П. А., Егоров А. Н., Зуёнок А. С., Шляховой И. И. Опыт эксплуатации карьерных самосвалов «БелАЗ» с электромеханической трансмиссией в ОАО «Ковдорский ГОК» // Горный журнал. 2012. № 2. С. 54–57.
16. Кузин Е. Г., Пудов Е. Ю., Дубинкин Д. М. Анализ отказов узлов карьерных самосвалов в условиях эксплуатации // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 2(154). С. 55–61.
17. Тарасов П. И., Хазин М. Л., Фурзинов В. В. Повышение ресурса карьерных самосвалов // Горная промышленность. 2019. № 6. С. 118–122.
18. Хорешок А. А., Кудреватых А. В., Ащеулов А. С., Винидиктов А. В., Кантович Л. И. Увеличение ходимости редукторов мотор-колес карьерных самосвалов методом вне-

дения контроля фактического технического состояния // Горные науки и технологии. 2021. Т. 6. № 4. С. 267–276.


19. Птах Г. К., Евсин Н. Ф., Яковенко А. Е., Звездун Д. А., Мустафаев Р. Р. и др. Опыт разработки и внедрения тягового вентильно-индукторного реактивного двигателя для мотор-колес карьерного самосвала серии БелАЗ-7513 // АЭП 2018 : тр. X Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу. – Новочеркасск : Лик, 2018. С. 202–208.

20. О концерне / Концерн «Русэлпром», 2022. URL: <https://www.ruselprom.ru/> (дата обращения: 19.01.2022).

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

22. Виноградов А. Б., Гнездов Н. Е. Система возбуждения тягового генератора электро-механической трансмиссии карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 1. С. 36–41.

23. Виноградов А. Б., Гнездов Н. Е., Коротков А. А., Чистосердов В. Л. Особенности тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 90 тонн // АЭП 2018 : тр. X Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу. – Новочеркасск : Лик, 2018. С. 194–197.

24. Привод большегрузных карьерных самосвалов / Концерн «Русэлпром», 2022. URL: <https://www.ruselprom.ru/for-industries/transport/privod-bolshegruznykh-karernykh-samosvalov/> (дата обращения: 15.03.2022). 

«GORNYI ZHURNAL», 2022, № 4, pp. 106–112  
DOI: 10.17580/gzh.2022.04.16

**Modernization of electromechanical transmission for dump trucks based on long-term operation data**

**Information about authors**

**A. B. Vinogradov**<sup>1</sup>, Research Manager, Professor, Doctor of Engineering Sciences  
**N. E. Gnezdov**<sup>1</sup>, Programmer Engineer, Candidate of Engineering Sciences, [gnezdov@list.ru](mailto:gnezdov@list.ru)  
**V. L. Chistoserdov**<sup>1</sup>, Head of the Programming Sector, Candidate of Engineering Sciences  
**A. A. Korotkov**<sup>1</sup>, Programmer Engineer, Candidate of Engineering Sciences  
<sup>1</sup>Vektor Science and Technology Center of Electric Drive, Ivanovo, Russia

**Abstract**

In open pit mining, overburden and mineral haulage is carried out mostly by dump trucks. The number of high-capacity machines persistently grows. Such dump trucks mainly use electromechanical transmission systems.

As a rule, dump trucks operate all day and all year round, with idle time for scheduled maintenance. The climatic service conditions assume variations in temperature, humidity and atmospheric pressure in wide ranges during a year, moreover, these physical quantities can fluctuate violently within a short time, for instance, within a day. The road conditions – road grade, hardness, roughness, length, altitude difference – differ greatly per open pit mines. Furthermore, air dustiness, including current-conducting coal- or metal-bearing dust should be taken into account.

On the whole, these numerous and diverse factors are impossible to embrace in full at the stages of machine engineering and testing. Thus, during operation, it is necessary to accumulate and analyze the hand-on experience, and to improve all components of electromechanical transmission.

This article gives data on four-year operation of BelAZ dump trucks with capacity of 90 and 240 t equipped with electromechanical transmission in open pit coal and ore mines. The traction electrical equipment faults are generalized, their causes are revealed, design modifications are described, as well as the processes of manufacturing and testing and the algorithm of diagnosis are reported.

The low count of faults during operation and the high availability factor of the dump trucks equipped with electromechanical transmissions manufactured by RUSELPROM is reflective of the proficiency and competency of the machine engineering, design and testing. The modifications introduced into the electromechanical transmissions are mostly aimed at cost reduction and performance buildup, i.e. at competitive recovery of the product.

The obtained results are used in engineering of traction electric equipment set for dump trucks of higher capacity (136, 180, 360 t).

**Keywords:** dump trucks, electromechanical transmission, testing, operation, test analysis, traction electric motor, control systems.

**References**

1. Customers BELAZ equipment. OJSC BELAZ. Available at: <https://belaz.by/about/consumers/> (accessed: 15.12.2021).

2. BELAZ Equipment. OJSC BELAZ. Available at: <https://belaz.by/products/products-belaz/> (accessed: 15.12.2021).

3. Kazubenko A. F. BELAZ dump trucks with electromechanical transmission. *Ugol*. 2019. No. 5. pp. 50–51.

4. Semenchenko B. A. Continental cleat. *Great Russian Encyclopedia*. Available at: <https://bigenc.ru/geography/text/2093254> (accessed: 15.12.2021).

5. Zhang Y. J., Zhang J., Chen X. K. A DSP-Based Transmission Control System of 154t Electrical Wheels Autonomous Dump Truck. *Proceedings of the 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*. Nanjing, 2005. Vol. 2. pp. 1650–1654.

6. Kozyaruk A. E., Taranov S. I. Application of Unified Control System of Dump Truck and Excavator Electric Drive and of Its Diagnostics Methods. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2013. No. 1. pp. 104–108.

7. Bing Yu, Dongmei Wang. Simulating Calculation of Six Phase Synchronous Generator for Motorized Wheel Dump Truck. *Proceedings of the 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*. Beijing, 2014. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941281

8. Anuchin A. S., Kotelnikov M. K., Ostrirov V. N., Lashkevich M. M., Podlesnyi M. V. et al. BelAZ-90 traction electric equipment set on the basis of ac converter-fed-inductor motor with outside excitation. *ICEPDS 2018 : Proceedings of X International Conference on Electrical Power Drive Systems*. Novocherkassk : Lик, 2018. pp. 218–224.

9. Vasiliev B. Yu., Grigorev P. S. Resource-saving electromechanical transmission of the mining truck. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2019. No. 2(142). pp. 15–21.

10. Dvornikovs I., Marinbahs M., Zarembo J., Groza E., Ketners K. Investigation of traction motor dynamic using computer simulation and method of mutual loading of two pair motors. *Proceedings of the 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems*. Varna, 2019. DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771518

11. Toha M., Prastyo D. E., Adi Saptari. A Comparison of Continuous and Periodic Review on Inventory Components of Dump Trucks. *Proceedings of the 2019 International Conference on Sustainable Engineering and Creative Computing*. Bandung, 2019. pp. 364–368.

12. Husniah H., Pasaribu U. S., Iskandar B. P. Optimal Preventive Maintenance for a Fleet of Dump Trucks with Two-Dimensional Lease Contract. *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Singapore, 2015. pp. 1067–1071.

13. Shrivastava A., Goswami S., Rao L. M. Monitoring the Utilization of Dump truck in Coal Mines Using Internet of Thing (IoT). *Proceedings of the 2019 IEEE Global Conference for Advancement in Technology*. Bangalore, 2019. DOI: 10.1109/GCAT47503.2019.8978465

14. Bolshunova O., Kamyshian A., Bolshunov A. Diagnostics of career dump truck traction induction motors technical condition using wavelet analysis. *Proceedings of the 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. Omsk, 2016. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818988

15. Parkhomchik P. A., Egorov A. N., Zuenok A. S., Shlyakhovoy I. I. Experience in operating BelAZ dump trucks with electromechanical transmission at JSC Kovdor GOK. *Gornyi Zhurnal*. 2012. No. 2. pp. 54–57.

16. Kuzin E. G., Pudov E. Yu., Dubinkin D. M. Analysis of failures of mining dump truck components under operating conditions. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2021. No. 2(154). pp. 55–61.

17. Tarasov P. I., Khazin M. L., Furzikov V. V. Extension of Open-Pit Dump Truck Life Cycle. *Gornaya promyshlennost*. 2019. No. 6. pp. 118–122.

18. Khoshok A. A., Kudrevatykh A. V., Ashcheulov A. S., Vinidiktov A. V., Kantovich L. I. Increasing life of pit dump truck motor-wheel gearboxes by introducing the monitoring of the actual technical condition. *Gornye nauki i tekhnologii*. 2021. Vol. 6, No. 4. pp. 267–276.

19. Ptagh G. K., Evsin N. F., Yakovenko A. E., Zvezdunov D. A., Mustafaev R. R. et al. Experience of engineering and introduction of ac converter-fed-inductor traction thrust motor for powered wheels of BelAZ-7513 dump truck. *ICEPDS 2018 : Proceedings of X International Conference on Electrical Power Drive Systems*. Novocherkassk : Lик, 2018. pp. 202–208.

20. About the Concern. RUSELPROM Concern, 2022. Available at: <https://www.ruselprom.ru/> (accessed: 19.01.2022).

21. Vinogradov A. B., Gnezdov N. E., Zhuravlev S. V., Sibirtsev A. N. Results of the development and testing of traction electrical equipment of mining dump truck with load capacity of 240 tons. *Russian Electrical Engineering*. 2015. Vol. 86, No. 3. pp. 139–146.

22. Vinogradov A. B., Gnezdov N. E. Traction alternator excitation system of the electromechanical transmission of a 240 t capacity dump truck. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2015. No. 1. pp. 36–41.

23. Vinogradov A. B., Gnezdov N. E., Korotkov A. A., Chistoserdov V. L. Peculiarities of traction electric equipment of 90 t capacity dump truck. *ICEPDS 2018 : Proceedings of X International Conference on Electrical Power Drive Systems*. Novocherkassk : Lик, 2018. pp. 194–197.

24. Large dump truck drive. RUSELPROM Concern, 2022. Available at: <https://www.ruselprom.ru/for-industries/transport/privod-bolshegruznykh-karernykh-samosvalov/> (accessed: 15.03.2022).