

Улучшение характеристик тягового электрооборудования карьерных самосвалов

Виноградов А.Б., Гнездов Н.Е., Чистосердов В.Л., Коротков А.А.

НТЦ Электропривода «Вектор»

г.Иваново, Россия

Аннотация — При эксплуатации карьерных самосвалов на них воздействует множество факторов: климатические, механические, ресурсные и человеческий. В результате выявляются “слабые” места, недостатки и направления совершенствования оборудования. В докладе представлены результаты 2-х годичной эксплуатации 30-ти комплектов тягового электрооборудования карьерных самосвалов Белаз. Приведён анализ результатов и выполненный комплекс мер по улучшению эксплуатационных характеристик самосвала.

Ключевые слова — карьерный самосвал, комплект электрооборудования, тяговый электропривод, системы управления, испытания, эксплуатация.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основным способом транспортировки грунта и полезных ископаемых при открытой разработке является их перевозка карьерными самосвалами. По данным одного из крупнейших в мире производителей карьерных самосвалов и основного их поставщика на рынок РФ – ОАО БЕЛАЗ, доля выпущенных самосвалов особо большой грузоподъёмности (90 тонн и выше) растёт 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 на технику особо большой грузоподъёмности. В таких самосвалах в большинстве случаев используются электромеханические трансмиссии (ЭМТ) [3].

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 изменение за короткое время, например, в течение суток [4]. Дорожные условия: уклон, твёрдость, неровность покрытия, протяжённость маршрута, перепад высот существенно отличаются на разных карьерах. Следует учитывать и повышенную запылённость воздуха, в том числе токопроводящей угольной или металлической пылью. При этом для достижения максимальной экономической эффективности стараются достичь максимальной скорости движения, т.е.

тяговое электрооборудование работает преимущественно в режимах максимальной тяги или торможения. Кроме того, имеют место перегрузы самосвалов, нарушение регламента тех. 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 комплекта тягового электрооборудования (КТЭО): аппаратную часть и программное обеспечение (ПО), документацию, процесс производства и испытаний, сервисное сопровождение и другие.

Публикации по тяговому электрооборудованию карьерных самосвалов освещают моделирование, разработку, стендовые и ходовые испытания [5-9]. При этом, как правило, докладывают об успехах и резюмируют, что «испытания подтвердили достоверность теоретических положений и верность конструкторских решений». В докладах, касающихся эксплуатации самосвалов, рассмотрены вопросы организационно-экономического плана [10], общие технические вопросы (надёжность, производительность и т.п.) [11-13]. Публикаций о результатах длительной эксплуатации именно КТЭО практически нет. Так, в [14] представлены результаты 6-ти месячной эксплуатации самосвала с вентиляционно-индукторным реактивным приводом. Однако приведены 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 серьёзные просчёты, а последствия достигают существенных масштабов. На наш взгляд, 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.

В настоящем докладе представлены результаты 2-х годичной эксплуатации самосвалов с КТЭО Русэлпром и связанные с ними изменения, внесённые в конструкцию, алгоритмы управления, документацию и процесс производства и испытаний КТЭО.

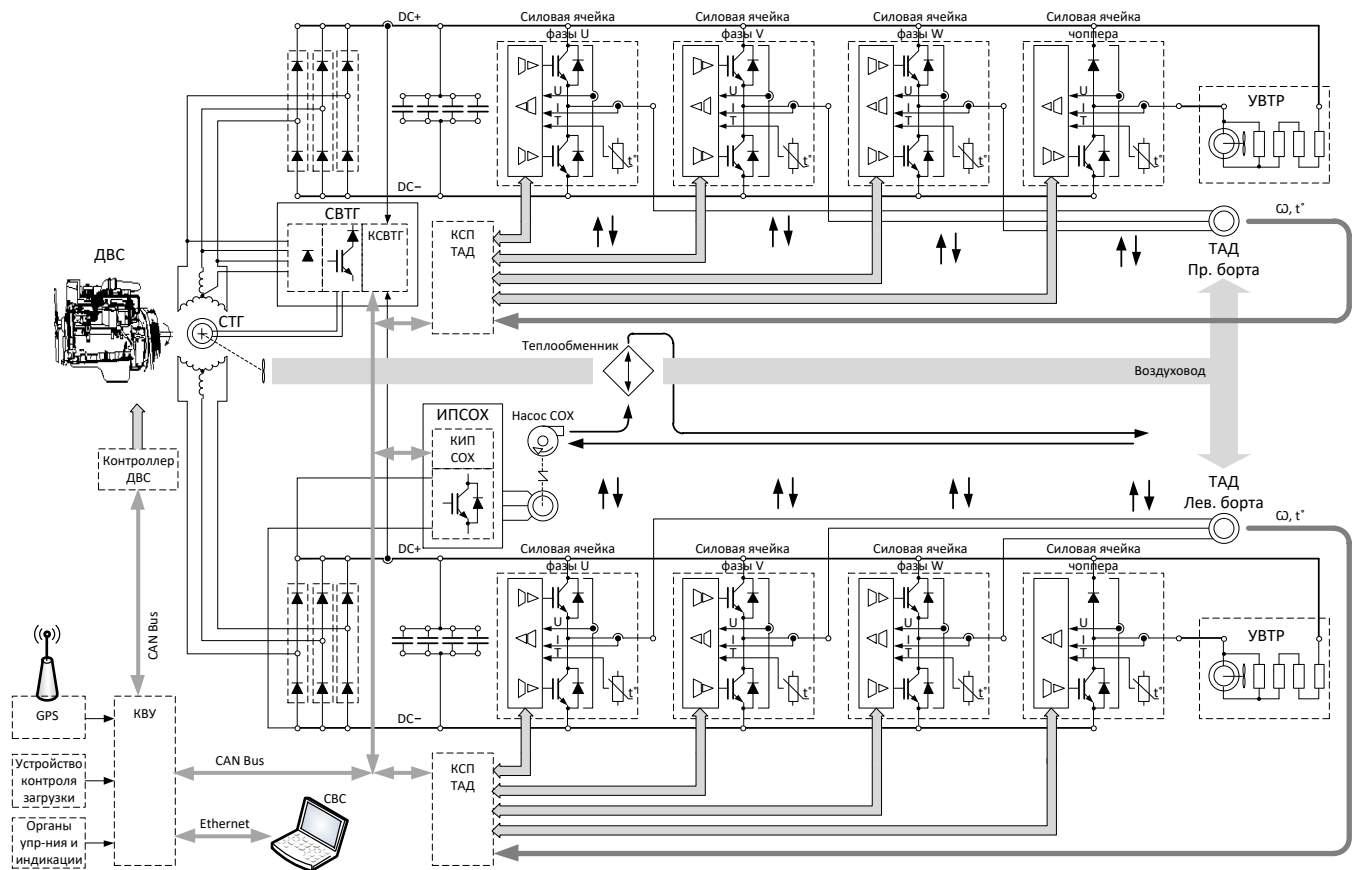


Рис. 1. Функциональная схема КТЭО Белаз-240

Таблица 1. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КТЭО

№ п/п	Наименование параметра	Значение	
		Белаз-90	Белаз-240
1	Мощность на выходе генератора, кВт, не более	900	1550
2	Напряжение на шине постоянного тока (на выходе выпрямителей), В, в тяговом режиме, не более в тормозном режиме, не более	1000	1100
		1200	1200
3	Мощность тормозной резисторной установки, кВт	2x600	2x1200
4	Мощность на валу асинхронного двигателя, кВт, не более, в тяговом режиме: в тормозном режиме:	382	700
		540	1200
5	Максимальный пусковой момент на валу двигателя, кНм	9850	30000
6	Максимальная скорость вращения асинхронного двигателя, об/мин (при скорости самосвала 65 км/час)	3968	2871

II. ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Состав КТЭО и взаимодействие его частей можно понять из функциональной схемы КТЭО Белаз-240, представленной на рис 1. КТЭО Белаз-90 имеет другую, полностью воздушную систему охлаждения радиаторов силовых ячеек и блока системы возбуждения тягового генератора (СВТГ), соответственно, в КТЭО Белаз-90 нет

электропривода и насоса системы жидкостного охлаждения (СОХ).

Основные технические характеристики КТЭО Белаз-240 и Белаз-90 представлены в табл. 1. Подробное описание КТЭО, результаты стендовых испытаний, алгоритмы систем управления тяговыми приводами, СВТГ и движением самосвала в целом представлены в предыдущих публикациях авторов [15-17].

Состав КТЭО принято делить:

- по типу преобразования энергии: на электромеханическую (тяговые асинхронные двигатели (ТАД) и генератор (СТГ)) и электрическую (ШПСУ) части;
- по функционалу элементов ШПСУ: на преобразовательную (силовую) часть и систему управления (контроллеры);
- по уровню управления: на нижний уровень (контроллеры силовых преобразователей (КСП), контроллер СВТГ (КСВТГ) контроллер инвертора привода СОХ (КИПСОХ)) и верхний уровень (КВУ).

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ

На момент написания доклада в эксплуатации находится 31 самосвал с КТЭО Русэллпром. Первый из них, опытный образец БЕЛАЗ-75585 грузоподъемностью 90 тонн, был введён в эксплуатацию 03.03.2018, т.е. отработал два с половиной года. Еще три БЕЛАЗ-75585 установочной серии были введены в эксплуатацию в мае, июне и августе 2018 года. Затем был перерыв, обусловленный проведением квалификационных испытаний и запуском серийного производства (закупка комплектующих, организация производства). С июля по октябрь 2019 года в эксплуатацию введены 15 самосвалов БЕЛАЗ-75585, с апреля по сентябрь 2020 – ещё 10. Самосвалы БЕЛАЗ-75318 грузоподъемностью 240 тонн в эксплуатации: первый – с 05.06.2018, второй – с 31.07.2020. Ещё 17 КТЭО установлены на шасси и ожидают отгрузки с БЕЛАЗа.

С октября 2018 года стала выпускаться модификация БЕЛАЗ-75585 с ДВС повышенной с 1050 до 1200 л.с. мощности. Обладая большей эффективностью (выше средняя скорость и масса, перевезённая за единицу времени) при почти такой же стоимости эксплуатации, в настоящее время она является основной для КТЭО Русэллпром. Отметим, что переход на новую модификацию самосвала не потребовал изменений конструкции или программного обеспечения КТЭО, поскольку ещё в техническом задании (ТЗ) на КТЭО была заложена такая возможность. А результаты разработки и стендовых испытаний подтвердили выполнение требований ТЗ [17].

География эксплуатации самосвалов включает 6 разрезов Кемеровской области, 2 - Красноярского края и 1 – в Армении. В разных разрезах недельный пробег самосвала, при условии отсутствия длительных простоев, составляет от 1,5 до 2,8 тысяч км, а средняя скорость движения – от 9 до 17 км/ч. В табл. 2 представлены типовые значения пробега, наработки и средней скорости движения некоторых самосвалов. Максимальный пробег одного самосвала (опытный образец БЕЛАЗ-75585) составляет 162 тыс. км при наработке почти 14,2 тыс. моточасов, суммарный пробег всех самосвалов – 1 882 тыс.км. при наработке 147,7 тыс. моточасов.

Для получения и анализа результатов наиболее показательна эксплуатация 10 самосвалов БЕЛАЗ-75585 на участке «Коксовый», г. Киселёвск, Кемеровская область. За счёт относительно короткого, но с большими уклонами маршрута движения 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 двигаются в предельных режимах. За 6 месяцев такой эксплуатации имели место следующие неисправности КТЭО:

- 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;
- выход из строя блока СВТГ имел место одновременно с выходом из строя силовой ячейки;

Таблица 2. ТИПОВОЙ НЕДЕЛЬНЫЙ ПРОБЕГ, НАРАБОТКА И СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ НЕКОТОРЫХ САМОСВАЛОВ С КТЭО РУСЭЛПРОМ

Номер шасси, тип КТЭО	Место эксплуатации	Дата	Недельные значения		
			Пробег, км	Наработка, м/ч	Средняя скорость, км/ч
9045, Б-240	разрез "Восточный ЗАО Салек", Кемеровская область	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 область	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
405, Б-90	участок "Коксовый", Кемеровская область	28.11.2019	2844	191	14,89
		05.12.2019	2659	160	16,62
		12.12.2019	1987	150	13,25
		19.12.2019	2502	159	15,74
		26.12.2019	2492	166	15,01

- 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:

- обрыв, затем замыкание на корпус силового кабеля одной из фаз ТАД. Причина – излом и перетирание в месте ввода кабеля в задний отсек самосвала. Корректно сработавшие программные защиты 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 разъёме вследствие вибраций, некачественная сборка разъёма на производстве, повреждение разъёма при проведении регламентных работ с ТАДами;
- 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: 3 случая на 31 самосвал за 2,5 года эксплуатации. Причинами являлись брак при производстве (сборке ШПСУ) либо нарушение герметичности. Остальные ситуации срабатываний защит связаны с неисправностями сигнальных цепей датчиков, некачественными комплектующими либо грубым, неквалифицированным использованием. Пути решения проблем очевидны: повышение качества производства, работа с поставщиками комплектующих, выбор других типов датчиков, разъёмов, кабелей.

Кроме того, 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 СОХ, нагрузки ДВС на тормозные резисторы, ручного управления воздушной заслонкой.

Обобщив результаты эксплуатации, были определены следующие направления совершенствования КТЭО:

- повышение качества производства;
- изменения конструкции: повышение надёжности отдельных элементов, улучшение герметизации ШПСУ, оптимизация состава КТЭО;
- обеспечение возможности движения самосвала при срабатывании защит элементов КТЭО, в т.ч. по датчикам температуры, скорости, по СОХ;
- повышение живучести КТЭО при неквалифицированном управлении («защита от дурака»);
- расширение функциональных возможностей КТЭО;
- повышение удобства диагностики и наладки КТЭО на самосвале.

IV. ИЗМЕНЕНИЯ В КТЭО

По результатам эксплуатации выполнены следующие мероприятия:

- усилен контроль за качеством производства ШПСУ и электрических машин, введены дополнительные

этапы проверки (контроль затяжки резьбовых соединений, проверка ШПСУ в сборе, и др.), скорректирована программа и методика испытаний (ПМИ). Создана независимая группа инженеров, выполняющая приемо-сдаточные и периодические испытания;

- внесены изменения в конструкцию КТЭО: изменён тип разъёмов сигнальных цепей на электрических машинах, изменена модель привода воздушной заслонки, исключены входные фильтры, изменён тип уплотнителя дверей ШПСУ, 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 неё установлен трёхходовой клапан байпаса теплообменника СОХ;
- определены варианты состава системы управления микроклиматом (СУМК) в зависимости от региона поставки: необходимые в конкретных случаях элементы подогрева, охлаждения, осушения, перемешивания воздуха внутри ШПСУ;
- скорректирован (в основном сокращён) состав комплекта запасных частей и принадлежностей (ЗИП);
- 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 определённых ситуациях с ограничением количества попыток сброса защит за определённый 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;
- реализована бездатчиковая система управления тяговыми электроприводами и возможность перехода между системами с и без датчика скорости на валу ТАД;
- скорректированы алгоритмы антипроскальзывания ведущих (задних) колёс самосвала при использовании информации с датчиков скорости передних колёс;
- 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 спец. режимами работы КТЭО на дисплее Bosch Rexroth DI4;
- создана сервисная оболочка для ПК (ноутбука) и спец. режимы в ПО контроллеров КТЭО (автофазировка, прокачка СОХ, нагрузка ДВС на УВТР), облегчающие ввод самосвала в эксплуатацию и диагностику его состояния;
- скорректированы руководство по эксплуатации КТЭО, инструкция водителя, перечень кодов событий и рекомендуемые действия водителя в нештатных ситуациях, инструкции по программированию контроллеров КТЭО.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малое количество отказов при эксплуатации и высокий коэффициент готовности самосвалов с КТЭО 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 конкурентно способности продукта.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] БЕЛАЗ: работа на эффективность и результат (итоги за 2018г.). Новости ОАО «БЕЛАЗ» – URL: <http://belaz.by/press-centre/belaz-work-on-efficiency-and-results/> (дата обращения 02.02.2020).
- [2] География партнерства – 48 стран, средняя грузоподъемность самосвалов «БЕЛАЗ» – 123 тонны (итоги за 2019г.). Новости ОАО «БЕЛАЗ» – URL: <http://belaz.by/press-centre/the-results-2019-geography-partnership-of-48-countries-the-average-capacity-of-dump-trucks-belaz-123/> (дата обращения 02.02.2020).
- [3] Егоров А.Н., Бигель Н.В., Казубенко А.Ф. Новые разработки ОАО «БЕЛАЗ»: Карьерные самосвалы с электромеханической трансмиссией переменного тока грузоподъемностью 90–360 тонн // Горная промышленность. - 2013.- №1 (107), с. 19-20.
- [4] Семенченко Б.А. Континентальный климат // Большая Российская энциклопедия – URL: <https://bigenc.ru/geography/text/2093254> (дата обращения 30.01.2020).

- [5] Y. J. Zhang, J. Zhang and X. K. Chen, "A DSP-Based Transmission Control System of 154t Electrical Wheels Autonomous Dump Truck," *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Nanjing, 2005, pp. 1650-1654.
- [6] Козярук А.Е., Таранов С.И. Применение унифицированной системы управления электроприводами самосвала и экскаватора и способы ее диагностики // Вестник ИГЭУ.– 2013.– Вып.1.– с. 104-107.
- [7] B. Yu and D. Wang, "Simulating calculation of six phase synchronous generator for motorized wheel dump truck," *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Beijing, 2014, pp. 1-3.
- [8] Анучин А.С., Котельников М.К., Остриров В.Н., Лашкевич М.М., Подлесный М.В., Мильский К.В., Тарасов А.С. Комплект тягового электрооборудования для БЕЛАЗ-90 на базе вентильно-индукторного электродвигателя с независимым возбуждением // Труды X Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2018. Материалы докладов конференции. 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] M. Toha, D. E. Prastyo and A. Saptari, "A Comparison of Continuous and Periodic Review on Inventory Components of Dump Trucks," *2019 International Conference on Sustainable Engineering and Creative Computing (ICSECC)*, Bandung, Indonesia, 2019, pp. 364-368.
- [11] Куличкин П.С., Конопелько С.А., Бирюков А.Н. Опыт эксплуатации карьерных самосвалов TEREX TR100 грузоподъемностью 91 тонна на разрезах Кузбасса // Горная промышленность.- 2011.- № 4 (98), с. 30-32.
- [12] Бредихин А.А. Модернизация автопарка. Карьерные самосвалы БЕЛАЗ-7513 с тяговым электроприводом General Electric на руднике Мурунтау // Горная промышленность.- 2009.- № 6 (88), с. 18-20.
- [13] 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.
- [14] Птах Г.К., Евсин Н.Ф., Яковенко А.Е., Звездунов Д.А., Мустафаев Р.Р., Шаповалов В.С. Опыт разработки и внедрения тягового вентильно-индукторного реактивного двигателя для мотор-колёс карьерного самосвала серии БелАЗ-7513 // Труды X Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2018. Материалы докладов конференции. 2018.– С. 202-208.
- [15] Виноградов А.Б., Гнездов Н.Е., Журавлев С.В., Сибирцев А.Н. Результаты разработки и испытаний комплекта электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 240т // Электротехника.- 2015.- №3, с. 38-45.
- [16] Виноградов А.Б., Гнездов Н.Е. Система возбуждения тягового генератора электромеханической трансмиссии карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн // Вестник ИГЭУ. – 2015.- Вып.1. – С. 36-41.
- [17] Виноградов А.Б., Гнездов Н.Е., Коротков А.А., Чистосердов В.Л. Особенности тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 90 тонн // Труды X Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2018. Материалы докладов конференции. 2018.– С. 194-197.

Performance Buildup of Electrical Traction Equipment of Mining Dump Trucks

Anatoliy B. Vinogradov
*Electrical Drive Research and
Technical Center “Vector”*
Ivanovo, Russia
vinogr_ab@mail.ru

Alexander A. Korotkov
*Electrical Drive Research and
Technical Center “Vector”*
Ivanovo, Russia
korotkov_alexand@mail.ru

Nikolay E. Gnezdov
*Electrical Drive Research and
Technical Center “Vector”*
Ivanovo, Russia
gnezdov@list.ru

Valeriy L. Chistoserdov
*Electrical Drive Research and
Technical Center “Vector”*
Ivanovo, Russia
val4is@mail.ru

Abstract—Mining dump trucks are influenced by a number of factors at operation: climatic, mechanical, life time and human. Weak point, faults, limitations and direction of improvement are uncovered as result. 2 year operation results of 30 complete sets of electrical traction equipment of Belaz trucks are presented in this report. Result analysis is given, implemented complex of concrete measures for truck performance buildup is described.

Keywords—dump truck, complete set of electrical equipment, traction electrical drive, control systems, test, maintenance.