



А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев

## Тяговое электрооборудование РУСЭЛПРОМ для карьерных самосвалов БелАЗ

**На предприятиях, занимающихся открытой разработкой полезных ископаемых, в последние годы активно идет процесс внедрения карьерных самосвалов большой грузоподъемности, использующих в качестве трансмиссии электрический привод переменного тока.**

О традиционных тяговых электрических приводах постоянного тока известно даже людям, далеким от карьерной техники. В сравнении с ними привод переменного тока позволяет повысить надежность самосвала, снизить стоимость жизненного цикла и одного тонно-километра перевозок. Это достигается за счет повышения ресурса работы элементов электромеханической и преобразовательной части привода, увеличения тягового и тормозного усилий, расширения скоростного диапазона их эффективного действия, повышения максимальной скорости движения груженого самосвала и эффективности электропривода в целом. Дополнительное преимущество – существенное повышение качества управления самосвалом практически во всех режимах движения, достигаемое за счет

повышения быстродействия и точности обработки заданного момента, введения специфических режимов работы, таких как антипроскальзывание колес и удержание самосвала в неподвижном состоянии.

Имеющиеся единичные технические решения в этой области не удовлетворяют потребителей либо по стоимости самого продукта и его сервисного обслуживания, к примеру, в случае с импортными производителями, либо по его качеству в случае с производителями отечественными.

### **КОМПЛЕКТЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ РУСЭЛПРОМ**

Конструкторы концерна РУСЭЛПРОМ разработали комплекты тягового электрооборудования (КТЭО) переменного тока для приме-

нения в карьерных самосвалах БелАЗ грузоподъемностью 240 и 90 т, в целом не уступающие импортным КТЭО, а по ряду показателей (табл.) превосходящие технические характеристики ведущих мировых производителей, но более привлекательные по стоимости изделия и издержкам эксплуатации. Рассмотрим преимущества и отличительные особенности КТЭО-Русэлпром. В качестве генератора в КТЭО используется синхронная машина с электромагнитным возбуждением, оснащенная двумя группами трехфазных обмоток на статоре, сдвинутых на 30°, питающих два неуправляемых выпрямителя, выполненных на изолированных диодных модулях на нитрид-алюминиевой керамике, установленных на радиаторы с жидкостным охлаждением. Емкостной фильтр выполнен на пленочных конден-



сигналы датчиков перегрева обмоток и подшипниковых узлов СТГ.

### ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КТЭО

Оптимизированная по КПД адаптивно-векторная система управления тяговыми приводами (рис.) позволяет существенно повысить качество управления самосвалом во всех режимах его работы, существенно повысить общий КПД системы «силовой преобразователь – двигатель» в зависимости от скорости движения и нагрузки. Она обеспечивает максимально полное использование возможностей силовой электроники и электрических машин, тем самым минимизируя стоимость КТЭО при заданном уровне предельной механической характеристики. В результате КПД трансмиссии с данным КТЭО достигает 88 %, а погрешность отработки заданного момента не превышает 5 % во всем диапазоне скоростей и нагрузок. Система управления приводом инвариантна к более чем двукратным изменениям активных сопротивлений и индуктивностей электрических машин, возникающим в процессе эксплуатации КТЭО, учитывает процессы в стали магнитопроводов, обеспечивает предельное значение быстродействия контура регулирования момента в условиях наложенных на систему физических ограничений, надежно работает при очень широком диапазоне регулирования переменных в области ослабления поля (более 15:1), что позволяет сформировать требуемые тяговую и тормозную характеристики самосвала вплоть до 65 км/ч.

Для повышения надежности функционирования инверторов ТАД в предель-

саторах с многослойной ламинированной шиной (фото 1).

Жидкостное охлаждение всех силовых приборов выполняется посредством циркуляционного насоса с асинхронным двигателем (фото 2), управляемым от собственного IGBT-инвертора (ИПСОХ). Групповое принудительное воздушное охлаждение теплообменников, а также обмоток синхронного тягового генератора (СТГ) и тяговых асинхронных двигателей (ТАД) производится крыльчаткой вентилятора, установленного на валу СТГ. В отличие от КТЭО БелАЗ-240 система охлаждения шкафа преобразователей и системы управления (ШПСУ) КТЭО БелАЗ-90 является чисто воздушной.

В первых образцах КТЭО использованы интеллектуальные силовые модули 4-го поколения SKiP-4 фирмы Semikron с температурой чипов, повышенной до

175 °С, и стойкостью к термоциклированию, увеличенной в пять раз за счет применения технологии низкотемпературного спекания (вместо традиционной пайки чипов) и прижимной конструкции внутренней шины. Модули оптимизированы под транспортное применение, позволяют снизить потери, повысить надежность и обеспечить расширенные диагностические возможности системы. Параллельно проработаны варианты альтернативного использования в ШПСУ силовых модулей других производителей, положительно зарекомендовавших себя на рынке силовой электроники. Силовой преобразователь системы возбуждения тягового генератора (СВТГ) выполнен по схеме «неуправляемый выпрямитель – понижающий DC/DC преобразователь на IGBT-чоппере с ШИМ» (фото 3). Для реализации защитных функций также используются



Фото 1. Емкостной фильтр на пленочных конденсаторах



Фото 2. Циркуляционный насос с асинхронным двигателем



Фото 3. Силовой преобразователь системы возбуждения тягового генератора

Технические характеристики КТЭО для самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 240 и 90 т



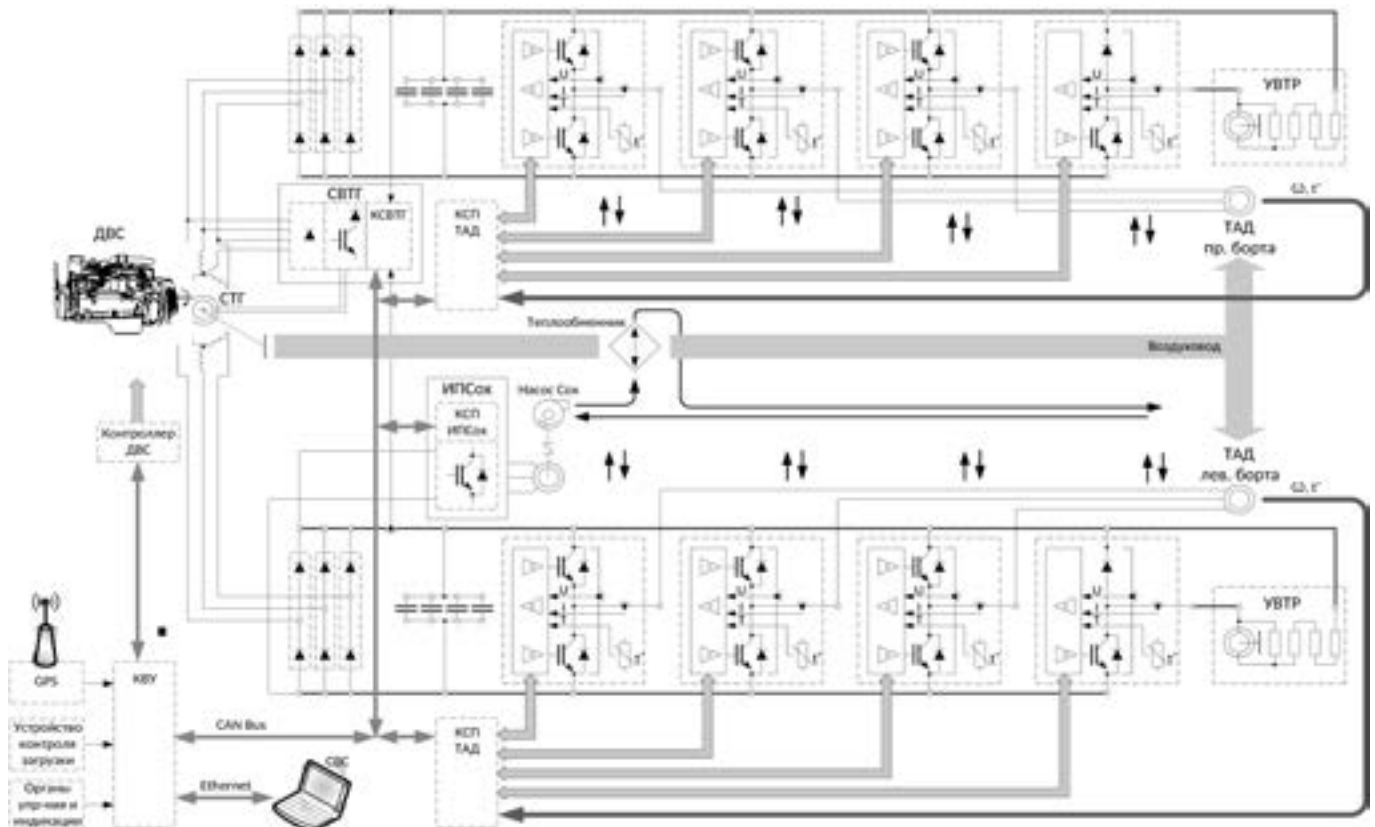
Основные технические характеристики КТЭО	КТЭО Б-240	КТЭО Б-090
Номинальная мощность электродвигателя мотор-колеса (тяга/торможение), кВт	700/1200	320/540
Номинальная мощность генератора, кВт	1550	700
Частота вращения электродвигателя, об/мин	0–3000	0–4000
Частота вращения дизеля в предельном тяговом режиме, об/мин	1900	1900
Частота вращения дизеля в тормозном режиме, об/мин	900–1500*	900–1500*
Частота вращения двигателя при стоянке, об/мин	800	800
Длительное тяговое усилие, кг	47 000	25 000
Максимальное тяговое усилие, кг	92 000	39 000
Диапазон выпрямленного напряжения, В	800–1200	800–1100
Максимальное время переходного процесса от полного тягового усилия до 90 % тормозного, с	1	1
Режим работы	S1	S1
<b>Основные режимы работы самосвала</b>		
Тяговый	+	+
Электродинамического торможения	+	+
Движение задним ходом	+	+
Движение выбегом	+	+
Ослабленный тяговый режим («возвращение на базу») – работа на одном мотор-колесе для транспортировки неисправного самосвала на ремонтную базу	+	+
<b>Защита и диагностика</b>		
Защита от перегрева тягового генератора, выпрямителя, асинхронных двигателей, силовых преобразователей	+	+
Диагностика ухудшения уровня изоляции токоведущих частей	+	+
Защита от превышения допустимого напряжения	+	+
Защита от перегрузок по току силовых преобразователей и асинхронных двигателей	+	+
Диагностика всех составных частей КТЭО с определением неисправности до функционального блока, контролем и визуализацией параметров электрооборудования, записью и хранением данных статистических и аварийных данных работы самосвала	+	+
<b>Специфические режимы и возможности</b>		
Использование на тягу полной свободной мощности дизеля	+	+
Стабилизация текущего значения скорости при тяге и торможении (круиз-контроль)	+	+
Ограничение скорости движения самосвала	+	+
Плавный сброс нагрузки с дизель-генератора	+	+
Проверка нагрузочных характеристик дизеля при работе на тормозной реостат	+	+
Режимы антипробуксовки и антиблокировки	+	+
Автоматическое регулирование мощности генератора и дизеля	+	+
Аварийный режим работы самосвала при неисправностях в КТЭО	+	+
Режим предотвращения скатывания (удержание самосвала на месте)	+	+

\* Изменяется в зависимости от температуры.

ных режимах реализован частотно-зависимый температурный дерейтинг. Данная функция контролирует максимальную величину выходного тока инвертора (электромагнитного момента двигателя) в зависимости от текущего значения выходной частоты и температуры подложки IGBT-модуля таким образом, чтобы не было превышено предельное значение температуры кристаллов. Функция реализована на основе динамической тепловой модели силовых модулей и позволяет добиться максимального использования возможностей силовых ключей в пределах выбранного типоразмера. Проверка функционирования выполнена для всего спектра выходных частот инвертора, в том числе при работе с заторможенным валом, когда разница между средними и пиковыми значениями температуры кристаллов достигает 50 °С.

Трехконтурная система регулирования возбуждения СТГ настроена на обработку ступенчатого наброса/сброса номинальной нагрузки в звене постоянного тока (ЗПТ) за 50 мс по критерию компромисса между быстродействием и уровнем пульсаций напряжения ЗПТ. Контроллер верхнего уровня (КВУ) по шине CAN управляет контроллерами дизеля и силовых преобразователей. Управление оборотами дизеля осуществляется с использованием алгоритмов оптимизации потребления топлива в зависимости от условий движения и загрузки. Алгоритмы управления движением включают функции антибукса, антиюза и противоотката при остановке на уклоне.

В качестве опции КТЭО может поставляться со встроенной системой управления микроклиматом (СУМК) ШПСУ, предназначенной для повышения надежности работы оборудования в условиях воздействия экстремально низких температур окружающей среды, их резких перепадов и проникновения влаги внутрь герметичного корпуса шкафа, например, при его открытии или разгерметизации во влажной среде. Основными задачами СУМК являются: диагностика температуры и влажности внутри ШПСУ при работе и простое самосвала; выявление и автоматическое



Функциональная схема КТЭО БелАЗ-240

устранение последствий воздействия резких перепадов температур и влаги. Программно-аппаратные средства СУМК включают в себя встроенный подогрев, пассивные и активные элементы влаговыведения, систему управления потоком охлаждающего воздуха, алгоритм просушки силовых элементов КТЭО (силовых модулей, ТАД, СТГ, УВТР) на безопасно низком напряжении, алгоритм холодного старта и безопасного выхода в рабочие режимы.

В качестве дополнительной опции в КТЭО реализован режим управления самосвалом без датчика скорости/положения на валу тяговых двигателей. Поскольку на сегодняшний день датчик скорости является одним из самых ненадежных элементов в тяговых электроприводах большой мощности, его устранение без сколь-нибудь существенного снижения предельных характеристик и качества управления самосвалом является одним из эффективных способов повышения надежности системы в целом, снижения трудоемкости и себестоимости изготовления КТЭО, а также его технического обслуживания.

### ПЕРСПЕКТИВЫ КТЭО-РУСЭЛПРОМ

Стендовые испытания КТЭО-Русэлпром проводились на испытательных площадках ООО «Русэлпром-СЭЗ» (г. Сафоново) и в составе самосвала – на полигоне ОАО «БЕЛАЗ», а также в ходе опытной эксплуатации в угольных разрезах Кузбасса. КТЭО успешно выдержали все проверки.

В настоящее время в эксплуатации находятся четыре самосвала грузоподъемностью 90 т и один самосвал грузоподъемностью 240 т. Результаты эксплуатации положительные. В стадии организации находится серийное производство КТЭО-Русэлпром объемом до 100 шт. в год с перспективой расширения по мере необходимости. Выпуск КТЭО развертывается на предприятиях концерна под уже подтвержденные заказы от ОАО «БЕЛАЗ» и непосредственно от обслуживающих организаций. Сформированы службы сервиса и технического обслуживания, проводится обучение персонала обслуживающих организаций. В стадии разработки – КТЭО самосвала грузоподъемностью 136 т, ведутся работы по удешевлению,

повышению надежности и расширению функциональных возможностей КТЭО. С учетом перечисленных преимуществ стоимость КТЭО-Русэлпром в изделии и, что не менее важно, в техническом обслуживании значительно ниже импортных аналогов. Дальнейшее внедрение комплекта предполагается осуществлять не только в составе новых карьерных самосвалов, выпускаемых ОАО «БЕЛАЗ», но и непосредственно на эксплуатирующих предприятиях, проводящих модернизацию своего парка самосвалов, электропривод которых по каким-либо причинам вышел из строя или не устраивает владельца по техническим характеристикам.



Концерн РУСЭЛПРОМ  
109029, РФ, г. Москва,  
Нижегородская ул., д. 32, стр. 15  
Тел.: 8 (800) 301-35-31  
Факс: +7 (495) 600-42-54  
e-mail: mail@ruselprom.ru  
www.ruselprom.ru