

Алгоритмы управления и технические решения в тяговом электроприводе карьерных самосвалов

ВИНОГРАДОВ А.Б., СИБИРЦЕВ А.Н., ЧИСТОСЕРДОВ В.Л., ГНЕЗДОВ Н.Е.,
КОРОТКОВ А.А.

ООО «НТЦ электропривода «Вектор», Иваново, Россия

Электрический привод постоянного или переменного тока является основным типом привода в карьерных самосвалах грузоподъёмностью 90 тонн и выше. Надёжная и экономная работа тяговых электроприводов – одно из ключевых условий успешной эксплуатации карьерных самосвалов. Конструкция преобразователей редко раскрывается её создателями, а управление электродвигателями осуществляется с использованием информации от датчиков скорости. В статье подробно рассмотрены новые конструктивные решения и управление без использования датчиков на валу тяговых электродвигателей карьерных самосвалов БЕЛАЗ. Рациональная конструкция шкафа преобразователей и систем управления для самосвала грузоподъёмностью 136 тонн обеспечила минимизацию паразитных параметров, осязаемое снижение себестоимости, повышение надёжности, ремонтпригодности и технологичности изготовления. Ходовые испытания самосвала БЕЛАЗ грузоподъёмностью 90 тонн с бездатчиковым управлением подтвердили высокое качество работы во всех режимах, в том числе при маневрировании на низких скоростях, удержании на уклоне, движении по обледенелому покрытию. Внедрение полученных результатов в комплекты тягового электрооборудования самосвалов грузоподъёмностью 90-240 тонн обеспечит снижение их себестоимости и повышение надёжности без снижения качества управления.

К л ю ч е в ы е с л о в а: карьерный самосвал, тяговый электропривод, конструкция шкафа управления, системы управления, бездатчиковое управление, векторное управление, частотное управление, моделирование, испытания.

Обеспечение бесперебойной, экономной и импортнезависимой 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 грузоподъёмности вводимых в эксплуатацию карьерных самосвалов, которые, при грузоподъёмности 90 тонн и выше, имеют электромеханическую трансмиссию [1-3]. Для её технически и экономически успешной эксплуатации необходимо выполнить не только традиционные для тяговых ЭП требования (широкий диапазон регулирования скорости вверх от номинальной, массогабаритные и стоимостные ограничения, вариация параметров и нагрузок), но и ряд специфических [3-5]:

отказоустойчивость и безаварийность работы элементов комплекта тягового электрооборудования (КТЭО), особенно во время движения самосвала;

эффективная и надёжная работа в режиме торможения, защита устройств вентиляции тормозных резисторов (УВТР);

обеспечение управляемости при резком изменении сцепных свойств колёс с дорожным покрытием (функции антипробуксовки и антиблокировки — ABS);

надёжная защита от климатических факторов (влага, пыль, перепад температур);

быстрая диагностика и ремонтпригодность.

Выполнение первых трёх требований обеспечивается, преимущественно, алгоритмами систем управления ЭП: бездатчиковым векторным управлением, алгоритмами управления и защиты УВТР, алгоритмами ABS; а последних двух – конструкцией шкафа преобразователей и систем управления (ШПСУ).

Публикации по бездатчиковому управлению тяговых ЭП [6-11] рассматривают отдельные вопросы идентификации переменных и параметров в рамках принятых концепций к построению наблюдателей. Однако в них не рассмотрены вопросы учёта в динамике процессов в стали, изменения взаимной индуктивности статора и ротора, работы в специфических для тягового ЭП нерельсовых транспортных средствах режимах удержания, маневрирования на низких скоростях, движения на уклон, наезда на препятствие или обледенелый участок дороги. Кроме того, везде представлены результаты только моделирования, результатов реализации и ходовых (дорожных, эксплуатационных) испытаний транспортных средств с бездатчиковым тяговым ЭП нет. Публикаций по алгоритмам управления УВТР и ABS именно карьерных самосвалов крайне мало, разработчики КТЭО предпочитают их не раскрывать, эти алгоритмы являются предметом отдельной статьи авторов. Публикации по конструкции ШПСУ практически отсутствуют. В патентах можно встретить структуры силовой части [12-14], системы управления [15-17], но их конструктивное исполнение никак не освещается.

В предыдущих публикациях авторы подробно представили структуру и алгоритмы управления КТЭО, этапы его разработки, наладки, испытаний и длительной эксплуатации [5, 18].

По результатам анализа отзывов эксплуатирующих организаций, отказов оборудования, рекомендаций, высказанных производителем самосвала и КТЭО, на основе собственного опыта, полученного в ходе проектных, пуско-наладочных работ, авторского и сервисного сопровождения эксплуатации карьерных самосвалов, грузоподъемностью 90 и 240 тонн (Б90, Б240), серийно выпускаемых ОАО «БЕЛАЗ», были сформулированы следующие направления совершенствования системы управления и КТЭО в целом:

повышение надежности, технологичности изготовления, удешевление шкафа преобразователей и систем управления (ШПСУ) за счет новых конструктивных решений, полностью исключающих или минимизирующих недостатки, выявленные при эксплуатации;

повышение надежности, снижение стоимости КТЭО и расходов на эксплуатацию и ремонт самосвала за счет внедрения функции высококачественного управления без использования датчиков на валу тяговых электродвигателей (ТАД);

повышение безопасности эксплуатации, управляемости и производительности самосвала за счет введения функций форсированного торможения и повышения эффективности работы системы ABS;

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.

В данной статье подробно рассмотрены новые конструктивные решения при построении ШПСУ и бездатчиковое управление тяговым ЭП самосвала. Конструктивные решения обеспечили минимизацию паразитных параметров, стоимости, повышение надёжности, ремонтпригодности первого экземпляра ШПСУ для самосвала грузоподъемностью 136 тонн. Ходовые испытания самосвала грузоподъемностью 90 тонн с бездатчиковым управлением подтвердили высокое качество работы во всех режимах, в том числе при маневрировании на низких скоростях, удержании на уклоне, движении по обледенелому покрытию.

Конструктивные решения. Задачами, решаемыми при совершенствовании конструкции ШПСУ, являлись:

1. Достижение максимальных показателей эффективности использования силовых полупроводниковых приборов.

2. Устранение систематических недостатков, снижающих показатели надежности.
3. Повышение технологичности и снижение себестоимости изготовления.
4. Повышение удобства обслуживания и ремонта.

Для решения первой задачи выполнена оптимизация конструкции шины звена постоянного напряжения (шины DC). Критерий - достижение минимальной величины распределенной паразитной индуктивности и симметрия параллельных силовых цепей. Это позволяет максимально расширить область безопасной работы IGBT-модулей, снизить потери и повысить надежность системы в аварийных режимах.

Важным средством решения является использование интегральных силовых модулей (ИСМ) с жидкостным охлаждением. ИСМ в конфигурации фазы инвертора, имеет в своем составе набор установленных на общем охладителе, параллельно включенных IGBT, 2-канальный драйвер, датчики тока, напряжения шины DC и температуры подложки. Благодаря этому появляется свобода в выборе компоновочных решений и возможность максимально снизить геометрические размеры шины. Кроме того, переход от ячеечной конструкции фаз инверторов с собственной шиной DC в каждой ячейке [18] к конструкции с одной общей шиной без промежуточных соединений позволяет существенно повысить надежность за счет уменьшения количества резьбовых соединений в силовых цепях. Этому также способствует использование конденсаторов фильтра большей ёмкости.

В результате получена конструкция, исключая возникновение паразитных осцилляций тока в промежуточных соединениях шины, обеспечивающая снижение динамических потерь и повышение стойкости IGBT-модулей в режимах перегрузки и коротких замыканий (рис. 1). Результаты испытаний ШПСУ показали возможность применения ИСМ с номиналом, рассчитанным на использование в самосвале грузоподъемностью 90 т, также и на типоразмерах 136, 160 и 180 т. Немаловажным является и то, что при данной конструкции может быть применен ИСМ в требуемом форм-факторе, изготовленный с использованием стандартных IGBT-модулей разных производителей, в том числе отечественных.



Рис. 1. Конструкция ШПСУ с общей шиной DC

Для решения второй задачи был проанализирован 4-х годичный опыт эксплуатации более 130 самосвалов с КТЭО разработки НТЦ электропривода «Вектор» в 12 карьерах Кемеровской, Новосибирской, Иркутской, Сахалинской областей, Якутии, Красноярского края и Армении. В результате выделены три группы систематических замечаний, касающихся надёжности КТЭО.

К первой группе относятся замечания к герметичности ШПСУ. Для исключения влияния на внутреннее оборудование шкафа вредных факторов повышенной влажности и запыленности в конструкции шкафа предусмотрена несъёмная монолитная герметичная крыша каркаса, дополнительно повышающая его жёсткость. Использование на передних дверцах «плавающих» двухшарнирных навесок и компрессионных замков по всему периметру обеспечивает гарантированное равномерное прижатие уплотнителя. Повышенную защищённость от проникновения пыли и влаги также обеспечивает замкнутый гидравлический контур системы охлаждения (СОх) и вынесение теплообменников «жидкость/воздух» в отдельный отсек. В результате внутри аппаратного отсека не создается пониженное давление и отсутствует необходимость герметизации фланцев радиаторов воздушного охлаждения.

Вторая группа систематических замечаний, связанная с большим количеством резьбовых соединений шинных сборок и крепления их к каркасу, исправлена за счёт оптимизации ошиновки, включая оптимизацию конструкции копланарной ламинированной шины. Главным достигнутым преимуществом является наличие единственной копланарной ламинированной шины и размещение ее в вертикальной плоскости. Данное решение значительно повышает надёжность в условиях возможного выпадения конденсата внутри шкафа.

Третья группа замечаний связана с качеством электромонтажа сигнальных цепей. Для решения данных проблем предусмотрено использование 4-х одинаковых съёмных монтажных панелей с интегрированными элементами крепления и перфорацией для бандажа жгутов и кабелей. В результате удалось добиться оптимального размещения всех блоков управления и защиты, минимальных длин соединений, надёжности фиксации жгутов и разъёмных соединений (рис. 2).



Рис. 2. Расположение блоков управления и защиты в ШПСУ

Решение третьей задачи, а именно повышение технологичности и снижение себестоимости изготовления, достигнуто следующими средствами:

предусмотрена выкатная конструкция внутренней рамы силовой части. Это позволяет выполнять механический и электрический монтаж силовых и сигнальных цепей вне шкафа, что обеспечивает большее удобство и сокращает время монтажа;

конструктив выкатной внутренней рамы собирается с использованием стандартных несущих профилей. При этом вместо нержавеющей стали используется оцинкованная, дающая дополнительную экономию. Оптимизация оцинковки и использование стандартных медных полосовых шин вместо многослойных изолированных в целом дает экономию в затратах на изделия из меди до 50%;

в конструкции коллекторов жидкостных контуров СОх использованы стандартные трубы из нержавеющей стали и фитинги с прессовым соединением. Кроме повышения надежности это дало до 40% экономии по сравнению с изготовлением сварных коллекторов.

Наконец, для решения четвертой задачи - обеспечения удобства обслуживания и ремонта были реализованы следующие технические решения:

контроллеры системы управления размещены на монтажных панелях непосредственно за дверцами (крышками) шкафа в непосредственной близости к соответствующим силовым преобразователям. Прозрачные крышки блоков контроллеров обеспечивают хорошую читаемость индикаторов и доступ к служебным интерфейсам. Над контроллерами расположены плафоны освещения;

большая часть электромонтажа сигнальных цепей расположена на монтажных панелях и удобна для инспектирования и, при необходимости, для переконфигурации сети CAN;

монтажные панели имеют смотровые окна и технологические вырезы для осмотра и протяжки ответственных соединений силовых цепей;

обеспечен удобный доступ ко всем быстроразъемным соединениям гидравлических контуров СОх через люки на задней стенке шкафа;

кроме компенсаторов давления на корпусе шкафа предусмотрены дренажные элементы, закрепленные в углублениях на днище для удаления конденсата;

для выполнения регулярных осмотров СОх обеспечен удобный доступ к циркуляционным насосам, теплообменникам, расширительным бачкам, фильтрам грубой очистки и приводам байпаса за счет размещения оборудования в отдельном отсеке, что исключает необходимость открытия отсеков с силовой электроникой (рис. 3).



Рис. 3. Отсек элементов жидкостной системы охлаждения

Управление электроприводом без датчика на валу ТАД. Принципы построения представляемой в данном докладе системы управления асинхронным ЭП без использования информации с датчика скорости/положения подробно рассмотрены в [19]. В основу построения системы положен наблюдатель состояния, который вычисляет модуль и частоту вращения вектора потокосцепления ротора, момент и скорость двигателя, выполняет оценку изменяющихся в процессе эксплуатации параметров двигателя: взаимной индуктивности и активных сопротивлений статора и ротора (L_m , R_s , R_r), а также производных от них параметров системы управления, на основе информации о токах статора и напряжения шины DC. Наблюдатель реализован в синхронной системе координат, не привязанной ни к одному из векторов двигателя. Особенности системы управления применительно к тяговому приводу самосвала:

- инвариантность к изменениям в широких пределах L_m , R_s , R_r , достигнутая за счет адаптивных оценок этих параметров в наблюдателе и коррекции ориентирующего угла по инвариантному к ним положению вектора ЭДС;

- учет в динамике процессов в стали ТАД [20];

- наличие режима удержания, позволяющего надежно фиксировать самосвал на максимальном рабочем уклоне с максимальной загрузкой и стартовать из этого положения в любом направлении;

- возможность в рамках единой системы управления работать как с датчиком скорости, так и без него, без снижения качественных характеристик движения самосвала, включая режимы удержания, ABS и маневрирования на малых скоростях;

- комбинация в единой системе двух принципов управления: адаптивно векторного, основанного на регулировании активной и реактивной компонент тока статора, и частотного, построенного на основе задания частоты скольжения и напряжения статора;

- безударный переход между структурами векторного и частотного управления;

- максимальное использование напряжения шины DC (максимальный момент без потери управляемости) и низкая чувствительность к вариациям параметров системы на высоких скоростях двигателя в области глубокого ослабления поля, достигаемая за счет перехода к частотному управлению;

- погрешность в оценке момента в статике и динамике во всем диапазоне работы привода не превышает 4% от его номинального значения.

Точка переключения структур управления зависит от режима работы привода. В режимах медленного изменения скорости либо нагрузки ТАД переключение осуществляется по уровню оценки потокосцепления в области ослабления поля. Уровни потока при прямом и обратном переходе выбираются экспериментально (на модели с последующей проверкой в стендовых условиях) по характеристикам чувствительности динамических свойств системы векторного управления к вариациям индуктивностей рассеяния ТАД, адаптация к изменению которых в процессе работы привода отсутствует и которые, хоть и в малых пределах технологического разброса, но все-таки изменяются от двигателя к двигателю одного и того же типа.

В режимах предельно быстрых изменений скорости либо нагрузки (чаще всего бывает в режимах пробуксовки либо при резких изменениях заданного момента, реже – момента сопротивления движению) переход к частотной системе также может выполняться по факту потери управляемости векторной системы, а именно: временному попаданию её в режим, когда заданное на выходах регуляторов тока напряжение превышает его фактически доступное из шины DC значение, что при длительном нахождении в таком состоянии обычно сопровождается попаданием регуляторов тока в ограничение и аварией по сверхтоку. Избежать этого можно

либо ограничением предельной динамики векторной системы при работе в области ограничения напряжения, что нежелательно и не всегда возможно, либо, как в нашем случае, переходом к частотному управлению и возвратом к векторной системе, когда угроза неуправляемости миновала.

На рис. 4 изображены временные диаграммы скорости, момента и мощности ТАД Б90, полученные в процессе стендовых испытаний КТЭО без датчика скорости ТАД в режиме разгона по предельной тяговой характеристике (а) до максимальной скорости (соответствует 65 км/ч движения самосвала) и в режиме торможения с максимальной скорости по предельной (форсированной) тормозной характеристике (б). Заметим, что ниже скорости движения самосвала 50 км/ч привод способен развивать тормозную мощность в 1000 кВт, при том, что типовая тормозная характеристика самосвала ограничена мощностью 540 кВт. Это позволило самосвалу БЕЛАЗ повысить производительность, безопасность эксплуатации и превзойти по эффективности тормозного режима своего основного конкурента в этом сегменте – 90-тонный самосвал с механической трансмиссией фирмы «Komatsu». Типовые и форсированные тормозные характеристики самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 90 тонн с системой управления НТЦЭ «Вектор» представлены на рис. 5.

На рис. 6а изображены временные диаграммы разгона до скорости 40 км/ч и торможения порожнего самосвала грузоподъемностью 90 т при движении по обледенелому дорожному покрытию с включенной ABS, полученные в процессе ходовых испытаний усовершенствованного варианта самосвала. Усовершенствования касались бездатчикового управления ТАД, форсированного торможения и улучшенного алгоритма работы ABS. Скорость переднего (ведомого) колеса изображена пунктиром, приведена к скорости вращения вала ТАД через коэффициент редуктора и при прямолинейном движении жестко связана со скоростью самосвала. Информация с датчиков скорости ТАД использовалась только для мониторинга. Разница скоростей ведущего и ведомого колес, а также пульсации момента связаны с работой ABS. При отсутствии на самосвале датчиков передних колес КТЭО переходит на прежний алгоритм работы ABS, не использующий информацию о скорости и обладающий несколько худшими характеристиками в части величины пульсаций скорости и момента, а также управляемости при проскальзывании колес.

На рис. 6б представлены временные диаграммы одного из наиболее тяжелых режимов движения, а именно: разгон, останов с переходом в режим удержания и последующее возобновление движения полностью груженого самосвала на 12%-м уклоне с обледенелым покрытием.

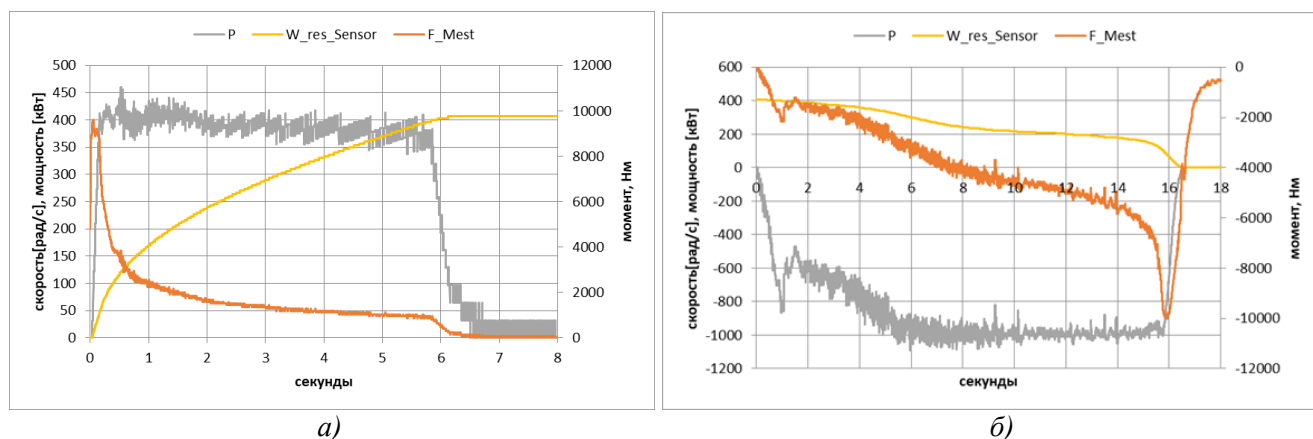


Рис. 4. Результаты стендовых испытаний тягового привода Б90 без датчика скорости ТАД в предельных тяговом (а) и тормозном (б) режимах

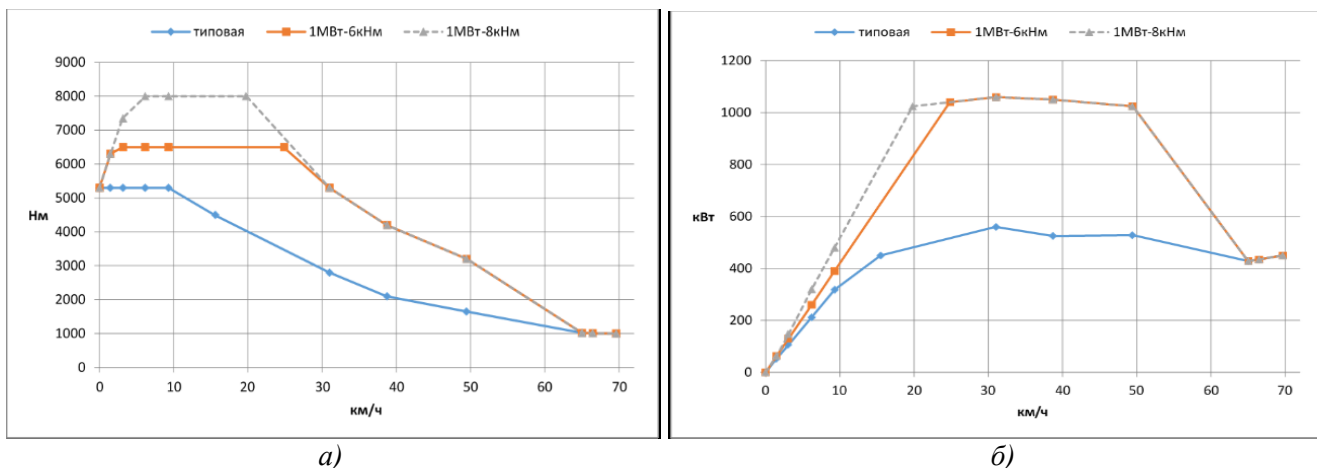


Рис. 5. Типовая и форсированные тормозные характеристики самосвала Б90: а) – момент, б) – мощность на валу двигателя

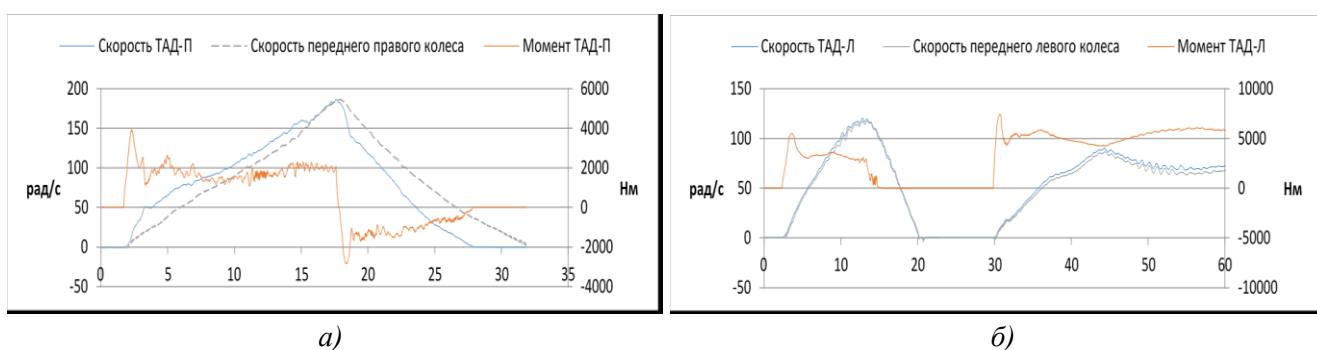


Рис. 6. Графики скорости и момента при движении самосвала без груза по ровной поверхности (а) и с номинальной загрузкой на уклоне (б)

Выводы. Конструктивные решения и алгоритмическое обеспечение тягового электропривода напрямую влияют на надёжность и экономичность работы транспортных средств. Конструкция оборудования практически не раскрывается его создателями, даже в патентах, а алгоритмы управления описываются, как правило, с результатами лишь моделирования, без стендовых и ходовых испытаний.

Реализация описанных в статье конструкторских решений в ШПСУ для самосвала БЕЛАЗ грузоподъёмностью 136 тонн обеспечила достижение максимальных показателей эффективности использования силовых полупроводниковых приборов, повышение отказоустойчивости, технологичности изготовления, удобство обслуживания и ремонта ШПСУ, а также заметное снижение его себестоимость.

Ходовые испытания самосвала БЕЛАЗ грузоподъёмностью 90 тонн с усовершенствованными алгоритмами управления, в частности, с бездатчиковым управлением подтвердили высокое качество работы во всех режимах, в том числе при маневрировании на низких скоростях, удержании на уклоне, движении по обледенелому покрытию. Получено максимальное использование напряжения ЗПТ (максимальный момент без потери управляемости), низкая чувствительность к вариациям параметров двигателя, безударный переход между структурами векторного и частотного управления.

Рассмотренные в статье технические решения распространены на всю существующую в настоящее время линейку ШПСУ для карьерных самосвалов БЕЛАЗ в диапазоне грузоподъёмности от 90 до 240 тонн. Идёт процесс внедрения в производство и эксплуатацию для получения результатов работы в карьерах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Казубенко А.Ф.** Самосвалы БЕЛАЗ с электромеханической передачей. - Уголь, 2019, № 5 (1118), с. 50-51.
2. **Егоров А.Н., Бигель Н.В.** Карьерные самосвалы с электромеханической трансмиссией переменного тока. - Горный журнал, 2013, № 1, с. 50-51.
3. **Казубенко А.Ф.** Применение электромеханической трансмиссии на карьерных самосвалах БЕЛАЗ. - Горная промышленность, 2018, № 6 (142), с. 21.
4. **Андреева Л.И., Ушаков Ю.Ю.** Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов. - Известия Уральского государственного горного университета, 2016, № 3 (43), с. 74-77.
5. **Виноградов А.Б. и др.** Модернизация электротрансмиссии карьерных самосвалов по результатам длительной эксплуатации. - Горный журнал, 2022, № 4, с. 106-112.
6. **Анучин А.С. и др.** Измерение производной тока с использованием дельта-сигма-модулятора для бездатчикового управления тяговым электроприводом. - Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2020, Т. 63, № 8. с. 711-719.
7. **Александров А.Л., Колодкин М.С.** Координатный наблюдатель для системы управления асинхронным тяговым электроприводом. - Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения, 2016, № 2 (72), с. 13-22.
8. **Мезенцев Н.В., Гейко Г.В.** Идентификация параметров асинхронного привода с использованием генетического алгоритма. - Электротехнические системы и комплексы, 2014, № 4 (25), с. 14-17.
9. **Опейко О.Ф., Пташник А.И., Хильмон В.И.** Тяговый электропривод с бездатчиковой системой векторного управления. - Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, 2010, № 6, с. 37-43.
10. **Аносов В.Н., Кавешников В.М., Саидов С.А.** Синтез нейрорегулятора мощности в системе бездатчикового тягового электропривода. - Омский научный вестник, 2021, № 2 (176), с. 31-35.
11. **Кулинич Ю.М. и др.** Моделирование векторного управления асинхронным приводом вспомогательных машин электроподвижного состава. - Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, 2022, Т. 81, № 1, с. 23-30.
12. **Патент № 2692288 С1** Российская Федерация, МПК В60L 50/13, Н02М 5/42, В60L 7/06. Тяговый электропривод автономного транспортного средства: № 2018133766: заявл. 24.09.2018: опубл. 24.06.2019 / А. Е. Козярук, А. М. Камышьян, О. М. Большунова, А. А. Коржев; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».
13. **Патент № 2653945 С1** Российская Федерация, МПК В60L 11/08, Н02М 5/458, В60W 10/105. Энергоэффективный тяговый электропривод автономного транспортного средства : № 2017121480 : заявл. 19.06.2017 : опубл. 15.05.2018 / А. Е. Козярук, А. М. Камышьян ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".
14. **Патент** на полезную модель № 151733 U1 Российская Федерация, МПК Н02К 13/00, Н02Р 21/00. Шестифазная вентильная электромеханическая система переменного тока с расщепленной трехфазной обмоткой: №2014123036/07: заявл. 05.06.2014: опубл. 10.04.2015 / В.М. Терешкин, Д.А. Гришин, А.А. Тупиков, Б.И. Габдрахманов; заявитель ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».
15. **Патент № 2670563 С1** Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В60L 11/18, В60L 7/14. Устройство управления для электромоторного транспортного средства и способ управления для электромоторного транспортного средства: №2017127278: заявл. 26.01.2015: опубл. 23.10.2018 / А. Савада, К. Ито, Т. Накадзима [и др.]; заявитель НИССАН МОТОР КО., ЛТД.
16. **Патент № 2666072 С2** Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В60L 11/18, В60L 7/14. Устройство управления для электромоторного транспортного средства и способ управления для электромоторного транспортного средства : № 2016127685 : заявл. 05.01.2015 : опубл. 05.09.2018 / А. Савада, К. Ито, Т. Накадзима [и др.] ; заявитель НИССАН МОТОР КО., ЛТД.

17. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611555 Российская Федерация. Система управления тяговым электроприводом автосамосвала грузоподъемностью 90 тонн : № 2014618282 : заявл. 19.08.2014 : опубл. 30.01.2015 / Н. А. Серов, С. В. Гурьянова, Д. А. Андреев, А. С. Смирнов ; заявитель Открытое акционерное общество "Силовые машины - ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт" (ОАО "Силовые машины").

18. **Виноградов А.Б. и др.** Результаты разработки и испытаний комплекта тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 240 т. – Электротехника, 2015, № 3, с. 39-45.

19. **Виноградов А.Б., Глебов Н.А.** Системы управления моментом в асинхронном электроприводе без датчика скорости. - Труды X междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП 2018: Материалы докладов конференции. Новочеркасск, 2018, с. 85-90.

20. **Виноградов А.Б.** Моделирование динамических процессов частотно-управляемого асинхронного двигателя с учетом потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта. - Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2005, № 3, с. 38-43.