

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 622.684

Анатолий Брониславович Виноградов

Научно-технический центр электропривода «Вектор», доктор технических наук, научный руководитель, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-08, e-mail: vinorg_ab@mail.ru

Александр Александрович Коротков

Научно-технический центр электропривода «Вектор», кандидат технических наук, инженер-программист, Россия, Иваново, e-mail: korotkov_alexand@mail.ru

Кирилл Константинович Ермаков

Научно-технический центр электропривода «Вектор», аспирант, инженер-программист, Россия, Иваново, e-mail: nice.ermakov19@gmail.com

Алгоритмы управления карьерным самосвалом при проскальзывании колес

Авторское резюме

Состояние вопроса. Карьерные самосвалы грузоподъемностью 90 тонн и более оснащают электромеханической трансмиссией, управляющей тяговыми электродвигателями ведущих колес. Неблагоприятные условия работы самосвалов предъявляют повышенные требования к безопасности движения по грунтовым технологическим дорогам разрезов. Результаты испытаний и опыт сопровождения карьерных самосвалов БЕЛАЗ показали, что система активной безопасности особенно востребована и оказывает существенную помощь водителю. Потеря управляемости груженого самосвала, например, при резком торможении на скользкой обледенелой дороге может привести к серьезной аварии и дополнительным затратам на ремонт карьерной техники. В связи с этим разработка систем безопасности движения карьерных самосвалов с электромеханической трансмиссией является важной задачей.

Материалы и методы. При разработке алгоритмов управления карьерным самосвалом использованы методы автоматического управления, математического моделирования и численного решения систем дифференциальных уравнений. Для апробации предложенных решений использован метод натурального эксперимента в реальных условиях движения по грунтовым и обледенелым дорогам.

Результаты. Предложены алгоритмы управления, использующие дополнительную информацию с датчиков передних (ведомых) колес. Приведены результаты испытаний на самосвале БЕЛАЗ грузоподъемностью 90 тонн, подтверждающие эффективность разработанной системы управления в сравнении с используемой в настоящее время в серийных изделиях.

Выводы. Разработанная система ABS с датчиками скорости передних колес карьерного самосвала показала эффективность торможения на скользкой дороге и позволила значительно улучшить управляемость самосвала при движении в условиях плохого сцепления колес с дорогой, предотвращая заносы самосвала и блокировку колес, снизить механические воздействия на трансмиссию и чувствительность характеристик системы антипроскальзывания к изменениям условий движения. Адаптивная система сохраняет работоспособность при выходе из строя одного из датчиков передних колес и, по сравнению со штатной системой, работает одинаково эффективно в различных условиях движения. Внедрение полученных результатов позволит повысить безопасность движения и снизить аварийность дорогостоящей карьерной техники.

Ключевые слова: карьерный самосвал; проскальзывание колес; система управления; алгоритмы антиблокировки; алгоритмы антипробуксовки

Anatoliy Bronislavovich Vinogradov

Electrical Drive Research and Technical Center “Vector”, Doctor of Engineering Sciences, Scientific Supervisor, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-08, e-mail: vinorg_ab@mail.ru

Alexander Alexandrovich Korotkov

Electrical Drive Research and Technical Center “Vector”, Candidate of Engineering Science, Programming Engineer, Russia, Ivanovo, e-mail: korotkov_alexand@mail.ru

Kirill Konstantinovich Ermakov

Electrical Drive Research and Technical Center “Vector”, Postgraduate Student, Programming Engineer, Russia, Ivanovo, e-mail: nice.ermakov19@gmail.com

Dump truck control algorithms when wheels slip

Abstract

Background. Mine dump trucks with a carrying capacity of 90 tons or more are equipped with an electromechanical transmission that controls the traction motors of the driving wheels. Due to unfavorable operation conditions of dump trucks, there are strict requirements to the driving safety along unpaved roads of open pits. The results of BELAZ dump trucks tests and authors maintenance experience have shown that the active security system is especially needed and gives essential assistance to a driver. Loss of control of a loaded truck, for example, during sharp braking on a slippery icy road, can lead to a serious accident and additional costs for repairing mining equipment. Thus, the development of traffic safety systems of mine dump trucks with electromechanical transmission is an important task.

Materials and methods. The methods of automatic control, mathematical modeling and numerical solution of differential equations are used to develop control algorithms for a mine dump truck. To test the proposed solutions, the method of full-scale experiment is used in real-life driving conditions along the dirt and icy roads.

Results. Control algorithms that use data of additional front (driven) wheels sensor are proposed. The results of tests of a BELAZ dump truck with a carrying capacity of 90 tons are presented. The results confirm the effectiveness of the developed control system in comparison with the one currently used in stock-produced items.

Conclusions. The developed ABS system with speed sensors of the front wheels of a dump truck has proved the braking effectiveness along a slippery road. It makes it possible to improve the controllability of the dump truck significantly under conditions of lack of road adhesion, preventing the dump truck from skidding and wheels blocking. And it makes it possible to reduce mechanical effects on the transmission and anti-slip system sensitivity to different traffic conditions. The adaptive system remains operational if one of the front wheel sensors fails and if compared to the standard system it works equally effectively in various traffic conditions. The implementation of the obtained results will improve traffic safety and reduce the accident rate of expensive mining equipment.

Key words: mine dump truck, wheels slip, control system, anti-lock system, anti-slip system

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.068-073

Состояние вопроса. Карьерные (внедорожные) самосвалы используются при открытом способе разработки полезных ископаемых и работают преимущественно в тяжелых дорожных и климатических условиях. Предельная грузоподъемность таких самосвалов на сегодняшний день составляет 450 тонн, а скорость движения по горизонтальной поверхности превышает 60 км/ч [1]. В таких условиях эксплуатации система управления самосвалом должна быть адаптивной, обеспечивать устойчивость движения и управляемость.

Современный автотранспорт оснащен множеством различных систем безопасности движения. Это система антиблокировки (ABS), система антипробуксовки (ASR), система блокировки дифференциала ведущего моста (EDS), а также система курсовой устойчивости (ESP), которая, в зависимости от производителя транспортного средства, получила названия

ESC, DSC, VDC и др. Задача таких систем, как ABS и ASR, заключается в сохранении управляемости на скользкой дороге за счет поддержания скольжения в оптимальном диапазоне, соответствующем максимальному коэффициенту продольного сцепления колес с дорожным покрытием [2]. Ширина этого диапазона является критерием качества работы этих систем. Эффективная работа ABS позволяет сократить тормозной путь, ASR совместно с EDS – повысить проходимость, а ESP – предотвратить занос автомобиля.

В условиях движения по сухому асфальтобетонному покрытию ABS увеличивает тормозной путь, но сохраняет управляемость и снижает износ дорогостоящей колесной резины карьерного самосвала. Современная система ABS должна обеспечивать [2, 3]:

- минимальный тормозной путь;
- сохранение управляемости;

- адаптивность к внешним условиям (изменение коэффициента скольжения);
- плавность торможения (без рывков).

Использование ASR позволяет увеличить силу тяги, сохранить устойчивость движения и снизить нагрузки на трансмиссию. ESP, объединяя и развивая преимущества ABS и ASR, предотвращает занос и боковое скольжение, помогает стабилизировать положение автомобиля при экстремальном маневрировании на скользком дорожном покрытии.

Разработка систем безопасности движения карьерных самосвалов с электромеханической трансмиссией (ЭМТ) является важной задачей. Сложные дорожные условия (грязь, сырая глина, гололед) и режимы работы самосвалов (спуски и подъемы в гору) предъявляют повышенные требования к таким системам.

Материалы и методы. Комплект тягового электрооборудования (КТЭО) ЭМТ карьерного самосвала включает в себя [4]: два тяговых асинхронных двигателя (ТАД), синхронный тяговый генератор (СГТ), шкаф управления (ШПСУ) и блок контроллера верхнего уровня (КВУ). Тяговые двигатели, устанавливаемые в заднем мосту на левый и правый борт, приводят в движение задние колеса самосвала. Дизельный двигатель вращает вал СГТ в зависимости от требуемой на тягу мощности. Электрическими машинами управляет ШПСУ, в который входят блоки контроллеров силовых преобразователей (КСП), системы возбуждения тягового генератора (КСВТГ), системы управления микроклиматом (СУМК), а также инверторы привода системы охлаждения (ИПСОХ) для исполнения с жидкостным охлаждением. Блок КВУ управляет движением самосвала на основе сигналов с органов управления и формирует задание контроллерам нижнего уровня, входящим в состав ШПСУ, и блоку контроллера дизельного двигателя (ДВС).

В общем виде процедура формирования управления следующая: крутящий момент ТАД рассчитывается в зависимости от нажатия педали (газа или тормоза) и мощности, которую в тяговом режиме развивает ДВС или в тормозном режиме способен рассеивать управляемый вентилируемый тормозной резистор (УВТР), ограничивая динамику разгона и контролируя проскальзывание колес. Раздельное управление крутящим моментом колес левого и правого борта самосвала улучшает управляемость и безопасность движения в сложных дорожных условиях [5, 6].

Рассмотрим штатную систему ABS карьерного самосвала. Здесь и далее под ABS будем понимать независимую работу двух систем: ABS и ASR, назначение которых – обеспечение оптимального скольжения в тяговом и тормозном режимах соответственно.

Штатная система ABS работает независимо по бортам самосвала, контролируя ускорение ведущего колеса, и в случае превышения максимально допустимого значения снижает электромагнитный момент ТАД, восстанавливая сцепление колеса с дорогой. Определив, таким образом, переход в режим антиблокировки или антипробуксовки, система ABS формирует переключения момента (в цикле: сброс до нуля и обратное восстановление по задатчику). В результате ограничения динамики по моменту и мощности период пульсаций крутящего момента составляет от 0,5 до 1 с. Выход из режима ABS выполняется по условию достижения текущей скоростью вращения колеса значения, рассчитываемого по предполагаемому ускорению (замедлению), при котором на данной скорости не происходит проскальзывания [7].

Работу системы ABS при экстренном торможении в различных дорожных условиях иллюстрирует рис. 1, где пунктирной линией показаны задаваемые КВУ значения крутящего момента для левого и правого борта, сплошной линией и точками – значения электромагнитного момента и скорости ТАД

Эксплуатация в реальных условиях выявила недостатки штатной системы ABS [8]:

- пульсации электромагнитного момента (от предельного значения в тормозном режиме до нуля с частотой 1–2 Гц (рис. 1)) накладывают повышенные требования к тяговому приводу, увеличивают потери, влияют на ресурс работы механической передачи мотор–колесо;

- условие перехода в режим ABS определяется по характеристике предельного ускорения, при котором колесо не теряет сцепление с дорогой, от скорости вращения. Следует иметь в виду, что данная характеристика рассчитывается на определенные условия движения и дорожного покрытия. На рис. 1,а показана работа штатной системы ABS, настройка которой выполнялась на порожнем самосвале при движении по ровному участку сухой щебеночной дороги. Изменение дорожных условий (лед, покрытый укатанным снегом) при сохранении настроек системы приводит к неоптимальной работе ABS (рис. 1,б) – колеса блокируются, скользят по снегу, а сохранить управляемость самосвала в этом случае может только опытный водитель. Скорость движения самосвала (приведенная к валу ТАД) выделена серым цветом;

- не обеспечивается оптимальность скольжения и адаптивность к изменению сцепления колеса с дорожным полотном. Возможным решением в данном случае может стать набор различных настроек, оптимизированных под конкретные условия эксплуатации (например, грунт, снег, лед, глина и т.п.);

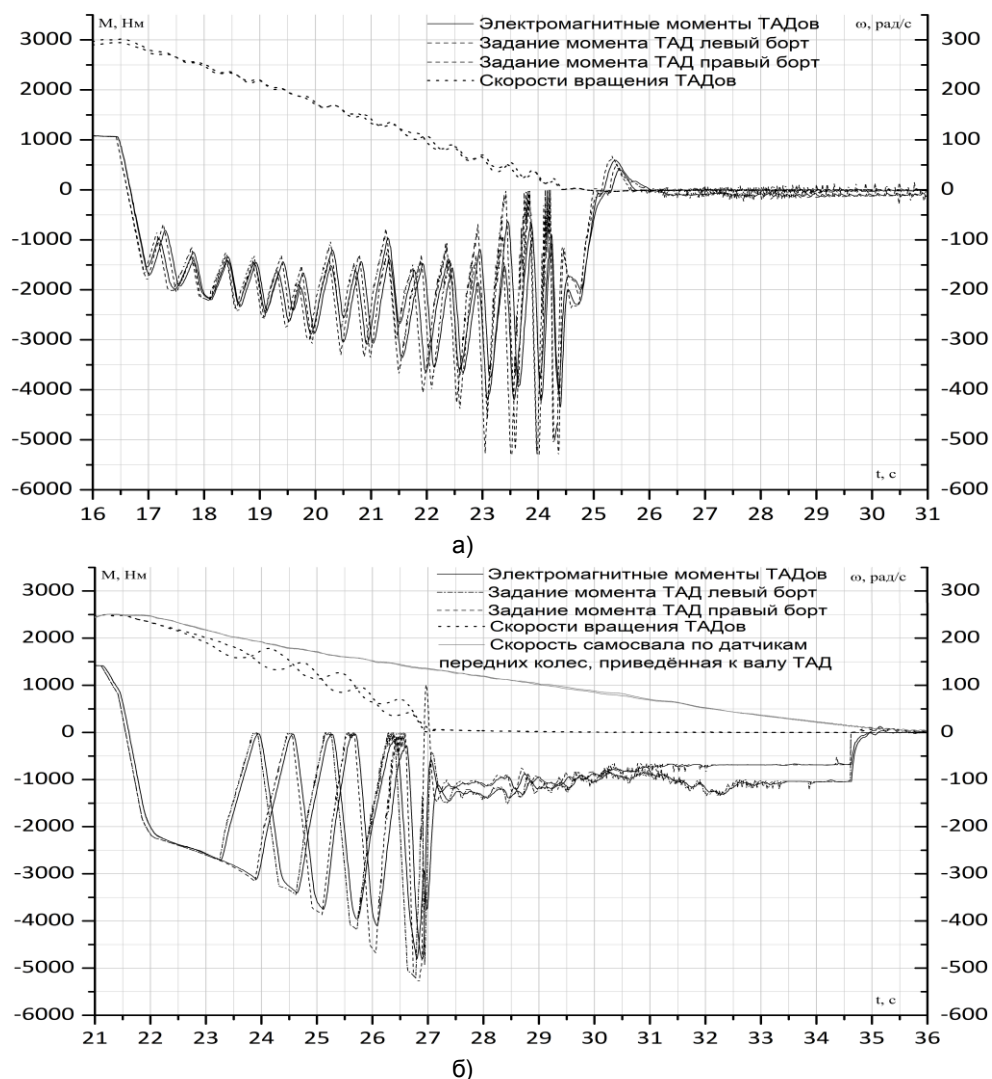


Рис. 1. Работа ABS при торможении (педаль в пол) порожнего самосвала грузоподъемностью 90 тонн: а – на сухой технологической дороге в летнее время года; б – на обледенелой дороге в зимнее время года

- различие в условиях сцепления ведущих колес левого и правого борта самосвала с дорогой приводит к рассогласованию их скоростей (колесо с меньшим коэффициентом сцепления быстрее тормозит или разгоняется). В данном случае необходимо определить максимально возможное рассогласование скоростей исходя из предельного радиуса поворота самосвала и снимать тяговый момент с колеса, скорость которого больше, или тормозной момент – с колеса, скорость которого меньше. Эту задачу выполняет подсистема блокировки колесного дифференциала, которая формирует сигналы включения режима ABS.

Штатная система ABS работает по ускорению колеса, фильтрованному для исключения ложных срабатываний при движении по неровной поверхности карьерной дороги. Это приводит к запаздываниям включения режима ABS на скользкой дороге и влияет на качество работы системы. Повысить качество возможно, если получать информацию о скорости движения самосвала.

Результаты разработки. Следующим этапом на пути развития ABS является разработка новой системы, обеспечивающей скольжение в допустимом диапазоне при любых дорожных условиях. Для этого в систему управления приходит информация с датчиков скорости вращения передних (ведомых) колес, по которым определяется линейная скорость самосвала.

Основная задача адаптивной системы ABS заключается в поддержании оптимального скольжения ведущих колес при изменении коэффициента сцепления колесной резины с поверхностью дороги. Структурная схема адаптивной системы показана на рис. 2.

Адаптивная система ABS уменьшает модуль задания момента M_1 , формируемого системой управления КВУ на основе режима движения (тягового или тормозного) без учета проскальзывания колес, на величину ΔM , значение которой определяется отклонением реальной скорости ω_2 (ведущего колеса) от рассчитанной по условию отсутствия проскальзывания ω_1 .

Условием перехода в режим ABS является превышение проскальзывания $|\omega_2 - \omega_1|$ заданного порога включения $\Delta\omega_0$, условием выхода из режима ABS – снижение проскальзывания до уровня порога выключения.

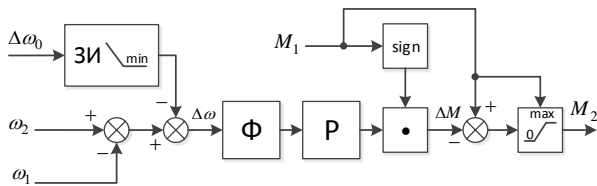


Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы ABS: ЗИ – задатчик интенсивности, уменьшающий входное значение до заданного минимального уровня; Φ – линейный фильтр первого порядка; P – регулятор скольжения колеса

Таким образом, если $\omega_1 = \omega_2$, колесо не проскальзывает и $M_2 = M_1$, если $|\omega_2 - \omega_1|$ превышает $\Delta\omega_0$, включается режим ABS и $M_2 = M_1 - \Delta M$ при $M_1 > 0$ или $M_2 = M_1 + \Delta M$ при $M_1 < 0$. Значение ΔM определяет регулятор P , на вход которого поступает фильтрованное отклонение скорости $\Delta\omega$.

Расчетная скорость ω_1 ведущего колеса определяется по скорости ведомого исходя из геометрических размеров самосвала и траектории движения. Скорости передних и задних колес одного борта (без учета проскальзывания) отличаются в большей степени на поворотах, как показано на рис. 3 на примере движения самосвала БЕЛАЗ 75584 по кругу с радиусом 10 м. Скорости ведомых колес отмечены цифрами 1 и 3, расчетные скорости ведущих колес (ω_1) – цифрами 2 и 4 для левого и правого борта соответственно.

Испытание адаптивной системы ABS проводилось на порожнем самосвале в зимнее время года в условиях движения по обледенелой, покрытой снегом дороге при температуре окружающего воздуха от -8 до -3°C . Самосвал двигался по прямой, поднимался на уклон 8 % и спускался с уклона 11 % в режимах предельной

тяги и экстренного торможения (педаль в пол). В этих режимах выполнялось сравнение работы штатной и адаптивной систем ABS.

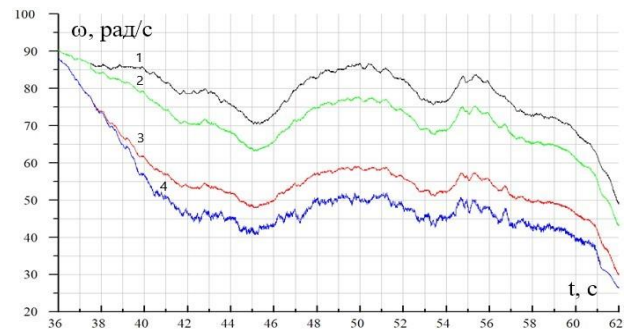


Рис. 3. Скорости ведомых (графики 1, 3) и расчетные (без проскальзывания) скорости ведущих (графики 2, 4) колес при движении самосвала по кругу

Режим резкого торможения самосвала со скорости 40 км/ч с адаптивной ABS на прямом участке дороги показан на рис. 4, где использованы те же обозначения графиков скорости и крутящего момента, что и на рис. 1. В результате испытаний, проведенных на полигоне БЕЛАЗ, установлено:

- размах пульсаций электромагнитного момента и угловой скорости ТАД значительно меньше, по сравнению со штатным вариантом ABS, что повышает ресурс работы и эксплуатационные качества ЭМТ;
- скольжение ведущих колес поддерживается в заданном диапазоне за счет регулирования момента ТАД, обеспечивая управляемость в процессе разгона и торможения самосвала;
- время торможения (со скорости 40 км/ч до нуля) для сравниваемых вариантов системы ABS незначительно (на 2–3 с) различается в пользу штатной системы, но при этом колеса быстро блокируются, теряется управляемость и самосвал уходит в боковой занос.

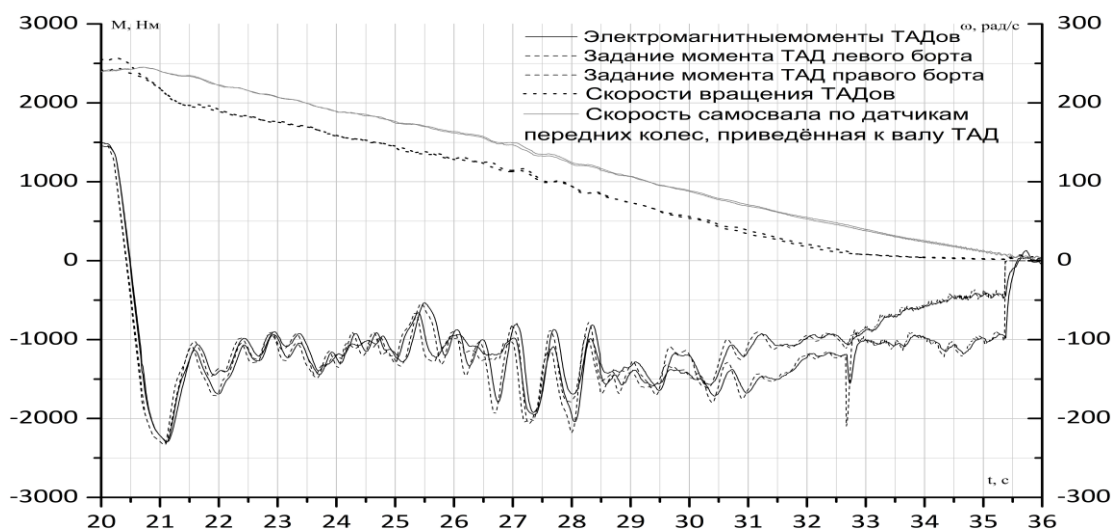


Рис. 4. Работа адаптивной ABS при торможении (педаль в пол) порожнего самосвала грузоподъемностью 90 тонн на обледенелой дороге

Выводы. Разработанная система адаптивной ABS с датчиками скорости передних колес карьерного самосвала показала эффективность торможения на скользкой дороге с точки зрения сохранения управляемости (отсутствие заносов и блокировок колес) при резком и полном нажатии на педаль динамического тормоза на прямом участке и на спуске с уклона. Адаптивная система сохраняет работоспособность при выходе из строя одного из датчиков передних колес и, по сравнению со штатной системой, работает одинаково эффективно в различных условиях движения, обеспечивая скольжение ведущих колес в заданном диапазоне за счет управления крутящим моментом тяговых двигателей.

Рассмотренные алгоритмы управления прошли апробацию на самосвале БЕЛАЗ 75584 грузоподъемностью 90 тонн. Планируется их внедрение на другие типоразмеры выпускаемых в настоящее время карьерных самосвалов. Штатный алгоритм ABS оставлен в качестве резервного на случай отсутствия информации с датчиков скорости обоих передних колес.

Список литературы

1. **Казубенко А.Ф.** Самосвалы БЕЛАЗ с электромеханической передачей // Уголь. – 2019. – № 5(1118). – С. 50–51.
2. **Петров А.П., Хоменко С.Е.** Антиблокировочная и противобуксовочная системы тормозов: учеб. пособие. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2003. – 103 с.
3. **Эксплуатация** антиблокировочных систем грузовых автомобилей: учеб. пособие для вузов / В.Е. Ютт, А.М. Резник, В.В. Морозов, А.И. Попов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2010. – 88 с.
4. **Особенности** тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 90 тонн / А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, А.А. Коротков, В.Л. Чистосердов // Труды X Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2018): материалы докл. конф. – Новочеркасск: Изд-во ООО «Лик», 2018. – С. 194–197.
5. **Казубенко А.Ф.** Применение электромеханической трансмиссии на карьерных самосвалах БЕЛАЗ // Горная промышленность. – 2018. – № 6(142). – С. 21.
6. **Егоров А.Н., Бигель Н.В.** Карьерные самосвалы с электромеханической трансмиссией переменного тока // Горный журнал. – 2013. – № 1. – С. 50–51.
7. **Разработка** и исследование алгоритмов антипротискольжения карьерного самосвала / А.Б. Виноградов, А.А. Коротков, В.Л. Чистосердов, М.А. Сибирцев // Труды IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу

(АЭП-2016), г. Пермь, 3–7 октября 2016 г. – Пермь, 2016. – С. 548–551.

8. **Модернизация** электротрансмиссии карьерных самосвалов по результатам длительной эксплуатации / А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, А.А. Коротков, В.Л. Чистосердов // Горный журнал. – 2022. – № 4. – С. 106–112.

References

1. Kazubenko, A.F. Samosvaly BELAZ s elektromekhanicheskoy peredachey [BELAZ dump trucks with electromechanical transmission]. *Ugol'*, 2019, issue 5(1118), pp. 50–51.
2. Petrov, A.P., Khomenko, S.E. *Antiblokirovonnaya i protivobuksovochnaya sistemy tormozov* [Anti-lock and anti-slip brake systems]. Kurgan: Izdatel'stvo Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta, 2003. 103 p.
3. Yutt, V.E., Reznik, A.M., Morozov, V.V., Popov, A.I. *Ekspluatatsiya antiblokirovochnykh sistem gruzovykh avtomobiley* [Trucks anti-lock braking systems operation]. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom, 2010. 88 p.
4. Vinogradov, A.B., Gnezdov, N.E., Korotkov, A.A., Chistoserdov, V.L. Osobennosti tyagovogo elektrooborudovaniya kar'ernogo samosvala gruzopod'emnost'yu 90 tonn [Traction electrical equipment features of a mining dump truck with a carrying capacity of 90 tons]. *Trudy X Mezhdunarodnoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2018)* [Proceedings of the X International Conference on Automated Electric Drive (AEP-2018)]. Novocherkassk: Izdatel'stvo ООО «Лик», 2018, pp. 194–197.
5. Kazubenko, A.F. Primenenie elektromekhanicheskoy transmissii na kar'ernykh samosvalakh BELAZ [Electromechanical transmission application on BELAZ dump trucks]. *Gornaya promyshlennost'*, 2018, no. 6(142), p. 21.
6. Egorov, A.N., Bigel', N.V. Kar'ernye samosvaly s elektromekhanicheskoy transmissiyei peremennoperemennogo toka [Dump trucks with AC electromechanical transmission]. *Gornyy zhurnal*, 2013, no. 1, pp. 50–51.
7. Vinogradov, A.B., Korotkov, A.A., Chistoserdov, V.L., Sibirtsev, M.A. Razrabotka i issledovanie algoritmov antiproskal'zyvaniya kar'ernogo samosvala [Mining dump truck anti-slip algorithms development and research]. *Trudy IX Mezhdunarodnoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2016), g. Perm', 3–7 oktyabrya 2016 g.* [Proceedings of the IX International Conference on Automated Electric Drive (AEP-2016), Perm, October 3–7, 2016]. Perm', 2016, pp. 548–551.
8. Vinogradov, A.B., Gnezdov, N.E., Korotkov, A.A., Chistoserdov, V.L. Modernizatsiya elektrotransmissii kar'ernykh samosvalov po rezul'tatam dlitel'noy ekspluatatsii [Electromechanical transmission modernization for dump trucks based on long-term operation data]. *Gornyy zhurnal*, 2022, no. 4, pp. 106–112.