

# Электрифицированный автотранспорт для подземных и открытых горных работ

Марк Леонтьевич ХАЗИН\*

Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

**Цель работы** – повышение энергосбережения горного предприятия за счет использования электроэнергии и уменьшения расходов на дизельное топливо.

**Методология проведения работы.** Анализ возможных направлений осуществления энергосбережения горного предприятия.

**Результаты работы.** Горнодобывающая промышленность является одним из основных потребителей энергии, и горнодобывающие компании все больше внимания уделяют мероприятиям по энергосбережению и экономически эффективным способам генерации энергии. Одной из самых больших статей расхода при горных работах является энергия, необходимая для добычи и переработки минеральных руд. При разработке месторождений полезных ископаемых основным видом технологического транспорта является автотранспорт с дизельными двигателями. Для перевозки горной массы мировая горнодобывающая промышленность ежегодно расходует миллиарды литров дизельного топлива. Наряду со многими достоинствами дизельные двигатели имеют и определенные недостатки. Одним из перспективных направлений энергосбережения горного предприятия является использование электроэнергии. Это приводит к экономии дизельного топлива и уменьшению объема выбросов отработанных газов. Рассмотрены пять основных способов подачи электроэнергии на двигатель: дополнительный силовой кабель, воздушная контактная сеть, встроенный аккумулятор, топливные элементы, электрогенератор, а также транспортные средства с комбинированной силовой установкой.

**Выводы.** Повышение эффективности работы горного предприятия может достигаться за счет значительной экономии топлива, повышения производительности процесса транспортирования горной массы, сокращения автопарка, уменьшения расходов на эксплуатацию и техническое обслуживание. Электропривод позволяет увеличить межремонтные интервалы двигателя, снизить затраты на потребляемую энергию за счет регенерации и возвращения ее в сеть, а также уменьшить или исключить выбросы отработанных газов.

**Ключевые слова:** энергосбережение, электропривод, подземные горные работы, открытые горные работы, самосвал с комбинированной силовой установкой, экология.

## Введение

В настоящее время при обеспечении устойчивого функционирования промышленных предприятий все большее внимание уделяется энергетическому фактору. Эффективное использование энергетического потенциала является необходимой основой для модернизации промышленной сферы и всей экономики. Горнодобывающая промышленность является одним из основных потребителей энергии, и горнодобывающие компании все больше внимания уделяют мероприятиям по энергосбережению и экономически эффективным способам генерации энергии. Одной из самых больших статей расхода при горных работах является энергия, необходимая для добычи и переработки минеральных руд. Этот спрос на энергию обычно удовлетворяется за счет дизельного топлива или электроэнергии.

Для перевозки горной массы мировая горнодобывающая промышленность ежегодно расходует миллиарды литров дизельного топлива. Типичный самосвал потребляет от 50 000 до 100 000 л дизельного топлива в год в зависимости от условий его применения и может выделять от 131 до 262 т CO<sub>2</sub> в отработанных газах. Например, согласно официальной статистике за 2012 г., только в Мурманской области горнорудные компании ООО «Апатит», Ковдорский ГОК, Оленегорский ГОК и Кольская горно-металлургическая компания потребили 139 тыс. т дизельного топлива. Компания АК «АЛРОСА» ежегодно на бензин и дизельное топливо расходует 2 млрд руб., основная доля которых приходится на дизельное топливо для карьерных самосвалов.

Наряду с многими достоинствами дизельные двигатели имеют и определенные недостатки. Основными технико-экономическими и экологическими недостатками дизельных двигателей являются: невысокая энергетическая эффективность; значительный расход энергии на выработку теряющегося в пространстве тепла; относительно низкая скорость движения на подъеме; существенный объем технического обслуживания; высокий уровень шума и вибрации; большой объем выбросов отработанных газов, загазованность атмосферы и возможность образования тумана.

Особенностью современного периода является увеличение глубины разработки месторождений полезных ископаемых. С ростом глубины горных работ ухудшаются условия естественного проветривания рабочего пространства карьеров. На глубине карьеров более 200–250 м загрязнение воздуха вредными веществами на рабочих местах приводит к постепенному превышению предельно допустимых концентраций и не отвечает требованиям ГОСТ 12.1.005–88 «Воздух рабочей зоны» [1].

На многих угольных шахтах и рудниках России объем воздуха, подаваемого в горные выработки, недостаточен для разбавления выхлопных газов дизелей до предельно допустимых концентраций [2]. Затраты на нагнетание в карьер чистого воздуха, необходимого для проветривания, часто перекрывают затраты на расход топлива карьерных самосвалов даже при условии, что экскаваторы в забое запитаны от кабеля – сети переменного или постоянного тока [3–5].

**Цель работы** – повышение энергосбережения горного предприятия за счет использования электроэнергии и уменьшения расходов на дизельное топливо.

**Методология проведения работы.** Анализ возможных направлений осуществления энергосбережения горного предприятия за счет уменьшения потребления дизельного топлива.

**Результаты работы.** Одним из перспективных направлений уменьшения расхода топлива, объема отработанных газов и повышения производительности горного предприятия является использование электроэнергии. На данный мо-

\* ✉ [khasin@ursmu.ru](mailto:khasin@ursmu.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-6081-4474>



**Рисунок 1. Грузовик с кабельным приводом EST-1030 [6].**  
**Figure 1. The truck with cable gear system EST-1030 [6].**

мент технология электрического привода является самым быстрым и эффективным способом существенного снижения энергопотребления. Интерес к электроприводу связан, в первую очередь, с возможностью уменьшения потребления дизельного топлива карьерными самосвалами и использования большей мощности на двигателе. Эти особенности делают электроприводы привлекательной альтернативой дизельным двигателям, но их фактические преимущества и недостатки в значительной степени зависят от того, как электроэнергия подается на двигатель самосвала. Имеется пять основных способов подачи электроэнергии на двигатель:

- дополнительный силовой кабель;
- воздушная контактная сеть;
- бортовой аккумулятор;
- топливные элементы;
- дизель-генератор.

#### **Дополнительный силовой кабель**

Электрическая энергия может непрерывно подаваться на транспортные средства через задний кабель без необходимости заправки или подзарядки батарей [6, 7], что позволяет уменьшить массу порожнего транспортного средства (рис. 1).

В промышленности используются электрогрузовики-погрузчики грузоподъемностью от 2 до 25 т. Вследствие высокой эффективности электроприводов они оснащены двигателями меньшей мощности, чем их дизельные аналоги. Поэтому у электропогрузчиков имеется более благоприятное соотношение между емкостью кузова и установленной мощностью машины. Например, для 10- и 14-тонных электропогрузчиков Sandvik это соотношение примерно вдвое больше, чем для дизельных машин [6]. В то же время почасовая стоимость работы для дизельных и электрических погрузчиков с одинаковой емкостью ковша аналогична, тогда как операционные расходы могут быть на 10–30 % ниже в зависимости от соотношения цен на дизельное топливо и электроэнергию. Стоимость энергии составляет около 15 % общей стоимости почасовых работ для дизельных погрузчиков и только около 5 % для электропогрузчиков.

Однако эти преимущества имеют определенную цену. Из-за ограниченного размера кабельной катушки, расположенной на электрогрузовике-погрузчике (независимо от того, размещена ли она горизонтально или вертикально), рабочий диапазон транспортного средства ограничен расстоянием менее чем двойная общая длина кабеля, который может храниться на катушке. На практике это означает, что даже при наиболее выгодном соотношении диаметров кабеля и катушки рабочий радиус для больших самосвалов не превышает 700 м (для малых грузовиков это расстояние еще меньше). Поэтому это техническое решение целесообразно использовать для самосвалов небольшой грузоподъемности. Другим недостатком является подверженность кабеля частым повреждениям (во время движения или при зацеплении за острые углы), а во избежание переплетения задних кабелей может работать только один такой погрузчик в определенной области. Кроме того, стоимость кабеля достаточно велика и составляет примерно 60 евро/м.

Применение транспортных средств с кабельным приводом требует специальной инфраструктуры, включая электрические подстанции, коробки трансформаторов, розетки и т. д. Когда необходимо перемещать операции по погрузке и транспортировке в другую зону шахты, рудника или карьера и невозможно подключить погрузчик полностью, должны быть использованы буксируемые дизель-генераторы. Тем не менее транспортные средства с кабельным приводом хорошо зарекомендовали себя в областях, где путь движения относительно короткий и достаточно хорошо определен, что позволяет использовать кабельный привод. Эксплуатация электрических 25-тонных погрузчиков на железном руднике Kiruna в Северной Швеции в течение более 25 лет подтверждает, что в благоприятных условиях эти машины превосходят свои дизельные аналоги.

#### **Воздушная контактная сеть**

Самосвалы с электроприводом, оснащенные токоприемниками (троллейбусы), могут получать энергию от воздушной контактной сети. Использование питания от воздушной контактной сети позволяет уменьшить массу самосвала на 10–15 % за счет исключения дизельного двигателя, топливного и масляного баков, масляного и водяного радиаторов, систем отвода отработавших газов и ряда других при сохранении той же грузоподъемности.



Рисунок 2. Электроаккумуляторные карьерные самосвалы BYD V60 – а и Komatsu HD 605-7 – б.  
Figure 2. BYD V60 mining trucks with electric accumulators – a; Komatsu HD 605-7 – б.

Применение троллейзосов позволяет не только исключить затраты на закупку, хранение и транспортировку дизельного топлива, но и повысить скорость движения самосвала и уменьшить расходы на вентиляцию выработок. Обычно скорость самосвала на уклоне ограничена мощностью дизельного двигателя. Возможность использования большей мощности позволяет самосвалу с электроприводом двигаться с большей скоростью и преодолевать более крутые уклоны, что обеспечивает сокращение времени транспортного цикла, а способность этих машин перемещаться по выработкам с уклоном  $12^\circ$  со скоростью до 24 км/ч существенно расширяет область использования электротранспорта [8]. Например, если время рабочего цикла уменьшается на 20 % в результате увеличения скорости на подъемах, то парк из 32 самосвалов-троллейзосов способен обеспечить те же результаты, что и 40 самосвалов, работающих на дизельном топливе [1, 9, 10]. В марте 2013 г. на крупнейшей медной шахте в Африке Kansanshi (Кансанши) дизельный автопарк был полностью заменен на троллейзосы Hitachi EH3500АСП.

Слабым местом этой технологии является ее ограниченная мобильность, операционная гибкость и высокие капитальные затраты. Для обеспечения работы требуется проложить троллейную трассу, к тому же ввиду «роста» карьера по мере выработки полезного ископаемого трассу необходимо будет время от времени перемещать и дополнять новыми участками. Трасса должна быть обеспечена необходимым количеством тяговых подстанций и основным источником питания сети, а также быть удалена от места производства взрывов на 300–600 м. Троллейзосам также требуется несколько более широкое пространство для маневра, чем эквивалентным дизельным машинам. Кроме того, высоковольтные провода во время загрузки и разгрузки троллейзоса находятся достаточно близко, и создается опасность их повреждения. Стоимость инфраструктуры составляет около 75 % от цены троллейзоса.

Питание автотранспортных средств от воздушной контактной сети представляет собой привлекательную альтернативу для подземных и карьерных самосвалов, особенно при работе на длинных пандусах. Наилучшие результаты могут быть достигнуты в случае перемещения горной массы на расстояния, превышающие 1500 м, особенно когда дорога для перевозки должна использоваться в течение нескольких лет и объем транспортируемой горной массы составляет более 500 000 т в год. Основываясь на производственном опыте, можно сказать, что троллейзосы могут быть интересной альтернативой для существующих шахт и карьеров. Согласно проведенным расчетам [9, 11], срок окупаемости системы с учетом повышения производительности карьерных самосвалов в троллейном режиме может составить 1–2 года. Кроме того, отсутствует дизельный выхлоп и, следовательно, загазованность и образование тумана в карьере или выработке.

#### Бортовой аккумулятор

Основные преимущества транспортных средств, работающих на аккумуляторах, – это их универсальность, энергоэффективность, хорошее тяговое усилие (включая высокий крутящий момент при низких скоростях), отсутствие вредных выбросов, снижение потребности в вентиляции, снижение эксплуатационных расходов, хорошая перегрузочная способность, меньшая потребность в техническом обслуживании и более высокая производительность. К сожалению, их мобильность ограничена малой емкостью аккумуляторов: у свинцовых аккумуляторов примерно 144 кДж/кг, а у более эффективного аккумулятора на основе фосфата лития железа ( $\text{LiFePO}_4$ ) или LFP – 396 кДж/кг. Более эффективные литий-ионные батареи имеют до 900 кДж/кг [6], но они пока не применяются для транспортных средств.

Параметры ряда аккумуляторов могут обеспечить необходимый запас энергии для выполнения вспомогательных операций транспортного цикла самосвала. Например, при питании от электролитической никель-кадмиевой аккумуляторной батареи (АКБ) энергоемкостью 250 МДж самосвал БелАЗ-7530 грузоподъемностью 220 т способен проехать 3,6 км [12].

Аккумуляторные грузовики-погрузчики выпускаются канадской компанией RDH Mining Equipment. Грузовик-погрузчик Muckmaster 300EB с емкостью ковша  $2 \text{ м}^3$  и 20-тонный грузовик Haulmaster 800-20EB питаются от LFP батареи. С 2013 г. четыре Muckmaster 300EB и один Haulmaster 800-20EB работают на золотом руднике Macassa (Макасса) – озеро Киркленд, Онтарио, Канада [6]. Главное преимущество погрузчиков и грузовиков с аккумуляторной батареей – это их экологическая чистота (нет выделения отработанных газов) и мобильность (не связаны с какой-либо постоянной инфраструктурой).

К недостаткам аккумуляторов можно отнести непродолжительный срок эксплуатации и небольшой запас хода в сравнении с ДВС. Согласно информации компании RDH Mining Equipment, LFP батареи позволяют грузовикам-погрузчикам и грузовикам работать в среднем в течение 4 ч. Это меньше, чем продолжительность рабочей смены, которая обычно составляет от 8 до 12 ч. Другими недостатками являются высокий вес аккумуляторов и их стоимость (хранение



**Рисунок 3. Электроаккумуляторный 40-тонный самосвал компании Artisan Vehicles.  
Figure 3. 40-ton mining truck with electric accumulators by Artisan Vehicles.**

1 Вт · ч стоит примерно 1 евро) [7]. Однако следует учитывать возможность переработки аккумуляторов после окончания срока эксплуатации.

Несмотря на это, имеется значительный интерес к применению этой технологии к подземным транспортным средствам шахт. В тех случаях, когда спрос на вентиляцию и обогрев является серьезной проблемой, выбор этих транспортных средств может быть оправданным. Кроме того, при постоянном прогрессе в технологии изготовления батарей следует ожидать увеличения их энергоемкости, что значительно повысит их привлекательность для применения в горной промышленности.

Китайский концерн BYD Co. разработал трехосный карьерный самосвал полной массой 60 т и габаритной шириной 3,2 м. Самосвал BYD V60 с колесной формулой 6 × 4 рассчитан для работы в угольных разрезах, а также плохо продуваемых карьерах (рис. 2, а). Грузоподъемность машины составляет только 30 т из-за огромной снаряженной массы в 30 т. Только на АКБ и тяговые электродвигатели уже приходится 10 т. Полезный объем кузова составляет 30 м<sup>3</sup>.

Следующим и более лучшим вариантом является самосвал Komatsu HD 605-7 (рис. 2, б) весом 45 т и грузоподъемностью 65 т, электромоторы которого питаются от аккумуляторных никель-марганец-кобальтовых батарей общей емкостью 700 кВт · ч и весом 4,5 т. Батареи поставляются китайской фирмой Shenzhen Westart. Электродвигатели Komatsu 605 HD обеспечивают крутящий момент 1000 Н · м. Самосвал оборудован системой рекуперативного торможения, которая за короткую поездку способна подзарядить батарею на 40 кВт · ч. В процессе эксплуатации 110-тонный самосвал будет не только потреблять электроэнергию, но и отдавать в сеть до 200 кВт лишней энергии при необходимости в течение ночи. Эти электросамосвалы уже работают на цементном карьере возле горы Шассераль в Швейцарии с конца 2017 г.

Калифорнийская фирма Artisan Vehicles представила новый электрический грузовик Z40 грузоподъемностью 40 т, предназначенный для подземных работ (рис. 3). Он оснащен четырьмя электродвигателями и системой обмена аккумуляторными батареями для облегчения смены батарейного блока.

По данным компании Artisan Vehicles, мощность Z40 благодаря электрической трансмиссии почти в два раза больше мощности аналогичного дизельного или бензинового грузовика. Новинка выделяет только 1/8 тепла от его дизельного аналога, не производя при этом выбросов CO<sub>2</sub>. Электросамосвалы Z40 используются на руднике Kirkland Lake Gold и вывозят значительно больше руды в каждом грузовике, что позволило уменьшить общее количество транспортных средств.

#### Топливные элементы

В топливных элементах нет движущихся частей, их отличают надежность, долговечность и простота эксплуатации. КПД топливных элементов уже сейчас составляет 50–70 %, что намного больше, чем у ДВС, и является важным преимуществом перед современными двигателями на нефтяном топливе [13, 14]. Одной из наиболее перспективных разработок в данной сфере является водородный двигатель. В отличие от современных нефтяных источников энергии, водород не дает никаких вредных выбросов в атмосферу и является самым экологически чистым. По сравнению со свинцово-кислотными АКБ, которые сегодня используются в большинстве электроприводов, водородные топливные элементы не нуждаются в частой и длительной зарядке батареи – достаточно периодически следить за наличием водорода в системе и проводить ее дозаправку.

Помимо очевидных достоинств, водородные топливные элементы имеют и определенные недостатки. Самый основной из них – высокая стоимость, что связано с использованием дорогих металлов платиновой группы. Второй недостаток – это габариты и вес, превышающие соответствующие параметры современных ДВС из-за большего количества необходимых узлов и агрегатов. Третья проблема – отсутствие водородных заправок. Кроме того, еще окончательно не отработана технология их изготовления.

Однако прогресс не стоит на месте, и появляются решения данных проблем. В скором времени водород сможет заменить бензин, дизельное топливо и газ, а топливные элементы будут использоваться в качестве основного силового агрегата карьерных самосвалов [15].

Компания Nuvera (штат Массачусетс, США) специализируется на производстве и внедрении водородных топливных элементов, которые используются для электрических погрузчиков Yale. Компанией Sandia National Laboratories/

СА разработан подземный транспортный тягач, силовая установка которого представляет собой батарею из топливных элементов на основе протонных обменных мембран в сочетании с обратимым металлгидридным аккумулятором. Тягач прошел промышленные испытания на безопасность в наземных условиях и показал низкие паразитные потери мощности, низкий уровень шума и высокую экологическую чистоту [16].

#### Дизель-генератор

Основным недостатком механических трансмиссий является ступенчатое изменение скорости, а также исчезновение тягового усилия вследствие разрыва силового потока в трансмиссии при переключениях передач. Некоторое устранение этих недостатков обеспечивается установкой на входе коробки передач гидротрансформатора, а внутри ее – фрикционных муфт, обеспечивающих переключение передач под нагрузкой. Однако гидромеханические трансмиссии имеют свои недостатки: они сложнее, дороже, тяжелее и имеют меньший коэффициент полезного действия, чем механические трансмиссии. Применение электромеханической трансмиссии позволяет избежать недостатков механических и гидромеханических трансмиссий. Кроме того, за счет исключения коробки передач с гидротрансформатором и насосом, дифференциала с карданной передачей, многодискового рабочего тормоза с его системой охлаждения снижаются эксплуатационные затраты на техническое обслуживание, ремонт и расходные материалы.

Силовой блок с электромеханической трансмиссией (ЭМТ) состоит из дизельного двигателя, вращающего тяговый генератор переменного тока, двух электромоторов-колес, блока резисторов динамического торможения. Система управления обеспечивает работу и контроль состояния всех компонентов тягового электропривода. Современная система управления обеспечивает возможность воздействия не только на тяговый электропривод, но и на дизельный двигатель, что позволяет формировать тяговые характеристики ЭМТ, оптимально сочетаемые с характеристиками дизельного двигателя. В результате снижается расход топлива при работе самосвала.

В настоящее время из-за своей ненадежности и дороговизны в эксплуатации двигатели постоянного тока практически не используются в промышленности. Использование асинхронных моторов дает возможность снизить удельные объем и массу тяговых электродвигателей, обеспечить более высокую частоту вращения и таким образом увеличить максимальную скорость самосвалов.

Другим достоинством электроприводов переменного-переменного тока является отсутствие щеточно-коллекторного узла в тяговых электродвигателях, что позволяет значительно уменьшить эксплуатационные затраты на их обслуживание. Электрические машины обычно рассчитывают на повышенную максимальную угловую скорость, которая на переменном токе ограничивается в основном механической прочностью ротора и подшипниковых узлов.

Применение тягового электропривода с частотно-регулируемым асинхронным электроприводом по сравнению с гидромеханической трансмиссией 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. Использование тормозных резисторов общей мощностью 2,4 МВт позволяет удерживать постоянную скорость 15 км/ч на 16 %-ном спуске, что способствует увеличению производительности самосвала [17].

Дополнительное преимущество – существенное повышение качества управления самосвалом практически во всех режимах движения, в том числе в сложных метеорологических условиях и на скользкой дороге. В таких условиях электромеханика всегда ведет себя лучше, чем гидромеханика, потому что на подъемах электродвигатели позволяют работать трансмиссии без пробуксовки, а торможение электродинамикой на виражах и спусках происходит без блокировки колес.

За последние 20 лет были достигнуты значительные успехи в технологии производства карьерных самосвалов с электроприводом. В сегменте карьерных самосвалов представлены новинки компаний Caterpillar, Komatsu, Libher, Hitachi и «БелАЗ» грузоподъемностью от 90 до 420 т. Все машины оснащены электромеханической трансмиссией переменного-переменного тока. На БелАЗе-75131 используется электротрансмиссия переменного-постоянного тока собственного производства, но на некоторых других самосвалах стоит продукция General Electric или петербургской ОАО «Электросила». На карьерном самосвале БелАЗ-75601 установлен асинхронный двигатель Siemens. Компания Libher применяет собственные разработки и производит все компоненты комплекта тягового электрооборудования, тогда как Komatsu использует продукцию фирмы General Electric.

Компания Siemens планирует в следующем году выпустить карьерный самосвал с ЭМТ переменного-переменного тока грузоподъемностью 30–40 т. Причем рассматривается возможность применения гибридной силовой установки: ДВС и накопитель энергии.

#### Транспортные средства с комбинированной (гибридной) силовой установкой

С ростом глубины карьеров увеличиваются средневзвешенный уклон автодорог и расстояние транспортирования, возрастают нагрузки на энергосиловую установку и трансмиссию самосвала. Вместе с тем увеличивается время движения порожнего самосвала, а значит время «непроизводительной» работы двигателя внутреннего сгорания на частичных нагрузках. На вспомогательных операциях транспортного цикла (40–60 % времени рейса) расход топлива составляет 5–15 % от общего расхода за транспортный цикл.

Работа автосамосвала в карьере имеет циклический характер: погрузка–движение в грузовом направлении – разгрузка–движение в порожнем направлении. Наиболее продолжительные составляющие времени рейса – движение с грузом на подъем, при котором самосвал запасает потенциальную энергию, и движение порожняком при спуске, когда накопленная потенциальная энергия рассеивается в виде тепла в тормозных устройствах самосвала. Если при спуске самосвала в карьер рекуперировать энергию торможения и запасать ее в накопителе энергии, то при маневрировании в карьере, погрузке и во время движения в рабочей зоне тяговые двигатели будут использовать запасенную в накопителе энергию, а ДВС будет выключен. Таким образом, можно экономить топливо, увеличить ресурс дизельного двигателя и снизить объемы выбросов отработанных газов.



Рисунок 4. Подземный дизель-троллейвоз EMT-35.  
Figure 4. Underground diesel-trolley car EMT-35.

Одним из вариантов является применение на транспортном средстве гибридной или комбинированной энергосиловой установки (КЭУ). Транспортные средства с гибридной энергосиловой установкой объединяют традиционный дизельный или бензиновый двигатель с бортовой перезаряжаемой системой хранения энергии для достижения лучшей экономии топлива и не ограничены областью нахождения зарядного устройства [2, 18]. При этом ДВС может быть меньше, легче и эффективнее, чем у обычного автомобиля, потому что он рассчитывается на средние затраты энергии, а не на пиковые значения. При этом ДВС и электродвигатель (ЭД) работают параллельно на общий вал. Высокий крутящий момент дизельного двигателя в сочетании с гибридной технологией может обеспечить значительно больший пробег. Причем в основном работает ЭД с питанием от аккумулятора, а ДВС используется для зарядки аккумулятора и для получения максимальных тягово-скоростных показателей при разгоне, движении на повышенных скоростях и в тяжелых дорожных условиях. Современные гибридные электромобили продлевают заряд своих батарей через рекуперативное торможение.

Транспортные средства с комбинированной энергосиловой установкой оборудованы двумя видами силовых установок, которые работают независимо и последовательно [19].

Карьерные самосвалы с дизельным двигателем и электродвигателем, получающим питание от воздушной контактной сети, или дизель-троллейвозы, успешно эксплуатируются в странах Африки, в Бразилии и США. Например, на золоторудном карьере «Бетце» (США, штат Невада) используется парк из 73 дизель-троллейвозов грузоподъемностью 170 т, которые ежедневно перевозят 410 тыс. т горной массы. Троллейвозы успешно работают на шахтах и карьерах в Конго – карьер Lubembashi, Намибии – бассейн Россинга (Rossing) в пустыне Намиб, на медных рудниках Гега вблизи Лубумбаши в Заире с 1986 г. В конце 1980-х гг. карьерные дизель-троллейвозы начали эксплуатировать в Канаде, Швеции и Австралии [9, 10]. Для транспортировки угля из разреза Grivice в RMU Banovici (Босния и Герцеговина) глубиной более 100 м используются карьерные дизель-троллейвозы Euclid-Hitachi EH4500 AC грузоподъемностью 254 т.

Компания Atlas Copco выпускает две модели подземных дизель-троллейвозов: 35- и 50-тонный грузовики EMT-35 (рис. 4) и EMT-50 соответственно.

Это низкопрофильные шарнирно сочлененные грузовики с мотор-колесами, приводы которых питаются от трехфазных линий переменного тока напряжением 690 В. Для обеспечения достаточной мобильности грузовик оснащен дизель-генераторной установкой, позволяющей ему загружаться, работать и разгружаться, пока он не подключен к линии электропередачи. Поскольку вспомогательный дизельный двигатель относительно небольшой по сравнению с основными электродвигателями (72 кВт против 2 · 200 кВт у EMT-35 и 107 кВт против 2 · 355 кВт у EMT-50), потребности в вентиляции для этих грузовиков намного ниже, чем для обычных автомобилей с дизельным двигателем. Грузовик EMT-50 потребляет менее 17 % объема воздуха, необходимого для работы и эвакуации выхлопных газов и паров, испускаемых аналогичным 50-тонным дизельным грузовиком [6].

Наиболее важным преимуществом этих грузовиков является их высокая перегрузочная способность и очень хорошая проходимость. На уклоне 14° скорость дизель-троллейвоза на подъеме почти вдвое выше по сравнению с аналогичной дизельной машиной.

Канадский Консорциум R&D разработал дизель-электрический погрузчик-грузовик для подземных горных работ [10], получив экономичное решение между минимальным объемом выбросов и расходом дизельного топлива. Погрузчик с объемом ковша 1,2 м<sup>3</sup> на базе модели LT-270 изготовлен канадской компанией МТИ (Садбери, Онтарио). Результаты испытаний, проведенных в 2010 г. [16], показали, что объем выбросов в зависимости от режима работы снизился на 12–64 %, а расход топлива уменьшился на 10 %.

Гибридные и комбинированные энергосиловые установки являются одним из возможных средств ускорения внедрения ресурсо- и энергосберегающих технологий и повышения экологической безопасности в горной промышленности.

#### Заключение

Повышение эффективности работы горного предприятия может достигаться за счет значительной экономии топлива, повышения производительности процесса транспортирования горной массы, сокращения автопарка, уменьшения расходов на эксплуатацию и техническое обслуживание. Электропривод позволяет увеличить межремонтные интервалы двигателя и снизить затраты на потребляемую энергию за счет регенерации и возвращения ее в сеть.

При оценке эффективности применения электротранспорта решающую роль играет соотношение цен на дизельное топливо и электроэнергию. Существенное значение имеет сам факт экономии топлива, который по расчетам составляет 0,9–1,1 кг на 1 м<sup>3</sup> транспортируемой горной массы, т. е. в среднем 1 тыс. т топлива на 1 млн м<sup>3</sup> перевозок. Благоприятным следствием этого является соответствующее сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу.

Радикальным вариантом может быть применение контактно-аккумуляторных самосвалов, движение которых в глубинной части карьеров и в забоях будет осуществляться с помощью аккумуляторных батарей, а при выезде из карьера – с помощью контактной сети. Аккумуляторы по сравнению с ДВС незначительно увеличивают массу самосвала.

Каждая технология подачи питания на электропривод предполагает снижение выбросов выхлопных газов и более широкое использование возобновляемой энергии. Согласование конкретных электрических и горнодобывающих технологий поможет преодолеть имеющиеся барьеры, такие как дальность транспортирования, наличие соответствующей инфраструктуры и времени подзарядки. Использование комбинированных энергосиловых установок позволяет уменьшить расход электрической энергии, дизельного топлива и трудовых затрат, повысить экологическую безопасность автотранспортных средств при подземной и открытой добыче полезных ископаемых.

В настоящее время рынок электрогрузовиков еще находится на ранних стадиях, но исследования в области технологий, необходимых для обеспечения электрической энергии различных видов электрогрузовиков, продолжаются. Важно понимать, что одна модель электрогрузовиков не может универсально подходить во всех случаях из-за широкого спектра горнотехнологических условий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шешко О. Е. Эколого-экономическое обоснование возможности снижения нагрузки на природную среду от карьерного транспорта // ГИАБ. 2017. № 2. С. 241–252.
2. Степаненко В. П. Применение в горной промышленности КЭСУ с возобновляемыми источниками и накопителями энергии // ГИАБ. 2016. № 9. С. 138–146.
3. Козырев С. А., Амосов П. В. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 231–237.
4. Koptev V. Y., Kopteva A. V. Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87, № 2. 022010.
5. Jacobs W., Hodkiewicz M. R., Bräunl T. A Cost-Benefit Analysis of Electric Loaders to Reduce Diesel Emissions in Underground Hard Rock Mines // IEEE Transactions on industry applications. 2015. Vol. 51, № 3. P. 2565–2573.
6. Paraszczak J., Svedlund E., Laflamme M. Electrification of loaders and trucks – a step towards more sustainable underground mining: ICREPQ'14 // Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ). 2014. Vol. 1, № 12. P. 81–86. <https://doi.org/10.24084/repqj12.240>
7. Barthel J., Jung K., Seewig J. High-voltage DC trailing cable systems for mobile machinery // IECON 2015: 41<sup>st</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2015. P. 001145–001151. <https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392254>
8. Славиковский О. В., Митрошин Г. Н. Подземный транспорт при комбинированной геотехнологии // ГИАБ. 2011. № 5. С. 88–93.
9. Mazumdar J. All electric operation of ultraclass mining haul trucks // Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society). 2013. P. 1–5. <http://dx.doi.org/10.1109/IAS.2013.6682568>
10. Varaschin J., De Souza E. Economics of diesel fleet replacement by electric mining equipment // 15<sup>th</sup> North American Mine Ventilation Symposium. Blacksburg, Virginia, June 21–25, 2015.
11. Степук О. Г., Зуёнок А. С. Дизель-троллейвозный транспорт БелАЗ: перспективы использования в горном производстве // Горный журнал. 2013. № 1. С. 52–55.
12. Хазин М. Л., Тарасов П. И., Тарасов А. П. Расчет накопителей энергии для карьерных контактно-аккумуляторных троллейвозов // Актуальные вопросы машиноведения. 2015. Т. 4. С. 91–93.
13. Kukkonen S. Energy consumption analysis of battery electric vehicles in underground environments // Underground Mining Technology. 2017. P. 569–580.
14. Demers M., Labelle D., Wilson R., Matikainen O. Hybrid Underground Loader-2010 // Project Update // MDEC Conference, October 5–8, Toronto, Ont., Canada, 2010.
15. Марков В. А., Сивачев В. М., Сивачев С. М. и др. Топливные элементы для транспорта // Грузовик. 2016. № 3. С. 13–19.
16. Miller A. R., Berg G., Barnes D. L., Eisele R. I., Tanner D. M., Vallely J. M., Lassiter D. A. Fuel cell technology in underground mining // 5th SAIMM International Platinum Conference. Sun City, South Africa, 17–21 September 2012. P. 533–545.
17. Трухнов Л. И., Насковец А. М. Самосвалы серии БелАЗ-7558 грузоподъемностью 90 т с электромеханической трансмиссией переменного тока // Горная промышленность. 2016. № 2 (126). С. 14–17.
18. Zhang R., Meng K. Driving Force Coordinated Control of Separated Axle Hybrid Electric Dump Truck // SAE Technical Paper. 2017. <https://doi.org/10.4271/2017-01-2462>.
19. Тарасов П. И., Журавлев А. Г., Исаков М. В. Вопросы создания и перспективы применения карьерных автосамосвалов с комбинированной энергосиловой установкой // Горная промышленность. 2008. № 3. С. 68–75.

Статья поступила в редакцию 6 октября 2018 г.

# Electric trucks for underground and open pit mining

Mark Leont'evich Khazin<sup>1\*</sup>

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

**Purpose of the work** is to increase the energy saving of a mining enterprise by using electricity and reducing the cost of diesel fuel.

**Methodology of the work.** Analysis of possible ways for energy saving of a mining enterprise.

**Results of the work.** The extraction industry is one of the main consumers of energy, therefore, mining companies put a greater emphasis on energy saving measures and cost-effective ways of energy generation. One of the largest expenditure item when mining is the energy required for extraction and processing of mineral ores. While the development of mineral deposits, the main type of technological transport is a motor vehicle with diesel engines. The global extraction industry spends billions of liters of diesel fuel annually to transport rock mass. Along with many advantages, diesel engines have some disadvantages as well. One of the promising areas of energy saving of a mining enterprise is the use of electricity. This leads to savings in diesel fuel and reduced exhaust emissions. Five main ways of power supply to an engine are considered: additional power cable, air contact network, built-in battery, fuel cells, electric generator, and trucks with a combined power plant.

**Conclusions.** Improving the efficiency of the mining enterprise can be achieved through significant fuel savings, higher productivity of the transportation process of rock mass, reduction of vehicle fleet, reduction of operating and maintenance costs. An electric motor drive allows you to increase time between engine repairs, reduce the cost of energy consumed by regeneration and return it to the network, as well as reduce or eliminate emissions of exhaust gases.

**Keywords:** energy saving, electric motor drive, underground mining, open pit mining, dump truck with a combined power plant, ecology.

## REFERENCES

1. Sheshko O. E. 2017, Ecological and economic substantiation of the possibility of waste load reduction from open-cast transport. *Gornyye Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 2, pp. 241–252. (In Russ.)
2. Stepanenko V. P. 2016, Application of combined power plants in the extraction industry with renewable sources and energy storage. *Gornyye Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 9, pp. 138–146. (In Russ.)
3. Kozыrev S. A., Amosov P. V. 2014, Ways to normalize the atmosphere of deep open pit. *Vestnik MGTU* [Scientific journal of Murmansk State Technical University], vol. 17, no. 2, pp. 231–237. (In Russ.)
4. Koptev V. Y., Kopteva A. V. 2017, Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 87, no. 2, 022010.
5. Jacobs W., Hodkiewicz M. R., Bräunli T. 2015, A Cost-Benefit Analysis of Electric Loaders to Reduce Diesel Emissions in Underground Hard Rock Mines. *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 51, no. 3, pp. 2565–2573.
6. Paraszczak J., Svedlund E., Laflamme M. 2014, Electrification of loaders and trucks – a step towards more sustainable underground mining: *ICREPQ'14. Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, vol. 1, no. 12, pp. 81–86. <https://doi.org/10.24084/repqj12.240>
7. Barthel J., Jung K., Seewig J. 2015, High-voltage DC trailing cable systems for mobile machinery. IECON 2015: 41<sup>st</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 001145–001151. <https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392254>
8. Slavikovskiy O. V., Mitroshin G. N. 2011, Underground transport with combined geotechnology. *Gornyye Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], no. 5, pp. 88–93. (In Russ.)
9. Mazumdar J. 2013, All electric operation of ultraclass mining haul trucks. Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), pp. 1–5. <http://dx.doi.org/10.1109/IAS.2013.6682568>
10. Varaschin J., De Souza E. 2015, Economics of diesel fleet replacement by electric mining equipment. 15<sup>th</sup> North American Mine Ventilation Symposium. Blacksburg, Virginia, June 21–25.
11. Stepuk O. G., Zuyenok A. C. 2013, BelAZ diesel-trolley transport: prospects of use in the extraction industry. *Gornyye Zhurnal* [Mining Journal], no. 1, pp. 52–55. (In Russ.)
12. Khazin M. L., Tarasov P. I., Tarasov A. P. 2015, Calculation of energy storage for open-pit contact-battery battery-trolley loco. *Aktual'nyye voprosy mashinovedeniya* [General issues of mechanics], vol. 4, pp. 91–93. (In Russ.)
13. Kukkonen S. 2017, Energy consumption analysis of battery electric vehicles in underground environments. *Underground Mining Technology*, pp. 569–580.
14. Demers M., Labelle D., Wilson R., Matikainen O. 2010, Hybrid Underground Loader-2010. Project Update. MDEC Conference, October 5–8, Toronto, Ont., Canada.
15. Markov V. A., Sivachev V. M., Sivachev S. M. et al. 2016, Fuel elements for transport. *Gruzovik* [Truck], no. 3, pp. 13–19.
16. Miller A. R., Berg G., Barnes D. L., Eisele R. I., Tanner D. M., Vallely J. M., Lassiter D. A. 2012, Fuel cell technology in underground mining. 5th SA IMM International Platinum Conference. Sun City, South Africa, 17–21 September, pp. 533–545.
17. Trukhnov L. I., A. Naskovets A. M. 2016, Dump trucks of the BelAZ-7558 series with a carrying capacity of 90 tons with an electromechanical transmission of alternate current. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. 2 (126), pp. 14–17. (In Russ.)
18. Zhang R., Meng K. 2017, Driving Force Coordinated Control of Separated Axle Hybrid Electric Dump Truck. SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2017-01-2462>.
19. Tarasov P. I., Zhuravlev A. G., Isakov M. V. 2008, Issues of creation and prospects for the use of mining dump trucks with a combined power plant. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. 3, pp. 68–75. (In Russ.)

The article was received on October 6, 2018

\* ✉ [khasin@ursmu.ru](mailto:khasin@ursmu.ru)

 <https://orcid.org/0000-0002-6081-4474>