

Научная статья

УДК 62-838

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-59-69

Нгуен Тхе Хиен, Васильев Богдан Юрьевич

Санкт-Петербургский Горный университет

E-mail: thehiennnguyen1697@gmail.com

АНАЛИЗ АВТОНОМНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ МАШИН ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА С АВТОНОМНЫМИ СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ**Информация о статье**

Поступила:

17 июня 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 октября 2022 г.

Принята к печати:

04 октября 2022 г.

Ключевые слова:

электродвигатель, горное оборудование, электросамосвал, электрический погрузчик, векторное управление, энергоэффективность, система электродвижения, горнодобывающая промышленность

Аннотация.

В настоящее время с развитием науки и техники электродвигатели нашли широкое применение в различных сферах, в т.ч. в горнодобывающей промышленности благодаря их высокой эффективности и стабильности по сравнению с двигателями внутреннего сгорания (дизельными и газовыми двигателями). В частности, использование электродвигателей не вызывает выбросов и загрязнения окружающей среды, что позволяет улучшить условия работы как на открытых, так на подземных горных объектах. Однако оборудование, питающееся от аккумуляторных батарей, также имеет определенные недостатки, требующие постоянных исследований и разработок для оптимизации работы системы электродвижения. Анализ преимуществ и недостатков существующих систем электродвижения показывает, что система электродвижения с двумя асинхронными двигателями, а также системами векторной модуляции автономных инверторов и системами векторного управления двигателем обеспечивает наиболее высокую эффективность электрооборудования

Для цитирования: Нгуен Т.Х., Васильев Б.Ю. Анализ автономных роботизированных машин горного производства с автономными системами электродвижения // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 5 (163). С. 59-69. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-59-69

Введение

Тенденция развития горного оборудования к более устойчивому экологически будущему ведет к серьезным изменениям в политике устойчивого развития наряду с защитой локальных экосистем и глобального климата. Это требует от крупных горнодобывающих компаний осторожного подхода к разработке и использованию новых технологий, в т.ч. роботизированных комплексов и систем. Современным робототехническим комплексам и системам необходимо непрерывно развиваться, чтобы соответствовать новым требованиям (экологичность, устойчивость) и уровням безопасности с учетом крайне тяжелых условий работы, а также обеспечивать минимизацию выбросов в окружающую среду.

Во Вьетнаме задача уменьшения энергопотребления вентиляционных систем горнодобывающих

объектов имеет особую актуальность из-за большого энергопотребления при расширении фронта горных работ [1-3]. Среднее потребление энергии с системами вентиляции в процессе удаления загрязняющих веществ, таких как пыль, углекислый газ, и снижение температуры в шахте (продукт сгорания топлива в дизельном двигателе) составляет 26% от общего расхода энергии (см. табл. 1). Данные также показывают, что чем больше площадь (глубина) добычи, тем выше энергопотребление системы вентиляции (до 32% от общего объема). Кроме того, в последнее время цены на нефть и топливо быстро изменяются, что приводит к нестабильному снабжению дизельных и газовых источников.

Основными недостатками при использовании дизельных двигателей являются высокий уровень вибрации во время работы, громкий шум и высокие выбросы углекислого газа. По сравнению с дизель-

Таблица 1. Потребление энергии для вентиляции шахт в крупных угольных компаниях Вьетнама
Table 1. Energy consumption for ventilation of mines in large coal companies in Vietnam

Компания	Глубина, м	Общее потребление энергии, МВт.ч	Энергия для вентиляции	
			МВт.ч	Доля, %
Мао Хе	450	33600	10750	32.0
Уонг Би	300	29100	6660	22.9
Нам Мау	300	25000	5800	23.2
Ванг Дань	300	40000	9500	23.8
Ха Лам	300	17000	3900	22.9
Тонг Ньат	300	21100	4850	23.0
Куанг Хань	450	18100	5800	32.0
Дуонг Гуи	350	18600	4650	25.0
Хе Чам	450	20500	6550	32.0
Монг Дуонг	300	22800	5250	23.0
Среднее значение				26.0

Таблица 2. Сравнение различных типов двигателей
Table 2. Comparison of different types of engine

Параметр	Тип двигателя			
	Дизельный	Газовый	Водородный	АКБ
Удельная мощность	С	С	В	Н
Выходная мощность	С	В	В	Н
Уровень безопасности	С	Н	Н	В
Стоимость	С	В	В	Н
Способность экономить энергию	Н	Н	В	В
Уровень загрязнения	В	С	Н	Н
Уровень шума	В	С	Н	Н

ными двигателями газовые двигатели имеют меньший вес и более низкие производственные затраты из-за более низкой степени сжатия и меньшего количества необходимых деталей машины [4, 5]. Кроме того, газовый двигатель дает более высокую скорость, чем дизельный двигатель, меньший шум при работе.

Однако использование газовых двигателей в горнодобывающей промышленности Вьетнама по-прежнему сталкивается со многими ограничениями, среди которых:

- газовый двигатель по сравнению с дизелем имеет меньший КПД (в 1,5 раза), но он дороже;
- повышенная температура сгорания газа делает двигатели более опасными;
- газовые двигатели имеют низкую грузоподъемность.

В результате этого горнодобывающие компании Вьетнама стремятся перейти к более энергоэффективным технологиям – применению электродвигателей. К основным преимуществам электродвигателей относятся стабильность, низкий уровень виб-

рации и шума, отсутствие выбросов и небольшая температура при работе.

Электродвигатели подключаются к источникам энергии, вырабатываемым батареями или водородным топливом. Аккумуляторные батареи (АКБ) появились раньше, и в последние годы произошли фундаментальные изменения, включая технологию литий-ионных батарей. Водородное топливо появилось позже и имело заметные улучшения в плотности энергии. Однако по безопасности и стоимости этот источник топлива все же значительно уступает аккумуляторной технологии (табл. 2). В табл. 2 приняты следующие обозначения: Н – низкий; С – средний; В – высокий.

Водород считается топливом (зеленой энергией), не выделяющим углекислый газ, потому что вода, которая образуется при сгорании водородного топлива, снова будет поступать в замкнутый процесс производства водорода. Однако производство водорода в некоторых странах может быть более вредным для окружающей среды, поскольку он производится из природного газа и с использованием ископаемого топлива.

В аккумуляторной технике все больше внимания уделяется вопросам повышения производительности устройств с батарейным питанием. Ожидается, что электромашина с батарейным питанием будет преодолевать такое же расстояние, как и автомобиль с водородным двигателем после каждой полной зарядки. Кроме того, крупные компании мира разрабатывают технологии быстрых зарядных устройств, что позволяет сократить время зарядки устройств и повысить эффективность использования.

Благодаря своим преимуществам оборудование с аккумуляторным питанием широко распространяется в горнодобывающей промышленности. Их техническое обслуживание производится путем замены батарейных блоков или использования систем быстрой зарядки от мобильных зарядных станций. Преимущество замены батарей заключается в том, что это позволяет сократить время рабочего цикла, когда устройство не может останавливаться для зарядки. Однако электрические машины могут использовать энергию аккумуляторов для перемещения между рабочими площадками (тележка), а затем использовать местную сеть для разработки и быстрой зарядки (шахтный погрузчик «Того LH514BE»).

Во Вьетнаме транспортные расходы (топливо для дизельных двигателей) могут составлять около 40%, а вентиляционные расходы – 30% (для удаления загрязняющих веществ) от общих эксплуатационных расходов. Это приводит к увеличению энергетических составляющих в конечной доле на 15-17%. Следовательно, применение электрического оборудования позволяет снизить транспортные расходы и выбросы углекислого газа, снизить энергозатраты на системы вентиляции и эксплуатационные расходы.

Увеличение времени работы (запаса хода) роботизированных комплексов без подзарядки является важным направлением развития электрического

оборудования в горной промышленности из-за ограниченной емкости доступных накопителей электроэнергии (АКБ). Задача повышения динамических и энергетических характеристик особенно актуальна для асинхронных двигателей, работающих в составе системы электродвижения роботизированных комплексов различного назначения.

На сегодняшний день в горной промышленности существуют следующие электрические машины с питанием от аккумуляторных батарей:

- Шахтный погрузчик «Toro LH514BE»;
- Шахтный погрузчик «MT42 Battery»;
- Подземный экскаватор «Cat R1700 XE»;
- Самосвал «БелАЗ-7558Е»;
- Самосвал «Volvo HX02»;
- Самосвал «Xiangtan Electric Manufacturing»;
- Самосвал «eDumper».

Обзор шахтного погрузчика «TORO LH514BE»

Погрузчик LH514BE представляет собой элект-



Рис. 1. Шахтный погрузчик «Toro LH514BE»
Fig. 1. Mine loader «Toro LH514BE»

трическую машину с вспомогательной аккумуляторной батареей (литий-железо-фосфатные), а также оснащен функцией рекуперации энергии торможения, которая может использовать потенциальную энергию и заряжать аккумулятор при движении вниз по склону. Основные технические характеристики машины представлены в табл. 3.

Главная особенность LH514BE заключается в том, что в режиме эксплуатации он работает как традиционный электрический погрузчик с питанием от рудничной электросети, но при перемещении в новое место погрузчик можно отсоединить от электросети и воспользоваться энергией батареи для перемещения на другое место или на площадку для обслуживания [8]. Зарядка аккумулятора во время работы и торможения обеспечивает высокую эксплуатационную готовность, что позволяет повысить производительность. Благодаря этому погрузчики Toro LH514BE нашли широкое применение на рудниках, где приходится перемещать погрузчики в новое место или на площадку для обслуживания без участия вспомогательных транспортных средств.

Работа системы электродвижения погрузчика LH514BE обеспечивается тяговым асинхронным двигателем (с мощностью 132 кВт и напряжением 380 В). В состав системы управления вращения тягового двигателя входят два преобразователя частоты, которые обеспечивают управление скоростью движения погрузчика Toro LH514BE. Борто-

вой аккумулятор позволяет погрузчику двигаться со скоростью до 9 км/ч на 17% уклоне. Широкий диапазон регулирования скорости позволяет погрузчику решать транспортные проблемы в шахтах, где с уклоном могут не справиться низкоскоростные электрические погрузчики.

Основное преимущество погрузчика Toro LH514BE – это возможность непрерывной работы с нулевыми выбросами в атмосферу рудника без содержания твердых частиц, выбросов CO₂ и NO_x из выхлопных газов двигателя), а также снижение выделения тепла, что позволяет сократить расходы на вентиляцию рудников.

Подключение погрузчика Toro LH514BE осуществляется через кабельный барабан, который имеет ограничение длины кабеля (до 150 м).

Обзор шахтного погрузчика «MT42 BATTERY»

Шахтный электрический погрузчик MT42 Battery предназначен для работы на закрытых ра-



Рис. 2. Шахтный погрузчик «MT42 Battery»
Fig. 2. Minetruck «MT42 Battery»

бочих местах в горнодобывающей промышленности. Шахтный погрузчик MT42 Battery компании «Epiroc» оснащается комплектным автоматизированным электроприводом компании ABB с грузоподъемностью 42 т. Основные технические характеристики машины представлены в табл. 3.

Главная особенность MT42 Battery заключается в том, что электропривод погрузчика состоит из двух подсистем: система электродвижения и гидравлическая система [9]. В состав системы электродвижения входит многодвигательный тяговый электропривод. Это обеспечивает высокую скорость на подъемах как вверх, так и вниз. Гидравлическая система приводится в действие отдельным вспомогательным двигателем, который обеспечивает гидравлическую мощность по заданию.

В состав системы электродвижения входят два асинхронных двигателя, установленных в колесах переднего шасси. Колесный асинхронный двигатель имеет мощность 200 кВт и входное напряжение 380 В. Гидравлическая система, обеспечивающая рабочее движение кузова электросамосвала, оснащена электродвигателем с мощностью 160 кВт и входным напряжением 380 В. Многодвигательный тяговый электропривод системы электродвижения управляется преобразователем частоты. В силовую часть входят три инвертора, которые обеспечивают индивидуальное управление приводными двигателями. Инверторы подключаются к источнику постоянного напряжения через преобразователь постоянного тока. В качестве источника

электроэнергии для системы автоматизированного электропривода карьерных электросамосвалов используется литий-ионный аккумулятор, что обеспечивает работу электропривода шахтного погрузчика в течение двух часов.

Преимуществом Minetruck MT42 является значительно уменьшенное количество узлов, точек обслуживания и движущихся частей, что приводит к более длительным интервалам обслуживания, меньшему количеству деталей, увеличению времени безотказной работы и к снижению эксплуатационных расходов.

Обзор подземного экскаватора «CAT R1700 XE»

В начале 2018 г. компания Caterpillar решила выпустить новый подземный экскаватор R1700 с множеством инноваций (рис. 3). В конструкции нового электрического аккумулятора Cat R1700 XE используют передовые технологии литий-ионных



Рис. 3. Подземный экскаватор «Cat R1700 XE»
Fig. 3. Underground excavator «Cat R1700 XE»

аккумуляторов и сверхбыструю зарядку на борту для повышения безопасности и производительности. Основные технические характеристики машины представлены в табл. 3.

Главная особенность Cat R1700 XE заключается в том, что подземный экскаватор имеет эффективную электрогидравлическую систему, которая позволяет экономить топливо и увеличивать подъемную силу на 65% [10], что приводит к значительному улучшению производительности оборудования.

Двигатель подземного экскаватора Cat R1700 XE LHD работает от аккумуляторной батареи. Главным преимуществом по сравнению с дизельными двигателями является то, что электродвигатели производят меньше выбросов и потребляют меньше энергии. Производительность работы R1700 XE может достигать максимума благодаря тому, что бортовая технология сверхбыстрой зарядки позволяет электрическому экскаватору заряжаться во время его работы. Зарядное устройство Cat MEC500 является мобильным и гибким в своей способности заряжать аккумуляторы независимо от зарядной инфраструктуры и стационарных мест зарядки. Это позволяет заряжать машины в любом месте, а также упрощает техническое обслуживание и замену аккумуляторов в случае возникновения проблем.

Зарядное устройство MEC500 может полностью зарядить R1700 XE за 30 мин. при применении одного зарядного устройства или в течение 20 мин. при одновременном использовании двух устройств

зарядки. Благодаря жидкостному охлаждению аккумулятора, когда устройство держится в режиме ожидания, продлевается время работы оборудования.

Обзор самосвала «БЕЛАЗ-7558Е»

В конце 2020 г. компания «БелАЗ» завершила проект электросамосвала «БелАЗ 7558Е», в котором вместо дизель-генератора источником энергии являются тяговые батареи с емкостью 675 кВт.ч. Основные технические характеристики машины представлены в табл. 3. На сегодняшний день дан-



Рис. 4. Самосвал «БелАЗ-7558Е»
Fig. 4. Dump truck «БелАЗ-7558Е»

ный самосвал является самым маленьким из семейства БелАЗ-7558 [11].

Самосвал БелАЗ-7558Е (рис. 4) предназначен для перевозки грузов и полезных ископаемых на открытых местах и других сыпучих грузов вне дорог, а также для работы в разных сложных условиях горных работ в шахтах с горными породами различной глубины и конфигурации.

Время работы данной машины при полной загрузке составит не менее двух часов с подъемом уклона до 10%. После выполнения некоторых циклов «загрузка – транспортировка – разгрузка» самосвал необходимо зарядить на стационарной зарядной станции. Использование нового электрического силового агрегата (четвертого поколения) позволяет электросамосвалу достигнуть максимальной скорости до 64 км/ч.

Главная особенность БелАЗ-7558Е заключается в том, что в состав системы движения электросамосвала входит электродвигатель, который по сравнению с дизельным двигателем имеет следующие отличия:

- система электродвижения имеет повышенную тяговую и тормозную характеристики, что обеспечивает движение машины с максимальной грузоподъемностью по прямой, под уклон и с уклона;
- электродвигатель по сравнению с дизельным двигателем имеет более высокую производительность. При применении электродвигателя также повышается коэффициент надежности системы работы электросамосвала в целом;
- за счет исключения дополнительных механизмов (таких как коробка передач, дифференциал с карданной передачей и т.д.) электрический двигатель требует меньших эксплуатационных расходов на техническое обслуживание, ремонт и расходные материалы;
- С помощью эффективного динамического торможения в области высоких и низких скоростей увеличивается диапазон регулирования скорости.

Обзор самосвала «VOLVO HX-02»

Компания «Volvo Construction Equipment» представила на выставке «CONEXPO/CON-AGG 2017» автономный электрический грузовой самосвал HX-02. Самосвал HX-02 является частью исследовательского проекта по созданию «электрических экосистем», целью которого является преобразование карьерной и строительной промышленности за счет сокращения выбросов углерода и стоимости эксплуатации, обслуживания и ремонта [12]. Размеры машины составляют примерно 5,5 м в длину и 2,5 м в ширину, а эксплуатационный вес – 6,5 т. Основные технические характеристики машины представлены в табл. 3.



Рис. 5. Самосвал «Volvo HX-02»
Fig. 5. Dump truck «Volvo HX-02»

В электросамосвале HX-02 применяется NMC-аккумуляторы. После каждого рабочего цикла самосвал требует осуществлять зарядку, а реализация заряда осуществляется пантографом (Рис. 5).

Главная особенность этой машины заключается в том, что батарея HX-02 имеет небольшую емкость, что обеспечивает быструю зарядку батареи в течении 1 мин. В результате значительно сокращается время простоя самосвала и увеличивается полезное время работы за цикл. У электросамосвала нет кабины (отсутствие водителя). Это позволяет ему работать в обе стороны без движения задним ходом, а также позволяет выполнять повороты для удобного позиционирования.

Отрицательной стороной такого решения можно считать относительно большую частоту замены аккумуляторной батареи, что уменьшает количество циклов заряда/разряда (уменьшение производительности) и может увеличить стоимость эксплуатации электросамосвала. Кроме этого, смена батареи выполняется с помощью оператора, что не только уменьшает степень автоматизации добычи, но и приводит к значительным потерям времени.

Однако подключение и отключение зарядного пантографа требует большой подготовительной работы, и при замене аккумулятора оператор должен подключить разряженный аккумулятор к зарядной станции и отключить его после завершения зарядки.

Обзор самосвала «XIANGTAN ELECTRIC MANUFACTURING»

В конце июля 2021 китайская компания «Xiangtan Electric Manufacturing» выпустила полностью электрический карьерный самосвал с грузоподъемностью до 120 т. Данный самосвал может подниматься в гору с максимальным уклоном в 17%. Самосвал Xiangtan Electric

Manufacturing имеет колесную формулу 3х6. Такая колесная формула обеспечивает эффективную работу в угольных шахтах и рудниках. Самосвал компании «Xiangtan Electric Manufacturing» оснащен литий-железо-фосфатным аккумулятором от компании «Contemporary Ampere Technology». Основные технические характеристики машины представлены в табл. 3.



Рис. 6. Самосвал «Xiangtan Electric Manufacturing»
Fig. 6. Dump truck «Xiangtan Electric Manufacturing»

Главная особенность машины – система регулирования температуры, которая обеспечивает работу самосвала в диапазоне температуры от -30° C до +60° C.

Преимуществом самосвала Xiangtan Electric Manufacturing является сокращение затрат на техническое обслуживание и ремонт на 20% [13]. Начало эксплуатации машины планируется в конце 2022 г.

Обзор самосвала «EDUMPER»

В 2018 году швейцарская компания Kuhn Schweiz представила мощный самосвал – «eDumper» (рис. 7), основанный на Komatsu HB 605-7.

Его длина составляет 9 м, ширина 4,2 м, высота 4,2 м (без поднятого кузова) или 8,5 м (с поднятым кузовом). Компания «Kuhn» заменила дизельный двигатель стандартного самосвала японской компании Komatsu HD 605-7 на электродвигатель с номинальной мощностью 600 кВт. Литий-ионные батареи имеют высокий показатель удельной емкости (до 220 Вт·ч/кг) и высокое напряжение каждой ячейки (3,6–3,7 В). Основные технические характеристики машины представлены в табл. 3.

Главная особенность этой машины заключается в том, что самосвал «eDumper» может перевозить



Рис. 7. Самосвал «eDumper»
Fig. 7. Dump truck «eDumper»

до 65 тонн груза за один раз, использует аккумулятор для подъема на гору и, как и другие электросамосвалы, использует рекуперативное торможение для восстановления энергии. Результаты полевых исследований компании показывают, что на поднятие грузовик затратил 19% энергии батареи, а при

спуске восстановил больше чем 19% [14]. И чем больше нагрузка, тем больше энергии восстанавливается.

Недостатком электросамосвала «eDumper» является то, что во время работы температура батареи может подниматься до 210 °С. Это требует особого внимания при разработке систем охлаждения аккумуляторов и алгоритмов управления.

Основные технические характеристики электрических машин в горной промышленности представлены в табл. 4. На основании этой таблицы можно констатировать некоторые недостатки электродвигателей, обусловленные следующими фак-

торами:

- конструктивным фактором;
- энергетическим фактором;
- работоспособным фактором.

Энергетический фактор – низкая производительность. После многих циклов «зарядка-транспортировка-разгрузка» машину необходимо заряжать с остановкой или заменять аккумулятор, что приводит к снижению производительности труда.

Конструктивный фактор заключается в том, что машина с аккумуляторным питанием должна быть спроектирована так, чтобы обеспечивать высокую

Таблица 3. Сравнение технических характеристик электрических машин в горной промышленности
Table 3. Comparison of the technical characteristics of electrical machines in the mining industry

Параметр	Электрическая машина						
	Toro LH514BE	MT42 Battery	Cat R1700	БелАЗ-7558Е	HX-02	Xiangtan Electric Manufacturing	eDumper
Технические характеристики электрических машин							
Назначение	подземный	подземный	подземный	открытый	открытый	открытый	открытый
Тип машины	погрузчик	погрузчик	экскаватор	самосвал	самосвал	самосвал	самосвал
Грузоподъемность, т	14	42	15	90	15	120	65
Снаряженная масса, т	39,5	35	48	76	6,5	-	45
Расчетный уклон дорог, %	17	19	12-13	10	-	17	19
Максимальная скорость, км/ч	21,1	20	32,5	64	40	-	40
Температура работы, °С	0 +25	0 +40	-25 +50	-50 +40	-	-30 +60	-20 +50
Способ зарядки	От трехфаз. сети	CCS 2.0 от трехфаз. сети	Сверхбыстрая зарядка на борту	От зарядной станции	Пантограф	От трехфаз. сети	От зарядной станции
Степень роботизации	Частичная автоматизация	Частичная автоматизация	Частичная автоматизация	Частичная автоматизация	Автоматизация	Частичная автоматизация	Частичная автоматизация
Технические характеристики автоматизированных электроприводов							
Номинальная мощность электродвигателя, кВт	320	200	226	640	200	-	600
Номинальный крутящий момент двигателей, Н·м	-	1100 600	600	750	-	-	-
Энергоемкость АКБ, кВт·ч	-	425	213	-	-	1575	600
Масса АКБ, т.	0,91	5,1	-	-	-	-	4,5
Время полной зарядки, мин.	-	120	30	25	1	60	-
Тип АКБ	LiFePO4	Li-ion	Li-ion	NMC	NMC	LiFePO4	Li-ion
Время работы, мин.	-	120	-	120	8 (1 цикл)	до 4800	-

грузоподъемность, приводиться в движение тяговым двигателем, а также аккумулятором, способным обеспечивать максимальное время работы между зарядками.

Работоспособный фактор обусловлен тем, что дизельные двигатели необходимо заменить электродвигателями за счет экономической и экологической эффективности (особенно там, где район добычи находится выше уровня нагрузки и в районах отдаленных районов, где снабжение дизельным топливом достаточно дорого).

Система электродвижения электрических машин

На основе изучения международных проектов (проект по созданию «электрических экосистем» компании Volvo [12] и проект Mining-RoX [15]) и статьи можно узнать, что система электродвижения состоит из аккумуляторной батареи (АКБ); сглаживающего фильтра (СФ); электрического двигателя (М); тормозного устройства (ТУ) и передаточного устройства (ПУ).

Электродвигатель является сердцем системы электропривода. В настоящее время большинство систем электропривода оснащены одним или несколькими электродвигателями. Для питания электродвигателя в этих транспортных средствах используется блок тяговых аккумуляторов, который подключается к зарядной станции или сети.

На основе таких критериев, как количество двигателей, тип двигателя, контроллер и конструкция, существуют различные классификации систем электропривода. Рассмотрим три наиболее распространенные системы электропривода на сегодняшний день (рис. 8):

- система электродвижения с двигателем постоянного тока и дифференциалом;
- система электродвижения с двумя двигателями постоянного тока;
- система электродвижения с двумя асинхронными двигателями.

Двигатели постоянного тока, для которых требуются щетки и коллекторы, не подходят для влажных и пыльных условий в горной промышленности, что приводит к сокращению срока службы. Кроме того, управление и техническое обслуживание двигателя при использовании дифференциала (рис. 8, а) сопряжено со многими трудностями из-за труднопроходимости маршрутов в горной промышленности. Чтобы преодолеть этот недостаток, дифференциал заменяется двумя независимыми управляющими двигателями (рис. 8, б).

Полупроводниковые технологии и технологии управления сильно развились в последние годы, двигатели постоянного тока заменяются асинхронными двигателями (рис. 8, в), которые обладают такими преимуществами, как низкая стоимость, универсальность и простота изготовления, асинхронный двигатель может полностью реализовать усовершенствованные алгоритмы векторного управления [13].

Асинхронные двигатели (АД) имеют высокую эффективность при использовании в транспортных средствах, их качественно эксплуатируют в местах,

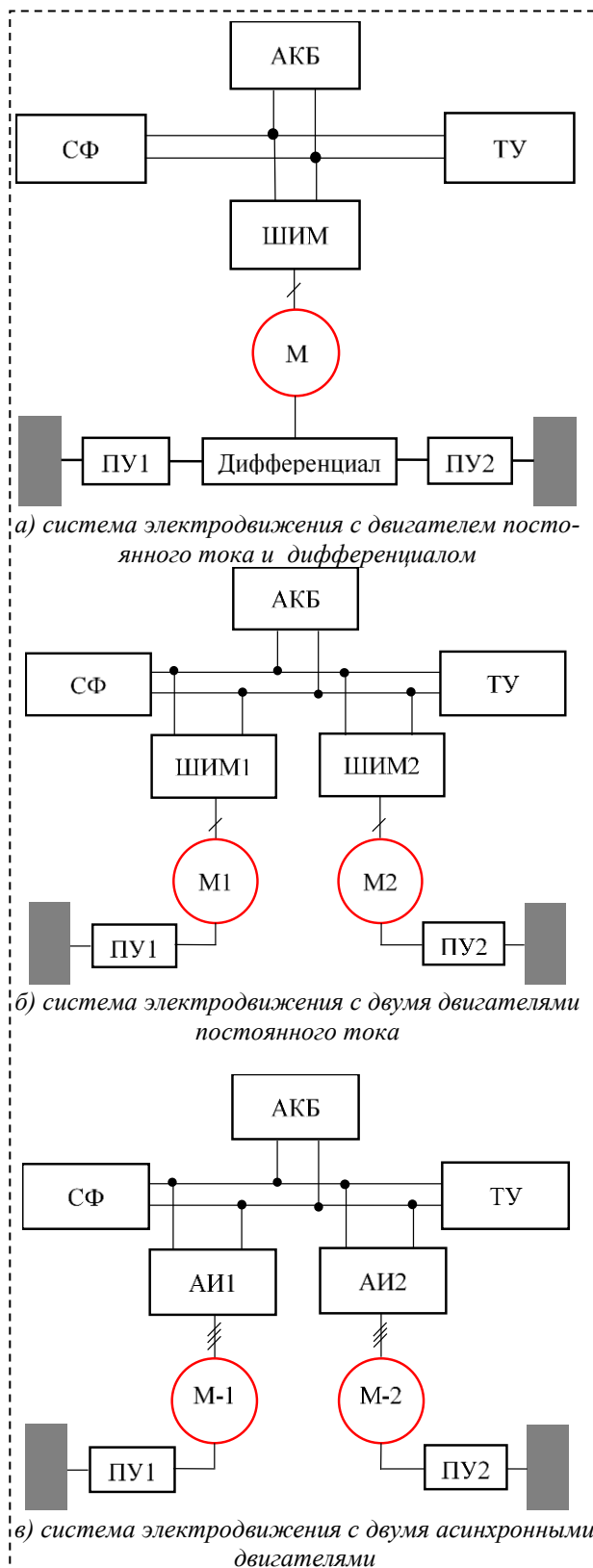


Рис. 8. Схемы системы электродвижения
Fig. 8. Electric propulsion system diagrams

допускающих высокие скорости и большие нагрузки. Однако производительность, а также пройденное расстояние не будут оптимальными при использовании асинхронного двигателя на короткие расстояния или при нескольких остановках. С целью преодоления недостатка АД инженеры и про-

Таблица 4. Сравнение модуляционных систем управления
Table 4. Comparison of modulation control systems

Параметр	Модуляционная система управления		
	Синусои- дальная	Пред- модуляция	Векторная
Амплитудное значение	$\frac{1}{2}mU_{dc}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}mU_{dc}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}mU_{dc}$
Коэффициент пользования автономного инвертора, %	78,5	90,7	90,7
Ток	-	уменьшение	уменьшение
Коэффициент искажения тока	высокий	средний	низкий
Время разрядки батареи	-	увеличение	увеличение

Таблица 5. Сравнение систем управления электроприводов по характеристике управляемости

Table 5. Comparison of control systems of electric drives according to the controllability characteristic

Параметр регулиро- вания		Тип системы управления электроприво- дов		
		Скалярное	Векторное	Прямое
Регулирование	Частота вра- щения	Прямое	Прямое	Прямое
	Потоко- сцепление	Косвенное	Прямое	Прямое
	Момент	–	Косвенное	Прямое
Оптимизация под тяговую нагрузку		$\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const}$	$\psi^* = k \frac{1}{\omega}$	$\psi^* = k \frac{1}{\omega}$

изводители оборудования для горной промышленности стремятся использовать синхронные двигатели с постоянными магнитами. Использование этого двигателя находится на проектном уровне, не освоено из-за его высокой себестоимости и не дает очевидных преимуществ по сравнению с использованием асинхронного двигателя.

В состав электропривода с АД входят три главных компонента: модуляционная система управления АИ; система управления АД; технологическая система управления. Различные типы модуляционных систем управления используются в составе различных систем управления электроприводов: система синусоидальной, векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и ШИМ с предмодуляцией широко используются в модуляционной системе управления (табл. 4).

Использование системы векторной и ШИМ с предмодуляцией приводят к более высокому коэффициенту пользования автономного инвертора (90,7), чем при использовании синусоидальной (78,5). Это приводит к уменьшению тока, протекающего через электрическую трансмиссию, что увеличивает время разрядки аккумулятора.

Преимущество от этого нетрудно увидеть, так как это способствует повышению эффективной работы системы электропривода в целом

(увеличению времени работы системы), снижению нагрузки на систему охлаждения, а также помогает сэкономить расходы. Несинусоидальности входных и выходных токов преобразователей частоты приводят к снижению входного и выходного коэффициента мощности и возникновению дополнительных потерь в источнике и потреблении. Исходя из этого, можно сделать вывод, что использование системами векторной модуляционной системы управления обеспечивает более высокую эффективность, чем использование синусоидальной модуляционной системы управления или предмодуляционной.

Анализ характеристик двигательных систем управления электроприводов с асинхронными двигателями можно выполнять по характеристикам управляемости. В табл. 5 представлено сравнение систем управления электроприводов с асинхронными двигателями с различными типами системы управления.

Из приведенной выше таблицы видно, что использование систем прямого управления обеспечивает прямое управление тремя факторами, а именно частотой вращения, потокосцеплением и моментом. Однако система прямого управления имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что пульсации потокосцепления и момента во время спуска очень велики, в результате чего увеличивается потребляемая мощность аккумуляторной батареи, повышаются потери на нагревание, уменьшается время работы общей системы и даже сокращается жизнь батареи. Использование системы векторного управления обеспечивает прямое управление двумя факторами (частотой вращения, потокосцеплением), а момент может регулироваться косвенно. В момент пуска выходной ток АИ увеличивается постепенно до действительного значения. Это обеспечивает безопасную работу батареи. Исходя из этого, можно делать вывод, что использование систем векторного управления обеспечивает более высокую эффективность, чем использование систем прямого и скалярного управления.

Технологическая система управления должна обеспечивать следующие характеристики:

- иметь тяговую характеристику с ограничением момента при работе на малых скоростях и ограничением частоты вращения при работе с малым моментом;
- обеспечивать заданные ходовые характеристики (движение с максимальной скоростью; преодоление максимального уклона; спуск с максимального уклона);
- обеспечивать заданные тяговые характеристики (движение с максимальной грузоподъемностью по прямой, под уклон и с уклона).
- обеспечивать движение машины при выходе из строя одного или нескольких мотор-колес;

- обеспечивать электрический дифференциал машины;
- обеспечивать противооткатный режим работы машины.

Заключение

В статье представлены семь электрических машин горной промышленности, питающихся от аккумуляторных батарей. Сравнение образцов показывает, что общим недостатком этих машин является то, что производительность машины зависит от емкости аккумулятора и эффективности работы системы преобразования энергии, а также от инфраструктуры, необходимой для быстрой зарядки и обслуживания устройства.

На основе анализа используемых систем электродвижения делается вывод, что электропривод с двумя асинхронными двигателями с использованием системами векторной модуляционной системы управления АИ и системами векторного управления двигателем обеспечивает более высокую энергоэффективность, продление срока службы батарей и повышение ее степени безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства № 17/2020/НД-КП от 05.02.2020 г. о внесении изменений и дополнений в ряд статей Постановлений, касающихся условий инвестирования бизнеса в сфере государственного управления Минпромторга Вьетнама.
2. Постановление Премьер-Министра Вьетнама № 2223/QĐ-TTg от 28 декабря 2020 года об утверждении Проекта «Развитие конкурентного энергетического рынка до 2030 года с перспективой до 2045 года».
3. Директива № 29/СТ-TTг от 02.12.2019 о дальнейшем усилении государственного управления деятельностью по добыче и торговле углем и поставкам угля для производства электроэнергии Вьетнама.
4. Драгуленко В. В. Применение газового топлива на дизельном двигателе // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. 2017. С. 70-72.
5. Тютрина А. Ю., Бурманов С. А. Анализ применения водородных элементов и аккумуляторных батарей на электротранспортных средствах // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте. 2021. С. 410-412.
6. Кузнецов М. Д. Особенности двигателей внешнего сгорания – двигателей Стирлинга // Записки Горного института. 2012. № 196. С. 252.
7. Безносенко Д. М. Новые источники питания тягового электропривода карьерных автосамосвалов // Записки Горного института. 2004. № 157. С. 98.
8. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rocktechnology.sandvik.ru/>
9. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.epiroc.com/ru-ru/products/loaders-and-trucks/diesel-trucks/mine-truck-mt42>
10. [Электронный ресурс]. Украинский портал о технологиях и спецтехнике. URL: <https://enki.ua/>
11. [Электронный ресурс]. URL: <https://belaz.by/>
12. Черепанов В. А., Журавлев А. Г., Глебов И. А., Чендырев М. А. Обзор транспорта с электропитанием в фокусе развития горнодобывающих предприятий // Проблемы недропользования. 2019. С. 33-49.
13. [Электронный ресурс]. URL: <https://insideevs.ru/news/516311/produced-first-in-the-world-dumptruck/>
14. Дубинкин Д. М., Карташов А. Б., Арутюнян Г. А., Бузунов Н. В., Сорокин К. П., Ялышев А. В. Современное состояние техники и технологий в области карьерных самосвалов с накопителями энергии // Горное оборудование и электромеханика. 2020. №6. С. 31-42.
15. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/project/Mining-RoX-Autonomous-Robots-in-Underground-Mining>
16. Васильев Б. Ю., Козырук А. Е. Методы и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронными электроприводами // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. С. 47-57.
17. Борисов С. В., Колтунова Е. А., Кладиев С. Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза // Записки Горного института. № 247. С. 1-8.
18. Vasiliev B. Y., Kozyaruk A. E., Mardashov D. V. Increasing the Utilization Factor of an Autonomous // Inverter under Space Vector Control Russian Electrical Engineering. 2020. №4. pp. 247-254.

© 2022 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Нгуен Тхе Хиен, аспирант, Санкт-Петербургский Горный университет (199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2), thiennguyen1697@gmail.com

Васильев Богдан Юрьевич, доцент, Санкт-Петербургский Горный университет (199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2)

Заявленный вклад авторов:

Нгуен Т.Х. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Васильев Б.Ю. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-59-69

The H. Nguyen, Bogdan Yu. Vasiliev

St. Petersburg Mining University

E-mail: thehiennnguyen1697@gmail.com

ANALYSIS OF AUTONOMOUS ROBOTIC MINING MACHINES WITH AUTONOMOUS ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS



Article info

Received:

17 June 2022

Accepted for publication:

01 October 2022

Accepted:

04 October 2022

Keywords: electric motor, mining equipment, electric dump truck, electric loader, vector control, energy efficiency, electric propulsion system, mining industry.

Abstract.

Nowadays, with the development of science and technology, electric motors have found wide application in various fields, including in the mining industry due to their high efficiency and stability compared to internal combustion engines (diesel and gas engines). In particular, the use of electric motors does not cause emissions and environmental pollution, thus improving working conditions both in open and in underground mining facilities. However, battery-powered equipment also has certain disadvantages that require continuous research and development to optimize the operation of the electric propulsion system. An analysis of the advantages and disadvantages of existing electric propulsion systems shows that an electric propulsion system with two asynchronous motors, as well as vector modulation systems of autonomous inverters and vector motor control systems, provides the highest efficiency of electrical equipment.

For citation: Nguyen T.H., Vasiliev B.Yu. Analysis of autonomous robotic mining machines with autonomous electric propulsion systems. Mining Equipment and Electromechanics, 2022; 5(163):59-69 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-59-69

REFERENCES

1. Government Decree No. 17/2020/ND-KP dated February 5, 2020 on amendments and additions to a number of articles of the Decrees regarding the conditions for business investment in the public administration of the Ministry of Industry and Trade of Vietnam.
2. Decree of the Prime Minister of Vietnam No. 2223/QĐ-TTg dated December 28, 2020 on the approval of the Project "Development of a competitive energy market until 2030 with a perspective until 2045".
3. Directive No. 29/ST-TTg of 02.12.2019 on further strengthening the state management of coal mining and trading activities and coal supplies for Vietnam's electricity generation.
4. Dragulenko V.V. The use of gas fuel on a diesel engine. *New science: Theoretical and practical view*. 2017: 70-72.
5. Tyutrina A.Yu. and Burmanov S.A. Analysis of the use of hydrogen cells and batteries in electric vehicles. *Innovations in information technologies, mechanical engineering and motor transport*. 2021, pp. 410-412.
6. Kuznetsov M.D. Features of external combustion engines - Stirling engines. *Notes of the Mining Institute*. 2012; 196:252.
7. Beznosenko D.M. New power sources for the traction electric drive of mining dump trucks. *Zapiski Gornogo instituta*. 2004. No. 157. C. 98.
8. [Electronic resource]. URL: <https://www.rocktechnology.sandvik.ru/>

9. [Electronic resource]. URL: <https://www.epiroc.com/ru-ru/products/loaders-and-trucks/diesel-trucks/mine-truck-mt42>

10. [Electronic resource]. Ukrainian portal about technologies and special equipment. URL: <https://enki.ua/>

11. [Electronic resource]. URL: <https://belaz.by/>

12. Cherepanov V.A., Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Chendyrev M.A. Review of transport with power supply in the focus of development of mining enterprises. *Problems of subsoil use*. 2019:33-49.

13. [Electronic resource]. URL: <https://insideevs.ru/news/516311/produced-first-in-the-world-dumptruck/>

14. Dubinkin D.M., Kartashov A.B., Arutyunyan G.A., Buzunov N.V., Sorokin K.P., Yalyshev A.V. Modern state of engineering and technology in the field of mining dump trucks with energy storage. *Mining equipment and electromechanics*. 2020; 6:31-42.

15. [Electronic resource]. URL: <https://www.researchgate.net/project/Mining-RoX-Autonomous-Robots-in-Underground-Mining>

16. Vasiliev B.Yu., Kozyaruk A.E. Methods and means of improving the energy efficiency of machines and technologies with asynchronous electric drives. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*. 2016: 47-57.

17. Borisov S.V., Koltunova E.A., Kladiev S.N. Improving the structure of the simulation model of the traction asynchronous electric drive of a mine electric locomotive. *Zapiski Gornogo instituta*. 247:1-8.

18. Vasiliev B.Y., Kozyaruk A.E., Mardashov D.V. Increasing the Utilization Factor of an Autonomous. *Inverter under Space Vector Control Russian Electrical Engineering*. 2020; 4:247-254.

© 2022 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
The author declare no conflict of interest.

About the author:

The H. Nguyen, post-graduate student, St. Petersburg Mining University (199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2), thehiennnguyen1697@gmail.com

Bogdan Yu. Vasiliev, associate professor, St. Petersburg Mining University (199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2)

Contribution of the authors:

The H. Nguyen – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Bogdan Yu. Vasiliev – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Author have read and approved the final manuscript.

