

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ПРИВОДА ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ И ОЦЕНКА ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Лукиенко Л.В.

Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, Тула

Ключевые слова: шахтный электровоз, тяговый электропривод, двигатель постоянного тока, асинхронный двигатель, частотное регулирование, рудничное исполнение, энергосбережение, рекуперация, автономный источник питания.

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ систем тягового привода шахтных электровозов, эксплуатируемых в условиях подземных горных выработок. Рассмотрены три основных типа приводов: коллекторный (на базе двигателей постоянного тока последовательного возбуждения), асинхронный частотно-регулируемый и привод на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами. Проведена оценка по ключевым критериям: энергоэффективность, массогабаритные показатели, надежность в условиях повышенной запыленности и влажности, сложность технического обслуживания, а также способность к рекуперативному торможению. Установлено, что наиболее перспективным направлением модернизации парка шахтного рельсового транспорта является переход на асинхронный тяговый привод с питанием от бортовых аккумуляторных батарей или дизель-генераторных установок автономного исполнения. Применение современных микропроцессорных систем управления позволяет повысить КПД транспортной цепочки до 15% по сравнению с классическими системами.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MINE ELECTRIC LOCOMOTIVE DRIVE SYSTEMS AND ASSESSMENT OF THEIR ENERGY EFFICIENCY

Lukienko L.V.

Tula State Pedagogical University n.a. L.N. Tolstoy, Tula

Keywords: mine electric locomotive, traction electric drive, DC motor, asynchronous motor, frequency control, mine design, energy saving, recovery, autonomous power source.

Abstract. The article presents a comparative analysis of the traction drive systems of mine electric locomotives operated in underground mine workings. Three main types of drives are considered: the collector drive (based on series-wound DC motors), the asynchronous variable-frequency drive, and the drive based on permanent magnet synchronous motors. The drives are evaluated based on key criteria, including energy efficiency, mass and size characteristics, reliability in dusty and humid environments, maintenance complexity, and the ability to perform regenerative braking. It has been established that the most promising direction for modernizing the fleet of mine rail transport is the transition to asynchronous traction drives powered by onboard batteries or autonomous diesel-generator sets. The use of modern microprocessor-based control systems allows for an increase in the efficiency of the transport chain by up to 15% compared to traditional systems.

Введение. Шахтный подземный транспорт остается одним из наиболее энергоемких технологических процессов при добыче полезных ископаемых. Традиционно для откатки вагонеток используются контактные электровозы постоянного тока напряжением 250 В. Однако жесткие требования промышленной безопасности (взрывозащита рудничного оборудования – особо взрывобезопасное исполнение), ограниченное пространство выработок и необходимость снижения

операционных затрат стимулируют переход на автономные источники питания (аккумуляторные батареи) и современные типы тяговых электродвигателей. Отдельные вопросы разработки и эксплуатации приводов шахтных электровозов отражены в работах [1-10].

Целью работы является систематизация данных о существующих системах привода и определение оптимального технического решения для различных горно-геологических условий.

Коллекторные системы привода – доминирующий тип привода, в котором применяют двигатели постоянного тока (обычно серии ДРТ). Питание осуществляется либо от контактной сети через токоприемник, либо от щелочных или кислотных свинцовых тяговых аккумуляторов. К основным **преимуществам** можно отнести: линейную механическую характеристику, обеспечивающую значительные пусковые моменты, необходимые для трогания состава на уклонах; простоту аналогового управления сопротивлением якоря; высокую ремонтпригодность в условиях шахты. **Недостатками** являются: низкий КПД (70-78%) из-за потерь в щеточно-коллекторном узле; искрение под щетками, создающее риск взрыва метановоздушной смеси; интенсивный износ коллектора, требующий еженедельного обслуживания; выделение водорода при заряде кислотных АКБ; большая масса меди и электротехнической стали.

Силовая часть асинхронных частотно-регулируемых систем привода

состоит из автономного источника (аккумуляторная батарея и инвертор напряжения) и трехфазного короткозамкнутого асинхронного двигателя во взрывозащищенном исполнении. Для управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором применяют прямое векторное управление потокосцеплением с точной регулировкой момента в широком диапазоне скоростей (от 0 до максимальной) для обеспечения плавного пуска без бросков тока сети и возможности реализации многоступенчатых циклов разгона-торможения, адаптированных под конкретный профиль пути. К основным **преимуществам** этого вида привода можно отнести: высокий КПД (85-92%), отсутствие щеточного узла (повышенная пылевлагозащищенность), минимальные затраты на техническое обслуживание, плавное векторное управление моментом, возможность реализации эффективного рекуперативного торможения с возвратом энергии в батарею (экономия до 20-25% заряда на длинных перегонах со спусками). Основными **недостатками** являются: высокая стоимость силовых преобразователей частоты (инверторов); генерация высокочастотных электромагнитных помех, требующая установки дорогостоящих входных фильтров радиопомех для исключения ложных срабатываний аппаратуры аэрогазового контроля; чувствительность алгоритмов управления к параметрам эквивалентной схемы замещения двигателя, которые меняются при нагреве обмоток.

Наиболее технологически совершенным решением в настоящее время являются **приводы на синхронных двигателях с постоянными магнитами**, которые размещены на роторе, что исключает потребление энергии на создание магнитного поля. Основные **преимущества** этого типа привода: максимальный удельный момент на единицу массы (позволяет снизить массу локомотива на 15-20% по сравнению с АД); наивысший КПД силовой установки (до 94-96%);

компактность, критичная для низких сечений выработок. Основные **недостатки**: экстремально высокая стоимость постоянных магнитов; риск необратимой потери магнитных свойств (размагничивания) при перегреве выше 150-180°C, что требует сложной системы термостабилизации; сложность обеспечения взрывозащиты вида «взрывонепроницаемая оболочка» из-за невозможности создания герметичной камеры вокруг вращающегося магнита без применения специальных немагнитных сплавов; наличие остаточного момента при аварийном отключении инвертора. В таблице 1 представлено сравнение характеристик различных систем привода шахтных электровозов

Табл. 1. Сравнение характеристик различных систем привода шахтных электровозов

Параметр	Тип привода		
	Коллекторный	Асинхронный	Синхронный
Общий КПД цепи	0,70-0,78	0,85-0,92	0,92-0,96
Удельная мощность, кВт/кг	0,15-0,20	0,25-0,35	0,40-0,55
Рекуперация энергии	Невозможна (резисторы)	Эффективная (в АКБ)	Высокоэффективная
Межремонтный интервал	~200 часов	более 2000 час.	более 3000 часов
Стоимость техобслуживания	Средняя (высокие ЗИП)	Низкая (низкие ЗИП)	Высокая (стоимость узлов)
Взрывозащита	Сложная (искрение щеток)	Стандартизированная	Критически сложная

Обсуждение результатов. Проведённый анализ показывает, что выбор системы привода напрямую зависит от топологии шахты. Для протяженных горизонтальных выработок с развитой контактной сетью экономически целесообразно сохранять коллекторные электровозы из-за их низкой капитальной стоимости. Синхронные приводы пока остаются нишевым решением для легких маневровых машин и монорельсовых дорог внутри шахт, где критична минимальная масса подвижного состава, а бюджеты позволяют закупать оборудование верхнего ценового сегмента.

Заключение. Переход от коллекторного привода к асинхронному частотно-регулируемому в сегменте тяжелых магистральных шахтных электровозов является объективной необходимостью, обусловленной требованиями энергоэффективности и промбезопасности. Несмотря на высокую начальную стоимость преобразовательной техники, снижение эксплуатационных расходов на электроэнергию (за счет КПД и рекуперации) и полное исключение затрат на замену щеток и проточку коллекторов обеспечивают окупаемость модернизации за 2,5-3 года непрерывной эксплуатации. Дальнейшее развитие систем привода связано с внедрением предиктивной диагностики подшипниковых узлов на основе

анализа вибраций и нейросетевого прогнозирования деградации емкости тяговых АКБ.

Список литературы

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. – М.: Недра, 1981. – 389 с.
2. Волков Д.Б. Тяговые электроприводы транспортных систем: учебное пособие. – М.: Горная книга, 2021. – 412с.
3. Мазуренко А.В. Сравнительный анализ энергетических показателей аккумуляторных электровозов с различными типами тяговых двигателей // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – №2. – С. 15-22.
4. Правила безопасности в угольных шахтах: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Серия 05. Вып. 52. – М.: ЗАО «НТЦ ПБ», 2022. – 280 с.
5. Kostic M., Petrovic V. Energy efficiency of modern battery haulage systems in underground mining // Journal of Mining Science. 2021, vol. 57, no. 5, pp. 789-801.
6. Бирюков С.В., Тарасов Ю.Д. Автономный шахтный транспорт: тенденции развития источников питания и тяговых агрегатов // Записки Горного института. – 2024. – Т. 267. – С. 456-468.
7. Сташинов Ю.П. Адаптивный привод шахтных электровозов. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – №10. – С. 294-296
8. Фришман В.М. Теория и расчет рудничных электровозов. – М.: Недра, 2018. – 342 с.
9. Зиборов К.А., Литвин В.В. Оптимизация параметров привода и управления шахтных локомотивов // ГИАБ. – 2002. – №8. – С. 217-218.
10. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. – М.: Академия, 2018. – 288 с.

Сведения об авторе:

Лукиенко Леонид Викторович – д.т.н., доцент, профессор кафедры агроинженерии и техносферной безопасности.