

УДК 62–831.1:621.313.333.2:621.333

ОЦЕНОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОНИЖЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ ДЛЯ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Арсентьев Олег Васильевич¹,
arsentyevov@mail.ru

Баранов Павел Рудольфович²,
baranovp@tpu.ru

Вильнин Александр Данилович²,
vilninad@tpu.ru

Кладиев Сергей Николаевич²,
kladiev@tpu.ru

¹ Иркутский Национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью решения проблем обеспечения энергоэффективных режимов работы тяговых электроприводов подземного электровоза, используемого для транспортировки руды черных и цветных металлов в рудниках от места добычи к месту складирования для дальнейшей транспортировки на поверхность. Одной из главных задач подземного рельсового транспорта является достижение предельных тяговых характеристик частотно-регулируемых асинхронных двигателей в условиях ограничения величины питающего напряжения контактной сети постоянного тока подземного транспорта по соображениям электробезопасности.

Цель работы: исследование возможности использования асинхронных двигателей с пониженным напряжением питания для тягового электропривода подземного рудничного электровоза; определение условий соответствия механических характеристик тягового асинхронного двигателя с пониженным напряжением питания относительно характеристик при стандартном напряжении.

Объект исследований: тяговый асинхронный электродвигатель с пониженным напряжением питания, повышенными тяговыми усилиями и малой чувствительностью к вибрационным и ударным воздействиям.

Методы исследования. Исследования проводились путем анализа аналитических зависимостей характеристик асинхронного двигателя и результатов имитационного моделирования в программной среде Simulink MatLab. Сравнение проведено по статическим и динамическим характеристикам, энергетическим показателям и конструктивным особенностям рассматриваемых электродвигателей.

Результаты. В качестве прототипа тягового асинхронного двигателя выбран специальный крановый асинхронный двигатель производства ОАО «Сибэлектромотор», рассчитанный для частотного регулирования скоростью. Приведена методика расчета параметров схемы замещения тягового асинхронного двигателя по паспортным данным при пониженном напряжении питания статора и разработана его имитационная модель. Основные механические и электромеханические свойства и характеристики тягового асинхронного двигателя с переключением схемы соединения фазных обмоток статора со «звезды» на «треугольник», пересчитанные на пониженное напряжение питания, соответствуют характеристикам тягового асинхронного двигателя со стандартным напряжением питания. Для обеспечения вибро- и ударопрочности обосновано изменение конструкции тягового асинхронного двигателя с заменой литого чугунного корпуса на сварной из стали с дополнительными опорами для крепления к раме электровоза.

Ключевые слова:

Тяговый асинхронный двигатель, рудничный электровоз, параметры схемы замещения, механические характеристики, пониженное напряжение питания.

Введение

Подземный рельсовый транспорт широко используется при добыче полезных ископаемых в подземных выработках, прежде всего при добыче руды черных и цветных металлов. Его применение позволяет эффективно перевозить руду на значительные расстояния [1, 2]. В то же время развитие и совершенствование данного транспорта сдерживается в связи с применением в рудничных электровозах тяговых двигателей постоянного тока последовательного возбуждения с морально устаревшей реостатно-контактной системой управле-

ния. Недостатки такой системы электропривода общеизвестны [2]. Причем основные из них, такие как: низкая надежность, ограниченный срок службы, отсутствие защиты от буксования и юза при использовании устаревшей системы релейно-контактного управления, устранить проблематично.

Цель данной статьи научно обосновать и сформулировать основные современные требования к тяговым асинхронным двигателям (ТАД; ITM – induction traction motor) рудничных электровозов, провести выбор перспективных электродвигателей

переменного тока, предназначенных для работы с частотными преобразователями с современной микропроцессорной системой управления. Для этого необходимо: исследовать возможности использования асинхронных двигателей с пониженным напряжением питания для тягового электропривода подземного рудничного электровоза; определить условия соответствия механических характеристик ТАД с пониженным напряжением питания относительно характеристик такого двигателя на стандартное напряжение.

В общем случае ТАД предназначены для приведения в движение электрических транспортных средств. Основное отличие ТАД от общепромышленных асинхронных электродвигателей заключается в условиях их эксплуатации, монтажа, в жестких ограничениях массы и габаритов, в повышенных механических воздействиях на элементы конструкции [1]. Эксплуатация ТАД для рельсового транспорта происходит в тяжелых условиях. Корпуса таких машин постоянно подвержены воздействию вибрационных и ударных нагрузок; активные части машин, особенно обмотки статора и ротора, также находятся под действием тепловых электрических перегрузок. Поэтому при проектировании конструкции ТАД крайне важно обеспечить достаточно высокую прочность узлов и отдельных деталей, более высокий класс изоляции и влагостойкость токоведущих частей и обмоток, монолитность обмоток.

Рабочие режимы ТАД отличаются значительной разнообразностью. Основные режимы работы кроме длительных режимов с переменной нагрузкой, – это перемежающиеся, кратковременные, повторно кратковременные с частыми пусками. В процессе работы зачастую требуется изменять скорость движения в широких пределах. При трогании груженого состава с места требуемый пусковой момент превышает номинальное значение в два и более раза. Из-за тяжелых условий работы и габаритных ограничений тяговые электродвигатели можно отнести к электрическим машинам предельной эксплуатации [1].

Развитие полупроводниковой техники и компьютерной технологии открывает новые возможности электрических машин: переход от двигателей с электромеханической коммутацией (двигатели постоянного тока) к двигателям переменного тока с коммутацией при помощи полупроводниковых преобразователей [3]. Наиболее перспективным типом двигателя переменного тока является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, который обладает важными преимуществами – простотой конструкции, надежностью, компактностью и относительно невысокой стоимостью [1].

Постановка задачи

При сохранении конструктивной схемы рудничного электровоза (рис. 1) необходимо разработать двухдвигательный асинхронный электропривод на базе конструкции известных и серийно производимых электродвигателей. Такой подход позволит осуществить типизацию технологического процесса, значительно снизить затраты на опытно-конструкторские работы, на изготовление и испытание опытных образцов и капитальные затраты на оборудование (штампы, оснастка, материалы и т. п.) при освоении серийного производства ТАД. Необходимо также разработать и систему управления ТАД, позволяющую повысить уровень основных эксплуатационных характеристик рудничного электровоза, таких как безопасность, надежность, энергоэффективность и функциональность [2, 4–7].

В данной работе не учитывалось возможное падение напряжения постоянного тока в длинных троллейных линиях до 30 % от номинала.

Для выбора базовой серии асинхронных двигателей разработаны критерии оценки, которые также учитывают требования ГОСТ [8, 9]:

- унификация конструкции рудничного электровоза;
- стойкость к внешним механическим воздействиям: вибрации, одиночным ударам;
- жесткость механической характеристики электродвигателя;

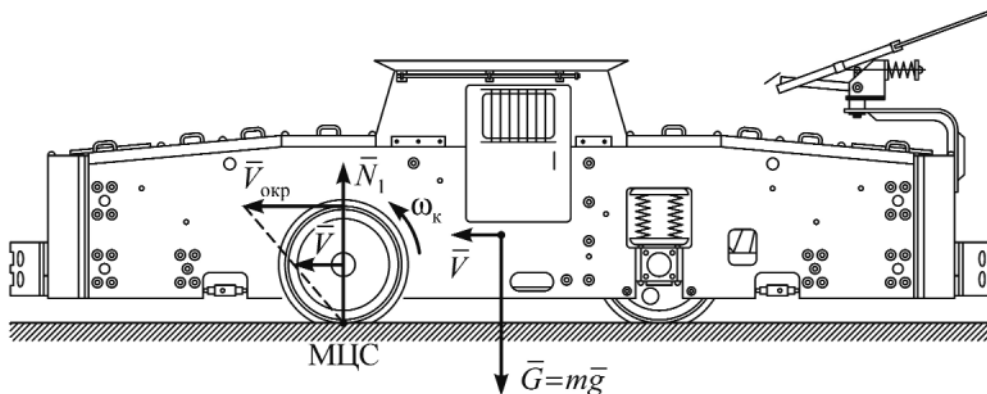


Рис. 1. Рудничный электровоз K14

Fig. 1. Mine electric locomotive K14

- высокая перегрузочная способность;
- высокая кратность пускового момента по отношению к номинальному моменту;
- высокая теплостойкость к длительным перегрузкам;
- компактность и относительно невысокая масса;
- минимальная стоимость в процессе разработки и серийном производстве.

Анализ свойств электродвигателей для подземной тяги

При выборе перспективной конструкции проведен анализ технических, массогабаритных и эксплуатационных показателей тягового двигателя прототипа. В качестве такого прототипа выбран тяговый двигатель постоянного тока (ДПТ) ДК-812 с последовательным возбуждением, который устанавливается на 14-тонные рудничные контактные электровазны типа К14, К14М, 14КР [10, 11].

Двигатель ДК-812 имеет два номинальных режима работы: S2 (часовой) и S1 (продолжительный). Основные номинальные показатели представлены в табл. 1 [12].

Эксплуатационные характеристики тягового ДПТ ДК-812 представлены ниже:

- двигатель выдерживает пуски током 270 А при номинальном напряжении и перегрузку двойным часовым током в течение 1 мин;
- класс вибрации – 4,5 по ГОСТ 16921–83;
- степень защиты – IP54 по ГОСТ 14254–80 с учетом встраивания в электроваз;
- способ охлаждения – 1С01 (самовентиляция) по ГОСТ 20459–87, при этом исключается прямое попадание воды в двигатель вместе с вентилируемым воздухом.
- гарантийный срок эксплуатации – 2 года со дня ввода;
- способ монтажа – М9403 по ГОСТ 2479–87;
- группа условий эксплуатации М27 по ГОСТ 17516.1–90.

Стальной корпус и монтаж с опорно-осевой подвеской, возможность крепления фланцем к корпусу редуктора обеспечивают жесткость конструкции тягового двигателя постоянного тока в составе электроваза и, несомненно, удовлетворяют требованиям экстремально высоких внешних механических воздействий. На этом фоне коллекторно-щеточный узел двигателя является наиболее уязвимой частью конструкции. При высоком уровне вибрации и одиночных ударов его работа будет характеризоваться повышенным износом щеток, высоким уровнем искрения, частыми профилактическими работами при обслуживании коллектора. Поэтому в настоящее время данный тип тяговых двигателей не является конкурентоспособным по надежности, по уровню безаварийности, по затратам при эксплуатации. Не отвечает современным требованиям и контактно-реостатная система управления.

При выборе перспективных двигателей отметим, что асинхронные двигатели общепромышлен-

ной серии в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам относятся к группе условий эксплуатации М1 ГОСТ 17516.1–90 и не выдержат величину однократных ударов и периодических механических воздействий при движении по рельсам, как регламентирует стандарт для группы эксплуатации М27 [13, 14].

Таблица 1. Характеристики ДПТ ДК-812

Table 1. Characteristics of DC motor DK-812

Режим работы Operational mode	S2 (часовой/hour)	S1 (длительный/long)
Напряжение, В Voltage, V	=250	
Мощность, кВт Power, kW	45	35
Частота вращения номинальная в режиме, (мин ⁻¹): Rotation per minute in nominal mode, (rpm):	1300	1480
Максимальная Maximum	4000	
Момент вращения, Н·м Torque, N·m	333	225
Ток якоря, А Armature current, A	=210	=162
КПД, % Efficiency, %	86	87,5
Тип возбуждения Excitation type	Последовательное Serial	
Масса, кг Weight, kg	460	

Наиболее близкими по условиям эксплуатации к тяговым двигателям являются серийные крановые асинхронные двигатели [15–17]. Они также предназначены для движения по рельсам, имеют стойкость к однократным ударам и более прочный корпус по сравнению с общепромышленными двигателями. Следует отметить, что в зависимости от фирмы производителя конструкции двигателей существенно разнятся.

Крановые электродвигатели [17] отличаются от других серийных аналогов наличием коробки выводов, которая прикреплена винтами к станине по аналогии с общепромышленными двигателями. Такая конструкция явно не выдержит механических воздействий при относительно высокой скорости движения электроваза по рельсам. Класс изоляции обмотки статора – F (155 °C).

Двигатели производителей [15, 16] обладают более предпочтительной конструкцией: корпус коробки выводов отлит заодно с прочной чугунной станиной, изоляция обмотки статора обладает классом нагревостойкости Н (180 °C). Обращают на себя внимание двигатели производителя [16]. Во-первых, в каталоге фирмы имеются двигатели близкой мощности с прототипом (ДК-812), мощностью 55 кВт, шести полюсные; во-вторых, на данном предприятии производят серию специальных крановых двигателей, которые предназначены для

работы только в составе частотно-регулируемого электропривода. Эта модификация в своем обозначении имеет шифр «2П». Обозначение двигателя – 4МТКМ2П225L6У1. Данный двигатель может выпускаться с самовентиляцией – IC411 по ГОСТ Р МЭК60034–6-2012; с независимой вентиляцией (с центробежным или осевым электровентилятором); со встроенными датчиками температурной защиты (терморезисторами или термоограничителями); с пристроенным датчиком скорости. Тип охлаждения и датчика скорости указывается при заказе [16]. Степень защиты двигателя от внешнего воздействия – IP54, кожух вентилятора – IP20, двигателя независимой вентиляции – не ниже IP44 по ГОСТ ИЕС 60034–5-2011.

У всех двигателей подшипник со стороны, противоположной приводу, зафиксирован от осевых смещений: по наружному кольцу – с помощью крышек подшипниковых и подшипникового щита; по внутреннему кольцу – с помощью пружинного упорного кольца на валу.

Основные номинальные показатели кранового двигателя 4МТКМ2П225L6 представлены в табл. 2 [16]. Масса двигателя приведена для монтажного исполнения IM2003: фланцевый крепеж с наличием лап и коническим рабочим концом вала. Обращает на себя внимание высокая величина крутящего момента кранового двигателя, его величина превосходит прототип более чем в 1,6 раза. Поэтому при векторном регулировании частоты вращения вверх от номинальной частоты величина крутящего момента при 1500 об/мин будет выше, чем у прототипа. Высокая и перегрузочная способность электрической машины, то есть по пусковым свойствам (скорости и времени разгона) крановый двигатель будет превосходить двигатель постоянного тока ДК-812.

Недостатком выбранного кранового двигателя является монтажное исполнение IM2003, которое не позволит обеспечить надежную эксплуатацию в части стойкости к механическим внешним воздействиям факторам для группы эксплуатации M27 по ГОСТ 17516.1–90.

Для решения данной проблемы можно воспользоваться опытом специалистов фирмы «СЭТК» [18]. Эта фирма выпускает крановые двигатели повышенной надежности при вибрационных нагрузках и ударах для вибростендов монтажного исполнения IM2003. Станина и подшипниковые щиты, и лапы в этих двигателях выполнены сварными из стальных листов. Цилиндрическая форма станины выполняется с помощью валков либо изготавливается из толстостенных труб определенного диаметра. Высокая надежность двигателей исполнения «ПНД» подтверждена многолетней эксплуатацией.

Для тягового двигателя электровозов на базе крановой серии целесообразно также изготавливать стальную станину. Способ монтажа на электровоз также необходимо унифицировать с прототипом. Кроме того, с опорно-осевой подвеской IM9403 без лап двигатель будет легче, а конструк-

ция – более жесткая. Технологически это не вызовет больших трудностей.

Таблица 2. Характеристики кранового асинхронного двигателя 4МТКМ2П225L6

Table 2. Characteristics of the crane induction motor MTKM2P225L6

Режим работы Operational mode	S2 (часовой/hour)	S1 (длительный/long)
Напряжение, В Voltage, V	~380	
Мощность, кВт Operational mode	55	33
Частота вращения номинальная в режиме, (мин ⁻¹): Rotation per minute in nominal mode, (rpm):	985	990
Максимальная Maximum	3800	
Момент вращения, Н·м Torque, N·m	533	318
Ток фазы статора, А Stator phase current, A	~114	~83,4
КПД, % Efficiency, %	90	88,5
cosφ	0,81	0,67
Перегрузочная способность M _{max} /M _n Overload capacity T _{max} /T _{nom}	3,4	
Масса, кг Weight, kg	464*	

*Указана масса при наличии лап (IM2003).

*Specified mass in the presence of paws (IM2003).

Теоретическое обоснование обеспечения предельно достижимого момента ТАД

Рассмотрим выражения для определения момента ТАД с питанием обмотки статора на пониженное напряжение. Для определения момента двигателя можно использовать выражение (1), известное из [19]:

$$M = 3 \frac{p U_n^2}{\omega_{0 \text{ эл.н}}} \times \frac{\bar{\omega}_p x_m^2 R_2}{(R_1 R_2 - \sigma \bar{\omega}_0 \bar{\omega}_p x_1 x_2)^2 + (R_2 \bar{\omega}_0 x_1 + R_1 \bar{\omega}_p x_2)^2}, \quad (1)$$

где R_1 , R_2 , x_m , x_1 , x_2 – параметры схемы замещения асинхронного двигателя; U_n – номинальное фазное напряжение; $\bar{\omega}_0$, $\bar{\omega}_p$ – относительное значение номинальной частоты переменного тока на обмотке статора и текущее значение частоты ЭДС ротора.

При переходе на другое, то есть пониженное, напряжение питания статорной обмотки двигателя необходимо пересчитать параметры его схемы замещения, умножив их на коэффициент пересчета $k = U^2 / U_n^2$.

Покажем, что количественное значение момента при переходе на другое напряжение не изменит-

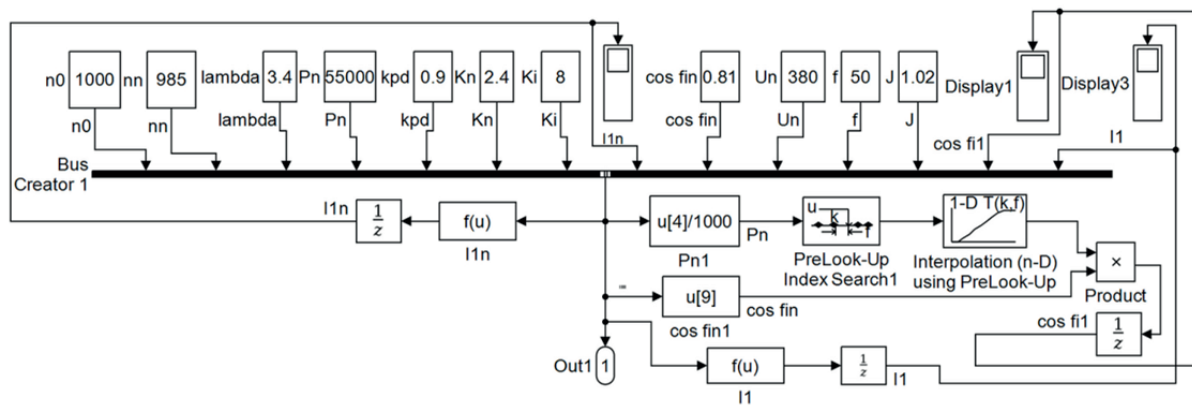


Рис. 2. Имитационная модель расчёта параметров схемы замещения асинхронного двигателя (блок ввода параметров двигателя)

Fig. 2. Simulation model for calculating the parameters of the induction motor equivalent circuit (motor parameters' input block)

ся. Для этого в выражение (1) введём пересчитанный коэффициент k :

$$M = 3 \frac{p k U_n^2}{\omega_{0 \text{ эл.н}}} \times \frac{\bar{\omega}_p k^2 x_m^2 k R_2}{(k R_1 k R_2 - \sigma \bar{\omega}_0 \bar{\omega}_p k x_1 k x_2)^2 + (k R_2 \bar{\omega}_0 k x_1 + k R_1 \bar{\omega}_p k x_2)^2}.$$

Выносим k в числителе и знаменателе за скобки:

$$M = 3 \frac{p U_n^2}{\omega_{0 \text{ эл.н}}} \times \frac{k^4 (\bar{\omega}_p x_m^2 R_2)}{k^4 [(R_1 R_2 - \sigma \bar{\omega}_0 \bar{\omega}_p x_1 x_2)^2 + (R_2 \bar{\omega}_0 x_1 + R_1 \bar{\omega}_p x_2)^2]}.$$

Полученное выражение (2) характеризует количественную неизменность механической характеристики асинхронного двигателя при работе на другом напряжении обмотки статора.

Подходы к определению параметров схемы замещения асинхронного двигателя указаны в работах [20, 21].

Таблица 3. Параметры схемы замещения двигателя 4МТКМ1Ф2П225Л6 55 кВт

Table 3. Equivalent circuit parameters of the motor MTKM2P225L6 55 kW

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Сопротивление обмотки статора R_s , Ом Resistance of stator winding R_s , Ohm	0,05759
Сопротивление обмотки ротора R_r , Ом Resistance of rotor winding R_r , Ohm	0,03559
Индуктивность рассеяния статора L_s , Гн Stator leakage inductance L_s , H	0,0004188
Индуктивность рассеяния ротора L_r , Гн Rotor leakage inductance L_r , H	0,0005719
Индуктивность контура намагничивания L_m , Гн Inductance of magnetization loop L_m , H	0,01045

Для определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя в *Simulink MatLab 2017a*

разработана имитационная модель по методике, опубликованной в [22].

На рис. 2 представлена схема ввода паспортных параметров асинхронного двигателя.

Результаты расчёта параметров схемы замещения сведены в табл. 3.

Разработка имитационной модели ТАД

Существуют различные подходы к построению имитационных моделей рельсовых транспортных средств [23, 24].

Для оценки статических и динамических свойств двигателя предлагается использовать имитационную модель, схема которой показана на рис. 3.

В последней версии *MatLab 2017a* модель асинхронного двигателя допускает включение обмотки статора, как в звезду, так и в треугольник. Этот фактор расширяет возможности исследований, что и использовано в настоящей статье. Вид включения обмотки статора определяет переключатель Two-Way Switch. При подаче на его вход управления сигнала амплитудой 1В обеспечивается соединение звездой, при нулевом сигнале управления – треугольником. Источник питающего трёхфазного напряжения *Voltage Source* обеспечивает установку любого значения частоты и напряжения. Для измерения действующего значения линейного трёхфазного напряжения используется датчик *Line Voltage Sensor*. Последовательно включенные элементы формируют действующее значение установленного напряжения. Измерение фазного тока осуществляет датчик *Current Sensor* при единичном значении коэффициента усиления блока *Gain1*. Формирование действующего значения обеспечивается последовательным включением указанных в схеме элементов с выходом датчика. Измерение тока статорной обмотки, включенной в треугольник, производится при коэффициенте усиления блока *Gain1*, равном 1/1,73. Измерение частоты вращения и момента двигателя производится блоком *Encoder*. По линии *trqMotor* передается значение измеряемого момента, по линии

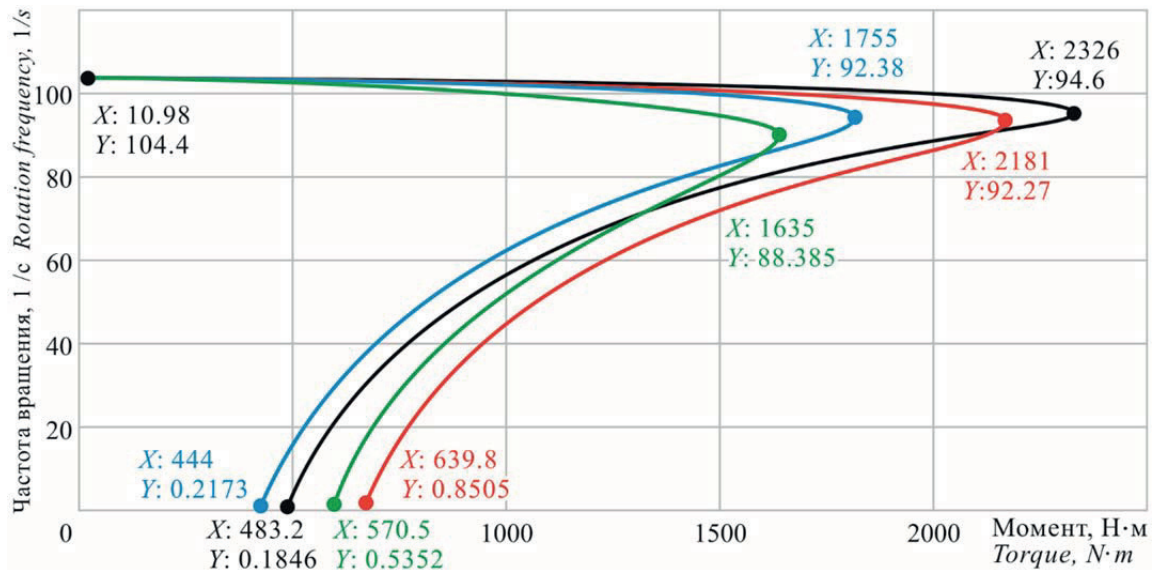


Рис. 4. Механические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225Л6: схема обмотки статора – «Δ» на напряжение 220 В: – и – с параметрами схемы замещения по обмоточным данным; – и – с параметрами схемы замещения по расчетным данным; – и – для температуры обмоток 20 °С; – и – для температуры обмоток 115 °С

Fig. 4. Mechanical characteristics of ITM 4MTKM1F2P225L6: triangle-scheme at voltage 220 V: – and – with parameters of the equivalent circuit for winding data; – and – with parameters of the equivalent circuit based on calculated data; – and – for winding temperature 20 °С; – and – for winding temperature 115 °С

На рис. 5 представлены электрохимические характеристики этого ТАД. По цвету характеристики полностью соответствует условиям моделирования механических характеристик, приведенных на рис. 4.

На рис. 6, а, представлены пусковые статические механические характеристики ТАД модели 4МТКМ1Ф2П225Л6 на 220 В и схемой обмоток статора «Δ» с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора. Характеристика синего цвета приведена для температуры обмоток 20 °С, а зеленого цвета – для нагретого двигателя 115 °С.

На рис. 6, б, представлены пусковые статические электрохимические характеристики этого же двигателя с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора. Характеристика черного цвета представлена для температуры обмоток 20 °С, а красного цвета – 115 °С.

На рис. 7, а, б, изображены статические механические и электрохимические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225Л6 с часовой мощностью 55 кВт на пониженное напряжение питания 178 В.

Динамические характеристики асинхронного двигателя снимаются при прямом включении на

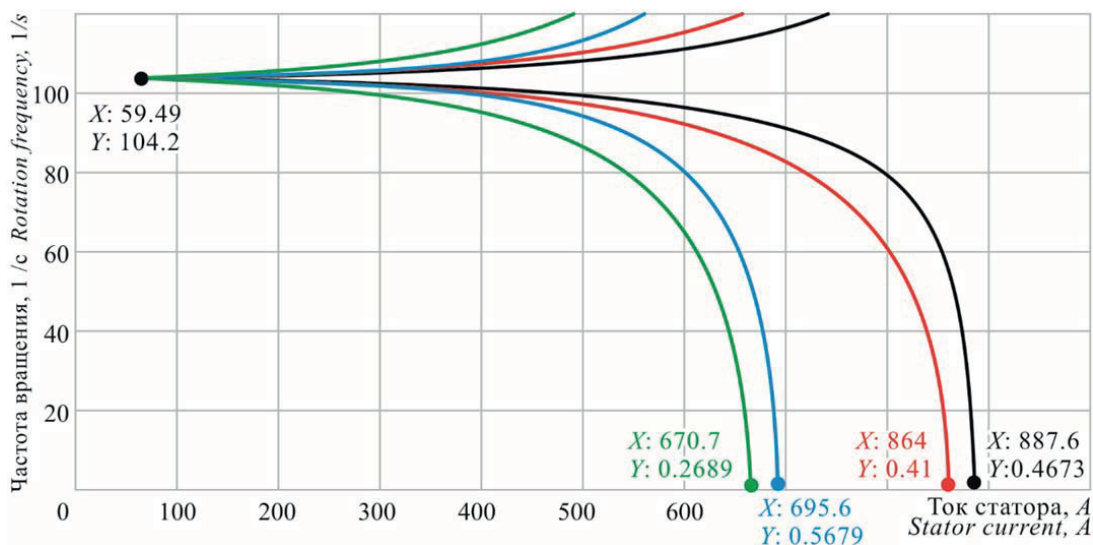


Рис. 5. Электрохимические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225Л6: схема обмотки статора – «Δ» на напряжение 220 В

Fig. 5. Electromechanical characteristics of the ITM 4MTKM1F2P225L6: triangle-scheme at voltage 220 V

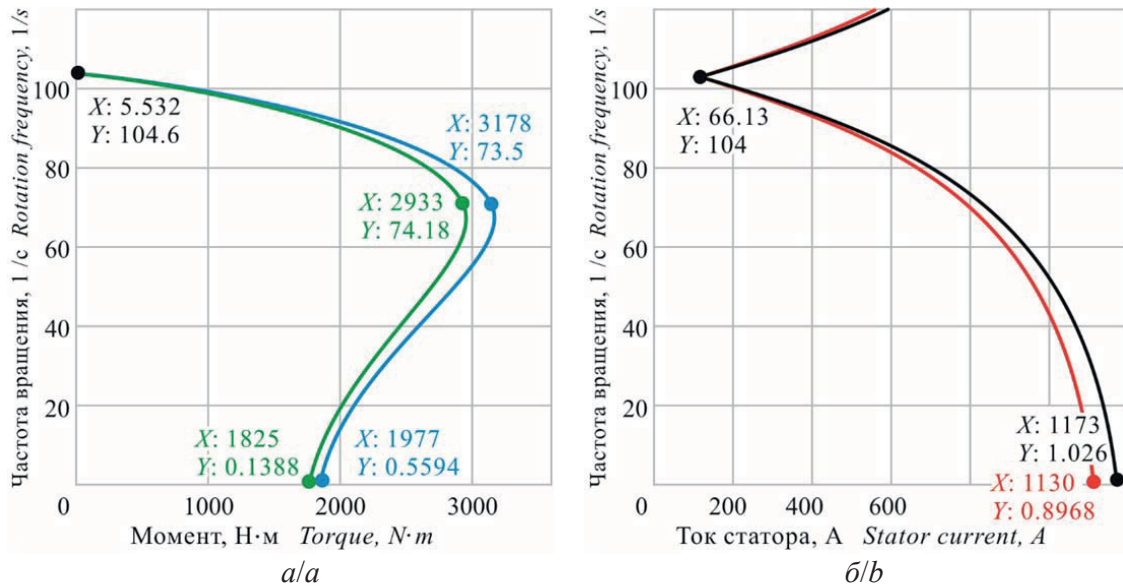


Рис. 6. Статические пусковые характеристики ТАД 4MTKM1F2P225L6 на 220 В с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора: а) механические; б) электромеханические

Fig. 6. Static inrush characteristics of the ITM 4MTKM1F2P225L6 at 220 V taking into account the magnetic circuit saturation in the machine and current displacement in the rotor winding: а) mechanical; б) electromechanical

номинальное напряжение. Для этого выполняется следующее изменение схемы модели (рис. 2): выход блока *Subsystem3 W* соединяется с входом блока *Simulink-PS Converter1*; выход блока *Clock* подключается к входу X графопостроителя *XY Graph*; на вход Y графопостроителя подаются исследуемые сигналы (частота вращения, момент или ток двигателя). Графопостроитель работает в режиме осциллографа.

На рис. 8, 9 представлены результаты имитационного моделирования прямого пуска двигателя с заводскими параметрами схемы замещения, схемой обмотки статора «Δ» на стандартное напряжение статора 220 В и пониженное напряжение 178 В. Черным цветом выделена зависимость от времени угловой скорости вала двигателя (n , об/мин); зеленым цветом – вращающего момента на валу (M , Н·м); и красным цветом – модуля результирующего вектора тока статора.

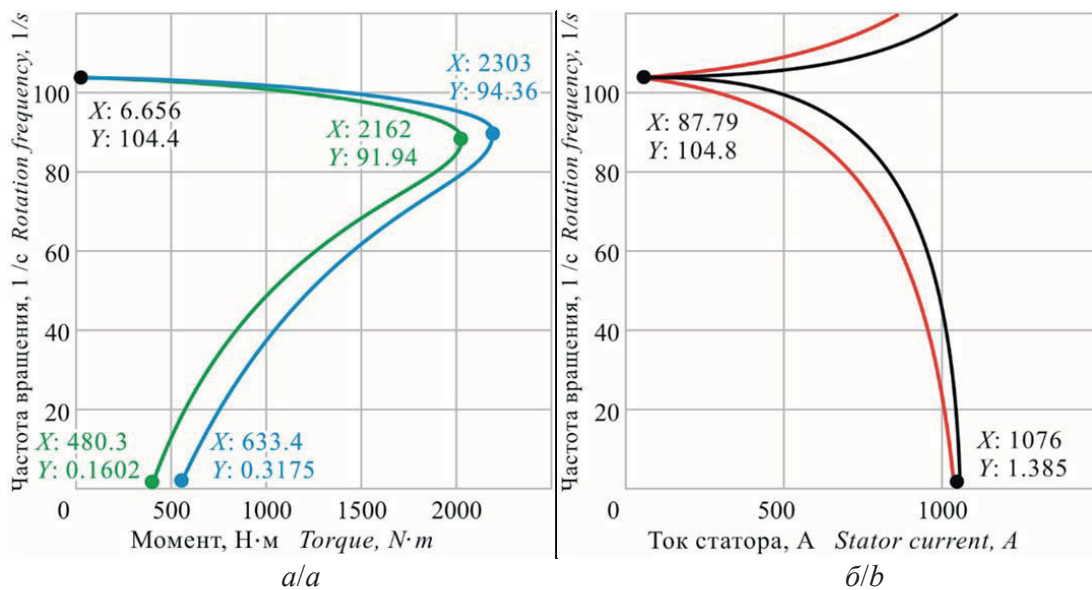


Рис. 7. Статические характеристики ТАД 4MTKM1F2P225L6 с часовой мощностью 55 кВт на пониженное напряжение питания 178 В при температуре обмотки 115 °С: механические; б) электромеханические

Fig. 7. Static characteristics of the ITM 4MTKM1F2P225L6 with 55 kW hourly power at low supply voltage 178 V: а) mechanical; б) electromechanical

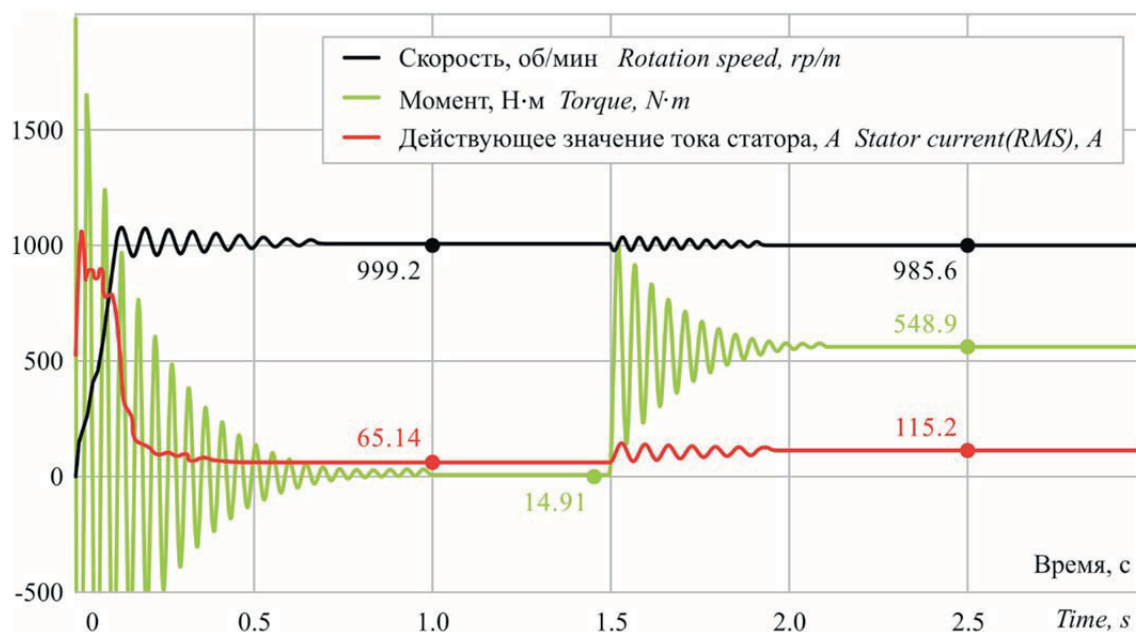


Рис. 8. Динамические характеристики прямого пуска ТАД с заводскими параметрами на стандартное напряжение 220 В и схемой соединения обмоток статора «Δ»

Fig. 8. Dynamic characteristics of direct ITM starting with the factory settings at standard voltage of 220 V and the triangle connection scheme of the stator windings' terminals

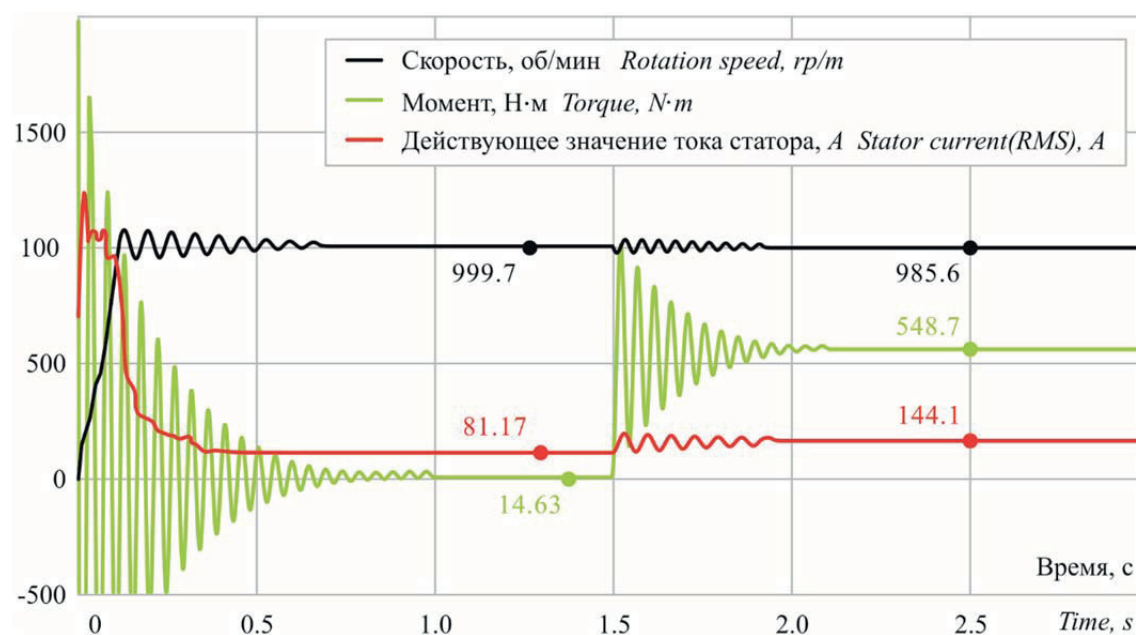


Рис. 9. Динамические характеристики прямого пуска ТАД с заводскими параметрами на пониженное напряжение 178 В и схемой соединения обмоток статора «Δ»

Fig. 9. Dynamic characteristics of direct ITM starting with the factory settings at low voltage of 178 V and the triangle connection scheme of the stator windings' terminals

Результаты исследований

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 4, 5, показывает, что максимальный статический момент ТАД напряжением 220 В с параметрами схемы замещения, полученными на основе обмоточных данных завода изготовителя кранового двигателя, примерно на 32...34 % больше момента двигателя с расчетными параметрами по паспортным

данным. Максимальный пусковой ток фазы статора также больше на 27,5...30 %, соответственно.

Максимальный момент ТАД при изменении температуры обмоток с 20 до 115 °С уменьшается незначительно, на 6,5...7,5 %.

Следовательно, предельные характеристики, полученные для двигателя с рассчитанными параметрами схемы замещения по паспортным дан-

ным, более характерны для общепромышленных асинхронных двигателей. Предельные характеристики ТАД на основе специального кранового двигателя с частотным управлением показывают, что обмотки этого двигателя спроектированы оптимальным образом не только для крановых механизмов, но и проявляют отличные тяговые свойства. Изменение тяговых свойств ТАД от температуры незначительно.

Ток холостого хода ТАД составляет 52 % от номинального тока. Это хорошо согласуется с режимами работы ТАД подземного электровоза. Грузовой состав дает нагрузку ТАД в пределах 100 %, а порожний состав грузит двигатели примерно наполовину.

Пусковые свойства ТАД представлены на рис. 6 с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора. Отношение пускового тока к номинальному току ТАД лежит в пределах 10:1. Отношение максимального момента к пусковому моменту ТАД составляет 1,6:1.

Статические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 с часовой мощностью 55 кВт с обмоткой статора и ротора, пересчитанной на пониженное напряжение питания 178 В, представлены на рис. 7. Максимальный момент ТАД с пониженным напряжением обмотки статора 178 В не отличается от момента ТАД на стандартное напряжение 220 В. При этом ток фазы статора вырос на 24,5 %.

Динамические характеристики прямого пуска ТАД с последующим «набросом» нагрузки приведены на рис. 8, 9. Характер переходных процессов и установившихся значений моментов, токов и скорости находится в пределах выявленных зависимостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов П.Р. и др. Исследование характеристик тяговых асинхронных двигателей для частотно-управляемого рудничного электровоза // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 212–216.
2. Studying Characteristics of Traction Induction Motors for Variable-Speed Mine Electric Locomotive / P.R. Baranov, S.N. Kladiyev, S.V. Borisov, A.A. Filipas // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 770. – P. 378–383.
3. Вопросы линеаризации математической модели преобразователя напряжения, применяемого в системах электропитания, работающих на основе возобновляемых источников энергии / Р.К. Диксон, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, В.А. Русский, С.М. Семенов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – P. 89–99.
4. Самотканов А.В. Комплексная математическая модель вспомогательного электропривода тепловоза // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский госу-

Выводы

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что для обеспечения необходимых тяговых свойств частотно-регулируемого асинхронного двигателя необходимо решить комплекс задач в условиях ограничения величины напряжения в питающей троллейной линии:

1. В качестве прототипа тягового асинхронного двигателя для подземных электровозов необходимо использовать специальный крановый частотно-регулируемый двигатель производства ОАО «Сибэлектромотор».
2. Необходимо применять устройства компенсации падения напряжения на 30 % в длинной линии путем использования последовательной вольтодобавки постоянного тока для двухдвигательного частотно-регулируемого тягового электропривода. В этом случае для обеспечения требуемой тяги нужно использовать специально спроектированный тяговый асинхронный двигатель с пониженным напряжением питания.
3. В случае использования последовательной вольтодобавки, компенсирующей не только падения напряжения, но и его увеличение на 70 %, возможно использовать тяговые асинхронные двигатели со стандартным напряжением статора.
4. С учетом жестких требований по вибростойкости и ударопрочности необходимо использовать стальной сварной корпус двигателя с дополнительными опорами.
5. В случае использования в качестве источника питания аккумуляторных батарей, при использовании герметичных вводов, можно получить взрывозащищенное исполнение данного электрооборудования.

- дарственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 216–220.
5. Самотканов А.В., Воробьев В.И., Пугачев А.А. Передаточная функция вспомогательного электропривода тепловоза // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 220–223.
 6. Федяева Г.А., Тарасов А.Н. Система управления асинхронным тяговым электроприводом гибридного маневрового тепловоза // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 223–226.
 7. Development of a system to control the motion of electric transport under conditions of iron-ore mines / O. Sinchuk, I. Kozakevich, V. Fedotov, A. Somochkyn, V. Serebrennikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2017. – V. 3. – Iss. 2. – P. 39–47.
 8. ГОСТ 2582–2013 «Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия». – М.: Стандартинформ, 2014. – 56 с.

9. ГОСТ Р 52776–2007 (МЭК 60034–1–2004) «Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики». – М.: Стандартинформ, 2008. – 74 с.
10. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. – М.: Недра, 1981. – 389 с.
11. Development aspects of asynchronous electrotechnical complex for mine pin-storage-battery electric locomotives / O.N. Jurchenko, I.O. Sinchuk, Je.S. Guзов, D.A. Shokarev, E.I. Skapa // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2015. – V. 1. – Iss. 8. – P. 21–26.
12. Сайт предприятия «Горная компания». Технические характеристики электродвигателя ДК-812. URL: <http://www.1gc.ru/oborudovanie-dlya-rudnichnyh-elektrovozov/electrodvigatel-dk-812> (дата обращения: 01.09.2017).
13. ГОСТ 17516.1–90 «Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействиям». – М.: Стандартинформ, 2007. – 53 с.
14. Wang Y., Liu J.-X. Vibration properties of locomotive traction gear excited by load fluctuation // Journal of Traffic and Transportation Engineering – 2015. – V. 15. – P. 45–50.
15. Сайт предприятия «Бавленский электромеханический завод». Каталог крановых двигателей на лапах с одним концом вала (IM 1001). URL: <http://www.bavemz.ru/products/5/> (дата обращения: 01.09.2017).
16. Сайт предприятия «Сибэлектромотор». URL: <http://www.sib-elektromotor.ru> (дата обращения: 01.09.2017).
17. Сайт предприятия «Русэлпром». Технический каталог крановых двигателей. URL: <http://www.ruselprom.ru> (дата обращения: 01.09.2017).
18. Сайт предприятия «Сибирская электротехническая компания». URL: <http://setc.ru> (дата обращения: 01.09.2017).
19. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: ИЦ «Академия», 2006. – 272 с.
20. Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Brendakov V.N. The influence of the design method for induction motor with stationary rotor on identification of its parameters // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proceedings. – Omsk, 2015. – P. 1–7.
21. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Document Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms // 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012. – Tomsk, 2012. – V. 2. – P. 586–589.
22. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (MatLab 7.0.1). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.
23. Fleischer M., Kondo K. Reduced Model Identification and Parameter Estimation for Traction Drive-Trains // IEEJ Journal of Industry Applications – 2015. – V. 4 – Iss. 4. – P. 486–495.
24. Kladiev S., Pyakillya B., Vilnin A. Mathematical model of traction electric drive for mine electric train // Smart Grids: the 2nd International Youth Forum. – 2014. – V. 19. DOI: 10.1051/mateconf/20141901040
25. Locomotive wheel slip detection based on multi-rate state identification of motor load torque / S. Wang, J. Xiao, J. Huang, H. Sheng // Journal of the Franklin Institute – 2016. – V. 353. – Iss. 2. – P. 521–540.
26. Sliding mode control of longitudinal motions for underground mining electric vehicles with parametric uncertainties / W. Ye, W. Shen, J. Zheng, D. Honnery, D. Dayawansa // International Journal of Modelling, Identification and Control. – 2016. – V. 26. – Iss. 1. – P. 68–78.
27. Fuzzy parameter tuning sliding mode control for longitudinal motion of underground mining electric vehicles based on a single wheel model / W. Ye, W. Shen, J. Zheng, D. Honnery, D. Dayawansa // International Conference on Advanced Mechatronic Systems. – Melbourne, Australia, 2016. – P. 283–288.
28. Analysis of variants of differential torque control applied to induction motor with short-circuited rotor / A.E. Evstratov, V.M. Zavyalov, A.V. Grigoryev, I.Y. Semykina // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – V. 11 (7). – P. 4391–4398.

Поступила 19.09.2017 г.

Информация об авторах

Арсентьев О.В., кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электропривода и электрического транспорта Института энергетики Иркутского Национального исследовательского технического университета.

Баранов П.Р., кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и материалов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Вильнин А.Д., заведующий научно-учебной лабораторией геоинформационных технологий Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кладиев С.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 62–831.1:621.313.333.2:621.333

EVALUATIVE RESEARCH OF INDUCTION TRACTION ELECTRIC MOTOR WITH LOW-LEVEL POWER SUPPLY FOR MINE LOCOMOTIVE

Oleg V. Arsentiev¹,
arsentyevov@mail.ru

Pavel R. Baranov²,
baranovp@tpu.ru

Alexander D. Vilnin²,
vilninad@tpu.ru

Sergey N. Kladiev²,
kladiev@tpu.ru

¹ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to solve the problem of ensuring energy-efficient operation modes of traction electric drives of underground locomotive used to transport metal ore in ferrous and nonferrous mines from the place of mining to place of storage for further transportation to the surface. One of the main tasks of underground rail transport is to reach marginal traction characteristics of variable-frequency induction motors in conditions of limited magnitude of supply voltage of the contact network DC of underground transport for electrical safety reasons.

The aim of the work is to study the possibility of using induction motors with reduced voltage power supply for traction electric underground mining locomotives; to determine the conditions of conformity of mechanical characteristics of induction traction motor with reduced voltage regarding the characteristics of a standard voltage.

Object of research: traction induction motor with reduced supply voltage, increased tractive effort and low sensitivity to vibration and shocks.

Research methods. The research was performed by analyzing the analytical dependences of induction motor characteristics and simulation results in the Simulink/MatLab. The comparison was carried out at static and dynamic characteristics, energy performance and structural features of the considered motors.

Results. A special crane induction motor, produced by «Sibelectromotor», designed for frequency regulation of speed, was selected as a prototype of induction traction motor. The paper introduces the method for calculating the equivalent circuit parameters of induction traction motor by passport data at reduced voltage to the stator; its simulation model was designed. The principal mechanical and electromechanical properties and characteristics of traction induction motor with the switching scheme of connection of phase windings of the stator from the «star» to «triangle», recalculated to a low voltage, correspond to characteristics of induction traction motor with standard voltage. To ensure vibration and shock resistance the authors justified a change in the design of induction traction motor with replacement of cast iron housing on the welded steel housing with additional supports for fixing to the frame of the locomotive.

Key words:

Induction traction motor, mine locomotive, equivalent circuit parameters, mechanical characteristics, lower supply voltage.

REFERENCES

1. Baranov P.R. Issledovanie kharakteristik tyagovykh asinkhronnykh dvigateley dlya chastotno-upravlyаемого rudnichnogo elektrovoza [Study of characteristics of induction traction motors for frequency-controlled mine locomotive]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) nauchno-tehnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proc. of VIII International (XIX all-Russian) scientific-technical conference on automated electric drive of AEP-2014]. Saransk, N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, 2014. pp. 212–216.
2. Baranov P.R., Kladiev S.N., Borisov S. V., Filipas A.A. Studying Characteristics of Traction Induction Motors for Variable-Speed Mine Electric Locomotive. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 378–383.
3. Dixon R.C., Mikhachenko G.Ya., Mikhachenko S.G., Ruskin V.A., Semenov S.M. Issues of linearization of a two-phase boost DC-DC converter applied in the power supply systems operating on renewable energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 89–99.
4. Samotkanov A.V. Kompleksnaya matematicheskaya model vspomogatel'nogo elektroprivoda teplovoza [A comprehensive mathematical model of the auxiliary electric drive of diesel locomotive]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) nauchno-tehnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proc. of VIII International (XIX all-Russian) scientific-technical conference on automated electric drive of AEP-2014]. Saransk, N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, 2014. pp. 216–220.
5. Samotkanov A.V., Vorobev V.I., Pugachev A.A. Peredatochnaya funktsiya vspomogatel'nogo elektroprivoda teplovoza [The transfer function of the auxiliary electric drive of diesel locomotive]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) nauchno-tehnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proc. of VIII International (XIX all-Russian) scientific-technical conference on automated electric drive of AEP-2014]. Saransk, N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, 2014. pp. 216–220.

- tific-technical conference on automated electric drive of AEP-2014]. Saransk, N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, 2014. pp. 220–223.
6. Fedyaeva G.A., Tarasov A.N. Sistema upravleniya asinkhronnym tyagovym elektropriivodom gibridnogo manevrovogo teplovoza [The control system of the induction traction electric drive hybrid shunting locomotives]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vse-rossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropriivodu AEP-2014* [Proc. of VIII International (XIX all-Russian) scientific-technical conference on automated electric drive of AEP-2014]. Saransk, N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, 2014. pp. 223–226.
7. Sinchuk O., Kozakevich I., Fedotov V., Somochkyn A., Serebrenikov V. Development of a system to control the motion of electric transport under conditions of iron-ore mines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 3, Iss. 2, pp. 39–47.
8. GOST 2582–2013 Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskiye usloviya [State Standard 2582–2013. Rotating electrical traction machines for rail and road vehicles. General technical specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 10 p.
9. GOST R 52776–2007 (MEK 60034–1–2004) Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiesya. Nominalnye dannye i kharakteristiki [State Standard R 52776–2007 (IEC 60034–1–2004). Rotating electrical machines. P. 1. Rating and performance]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 74 p.
10. Volotkovskiy S.A. Rudnichnaya elektrovoznaya tyaga [Mine locomotive traction]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 389 p.
11. Jurchenko O.N., Sinchuk I.O., Guzev Ye.S., Shokarev D.A., Skapa E.I. Development aspects of asynchronous electrotechnical complex for mine pin-storage-battery electric locomotives. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, vol. 1, Iss. 8, pp. 21–26.
12. Tekhnicheskiye kharakteristiki elektrodvigatelja DK-812 [Technical characteristics of electric motor DK-812]. *Gornaya kompaniya*. Available at: <http://www.lgc.ru/oborudovanie-dlya-rudnichnyh-elektrovozov/elektrodvigatel-dk-812> (accessed 01 September 2017).
13. GOST 17516.1–90 Izdeliya elektrotekhnicheskoye. Obshchie trebovaniya v chasti stoykosti k mekhanicheskim vneshnim vozdeystviyam [State Standard 17516.1–90 Electrical articles. General requirement for environment mechanical stability]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 53 p.
14. Wang Y., Liu J.-X. Vibration properties of locomotive traction gear excited by load fluctuation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, vol. 15 (6), pp. 45–50.
15. Katalog kranovykh dvigateley na lapakh s odnim kontsom vala (IM 1001) [Catalogue of crane motors with feet and one sided shaft (IM 1001)]. *Bavlenkiy elektromekhanicheskiy zavod*. Available at: <http://www.bavemz.ru/products/5/> (accessed 01 September 2017).
16. *Sibelektromotor*. Available at: <http://www.sibelektromotor.ru> (accessed 01 September 2017).
17. Tekhnicheskiy katalog kranovykh dvigateley [Crane motor technical catalogue]. *Ruselprom*. Available at: <http://www.ruselprom.ru> (accessed 01 September 2017).
18. *Sibirskaya elektrotekhnicheskaya kompaniya*. Available at: <http://setc.ru> (accessed 01 September 2017).
19. Sokolovskiy G.G. *Elektropriivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC-drives with frequency regulation]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 272 p.
20. Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Brendakov V.N. The influence of the design method for induction motor with stationary rotor on identification of its parameters. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*: proceedings. Omsk, 2015. pp. 1–7.
21. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Document Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms. *7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012*. Tomsk, 2012. Vol. 2, pp. 586–589.
22. Terekhin V.B. *Modelirovaniye sistem elektropriivoda v Simulink (MatLab 7.0.1)* [Simulation of electric drive systems in Simulink (MatLab 7.0.1)]. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. 292 p.
23. Fleischer M., Kondo K. Reduced Model Identification and Parameter Estimation for Traction Drive-Trains. *IEEE Journal of Industry Applications*, 2015, vol. 4, Iss. 4, pp. 486–495.
24. Kladiev S., Pyakillya B., Vilnin A. Mathematical model of traction electric drive for mine electric train. *The 2nd International Youth Forum. Smart Grids*, 2014. Vol. 19. DOI: 10.1051/mateconf/20141901040
25. Wang S., Xiao J., Huang J., Sheng H. Locomotive wheel slip detection based on multi-rate state identification of motor load torque. *Journal of the Franklin Institute*, 2016, vol. 353, Iss. 2, pp. 521–540.
26. Ye W., Shen W., Zheng J., Honnery D., Dayawansa D. Sliding mode control of longitudinal motions for underground mining electric vehicles with parametric uncertainties. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2016, vol. 26, Iss. 1, pp. 68–78.
27. Ye W., Shen W., Zheng J., Honnery D., Dayawansa D. Fuzzy parameter tuning sliding mode control for longitudinal motion of underground mining electric vehicles based on a single wheel model. *International Conference on Advanced Mechatronic Systems*. Melbourne, Australia, 2016. pp. 283–288.
28. Evstratov A.E., Zavyalov V.M., Grigoryev A.V., Semykina I.Y. Analysis of variants of differential torque control applied to induction motor with short-circuited rotor. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11 (7), pp. 4391–4398.

Received: 19 September 2017.

Information about the authors

Oleg V. Arsentiev, Cand. Sc., associate professor, head of department, Irkutsk National Research Technical University.

Pavel R. Baranov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander D. Vilnin, head of laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.