

Васильев Богдан Юрьевич^{1,*}, канд. техн. наук, доцент, **Григорьев Павел Сергеевич**², инженер-конструктор

¹Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2

²ПАО «Силовые машины», 195009, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ватутина, д.3, Лит.А

*E-mail: vasilev.bu@yandex.ru

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ТРАНСМИССИЯ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

Аннотация: Предметом исследования являются электромеханические трансмиссии карьерных самосвалов, которые обеспечивают все режимы перемещения данного вида карьерной техники.

Цель работы заключается в разработке электромеханической трансмиссии карьерного самосвала, отвечающей высоким требованиям по унификации и надежности, обеспечивающей ресурсосбережение при ее создании и в процессе эксплуатации. Главной задачей является оптимальный выбор компонентов, на базе которых строится электромеханическая трансмиссия, а также изучение их влияния друг на друга.

Для выполнения исследования разработанной электромеханической трансмиссии использовались методы математического и имитационного моделирования в математическом пакете прикладных программ. Создана комплексная имитационная модель, которая включает: источник электроэнергии; преобразователь частоты в составе активного выпрямителя (преобразователь энергии и устройство возбуждения) и автономных инверторов напряжения; асинхронные двигатели. Имитационная модель снабжена блоками осциллографирования и анализа электрических переменных электромеханической трансмиссии.

Исследование имитационной модели электромеханической трансмиссии показывает строгое соответствие скоростных характеристик как приводных двигателей, так и карьерного самосвала в целом. Обеспечиваются разгон транспортного средства до номинальной скорости при полной загрузке, торможение на склоне, разворот. Электрические параметры электромеханической трансмиссии соответствуют заданию, контроль переменных приводных двигателей во всех режимах работы обеспечивается на должном уровне.

Ключевые слова: электропривод, ресурсосбережение, энергосбережение, электромеханическая трансмиссия

Информация о статье: принята 01 июня 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-2-15-21

Введение. Современные карьерные самосвалы (КС) являются высокотехнологичными и надежными машинами. Современная горная промышленность предъявляет все более высокие требования к карьерной технике, что обусловлено ростом объемов добычи полезных ископаемых, а также увеличением глубины горных предприятий. В связи с этим растут и единичная мощность, грузоподъемность, скорость передвижения транспортных средств. Рост габаритов КС за последнее десятилетие привел к постепенному отказу производителей от «классического» варианта - гидромеханической трансмиссии транспортного средства. КС грузоподъемностью более 100 тонн (рисунок 1) оснащаются преимущественно дизель-электрическими трансмиссиями переменного тока [1,2,3], которые обеспечивают следующие режимы работы транспортного средства:

- движение по горизонтальной поверхности, спуск и подъем по наклонной трассе с пустым и груженым кузовом;

- плавное трогание с места, в том числе на наклонной поверхности, с пустым и груженым кузовом;

- разворот самосвала, реализация электрического дифференциала;

- удержание самосвала в неподвижном состоянии, в том числе на наклонной поверхности, без применения механических тормозов [2].

Жесткие условия работы КС требуют обеспечения высоких показателей надежности и ремонтпригодности, экономичности и простоты изготовления электромеханических трансмиссий (ЭМТ). Таким образом, именно от выбора структуры и компонентов ЭМТ зависит эффективность работы машины, затраты на ее эксплуатацию и обслуживание.

На сегодняшний день в составе ЭМТ КС применяются разнообразные электрические машины и



Рис. 1. БелАЗ-75710 на руднике
Fig. 1. BelAZ-75710 at the mine

устройства распределения потоков мощности. В качестве последних в основном используются преобразователи частоты (ПЧ), которые осуществляют частотную развязку электрических генераторов и приводных двигателей [1,4,5]. Таким образом, генераторы работают на номинальных частотах вращения, ПЧ осуществляют управление переменными приводных двигателей: частотой вращения, моментом на валу.

В настоящей статье представлены результаты разработки и исследования ресурсосберегающей ЭМТ КС, построенной на основе асинхронных электрических машин, активного выпрямителя (АВ), автономного инвертора напряжения (АИН).

Постановка задачи. В современных условиях наиболее актуальными вопросами для машиностроительной отрасли являются снижение материалоемкости и обеспечение высокого уровня унификации выпускаемой продукции, упрощение производства и ремонта. Для горной промышленности важнейшим критерием остается повышение надежности и снижение стоимости эксплуатации карьерной техники. Эти задачи могут быть решены рациональным выбором элементов конструкции ЭМТ, а также минимизацией числа функциональных звеньев, совмещением функций различных элементов. Рассмотрим существующие решения в области ЭМТ КС.

Возможности развития. ЭМТ современных КС строятся по общей схеме: тепловой двигатель, электрогенератор, преобразователь частоты, тяговые двигатели, механическая передача, колеса. Ниже рассмотрим наиболее перспективные структуры ЭМТ.

Существует ЭМТ КС БелАЗ 75581 следующего состава (рисунок 2): двухкомплектный синхронный генератор (СГ) с бесщеточной системой возбуждения - 12-пульсный диодный выпрямитель (ДВ) - звено постоянного тока (ЗПТ) - АИН - асинхронные двигатели (АД) [2,6].

Возможна реализация ЭМТ КС на следующей элементной базе. Применяются синхронный генератор (СГПМ) и синхронные двигатели (СДПМ) с постоянными магнитами на роторе [7]. Данная структура хорошо показала себя в составе приводов гибридных транспортных средств, а также в корабельных гребных системах. Структура ЭМТ поясняется рисунком 3.

В [8,9,10] рассмотрены структуры и возможности ЭМТ на базе вентильно-индукторных электри-

ческих машин. Данный тип машин используется как в качестве генератора (ВИГ), так и в качестве тяговых двигателей (ВИД). Более подробно структура ЭМТ раскрыта на рисунке 4.

Сравнение рассмотренных вариантов ЭМТ приведено в таблице 1. Причина высокой стоимости ЭМТ на машинах с постоянными магнитами кроется в цене на редкоземельные металлы, кроме того, сложны и трудоемки технологии крепления магнитов к ротору и их охлаждение в процессе работы. Относительно низкая стойкость к авариям объясняется сложностью гашения поля ротора синхронной машины в случае КЗ обмоток статора, кроме того, частой причиной выхода из строя становится разрушение магнитов ротора. Разработка и наладка аналогична по сложности ЭМТ с СГ и АД. Применение автономного инвертора тока (АИТ) повышает качество управления моментом СДПМ, но вместе с тем увеличивается инерционность управления. Высокий КПД синхронных машин и широкие возможности унификации силовой части ЭМТ являются преимуществом. [11]

При низкой стоимости изготовления ЭМТ с вентильно-индукторными машинами уступает конкурентам в стоимости разработки и наладки, что обусловлено высокой сложностью алгоритма системы управления (СУ). Относительно высокая стойкость к авариям объясняется отсутствием связей между статорными обмотками машин, что позволяет сохранить работоспособность при выходе из строя некоторого числа фаз (n). Высокая степень унификации является преимуществом. Несмотря на это, остается неизвестным фактический ресурс ЭМТ, так как КС на ее основе только вводится в эксплуатацию. Затраты на текущий ремонт минимальны, требуется регулярное обслуживание подшипниковых узлов.

Подтвержденный высокий ресурс, низкая стоимость реализации и эксплуатации являются значительными преимуществами ЭМТ с СГ и АД. От аналогов данную ЭМТ отличают низкая сложность алгоритма СУ, а также максимальное использование мощности СГ [2,6]. Структура ЭМТ обеспечивает необходимый уровень надежности и резервирования, однако вопросы вызывает стойкость к авариям. По сравнению с аналогами ЭМТ отличается низким уровнем унификации и требовательна к обслуживанию. Габариты и масса СГ увеличены из-за использования двух комплектов обмоток статора.

По результатам проведенного анализа сформулированы следующие требования к структуре энергоэффективной ЭМТ КС: высокая степень унификации обеспечивается за счет использования одного типа электрических машин; используемые электрические машины должны обладать высокой надежностью; выпрямитель ПЧ совмещает функции преобразователя электрической энергии и устройства возбуждения генератора; обеспечивается простота и технологичность изготовления, обусловленная выбором элементов ЭМТ.

Разработанная схема представлена на рисунке 5. Она содержит: ДД – асинхронный генератор (АГ) – активный выпрямитель – ЗПТ – АИН – АД.

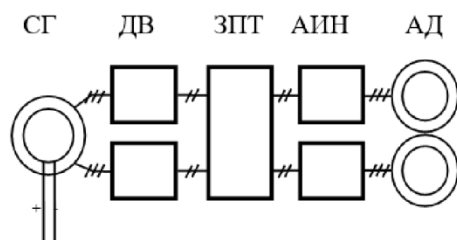


Рис. 2. ЭМТ КС БелАЗ
Fig. 2. EMT of MT BelAZ

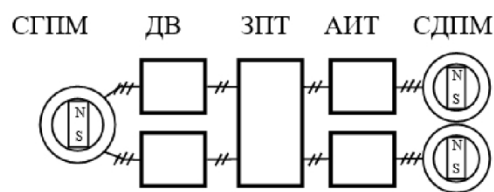


Рис. 3. ЭМТ с постоянными магнитами
Fig. 3. EMT with permanent magnets

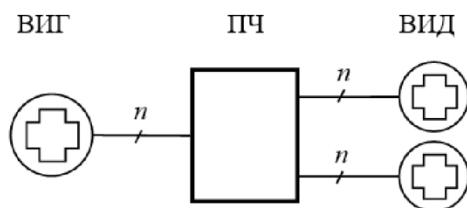


Рис. 4. Вентильно-индукторная ЭМТ
Fig. 4. Switched-reluctance EMT

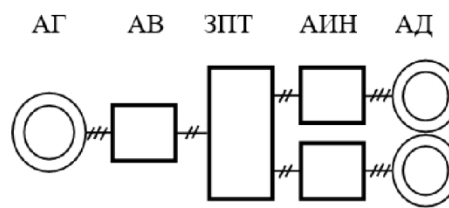


Рис. 5. Проект ЭМТ
Fig. 5. EMT project

Таблица 1. Сравнение структур ЭМТ КС.

Table 1. The comparison of EMT structures.

Параметр / тип ЭМТ	СГ+АД	СГПМ+СДПМ	ВИГ+ВИД
стоимость разработки	низкая	средняя	высокая
стоимость изготовления	средняя	высокая	низкая
стоимость наладки	низкая	средняя	высокая
стоимость обслуживания	средняя	средняя	низкая
ресурс	высокий	средний	нет данных
уровень унификации	низкий	средний	высокий
стойкость к авариям	средняя	низкая	высокая
масса и габариты	большие	малые	средние

Теоретические исследования. На этапе разработки проведен полный комплекс работ по математическому и имитационному моделированию. Математическое описание ЭМТ строится на основе [12,13,14,15,16].

В имитационной модели ЭМТ используются блоки, которые обеспечивают преобразование измеряемых токов и напряжений из статической трехфазной системы координат ABC во вращающуюся dq . Для стабилизации выходного напряжения АВ введены регуляторы (1), где $K1, K2$ - коэффициенты для компенсации перекрестных связей. Для управления транзисторами АВ произведено обратное преобразование в систему ABC .

$$U_d = -K1(I_{sdz} - I_{sd}) / \Delta T + \omega L I_{sq} + U_{sm}$$

$$U_q = -K2(I_{sqz} - I_{sq}) / \Delta T - \omega L I_{sd} \quad (1)$$

СУ АВ представлена на рисунке 6 и состоит из следующих элементов: $U_{dc\ set}, I_{sq\ set}$ - источники установки по напряжению ЗПТ и реактивной составляющей тока соответственно; $Control\ U_0$ - регулятор величины напряжения ЗПТ; $Control\ I_{sd}, I_{sq}$ - регуляторы активной и реактивной составляющих тока генератора соответственно; $Control\ U_{db}, U_q$ -

регуляторы активной и реактивной составляющих выходного напряжения АВ соответственно.

СУ АД (рисунок 7) построена аналогично СУ АВ. Для правильной работы вычисляются коэффициент усиления K_μ и постоянная времени T_μ АИН (2).

$$K_\mu = \frac{U_{sm}}{U_s^*}; T_\mu = \frac{1}{f_{set}} \quad (2)$$

Значения коэффициентов обратных связей W_n приняты в соответствии с (3).

$$W_i(p) = K_i = 1$$

$$W_f(p) = K_f = 1$$

$$W_{sp}(p) = K_{sp} = 1 \quad (3)$$

Вычисляются коэффициент усиления K_{ri} и постоянная времени T_{ri} ПИ-регуляторов потокообразующего и моментобразующего тока (4), а также регулятора потокоцепления (K_{rf} и T_{rf}) (5), кроме того, регулятора частоты вращения (K_{rs} и T_{rs}) (6).

$$K_{ri} = \frac{R_d T_d}{2 T_\mu K_\mu K_i}; T_{ri} = \frac{2 T_\mu K_\mu K_i}{R_d} \quad (4)$$

$$K_{rf} = \frac{K_i T_r}{4T_\mu K_f L_\mu}; T_{rf} = \frac{4T_\mu K_f L_\mu}{K_i} \quad (5)$$

$$K_{rs} = \frac{L_r J K_i}{3zT_\mu K_{sp} L_\mu}; T_{rs} = 4T_\mu \quad (6)$$

Уставка канала регулирования потокоцепления ротора соответствует номинальному уровню потокоцепления.

Система состоит из следующих элементов: w_{set} , F_{set} – источники уставки по частоте вращения и потокоцеплению соответственно; *Control speed* – регулятор частоты вращения АД; *Control torque, flux* – регуляторы момента и потокоцепления АД соответственно; *Control current1,2* – регуляторы потоков и моментобразующего токов АД соответственно.

Имитационная модель ЭМТ представлена на рисунке 8. Она содержит следующие блоки: *Generator* – модель источника электроэнергии (АГ), *Measurement1,2,3* – блок измерителей напряжения и тока; *Choke* – трехфазный дроссель; *Active rectifier* – АВ; *DC-bus* – ЗПТ с устройством предварительного за-

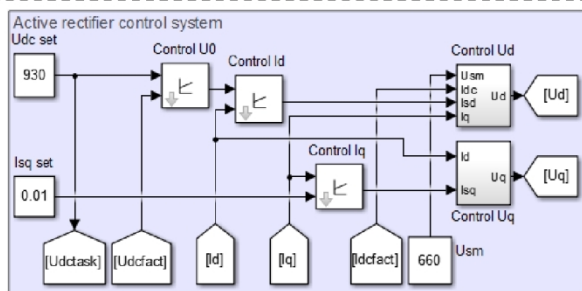


Рис. 6. Система управления активным выпрямителем

Fig. 6. Active rectifier control system

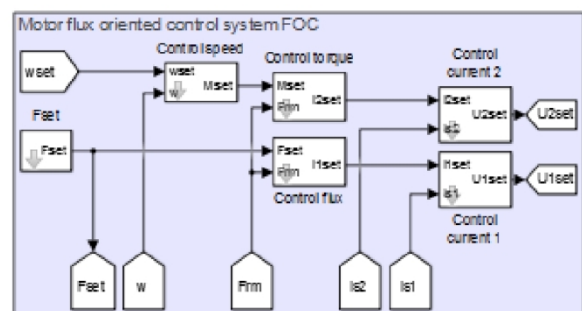


Рис. 7. Система управления асинхронным двигателем

Fig. 7. Asynchronous motor control system

ряда конденсатора и балластным резистором; *Autonomous inverter1,2* – АИН 1 и 2 соответственно; $M_{1,2}$ – АД 1 и 2 соответственно; *Dump truck load1,2* – имитатор нагрузки; *Oscilloscope* – блок осциллографов.

Практические исследования. Имитационное моделирование выполнялось с целью анализа следующих режимов работы ЭМТ при разгоне, подъеме по уклону, движении к отвалу и развороте КС под разгрузку.

В ходе моделирования линейные напряжения статора АГ оставались на номинальном уровне 930 В (рисунок 9 (а)), Фазные токи АГ пропорцио-

нальны нагрузке, максимальное значение 1000 А соответствует номинальной мощности. (рисунок 9 (б)). Величина активной мощности колеблется в номинальном режиме около значения 700 кВт, что соответствует номинальному потреблению АД. В то же время величина реактивной мощности находится на уровне потребления ее АГ (60 квар) (рисунок 9 (в)).

Параметры ЗПТ также адекватны режиму работы. Из осциллограммы на рисунке 10 (а) следует, что ток в номинальном режиме составляет 700 А, что несколько ниже ожидаемого. Из рисунка 10 (б) следует, что напряжение ЗПТ поддерживается АВ на необходимом уровне 930 В, повышение напряжения в ЗПТ обусловлено переходом АД в генераторный режим. Среднее значение мощности в ЗПТ находится на уровне 700 кВт, что соответствует номиналу (рисунок 10 (в)). Форма кривой мощности обусловлена импульсным протеканием тока в ЗПТ.

Входными параметрами АИН являются линейные напряжения (рисунок 11 (а)) и фазный ток (рисунок 11 (б)). Амплитудное значение линейного напряжения равно амплитуде напряжения ЗПТ. Переход АД в генераторный режим приводит к повышению напряжения на выходе АИН.

На приведенных осциллограммах моментобразующего тока АД (рисунок 12 (а)), момента на его валу и величины момента нагрузки (рисунок 12 (б)) хорошо видно, что момент на валу прямо пропорционален соответствующей проекции тока статора. Колебания момента устраняются подстройкой регуляторов контура регулирования момента.

На рисунке 13 (а) представлена форма кривой напряжений АГ, видно, что напряжения синусоидальные, частота их неизменна и составляет 127 Гц. На рисунке 13 (б) представлена осциллограмма потокообразующего тока, видно, что благодаря подстройке регулятора величина тока слабо колеблется около установившегося значения.

Из осциллограмм на рисунке 14 (а) и (б) хорошо видно, что фактическая частота вращения АД и скорость движения КС находятся в полном соответствии с заданными величинами.

Выводы. ЭМТ обеспечивают все режимы работы карьерных транспортных средств. Их работоспособность и надежность в полной мере определяют целесообразность применения КС. Разработана ресурсосберегающая ЭМТ КС, которая отвечает высоким требованиям по унификации и надежности. Исследование имитационной модели ЭМТ показывает строгое соответствие скоростных характеристик как приводных двигателей, так и КС в целом. Максимально используются преимущества компонентов разработанной ЭМТ: возможность энергетической развязки с использованием АВ, минимальная инерционность в управлении за счет применения асинхронных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода. Учебник / Васильев Б.Ю. – М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 268 с.

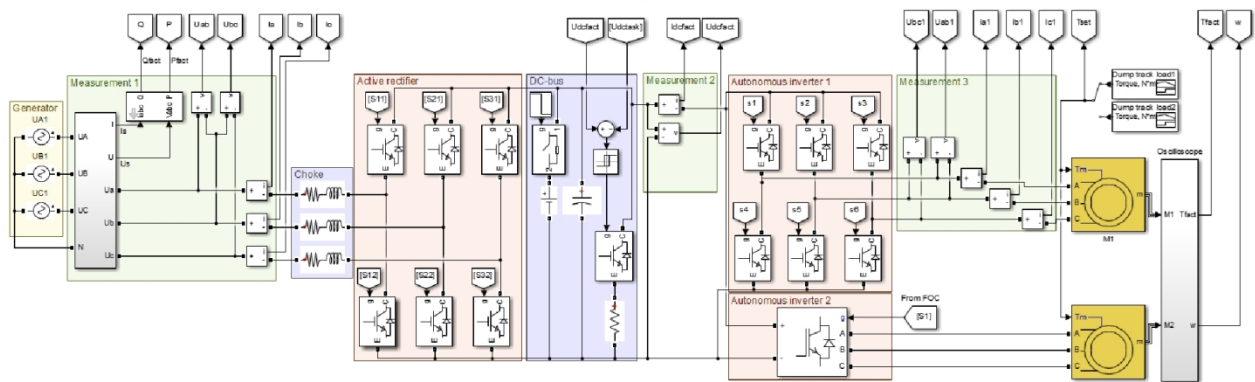


Рис. 8. Имитационная модель ЭМТ КС
Fig. 8. MT's EMT simulation model

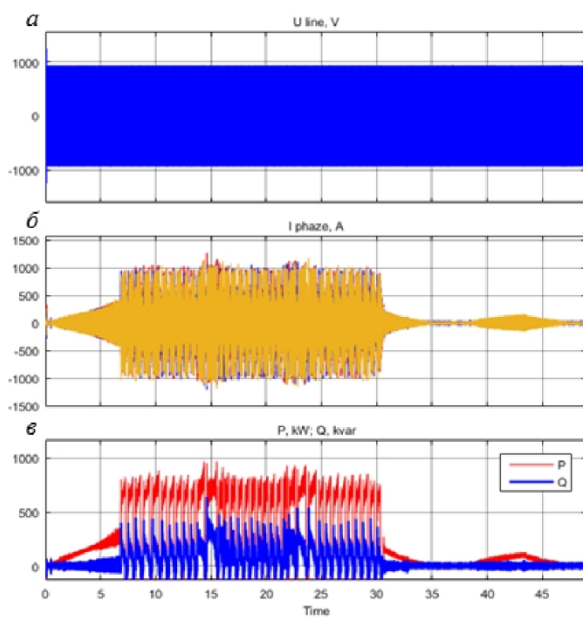


Рис. 9. Параметры АГ
Fig. 9. AG parameters

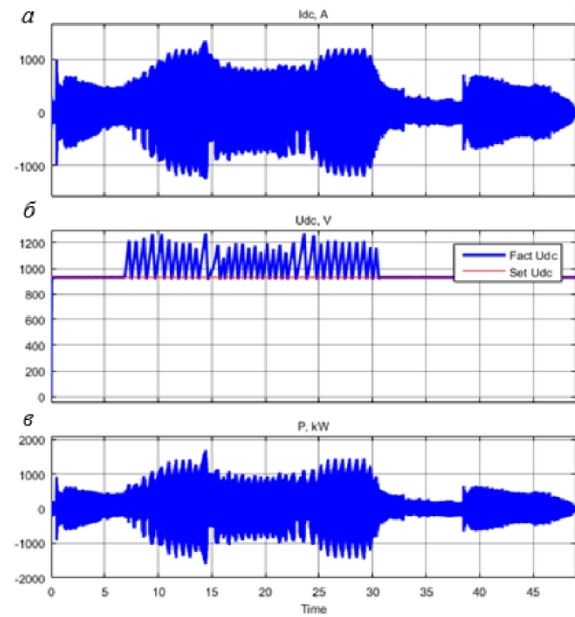


Рис. 10. Параметры ЗПТ
Fig. 10. DC-bus parameters

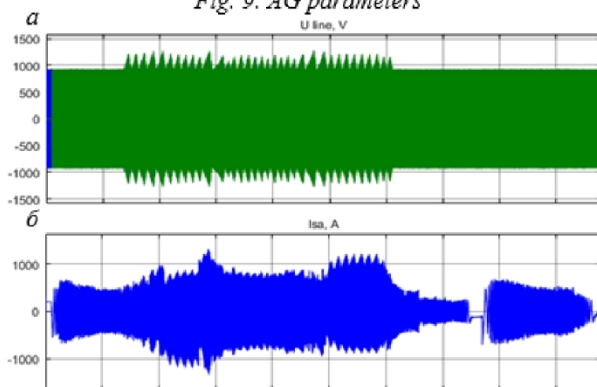


Рис. 11. Параметры АИН
Fig. 11. AVI parameters

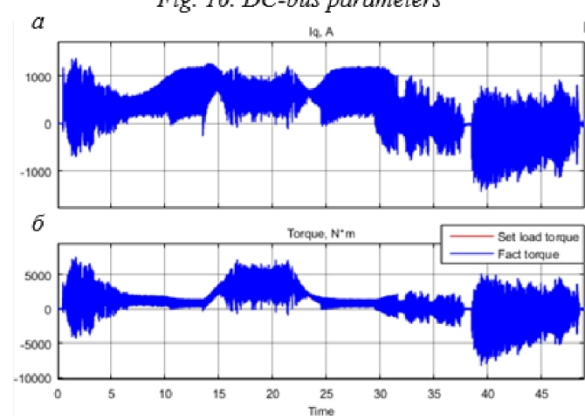


Рис. 12. Зависимость ток-поток
Fig. 12. Current-torque fuction

2. Пронин, М.В. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам / Пронин, М.В., А.Г. Воронцов. СПб: Ладога, 2017. – 220 с.

3. W.G. Koellner; G.M. Brown; J. Rodriguez; J. Pontt; P. Cortes; H. Miranda. Recent advances in mining haul trucks // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004. - № 51(2). – 321 – 329.

4. Васильев Б.Ю. Энергосбережение и энергоэффективность в промышленности / Б.Ю.Васильев, Ю.Л.Жуковский. - СПб: Энергетика, 2016. - 214 с.

5. Da Fang Wang, Zhen Fei Hu, Na Li, Yi Jin, Bo Wen Yang. Control Strategies for AC Motor of Electric

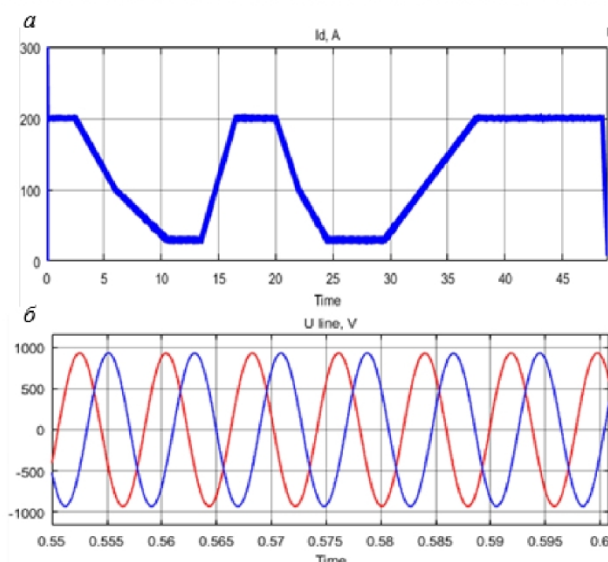


Рис. 13. Форма напряжения АГ,
ток намагничивания АД
Fig. 13. AG voltage waveform,
AM magnetizing current

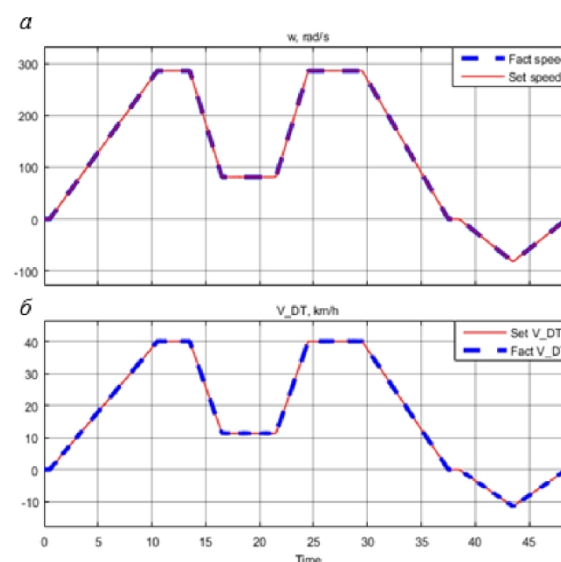


Рис. 14. Скоростные характеристики
Fig. 14. Speed characteristics

Vehicles // Advanced Materials Research. – 2013. – № 724-725. – 1409-1412.

6. Серов Н.А. Электротрансмиссии самосвалов БелАЗ грузоподъемностью 136 т / Н.А. Серов, П.Н. Калачиков, М.В. Пронин и др. // Горное оборудование и электромеханика. – 2005. – №5. – С. 22-25.

7. Jun Li, Jia Jun Yu, Zhenxing Chen. A Review of Control Strategies for Permanent Magnet Synchronous Motor Used in Electric Vehicles // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – № 321-324. – 1679-1685.

8. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т.2, №3. – С. 23-33.

9. G.M. Brown; B.J. Elbacher; W.G. Koellner. Increased productivity with AC drives for mining excavators and haul trucks // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – № 610. – 117-122.

10. Иванов К.А. Применение индукторных двигателей в вентильном электроприводе // Научное и образовательное пространство: Перспективы

развития. Чебоксары, 15 апреля 2017 г. – Чебоксары 2017. – С. 165-168.

11. Кулагин Ю.А. Интеллектуальный электропривод на базе электрических машин с постоянными магнитами / Кулагин Ю.А., Белозеров А.В. // СПб: Морской вестник. – 2008. – № 2 (26). – С. 29.

12. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты // Екатеринбург: УРО РАН. – 2000. – 654 с.

13. Анучин А.С. Системы управления электроприводов // М.: МЭИ. – 2015. – 373 с.

14. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием // М.: Академия. – 2006. – 272 с.

15. Онищенко Г.Б. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Онищенко Г.Б., Аксенов М.И. и др. // М.: ПАСХН. – 2011. – 520 с.

16. Jun Rong, Yue Jiao Ding, Xi Chen. Modeling and Simulation of Vector Control System for Asynchronous Motor", Applied Mechanics and Materials. – 2013. – № 397-400. – 1241-1244.

Bogdan Yu. Vasilev¹, C. Sc. in Engineering, assistant professor, **Pavel S. Grigorev²**, engineer

¹Saint-Petersburg mining university, 199106, Russia, Saint-Petersburg, Vasilevskiy island, 21 line 2

²«Power Machines», 195009, Russia, Saint-Petersburg, Str. Vatutina, 3, Lit.A

E-mail: vasilev.bu@yandex.ru

RESOURCE-SAVING ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION OF THE MINING TRUCK

Abstract: The subject of research is electromechanical transmission of mining truck, which provide all modes of movement of this type of mining equipment.

The purpose of the work is to develop an electromechanical transmission of a mining truck that meets high requirements for unification and reliability, ensuring resource saving during its creation and exploitation. The main task is the optimal choice of the electromechanical transmission components, as well as the study of their influence on each other.

Math methods and simulation modeling in the mathematical package of applied programs were used to perform the study of the developed electromechanical transmission. A complex simulation model has been created, it includes: a source of electricity; frequency converter (amounting to the active rectifier (energy converter and excitation device) and autonomous voltage inverters); asynchronous motors. The simulation model is equipped with blocks of oscillography and analysis of electrical variables of an electromechanical transmission.

The study of the simulation model of an electromechanical transmission shows the strict correspondence of the speed characteristics of both drive engines and the mining truck as a whole. The vehicle accelerates to the rated speed at full load, braking on a slope, and turning. The electrical parameters of the electromechanical transmission correspond to the task, the control of variable drive engines in all modes of operation is provided at the proper level.

Keywords: electric drive, resource saving, energy saving, electromechanical transmission

Article info: received June 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-2-15-21

REFERENCES

1. Vasilyev B.Yu. Elektroprivod. Energetika elektroprivoda. Uchebnik / Vasilyev B.Yu. – M.: SO-LON-Press. 2015. – 268 s.
2. Pronin. M.V. Elektromekhanotronnyye komplekсы i ikh modelirovaniye po vzaimosvyazannym podsystemam / Pronin. M.V., A.G. Vorontsov. SPb: Lada, 2017. – 220 s.
3. W.G. Koellner; G.M. Brown; J. Rodriguez; J. Pontt; P. Cortes; H. Miranda. Recent advances in mining haul trucks // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2004. - № 51(2). – 321 – 329.
4. Vasilyev B.Yu. Energoberezheniye i energo-effektivnost v promyshlennosti / B.Yu. Vasilyev. Yu.L. Zhukovskiy. - SPb: Energetika. 2016. - 214 s.
5. Da Fang Wang, Zhen Fei Hu, Na Li, Yi Jin, Bo Wen Yang. Control Strategies for AC Motor of Electric Vehicles // Advanced Materials Research. – 2013. - № 724-725. - 1409-1412.
6. Serov N.A. Elektrotransmissii samosvalov BelAZ gruzopodъемности 136 t / N.A. Serov. P.N. Kalachikov. M.V. Pronin and others. // Горное оборудование и электромеханика. – 2005. – №5. – С. 22-25.
7. Jun Li, Jia Jun Yu, Zhenxing Chen. A Review of Control Strategies for Permanent Magnet Synchronous Motor Used in Electric Vehicles // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – № 321-324. – 1679-1685.
8. Ptakh G.K. Ventilno-induktorный re-aktivный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т.2. №3. – С. 23-33.
9. G.M. Brown; B.J. Elbacher; W.G. Koellner. Increased productivity with AC drives for mining excavators and haul trucks // Applied Mechanics and Materials. – 2014. - № 610. - 117-122.
10. Ivanov K.A. Primeneniye induktorных dvigateley v ventilnom elektroprivode // Nauchnoye i obrazovatelnoye prostranstvo: Perspektivy razvitiya. Cheboksary. 15 aprelya 2017 g. – Cheboksary 2017. – С. 165-168.
11. Kulagin Yu.A. Intellectualnyy elektroprivod na baze elektricheskikh mashin s postoyannymi magnitami / Kulagin Yu.A., Belozarov A.V. // SPb: Morskoy vestnik. – 2008. - № 2 (26). – С. 29.
12. Shreyner R.T. Matematicheskoye modelirovaniye elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty // Ekaterinburg: URO RAN. - 2000. – 654 s.
13. Anuchin A.S. Sistemy upravleniya elektroprivodov // M.: MEI. - 2015. - 373 s.
14. Sokolovskiy G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniyem // M.: Akademiya. - 2006. – 272 s.
15. Onishchenko G.B. Avtomatizirovannyy elektroprivod promyshlennykh ustanovok / Onishchenko G.B., Aksenov M.I. i dr. // M.: RASKhN. - 2011. – 520 s.
- Jun Rong, Yue Jiao Ding, Xi Chen. Modeling and Simulation of Vector Control System for Asynchronous Motor", Applied Mechanics and Materials. – 2013. - № 397-400. - 1241-1244.

Библиографическое описание статьи

Васильев Б.Ю., Григорьев П.С. Ресурсосберегающая электромеханическая трансмиссия карьерного самосвала // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 2 (142). – С. 15-21.

Reference to article

Vasilev B.Yu., Grigorev P.S. Resource-saving electromechanical transmission of the mining truck. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 2 (142), pp. 15-21.