

УДК 621.331.001.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КАРЬЕРНЫХ ЭЛЕКТРОСАМОСВАЛОВ

Д. В. Ососков¹, А. В. Ляхомский²

¹ dosv@me.com, ² mggu.eegp@mail.ru

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Поступила в редакцию 20.06.2017

Аннотация. В статье обоснована актуальность перехода к электрическому питанию карьерных самосвалов от контактной сети и внутреннего источника электрической энергии взамен потребления дизельного топлива. Сформулированы цели и задачи исследования этого вопроса. Статья приводит преимущества полностью электрической трансмиссии перед электромеханической. Описана структура компьютерной модели, предназначенной для моделирования работы трансмиссии полностью электрического самосвала и помощи в выборе параметров ее элементов. Приведены результаты моделирования системы расчета нагрузки на валу двигателя, которые позволяют определять электрические нагрузки на электропривод автосамосвала и выполнять оценку необходимых значений параметров источника автономного питания.

Ключевые слова: энергоэффективность; электрическое питание карьерных самосвалов; электропривод; механическая нагрузка; компьютерное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Горнодобывающие предприятия затрачивают значительные средства на топливно-энергетические ресурсы, в том числе на моторное топливо, основными потребителями которого на предприятиях, ведущих добычу открытым способом, являются карьерные самосвалы.

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) повсеместно используются в карьерном автотранспорте и являются источником энергии для генератор-электродвигательной гибридной трансмиссии автосамосвалов. Для привода колес широко применяются асинхронные двигатели благодаря их компактности, простоте конструкции и надежности. Регулирование скорости производится инвертором.

Однако использование ДВС в карьерном самосвале сопряжено с определенными недостатками, а именно: низкий коэффициент полезного действия ДВС (до 45%) и неоднократное последовательное преобразова-

ние энергии из одного вида в другой. Это значительно снижает эффективность энергосистемы самосвала и приводит к тому, что более половины дизельного топлива, расходуемого самосвалом, уходит на бесполезный нагрев атмосферы. Помимо этого, двигатели внутреннего сгорания имеют сложную конструкцию, большие размеры и массу.

Дизельный автотранспорт является постоянно действующим источником загрязнения воздуха. Так, например, среднее значение суточных выбросов вредных газов от работы автосамосвалов в Первомайском карьере составляет 50408,68 кг [1]. Для предотвращения карьера от выбросов может потребоваться искусственная вентиляция, которая требует дополнительных затрат энергии, что повлечет и дополнительные расходы. Выбросы автосамосвалов опасны и для их водителей. Как показывает анализ непрерывной записи параметров воздуха в кабинах самосвалов Ковдорского ГОКа, за-

грязнение в кабине до 2–2,5 раз больше фонового загрязнения атмосферы карьера, вследствие чего превышаются ПДК по диоксиду и оксиду азота и тонкодисперсным частицам [2], что ведет к тяжелым заболеваниям водителей самосвалов.

С учетом вышесказанного актуально обоснование вопроса перевода первичного энергетического ресурса карьерных автосамосвалов с дизельного топлива на электроэнергию.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ КОНФИГУРАЦИЯ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

Постоянное развитие технологий создания накопителей электрической энергии к настоящему времени позволило массово создавать электрический транспорт, в частности автономные электромобили. Применение полностью электрического привода является перспективным направлением развития не только легкового автотранспорта, но и карьерных самосвалов.

Вместо использования на карьерных автосамосвалах дизельного двигателя рассматривается возможность применения для питания инвертора электроэнергии от контактной сети при движении самосвала за пределами карьера и от автономного накопителя электроэнергии при движении внутри карьера. Применение автономного источника электроэнергии необходимо, т.к. контактную сеть невозможно проложить на многих участках внутри карьера из-за перемещения зон погрузки и активного ведения горных работ, при которых она может быть повреждена взрывом. В качестве автономного накопителя электроэнергии могут быть использованы батареи аккумуляторов, суперконденсаторов или другие типы источников электрической энергии.

Замена дизельного топлива на электроэнергию позволит увеличить энергетический КПД самосвала, его скорость движения и производительность, а также существенно снизить затраты на энергетические ресурсы за счет меньшей стоимости единицы энергетического эквивалента электроэнергии по сравнению с дизельным топли-

вом, повышения КПД самосвала и возможности рекуперации части энергии при движении самосвала под уклон [3–5]. В отличие от электроэнергии, моторное топливо необходимо доставлять к месту использования с помощью транспортных средств, например по железной дороге, что требует времени и дополнительных расходов. Таким образом, отказ от ДВС позволит сократить затраты на доставку топлива. Кроме того, применение электрической энергии для питания самосвала позволит сократить выбросы в окружающую среду, существенно уменьшит загрязнение атмосферы и позволит уменьшить экологические платежи.

Переход от гибридной дизель-электрической энергосистемы к полностью электрической требует обоснованного выбора источника электропитания: он должен обеспечить достаточную мощность и запас энергии для требуемой работы автосамосвала в определенных условиях эксплуатации. В связи с этим необходимо проанализировать энерго-технологические режимы работы автосамосвала, зависящие от дальности поездки, уклонов дороги, направления движения, грузоподъемности и т.д. Также следует выполнить технико-экономическое обоснование перевода питания автосамосвала с дизельного топлива на электрическую энергию.

Для обоснования перевода первичного энергоресурса автосамосвала с дизельного топлива на электроэнергию требуется решение следующих задач.

1. Разработка компьютерной модели энергосистемы самосвала, предусматривающей возможность питания как от автономного источника питания, так и от контактной сети. Компьютерная модель является основой для дальнейших исследований этого вопроса. Она требуется для определения необходимого запаса энергии для работы самосвала в заданных условиях и сравнения различных типов автономных источников питания.

2. Моделирование энерго-технологических режимов работы автосамосвала для выбора параметров источника питания. Оно производится с использованием компью-

терной модели энергосистемы самосвала и предоставляет информацию, необходимую для обоснованного выбора типа автономного источника питания.

3. Обоснование и разработка технического решения по переводу карьерных автосамосвалов с питания дизельным топливом на электрическую энергию.

4. Оценка технико-экономической эффективности перевода карьерных самосвалов на электрическое питание.

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

Компьютерная модель предполагает симуляцию движения самосвала за счет питания от внешнего и внутреннего источников питания по заданному пути. При движении самосвала по различным участкам пути меняется нагрузка на электропривод, что необходимо учитывать при моделировании. Для этого в модель вводится профиль дороги, по которой следует самосвал. Профиль дороги задается углами наклона ее участков к горизонтали и протяженностью этих

участков. В зависимости от положения самосвала на пути моделируется его загрузка и разгрузка путем изменения его массы, а также переключение питания между контактной сетью и автономным источником питания.

В упрощенном представлении самосвал содержит источник питания, инвертор, электрический двигатель и систему управления приводом. В современных автосамосвалах роль источника питания играет генератор, вращаемый двигателем внутреннего сгорания. В электрическом самосвале двигатель через инвертор будет питаться либо от автономного источника постоянного тока, либо от контактной сети в зависимости от того, где находится самосвал.

Компьютерное моделирование даст возможность определить необходимые запас энергии и мощность автономного источника электроэнергии и позволит сравнить различные их типы применительно к конкретным условиям эксплуатации. Модель предоставляет возможность ввода параметров реальных карьеров и различных самосвалов для исследования поведения энерго-

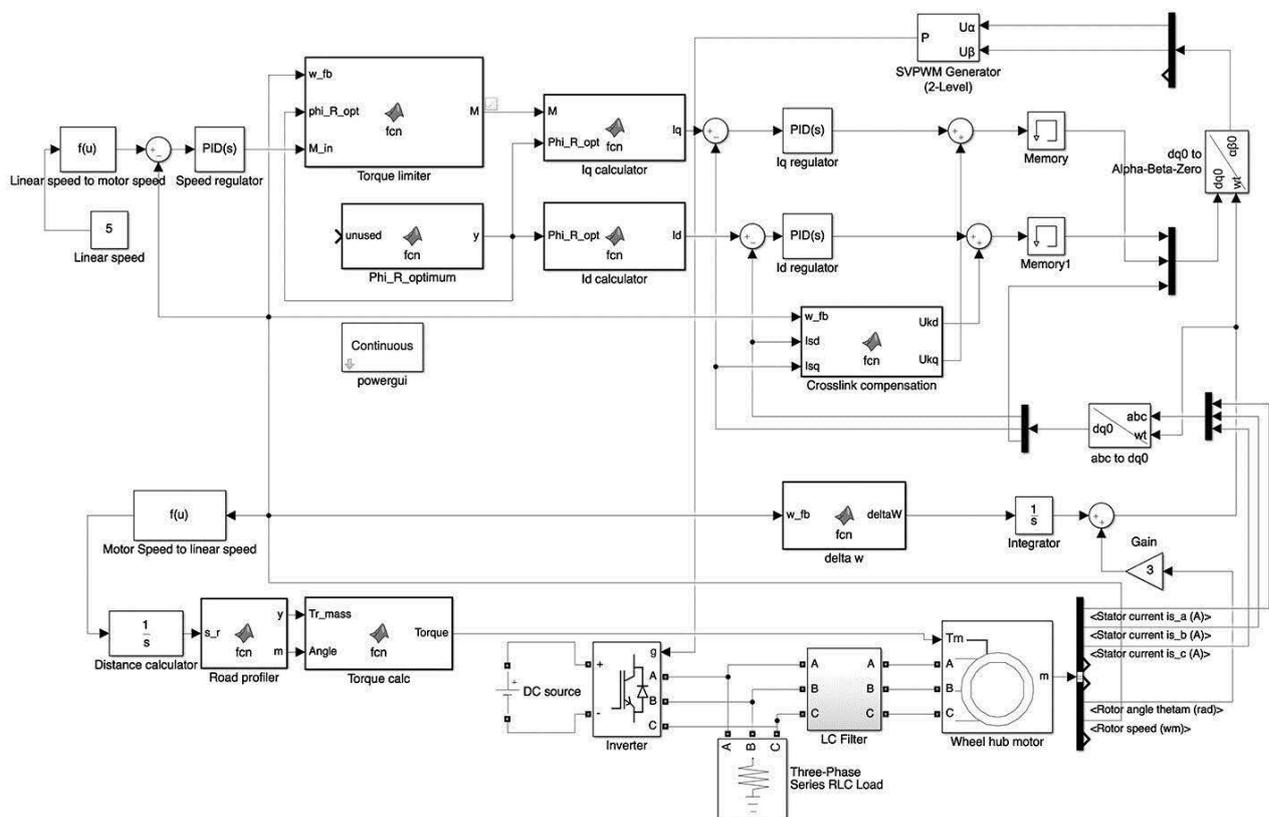


Рис. 1. Компьютерная модель энергосистемы электрического самосвала

системы самосвала в предполагаемых условиях его работы.

Вид текущей версии компьютерной модели энергосистемы самосвала представлен на рис. 1.

Компьютерная модель самосвала должна отражать все составляющие его трансмиссии и учитывать условия, в которых он передвигается, чем и обусловлен ее состав. Текущая версия модели содержит источник постоянного напряжения (DC Source), инвертор (Inverter), асинхронный электродвигатель мотор-колес (Wheel hub motor), систему векторного управления инвертором (верхняя часть схемы), датчик линейной скорости движения самосвала (Linear speed), систему задания траектории движения самосвала с вычислителем нагрузки на валу двигателя и различные вспомогательные блоки.

Система векторного управления инвертором состоит из двух регуляторов тока по осям d и q (Id regulator и Iq regulator), регулятора скорости (Speed regulator), блока компенсации перекрестных связей (Crosslink compensation), ограничителя момента (Torque limiter) и вспомогательных элементов. Вычислительные элементы системы регулирования выполнены блоками Matlab Function.

Для учета профиля дороги, по которой следует самосвал, в модели предусмотрена система расчета механических нагрузок на электропривод самосвала. Она позволяет определить нагрузку на вал двигателя и влияние на нее изменения угла наклона дороги, загрузки самосвала и дорожного покрытия, а также параметров самого автосамосвала. Это необходимо для правильной оценки необходимой мощности и запаса энергии автономного источника электрической энергии.

Вычисление нагрузки на валу двигателя упрощенно производится по формуле

$$M = \left(f \cos \alpha - \left(1 - \frac{f}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \times r \sin \alpha \right) \frac{m \times g}{2i} \quad (1)$$

где M – момент сопротивления, Н·м; r – радиус колес самосвала, м; α_i – угол наклона

дороги; f – коэффициент трения качения, м; m – масса самосвала, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; i – передаточное число редуктора.

Вычисление производится блоком Torque calc. Наклон дороги и масса самосвала в каждой точки пути задается блоком Road profiler.

При моделировании приняты параметры самосвала Белаз 75600:

- радиус колеса 2,03 м;
- масса загруженного самосвала 560 т, порожнего – 240 т;
- передаточное число редуктора 39,32.

Коэффициент трения качения установлен для случая езды резиновых шин по бетону – 0,0035 м.

Результаты работы системы моделирования механических нагрузок на валу электродвигателя представлены на графиках ниже.

На рис. 2 представлен рост во времени пройденного самосвалом пути в метрах. Рост имеет линейный характер, т.к. в процессе моделирования скорость самосвала была задана постоянной, равной 18,6 км/ч. За время моделирования (2500 с, что соответствует 0,69 ч) пройденный путь составил ~11 км.

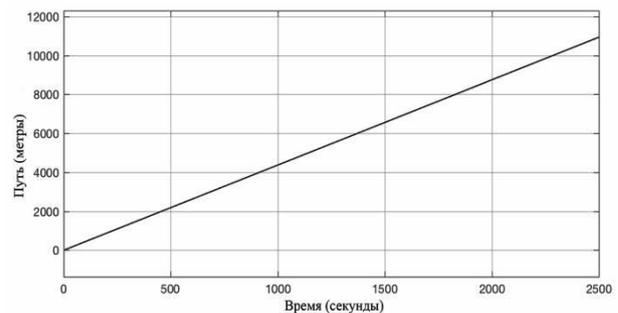


Рис. 2. Изменение пройденного пути

На рис. 3 изображен условный профиль дороги. Наклон дороги α_i задается независимо для разных отрезков пути. Таким образом задается профиль дороги, по которому следует самосвал. Каждая точка графика соответствует высоте нахождения самосвала в метрах в каждый момент времени относительно исходного уровня.

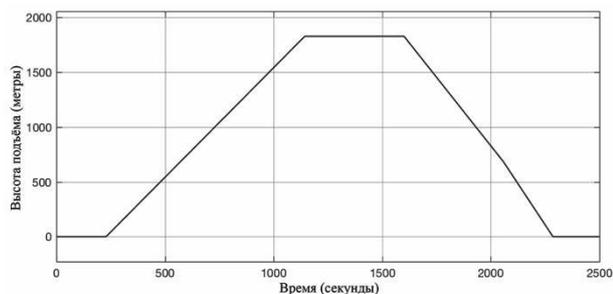


Рис. 3. Профиль дороги

Рис. 4 позволяет увидеть изменение угла наклона дороги в градусах. Наклон дороги считается положительным при спуске и отрицательным при подъеме.

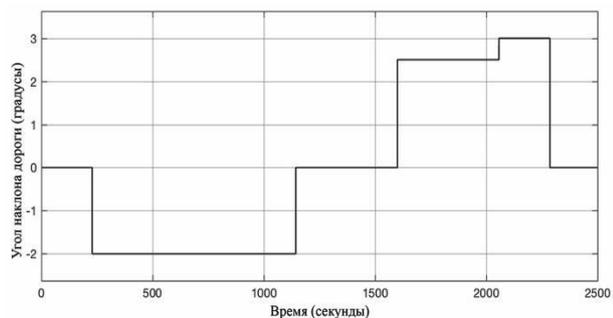


Рис. 4. Углы наклона дороги

Условия работы самосвала на различных участках пути были заданы такими:

- на протяжении 1000 м горизонтальное движение от зоны погрузки до подъема в гору, загружен;
- на протяжении 4000 м наклон – 2 градуса: подъем в гору до зоны разгрузки, загружен;
- на протяжении 2000 м горизонтальное движение от зоны разгрузки до спуска в карьер, порожний;
- на протяжении 2000 м наклон 2,5 градуса, спуск, порожний;
- на протяжении 1000 м наклон 3 градуса, спуск, порожний;
- на протяжении 1000 м, горизонтальное движения к зоне погрузки, порожний.

Условия работы самосвала в данной модели могут быть заданы любыми для соответствия параметрам реального карьера.

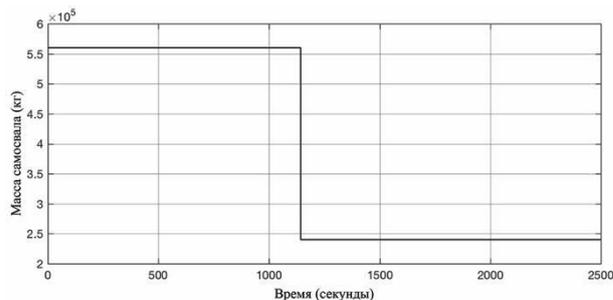


Рис. 5. Масса самосвала

Рис. 5 демонстрирует изменение массы самосвала в килограммах. В модели масса задается для каждого участка пути отдельно. За время симуляции был смоделирован один цикл перемещения самосвала, поэтому масса изменяется только один раз – в точке 5000 м происходит разгрузка кузова, и масса меняется с 560 т до 240 т – массы порожнего самосвала.

Рис. 6 показывает рассчитанный по формуле (1) момент сопротивления вращению вала электродвигателя самосвала в Н·м в каждый момент времени.

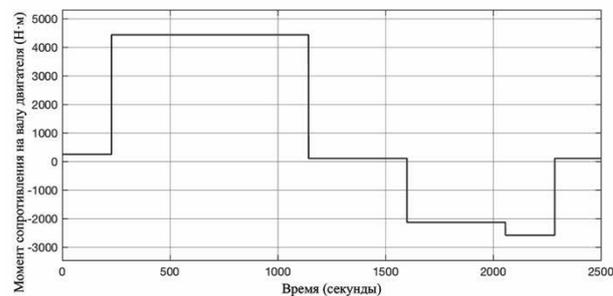


Рис. 6. Момент сопротивления на валу электродвигателя

На графике видно изменение момента сопротивления при изменении угла наклона дороги и массы самосвала. Эти изменения соответствуют различным участкам дороги, параметры которых описаны выше. На горизонтальных участках пути видна разница в моменте сопротивления вращению вала двигателя, возникающая за счет изменения массы самосвала в результате разгрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнение моделирования позволяет определить механическую нагрузку на электродвигатель автосамосвала при вы-

полнении различной транспортной работы в условиях заданного карьера с учетом параметров самого автосамосвала, профиля дороги в карьере и вне его, загрузки кузова автосамосвала и дорожного покрытия.

Расчет механической нагрузки является необходимым условием для определения электрических нагрузок на электропривод автосамосвала, что необходимо при выполнении оценки необходимых значений параметров источника автономного питания. В целях выполнения данной оценки представленная система расчета момента сопротивления на валу электродвигателя карьерного самосвала входит в общую компьютерную модель энергосистемы электрического самосвала.

Конечным результатом работы над этой компьютерной моделью будет возможность определения с ее помощью параметров автономного источника электроэнергии для карьерного электрического самосвала, способного обеспечить его работу в требуемых условиях эксплуатации для любого карьера. Это позволит разработать и обосновать техническое решение по переводу карьерного самосвала на питание электрической энергией вместо дизельного топлива, а также провести технико-экономическое обоснование этого мероприятия.

Различные технологии создания автономных источников электрической энергии непрерывно развиваются, такие источники различных типов уже массово применяются в легковых автомобилях. Их использование имеет широкие перспективы и в других видах транспорта, в том числе и в карьерных самосвалах.

Применение в качестве первичного энергетического ресурса в карьерном автосамосвале электроэнергии вместо дизельного топлива для двигателя внутреннего сгорания, сопряженного с генератором постоянного тока, позволит сократить эксплуатационные расходы за счет значительного снижения потребления предприятием моторного топлива, сокращения затрат на его доставку, что будет особенно заметно для предприятий Дальнего Востока, и перехода на более дешевую электроэнергию.

Кроме того, такой переход сделает самосвал экологически чистым транспортом, позволит уменьшить загрязнение атмосферы карьера, тем самым обеспечив безопасные условия труда его работников и снизив требования к системе вентиляции карьера. Помимо локального положительного эффекта в карьере, где будут применяться электрические автосамосвалы, переход к электрическому питанию карьерных самосвалов окажет общее положительное влияние на окружающую среду в целом, улучшив экологическую обстановку, что с учетом значительного влияния ее состояния на здоровье людей [6] является сейчас актуальным вопросом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бересневич П. В., Монастырский Ю. А., Веснин А. В. Определение объемов пылегазовыделения автотранспортного комплекса карьера с учетом нестационарности его эксплуатации // Разработка рудных месторождений. 2007. № 91. С. 228–232. [P. V. Beresnevich, Y. A. Monastyrsky, A. V. Vesnin, "Calculation of volume of dust and gases emission by motor transport complex of a open pit mine considering nonstationarity of its exploitation conditions", (in Russian), in *Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy*, no 91. pp. 228-232, 2007.]
2. Кутенев В. Ф., Сайкин А. М. Исследование влияния условий эксплуатации карьерных самосвалов на загрязнение воздуха кабин водителей // Журнал автомобильных инженеров. 2009. Т. 57, № 4. [V. F. Kutenev, A. M. Saikin, "Research of haul trucks exploitation conditions influence on driver cabins air pollution", (in Russian), in *Zhurnal avtomobilnih inzhenerov*, vol. 57, no. 4, 2009.]
3. Применение троллейвозного транспорта на открытых горных работах / П. И. Тарасов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. Т. 6. [P. I. Tarasov, et al., "Application of trolley transport at open-pit mining", (in Russian), in *Gornyi informacionno-analiticheskiy bulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*, M. 2006.]
4. Mazumdar J. Performance improvement of mining haul trucks operating on trolley systems // Industry Applications Society Annual Meeting (IAS) (Orlando, Oct. 9-13 2011). Orlando: IEEE, 2011, pp. 1-6. [J. Mazumdar, "Performance improvement of mining haul trucks operating on trolley systems," in *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS 2011)*, pp. 1-6. 2011.]
5. Mazumdar J. All Electric Operation of Ultraclass Mining Haul Trucks // Industry Applications Society Annual Meeting (IAS) (Lake Buena Vista, Oct. 6-11 2013), Lake Buena Vista: IEEE, 2013, pp. 1-5. [J. Mazumdar, "All Electric Operation of Ultraclass Mining Haul Trucks," in *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS 2013)*, 2013, pp. 1-5.]
6. Wu S., Powers S., Zhu W., Hannun Y. A. Substantial contribution of extrinsic risk factors to cancer development // *Nature*. 2016. Т. 529. С. 43–47. [S. Wu, S. Powers, W. Zhu, Y. A. Hannun, "Substantial contribution of extrinsic risk factors to cancer development", in *Nature*, vol. 529, pp. 43-47, 2016.]

ОБ АВТОРАХ

ОСОСКОВ Даниил Владимирович, асп. каф. ЭЭГП. Дипл. горный инженер (НИТУ МИСИС, 2014). Готовит дис. о электрическом питании карьерных самосвалов.

ЛЯХОМСКИЙ Александр Валентинович, зав. каф. ЭЭГП. Дипл. горный инженер (Московский гос. горный ун-т, 1971). Д-р техн. наук. Иссл. в обл. энергоэффективности и энергосбережения в промышленности.

METADATA

Title: Modeling of all-electric haul truck operation.

Authors: D. V. Ososkov¹, A. V. Lyakhomsky².

Affiliation: National University of Science and Technology MISiS.

Email: ¹dosv@me.com, ²mggu.eegp@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 3 (77), pp. 72-78, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: This article substantiates relevance of using electrical power supply in haul trucks instead of internal combustion engine. It contains goals of researching of this matter. The simulation of the system calculating mechanical load on the electric motor is carried out and the results of this simulation are described in this article. These results allow to determine electrical load on the haul truck electric drive and calculate the required parameters of the haul truck energy storage device.

Key words: Energy efficiency; electrical power supply of haul trucks; electrical drive; mechanical load; computer modeling.

About authors:

OSOSKOV, Daniil Vladimirovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Energetics and Energy Efficiency of Mining Industry. Dipl. Mining engineer (Moscow State Mining Univ., 2014).

LYACHOMSKY, Alexander Valentinovich, Prof., Head of Dept. of Energetics and Energy Efficiency of Mining Industry. Dipl. Mining engineer (Moscow State Mining Univ., 1971). Dr. of Tech. Sci. (MSMU).