

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМОКОЛЕСНОГО ТРАНСПОРТА С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ ДОБЫЧЕ ИСКОПАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

В.В. Бирюков<sup>1</sup>, Б.В. Малозёмов<sup>1</sup>, Н.И. Щуров<sup>1</sup>, И.И. Сингизин<sup>1</sup>, Р.Н. Латышев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
Новосибирск, Россия, e-mail: mbv5@mail.ru

**Аннотация:** Проведение добычи полезных ископаемых открытым способом предполагает использование транспортных средств большой грузоподъемности и удовлетворительной мобильности. Как показывает практика, этим требованиям в полной мере удовлетворяют пневмоколесные самосвалы, тяговые приводы которых могут быть реализованы на тепловых либо на электрических машинах. Последние более предпочтительны в силу их экологичности. В отличие от самосвалов с тепловыми двигателями, работающими на топливе, на машинах с электроприводом возможна реализация различных вариантов электроснабжения: централизованное, автономное и комбинированное. Каждый из этих вариантов обладает своими достоинствами и недостатками, зависящими как от их схемотехнического решения, так и от параметров карьера. Для выявления влияния каждого из этих факторов на энергопотребление самосвала было необходимо проведение расчетов для всех вариантов электроснабжения. При этом изменение количественных показателей одного из факторов проводилось в условиях постоянства других. В качестве исследуемых факторов выступали крутизна подъема дороги в карьере и ее протяженность. Проведенные расчеты показали, что расход энергии на движение самосвала при всех вариантах электроснабжения практически неизменен. Другой группой факторов являлись источники электрической энергии, в качестве которых выступали аккумуляторы и конденсаторы двойного электрического слоя – ионисторы. Результаты исследований показали целесообразность использования аккумуляторов, поскольку они обладают меньшими массогабаритными показателями.

**Ключевые слова:** горнодобывающие предприятия, угольный карьер, электротранспорт, аккумулятор, зарядная станция, рекуперация, энергоэффективность, накопитель энергии.

**Для цитирования:** Бирюков В.В., Малозёмов Б.В., Щуров Н.И., Сингизин И.И., Латышев Р.Н. Исследование энергоэффективности применения пневмоколесного транспорта с электроприводом при добыче ископаемых открытым способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 301–315. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_121\_0\_301.

### Energy efficiency of electric machines with pneumatic tires in open pit mineral mining

V.V. Biryukov<sup>1</sup>, B.V. Malozyomov<sup>1</sup>, N.I. Shchurov<sup>1</sup>, I.I. Singizhin<sup>1</sup>, R.N. Latyshev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, e-mail: mbv5@mail.ru

---

**Abstract:** Making minerals in an open way involves the use of vehicles of large carrying capacity and satisfactory mobility. As the practice shows these requirements, the air – wheeled dump trucks are fully satisfied, the traction drives of which can be implemented on heat or electric machines. The latter are more preferable due to their environmental friendliness. Unlike dump trucks with thermal engines requiring the placement of fuel on them, various power supply options are possible on electric vehicles: centralized, autonomous and combined. Each of these options has its own advantages and disadvantages, depending on both their schematic solutions and on the parameters of the career. To identify the influence of each of these factors on the energy consumption of a dump truck, it was necessary to conduct calculations for all power supply options. Moreover, the change in the quantitative indicators of one of the factors was carried out in conditions of the constancy of others. As the studied factors were the steepness of the rise in the road in the career and its length. The calculations carried out showed that the energy consumption for the movement of a dump truck with all power supply variants is practically unchanged. Another group of factors were sources of electric energy, which were the batteries and capacitors of the double electric layer – ionistors. The results of the studies showed the feasibility of using batteries, since they have less mass – body indicators.

**Key words:** mining enterprises, coal quarry, electric transport, battery, charging station, recuperation, energy efficiency, energy storage.

**For citation:** Biryukov V. V., Malozyomov B. V., Shchurov N. I., Singizhin I. I., Latyshev R. N. Energy efficiency of electric machines with pneumatic tires in open pit mineral mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12-1):301-315. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_121\_0\_301.

---

## Введение

Одним из эффективных способов решения экологических проблем, существующих при добыче полезных ископаемых открытым способом, является замена в звене транспортировки пневмоколесного транспорта с приводными моторами на базе тепловых машин на электрические [1]. Такая замена приводит к сокращению выброса в атмосферу продуктов сгорания топлива, а также предупреждению скапливания отработавших газов в котловане.

Использование транспортных средств большой грузоподъемности и высокой мобильности является необходимым при открытой добыче полезных ископаемых [2]. Пневмоколесные самосвалы являются наилучшим выбором, так как их тяговые приводы могут быть оснащены тепловыми или электрическими двигателями [3, 4]. Электрические машины

предпочтительны из-за их экологической чистоты, в отличие от самосвалов с тепловыми двигателями, работающими на топливе. Машины с электроприводом могут быть оснащены централизованным, автономным или комбинированным электропитанием. Каждый из этих вариантов имеет свои преимущества и недостатки, зависящие от схемотехнического решения и параметров карьера [5].

Эффективность использования пневмоколесных самосвалов в добыче полезных ископаемых зависит от различных факторов, включая крутизну подъема дороги в карьере и ее протяженность. Для оценки влияния этих двух факторов на энергопотребление самосвала были проведены расчеты для всех вариантов электроснабжения [6, 7]. Расчеты показали, что расход энергии на передвижение самосвала практически не меняется при всех вариантах электроснабжения.

Таким образом, выбор оптимального способа электроснабжения для пневмоколесных самосвалов может быть основан на других факторах, таких как стоимость, доступность ресурсов и экологические аспекты [8, 9].

Использование централизованного варианта электроснабжения имеет свои ограничения, связанные главным образом с продлением тяговой сети по мере углубления разреза, а также со сложностью ее подвода к месту погрузки [10].

Использование варианта с автономным источником электрической энергии подразумевает применение в системе электроснабжения зарядных станций, которые могут работать как по схеме заряда аккумуляторных батарей без снятия с подвижного состава, так и по схеме заряда сменного аккумулятора.

Первая схема менее предпочтительна, поскольку время заряда довольно значительно и самосвал выключается из технологического процесса транспортировки на длительный период [11].

### Методы

Предварительный анализ вариантов электроснабжения подвижного состава показал, что целесообразен комбинированный вариант. При этом схема силовых цепей тягового электропривода в целях снижения энергозатрат должна обеспечивать не только тяговый режим, но и режим рекуперативного торможения, при котором часть ранее потребленной в ре-

жиме тяги электрической энергии возвращается в аккумулятор, подзаряжая его [12, 13].

На рис. 1. представлена структурная схема тягового электропривода карьерного самосвала, разработанная авторами. Независимо от варианта системы электроснабжения и параметров элементов тягового привода, приведенного на рис. 1, в силовых цепях электропривода самосвала используется преобразователь, потери электрической энергии в котором (по опыту эксплуатации их на других транспортных средствах) не превышают 1–2%.

Изображенная на рис. 1 структурная схема тягового электропривода включает в себя: ИЭ — источник энергии; Пр — преобразователь; ЭМПр — электро-механический преобразователь (тяговый электродвигатель); МП — механическую передачу; Дв — движитель (пневмоколесо); СУ — систему управления [1].

В качестве элементов преобразователя, регулирующих подачу энергии в тяговый двигатель, используются силовые полупроводниковые приборы [14]. Независимо от параметров карьера, где производится добыча ископаемых, технологический цикл работы самосвалов включает в себя следующие элементы: место погрузки; автомобильная дорога, по которой движутся самосвалы при спуске в карьер и выезде из него; место разгрузки (рис. 2). Длина участков отвала и погрузки даже на начальной стадии

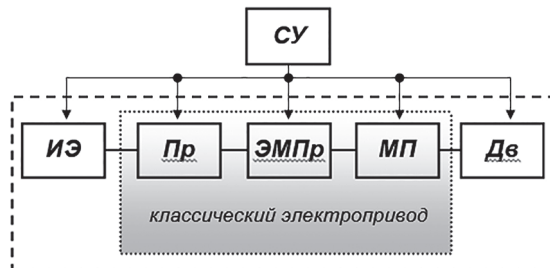


Рис. 1. Структурная схема тягового электропривода карьерного самосвала

Fig. 1. The structural diagram of the traction electric drive of a career dump truck

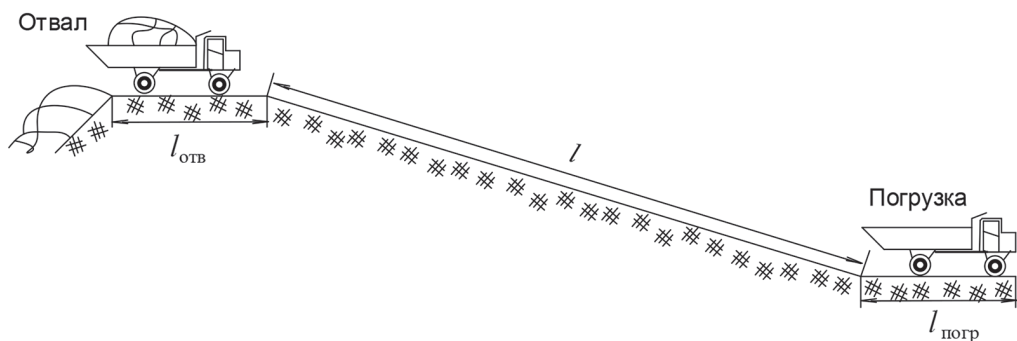


Рис. 2. Схема движения карьерного самосвала  
Fig. 2. Scheme for the movement of a career dump truck

формирования карьера многократно уступает длине дороги ( $l_{отв} \approx l_{погр} \ll l$ ), по которой движутся порожние и груженные самосвалы. Поэтому затрачиваемая энергия на маневрирование самосвалов на них несоизмерима с затратами при движении на дороге. Величина этих затрат может быть учтена введением поправочного коэффициента, зависящего от параметров конкретного разреза [15].

Величина продольного уклона дороги существенно зависит от конструктивного исполнения и грузоподъемности самосвалов [2]. Для уклонов  $i_{ук} = 8\%$  предусмотрено применение автосамосвалов грузоподъемностью 120 т, для уклонов  $i_{ук} = 16\%$  — автосамосвалов 75 т, для уклонов  $i_{ук} = 24\%$  — автосамосвалов с шарнирно сочлененными рамами грузоподъемностью 30–40 т.

По мере углубления карьеров применяется изменение величины уклонов в сторону их увеличения [16].

### Расчет расхода энергии на передвижение самосвала

Рассмотрим методику расчета расхода энергии на передвижение самосвала с тяговым электроприводом за один цикл, состоящий из подъема груженого самосвала и его спуска порожним в карьер [17].

В соответствии с положениями теории электрической тяги [3] движение на

участке дороги разбивается на три составляющие: пуск при трогании с места до набора заданной скорости; движение с постоянной скоростью и участок торможения до полной остановки. При движении самосвала в любом режиме он преодолевает сопротивление движению, включающее в себя внешние силы, проявляющиеся в сопротивлении качению колес, и силы аэродинамического сопротивления воздушной среды [18]. Силы сопротивления качению в значительной мере зависят от состояния поверхности и материала, из которого состоит путевая структура [19].

Применительно к автомобилям силы сопротивления качению рассчитываются как сумма сил, действующих на каждый мост автомобиля:

$$W_{нум} = \sum_{i=1}^n W_{нумi} = \sum_{i=1}^n f_i G_i ,$$

где  $n$  — количество мостов транспортного средства;  $f_i$  — коэффициент сопротивления качению  $i$ -го моста;  $G_i$  — вес автомобиля, приходящийся на  $i$ -й мост.

Коэффициент сопротивления качению зависит, во-первых, от структуры пути (асфальт, бетон и т.д.) и, во-вторых — от состояния колес (степени износа протектора, величины давления сжатого воздуха в пневмошине и т.д.). Поскольку разброс значений этих факторов трудно учитывать, то в расчетах обычно прини-

Таблица 1

**Значения коэффициента сопротивления качению для различных покрытий путевых структур**

**Values of the rolling resistance coefficient for various coatings of waybills**

Тип дороги	$f_0$
Цементо- или асфальтобетонное покрытие в хорошем состоянии	0,012...0,018
Цементо- или асфальтобетонное покрытие в удовлетворительном состоянии	0,018...0,02
Щебеночное или гравийное шоссе, обработанное вяжущими органическими материалами	0,02...0,025
Щебеночное или гравийное шоссе без обработки	0,03...0,04
Булыжная мостовая в хорошем состоянии	0,023...0,03
Булыжная мостовая с выбоинами	0,035...0,05
Грунтовые дороги после дождя	0,05...0,15
Песок влажный	0,08...0,15
Песок сыпучий	0,15...0,3
Снежные дороги укатанные и расчищенные	0,03...0,05

мается одинаковыми коэффициентом сопротивления качению для всех колес автомобиля и состояние колес [20]. При этих допущениях сила сопротивления качению рассчитывается следующим образом:

$$W_{\text{пут}} = f G_{\text{пс}} \quad (1)$$

где  $G_{\text{пс}}$  — вес подвижного состава (автомобиля).

Величина коэффициента сопротивления качению по горизонтальному участку пути зависит от скорости движения транспортного средства  $v$ . Наиболее распространенные эмпирические выражения этой зависимости имеют вид

$$f = f_0(1 + 6,5 \cdot 10^{-4} v^2)$$

и

$$f = \begin{cases} 0,0165 & \text{при } v \leq 14 \text{ м/с} \\ 0,0165 + 3,6 \cdot 10^{-4}(v - 14) & \\ \text{при } v > 14 \text{ м/с} & \end{cases}$$

где  $f_0$  — коэффициент сопротивления качению при движении со скоростью 50 км/ч.

Значения коэффициента сопротивления качению для различных покрытий путевых структур приведены в табл. 1.

Аэродинамическая составляющая сил сопротивления движению проявляется в виде появления зон повышенного и по-

ниженного давления воздуха, способствующих образованию турбулентности. При этом наибольшая доля энергии (до 60%) при преодолении сопротивления воздуха расходуется на образование воздушных вихрей [21].

На основании проведенных аэродинамических исследований движения тела неизменяемой формы в воздухе установлено, что при постоянной скорости движения сила сопротивления  $W_{\text{в}}$  приблизительно пропорциональна произведению квадрата скорости на площадь  $S_{\text{п/п}}$  поперечного (миделевого) сечения автомобиля. С учетом коэффициента обтекаемости  $\alpha_{\text{в}}$  расчетная формула для определения аэродинамического сопротивления приобретает вид

$$W_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}} S_{\text{п/п}} v^2, \quad (2)$$

где  $S_{\text{п/п}} = B_{\text{кол}} H_{\text{г}}$ ;  $B_{\text{кол}}$  — ширина колеи автомобиля;  $H_{\text{г}}$  и  $B_{\text{г}}$  — его габаритная высота и ширина соответственно;  $\alpha_{\text{в}} = 0,6 \dots 0,7 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{М}^4$ .

В процессе разгона энергия затрачивается и на преодоление сил инерции, которые зависят от массы самосвала и развиваемого ускорения и могут быть рассчитаны согласно выражению

$$W_{ин} = (1 + \gamma) \frac{G_{ПС} dv}{g dt}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  — коэффициент вращающихся масс автомобиля, а  $(1 + \gamma) = 1,04 + k_{авт} i_{к.п}^2$ ;  $k_{авт} = 0,05 \dots 0,07$ ;  $i_{к.п}$  — передаточное число редуктора.

Помимо указанных усилий на самосвал во время движения действуют и добавочные силы сопротивления движению, первая составляющая которых обусловлена наличием уклонов дороги, а вторая — поворотами.

Составляющая от уклонов определяется согласно выражению

$$W_{ук} = i_{ук} G_{ПС} \quad (4)$$

На участках вписывания в кривые вследствие небольшой скорости движения силой сопротивления можно пренебречь.

Таким образом, необходимое тяговое усилие на подъеме в момент разгона рассчитывается по формуле

$$F_{тяг} = W_{пут} + W_{в} + W_{ин} + W_{ук}, \quad (5)$$

а при движении с постоянной скоростью

$$F_{тяг} = W_{пут} + W_{в} + W_{ук}. \quad (6)$$

При равномерном движении на спуске тяговое усилие привода уменьшается, поскольку движению самосвала способствует скатывающая сила, и расчетное выражение приобретает вид

$$F_{тяг} = W_{пут} + W_{в} - W_{ук}. \quad (7)$$

Полезная работа, совершаемая приводом, определяется выражением

$$A = F_{тяг} l, \quad (8)$$

где  $l$  — пройденный путь,

а потребляемая от источника энергия

$$E = A / \eta, \quad (9)$$

где

$$\eta = \eta_{м.пер} \cdot \eta_{пр} \cdot \eta_{СЭС};$$

$\eta_{м.пер} = 0,93 \dots 0,95$  — КПД механической передачи;  $\eta_{пр} = 0,98$  — КПД преоб-

разователя;  $\eta_{пр} = 0,95 \dots 0,98$  — КПД системы электроснабжения, учитывающий потери на тяговой подстанции, а в случае централизованного электроснабжения — и потери в тяговой сети.

При автономном питании потери в тяговой сети отсутствуют, но появляются потери от перевозки аккумулятора вследствие увеличения веса самосвала от их размещения на нем.

В режиме торможения часть кинетической энергии самосвала в тяговом электроприводе может быть возвращена в источник за счет рекуперации [17]. Учитывая, что эффективное торможение с максимальным усилием истощается при скоростях порядка  $v_{кон} = 5 \dots 7$  км/ч, объем возвращаемой энергии следует определять по формуле

$$E_{рек} = \frac{G_{ПС}}{2g} (v_{нач}^2 - v_{кон}^2) / \eta, \quad (10)$$

где  $v_{нач}$  и  $v_{кон}$  — соответственно скорости начала и конца режима торможения.

Анализ выражений (1) ... (10) показывает, что расход энергии на движение зависит от скорости и длины пути, пройденного самосвалом. При этом величина скорости движения в карьере определяется условиями безопасной эксплуатации, а длина пути — параметрами карьера (глубиной, площадью и величиной уклона). Суммарный расход энергии при выполнении одного цикла, включающего в себя подъем самосвала с грузом из карьера, спуск порожнего самосвала и маневрирование на площадках погрузки и разгрузки, описывается выражением

$$E_{\Sigma} = (A_{под} + A_{спуск} + 2A_{ман}) / \eta, \quad (11)$$

где  $A_{ман}$  — работа, совершаемая при маневрировании в карьере и на отвале.

Поскольку маневровые перемещения практически не зависят ни от скорости движения, ни от длины пути, можно принять их постоянными и не учитывать при определении зависимости  $E(l, v, i_{ук})$ .

Тогда выражение (9) примет вид

$$E_{\Sigma} = (A_{\text{под}} + A_{\text{спуск}}) / \eta = [(F_{\text{тяг1}} + F_{\text{тяг2}})l] / \eta, \quad (12)$$

где  $F_{\text{тяг1}}$  и  $F_{\text{тяг2}}$  — соответственно сила тяги на подъеме и спуске, определяемые по выражениям (5) и (7).

При определении зависимостей расхода энергии от каждого аргумента будем считать, что другие являются константами.

### Численное моделирование энергетических характеристик карьерного самосвала

В качестве примера приведем расчет расхода энергии, потребляемой карьерным самосвалом модели HD605-7 фирмы Komatsu. На электросамосвал Komatsu HD605-7 устанавливаются электродвигатели постоянного тока, для питания которых на машину установлен самый большой автомобильный аккумулятор весом 4,5 т. Емкость батареи в разных исполнениях составляет от 600 до 700 кВтч.

Электросамосвал имеет следующие физические размеры: длина 9,4 м, ширина 4,2 м, высота 4,4 м (при поднятом кузове высота составляет 9 м).

Номинальная грузоподъемность самосвала составляет 181 т, масса самосвала без груза — 146 т, максимальный крутящий момент — 8199 Н·м, номинальная мощность двигателей ведущего моста —  $P_{\text{дв}} = 6202$  кВт, передаточное число редуктора  $i_{\text{ред}} = 35,2$ , диаметр колеса  $D_{\text{кол}} = 3$  м.

Длина автодороги составляет  $l = 1$  км, уклон — 16%, скорость движения на перегоне  $v_{\text{пер}} = 20$  км/ч.

Для режима движения самосвала из карьера к отвалу с постоянной скоростью силы сопротивления движению в соответствии с выражениями (1), (2) и (4) составят:

$$W_{\text{пут}} = f G_{\text{ПС}} = 0,0165 \cdot (146 + 181) \cdot 10^3 = 54 \text{ кН};$$

$$W_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}} S_{\text{п/п}} v^2 = 0,7 \cdot 4,34 \cdot 7 \cdot 5,56 = 118,2 \text{ Н},$$

где  $\alpha_{\text{в}} = 0,7 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{М}^4$ ,

$$S_{\text{п/п}} = B_{\text{кол}} \cdot H_{\text{г}} = 4,34 \cdot 7 = 30,4 \text{ м}^2;$$

$$W_{\text{ук}} = i_{\text{ук}} G_{\text{ПС}} = 0,16 \cdot (141 + 181) \cdot 10^3 = 51,5 \text{ кН}.$$

Поскольку силы аэродинамического сопротивления движению самосвала при изменении скорости движения от 10 до 50 км/ч не превышают 1% от тягового усилия, то с позиции допустимой точности инженерных расчетов ими можно пренебречь. Тогда расчетные формулы (6) и (7) приобретают вид

$$F_{\text{тяг}} = W_{\text{пут}} + W_{\text{ук}}, \quad F_{\text{тяг}} = W_{\text{пут}} - W_{\text{ук}},$$

и для преодоления сил сопротивления движению на подъеме тяговый привод самосвала должен развивать усилие

$$F_{\text{тяг}} = W_{\text{пут}} + W_{\text{ук}} = 54 + 51,5 = 105,5 \text{ кН}.$$

Развиваемый двигателями момент на ободу колеса равен

$$M_{\text{кол}} = i_{\text{ред}} P_{\text{дв}} / n_{\text{дв}} = 35,2 \cdot 1240 / 50 = 873 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где  $n_{\text{дв}} = 3000 \text{ мин}^{-1} = 50 \text{ с}^{-1}$  — номинальная частота вращения двигателя.

Тяговое усилие самосвала на ободу колеса

$$F_{\text{тяг,кол}} = 2M_{\text{кол}} / D_{\text{кол}} = 2 \cdot 873 / 3 = 582 \text{ кН},$$

что больше требуемого значения по условиям задачи.

Для совершения работы при вывозе груза потребуются затратить энергию, в соответствии с (8),

$$E_{\text{под}} = F_{\text{тяг}} l = 105,5 \cdot 1000 = 105,5 \text{ МДж}.$$

Расчеты произведены, исходя из условия равномерного движения по всей дороге. Однако в реальности на начальном этапе происходит разгон самосвала до скорости 20 км/ч, а в конце пути торможение до скорости 5 км/ч при рекуперативном торможении.

Таблица 2

**Показатели суммарного расхода энергии в зависимости от длины автодороги**  
**Indicators of the total energy consumption in the functions of the length of the road**

$l$ , км	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$E_{\Sigma}$ , МДж	61,2	122,4	183,6	224,8	286	367,2

Величина возвращаемой при рекуперации энергии, согласно (10), составит

$$E_{рек} = \frac{G_{ПС}}{2g} (v_{нач}^2 - v_{кон}^2) / \eta =$$

$$= \frac{322}{2 \cdot 9,81} (5,56^2 - 1,4^2) / 0,95 \cdot 0,98 \cdot 0,95 =$$

$$= 420,3 \text{ кДж},$$

а при разгоне до скорости  $v_{пер}$  потребляется энергия в размере

$$E_{пуск} = \frac{G_{ПС}}{g} \frac{v_{пер}^2}{2} / \eta =$$

$$= \frac{322}{9,81} \cdot \frac{5,56^2}{2} / (0,95 \cdot 0,98 \cdot 0,95) =$$

$$= 573,6 \text{ кДж}.$$

Произведенные расчеты показывают незначительные величины энергии рекуперации и пусковой по сравнению с потребляемой при движении по перегону. Поэтому в дальнейших расчетах ими можно пренебречь. Энергия, потребляемая в маневровых режимах, также пренебрежимо мала.

Затраты энергии на движение порожнего самосвала при спуске в карьер определяются согласно выражению (7), а величины входящих в выражение сил сопротивления при движении со скоростью подъема будут такими же:

Таблица 3

**Результаты расчетов расхода энергии при движении самосвала**

**The results of the calculation of energy consumption during the movement of a dump truck**

	$l$ , км	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
	$E_{\Sigma}$ , МДж						
$i_{ук} = 8\%$	$E_{\Sigma}$	61	122,1	183,1	244,2	305,2	366,3
$i_{ук} = 16\%$	$E_{\Sigma}$	61,2	122,4	183,6	244,8	306	367,2
$i_{ук} = 24\%$	$E_{\Sigma}$	61	122,1	183,1	244,2	305,2	366,3

$$F_{тяг} = W_{пут} - W_{ук} = 54 - 51,5 = 2,5 \text{ кН}.$$

Потребленная от источника питания энергия на спуске самосвала в карьер, согласно (8):

$$E_{спуск} = F_{тяг} l = 2,6 \cdot 1000 = 2,6 \text{ МДж}.$$

Таким образом, суммарный расход энергии на один челночный рейс составит, согласно (12),

$$E_{\Sigma} = [(F_{тяг1} + F_{тяг2})l] / \eta =$$

$$= [(105,65 + 2,6) \cdot 1000] /$$

$$/ (0,95 \cdot 0,98 \cdot 0,95) = 122,4 \text{ МДж}.$$

Показатели суммарного расхода энергии в функции длины автодороги  $l$  в карьере при движении со скоростью  $v = 20$  км/ч по склону с уклоном  $i_{ук} = 16\%$  сведены в табл. 2.

Табл. 2, содержащая результаты расчетов, подтверждает влияние длины перегона на расход энергии при заданной величине уклона.

Предложенная методика может быть использована для расчета энергии при заданной величине уклона. Результаты расчетов расхода энергии в МДж для случаев движения самосвала со скоростями  $v$  от 10 до 50 км/ч на уклонах  $i_{ук} = 8, 16$  и 24% при длинах автодороги  $l = 0,5 \dots 3$  км сведены в табл. 3.

Необходимое тяговое усилие при подъеме по уклону 8% составит  $F_{тяг.1/8} =$



= 79,75 кН, а при спуске  $F_{\text{тяг.2/8}} = 28,25$  кН. Необходимое тяговое усилие при подъеме по уклону 24% составит  $F_{\text{тяг.1/24}} = 131,25$  кН, а при спуске  $F_{\text{тяг.2/24}} = -23,25$  кН. Знак «минус» говорит о том, что при спуске по дороге с таким уклоном необходимо применение подтормаживания, т.е. использование режима рекуперативного торможения. При этом объем энергии рекуперации рассчитывается по формуле

$$E_{\text{рек}} = F_{\text{тяг.2/24}} l,$$

а суммарное потребление электроэнергии — по формуле

$$E_{\Sigma} = [(F_{\text{тяг.1/24}} + F_{\text{тяг.2/24}}) l] / \eta.$$

Анализ полученных результатов показывает, что энергопотребление тягового привода самосвала практически не зависит ни от величины уклона автодороги карьера, ни от скорости движения по ней. Вместе с тем при малой величине уклона происходит потребление энергии, как при вывозе полезного ископаемого, так и при съезде самосвала в карьер. При большой величине уклона возрастает энергопотребление на подъеме, которое частично компенсируется рекуперацией при спуске в карьер.

Использование режима рекуперативного торможения требует включения в схему системы электроснабжения накопителя энергии, в качестве которого целесообразно применить аккумуляторную батарею. В случае централизованного электроснабжения ее необходимо устанавливать на тяговой подстанции. Вместе с тем даже при централизованном электроснабжении на самосвале нужно разместить накопитель для питания тяговых двигателей в маневровых режимах, поскольку в зоне погрузки невозможно расположить опоры для тяговой сети.

Определение параметров аккумулятора при централизованной схеме элект-

роснабжения производится, исходя из длительности рабочего дня самосвала  $t_{\text{раб}}$  при максимальной глубине карьера, т.е. длительности одного цикла, состоящего из периодов подъема  $t_{\text{под}}$  и спуска  $t_{\text{спуск}}$ , а также времени погрузки  $t_{\text{погр}}$  и разгрузки  $t_{\text{разгр}}$ :

$$t_{\text{раб}} = n_{\text{цикл}} (t_{\text{под}} + t_{\text{спуск}} + t_{\text{погр}} + t_{\text{разгр}}).$$

Входящие в формулу слагаемые изменяются по мере углубления карьера. Поэтому целесообразно оперировать их средневзвешенными величинами.

Поскольку энергия потребляется приводом самосвала от аккумулятора только в периоды маневровых работ и зависит от количества циклов за смену, то зная их число, а также расход энергии в маневровых режимах  $E_{\text{ман}}$ , требуемое количество энергии  $E_{\text{см}}$ , расходуемой за смену, определяется выражением

$$E_{\text{см}} = n_{\text{цикл}} A_{\text{ман}} / (\eta_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{м.пер}}). \quad (13)$$

Полагая для определенности, что время погрузки  $t_{\text{погр}} = 10$  мин,  $t_{\text{разгр}} = 3$  мин,  $t_{\text{ман}} = 5$  мин при скорости  $v_{\text{ман}} = 5$  км/ч, длина автодороги  $l = 3000$  м, скорость движения на дороге  $v_{\text{дор}} = 20$  км/ч, напряжение тяговой аккумуляторной батареи  $U_{\text{таб}} = 400$  В, рассчитаем параметры аккумуляторной батареи.

Количество циклов за смену определяется по формуле

$$n_{\text{цикл}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{погр}} + t_{\text{разгр}} + 2l / v_{\text{дор}} + 2t_{\text{ман}}} = \frac{8 \cdot 60}{10 + 3 + 2 \cdot 3000 / 65,6 + 2 \cdot 5} = 4.$$

Работа при маневрировании в одном цикле

$$A_{\text{ман}} = (F_{\text{пут1}} + F_{\text{пут2}}) v_{\text{ман}} t_{\text{ман}} = (54 + 24,5) \cdot 65,6 \cdot 5 = 25,8 \text{ МДж},$$

а в течение смены затраты энергии составят, согласно (13),

$$E_{\text{см}} = 4 \cdot 25,8 / (0,98 \cdot 0,95) = 110,9 \text{ МДж}.$$

При напряжении на тяговой аккумуляторной батарее (ТАБ) в 40. В ее емкость должна быть 77 А·ч.

При автономном электроснабжении величина емкости аккумуляторной батареи увеличивается до 1046 А·ч.

С учетом того, что по мере разряда ТАБ снижается ее выходное напряжение, что приводит к ухудшению динамических показателей привода, для устранения этого явления, а также в целях продления срока службы аккумулятора целесообразно ограничить его разряд 80% от номинального значения. Тогда величина емкости аккумуляторной батареи должна быть поднята до 5200 А·ч.

Авторы в настоящей работе не задавались целью рассчитать параметры аккумуляторов конкретных самосвалов для их модернизации, а исследовали влияние на них величины грузоподъемности, длины перегона, крутизны подъема и др.

Альтернативным решением для накопителя аккумуляторного типа является, как известно, конденсаторный накопитель, имеющий ряд преимуществ:

- практически мгновенный процесс заряда, поскольку он не связан с протеканием химических реакций, характерных для аккумуляторов любого типа;

- величина токов заряда и разряда не зависит от внутреннего электрического сопротивления и определяется только параметрами зарядных цепей и цепей потребителя;

- работоспособность конденсатора не зависит от внешних факторов, основным из которых является температура окружающей среды. Общеизвестно, что понижение температуры приводит к снижению скорости протекания химических реакций в гальванических элементах с полным их прекращением при температурах воздуха ниже  $-30...-40$  °С. Это приводит к необходимости устанавливать на подвижном составе термоста-

ты, что усложняет конструктивное исполнение источника питания. Вместе с тем и повышенная температура (в летний период) требует применения охлаждения;

- конденсаторы, соединенные в накопителе последовательно и параллельно, как и гальванические элементы в аккумуляторной батарее, не требуют применения специальных мер по балансировке протекающих в них токов и приложенного к ним напряжения вследствие незначительного различия их электрических параметров. В аккумуляторной батарее, сформированной из множества элементов, имеющих значительный разброс параметров, возникает необходимость регулирования токов заряда и разряда каждого элемента, что существенно усложняет схему силовых цепей накопителя.

Однако и конденсаторному накопителю присущ существенный недостаток, обусловленный требованием стабильности напряжения на его зажимах, питающего тяговый привод. Для пояснения этого момента обратимся к выходной характеристике аккумулятора  $U_{AB}(I_{AB})$ , приведенной на рис. 3.

КПД электроприводов на постоянном и переменном токе при равной развиваемой мощности различается не более чем на 2...3%. Поэтому изложенные в статье результаты могут учитываться при разработке тяговых приводов, как на постоянном, так и на переменном токе. Электроприводы транспортных средств на переменном и постоянном токе, как известно, обладают свойствами обратимости. При этом потери энергии в них, а, следовательно, и КПД, не зависят от режима движения.

Из теории электрических машин известно, что отклонение питающего двигателя напряжения от номинального значения влечет за собой изменение его характеристик. В частности, снижение

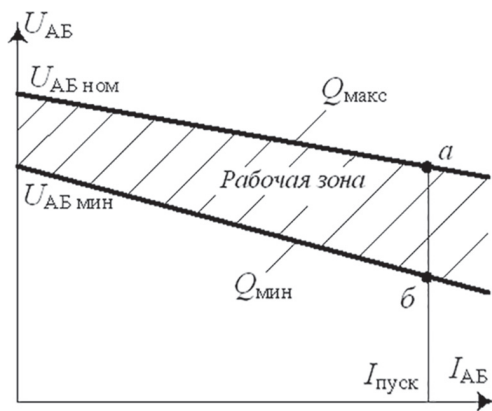


Рис. 3. Выходная характеристика аккумулятора UAB(IAB)

Fig. 3. Output characteristic of the UAB battery (IAB)

напряжения вызывает уменьшение тягового усилия, что нежелательно.

В процессе работы величина питающего напряжения изменяется от  $U_{макс}$  до  $U_{мин}$ . При отсутствии подзаряда аккумулятора рабочая зона зависимости  $U_{AB}$  ( $I_{AB}$ ) лежит в пределах заштрихованной на рис. 3 фигуры. Таким образом, величина заряда аккумулятора  $Q_{AB}$ , выражаемая на практике в ампер-часах, может быть рассчитана по известной формуле

$$E_{AB} = U_{AB} Q_{AB}$$

откуда

$$Q_{AB} = E_{AB} / U_{AB}$$

В тех случаях, когда ток рекуперации тормозящего самосвала должен быть ограничен величиной допустимого по паспортным данным аккумулятора, на транспортном средстве параллельно аккумулятору следует подключать конденсаторный накопитель. Для определения величины емкости конденсатора зададимся условием недопустимости уменьшения величины напряжения ниже 15% от номинального ( $U_{мин} = 0,15U_{ном}$ ). Тогда требуемая емкость конденсатора для принятия энергии рекуперации с учетом того, что на нем сохранялось минимальное напряжение, определится как

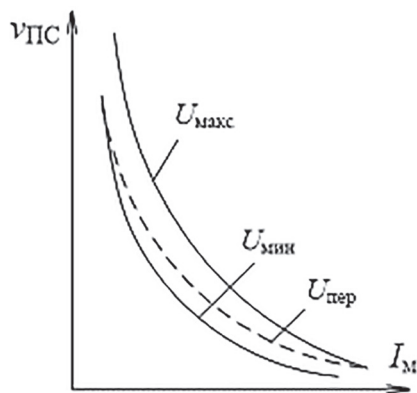


Рис. 4. Зависимость скорости самосвала от тока якоря

Fig. 4. Dependence of the speed of the dump truck on the anchor current

$$C = \frac{2E_{рек}}{U_{ном}^2 - U_{мин}^2}$$

Из теории электрической тяги известно, что при уменьшении напряжения на двигателе падают и развиваемые им мощность и скорость и возрастает энергопотребление [16]. Графическое изображение этого влияния на примере тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведено на рис. 4. При изменении величины питающего напряжения в процессе движения с  $U_{макс}$  до  $U_{мин}$  нарастание скорости подвижного состава происходит по кривой  $U_{пер}$ .

Такая кривая характерна при использовании аккумулятора, поскольку в процессе разряда напряжение на нем изменяется в пределах заштрихованной зоны, отражающей изменение величины накопленного в нем заряда и уменьшение в связи с этим величины выходного напряжения. При использовании конденсатора кривая  $U_{пер}$ , начавшись с точки при  $U_{макс}$  максимального напряжения, в конечной точке будет иметь меньшее значение скорости.

Для того, чтобы «поднять» характеристику до совпадения ее с кривой ак-

кумуляторного источника, необходимо увеличить емкость конденсатора, т.е. в конечном итоге увеличить его массу.

Для того, чтобы оценить в процентном отношении увеличение емкости, а, следовательно, и массы конденсатора с целью достижения совпадения характеристик, воспользуемся следующими соотношениями:

- энергия, расходуемая на движение транспортного средства с аккумулятором

$$\begin{aligned} E &= U_{\text{АБ ном}} Q_{\text{макс}} - U_{\text{АБ мин}} Q_{\text{мин}} = \\ &= (1 - k_U k_Q) U_{\text{АБ ном}} Q_{\text{макс}} = \\ &= (1 - 0,85 \cdot 0,25) U_{\text{АБ ном}} Q_{\text{макс}} = \\ &= 0,7875 U_{\text{АБ ном}} Q_{\text{макс}}, \end{aligned}$$

где  $k_U = U_{\text{АБ мин}} / U_{\text{АБ ном}}$  — коэффициент падения напряжения (обычно  $k_U = 0,85 \dots 0,87$ ;  $k_Q = Q_{\text{мин}} / Q_{\text{макс}}$  (обычно  $Q_{\text{мин}} = 0,25 Q_{\text{макс}}$ );

- величина энергии конденсатора, расходуемой на движение транспортного средства

$$\begin{aligned} E &= \frac{C_{\text{конд}} U_{\text{АБ ном}}^2}{2} - \frac{C_{\text{конд}} U_{\text{АБ мин}}^2}{2} = \\ &= 0,7875 U_{\text{АБ ном}} Q_{\text{макс}}, \end{aligned}$$

откуда

$$C_{\text{конд}} = 5,67 Q_{\text{макс}} / U_{\text{АБ ном}}.$$

В случае использования полной энергии конденсатора (разряд до нуля) требуемая величина его емкости  $C'_{\text{конд}}$

$$C'_{\text{конд}} = 2E / U_{\text{АБ ном}}^2 = 2Q_{\text{макс}} / U_{\text{АБ ном}}.$$

Таким образом, для обеспечения работы привода с конденсаторным источником энергии по характеристикам, идентичным аккумуляторному, требуется следующее увеличение емкости конденсатора:

$$\begin{aligned} C_{\text{конд}} / C'_{\text{конд}} &= (5,67 Q_{\text{макс}} / U_{\text{АБ ном}}) / \\ &/ (2Q_{\text{макс}} / U_{\text{АБ ном}}) = 2,84 \text{ раза.} \end{aligned}$$

### Заключение

В результате исследования энергоэффективности применения пневмоко-

лесного транспорта с электроприводом при добыче ископаемых открытым способом было выявлено:

1. При использовании на карьерных разработках самосвалов большой грузоподъемности их электроснабжение может быть обеспечено тремя различными схемными решениями — централизованным, автономным и комбинированным. Энергопотребление, как показали расчеты, во всех случаях соизмеримо. Поэтому для определения предпочтительного варианта реализации питания необходимо провести детальное экономическое обоснование;

2. На расход энергии для каждого из трех вариантов электроснабжения практически не влияет ни длина плеча от места погрузки до отвала, ни крутизна подъема. В течение смены затраты энергии на 1 горный самосвал составляют около 110 МДж;

3. Сравнение массогабаритных показателей источника энергии при автономном электроснабжении (аккумулятор либо конденсатор двойного электрического слоя) указывает на целесообразность применения аккумулятора;

4. Использование аккумулятора влечет за собой увеличение веса самосвала и существенно зависит от времени питания привода.

При этом возможны различные варианты его подзарядки (после одного цикла выемки, после работы в течение нескольких часов либо смены). Определение оптимального варианта требует проведения дополнительных исследований.

Кроме того, может быть использован вариант замены разряженного аккумулятора на новый (заряженный).

Для обеспечения работы привода с конденсаторным источником энергии по характеристикам, идентичным аккумуляторному, требуется увеличение емкости конденсатора почти в 2,84 раза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Klyuev R. V., Andriashin S. N.* Degradation of lithium-ion batteries in an electric transport complex // *Energies*. 2021, vol. 14, article 8072. DOI: 10.3390/en14238072.
2. *Саканцев Г. Г., Ческидов В. И., Зырянов И. В., Акишев А. Н.* Обоснование параметров уклонов вскрывающихся выработок при открытой разработке глубоко залегающих месторождений // *ФТПРПИ*. — 2018. — № 1. — С. 87–96. DOI: 10.15372/FTPRPI20180111.
3. *Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenk V. S., Tynchenko Y. A., Qi M.* Review of methods for improving the energy efficiency of electrified ground transport by optimizing battery consumption // *Energies*. 2023, vol. 16, article 729. DOI: 10.3390/en16020729.
4. *Саканцев М. Г.* О влиянии уклонов капитальных съездов на средний коэффициент вскрыши // *Энергосбережение на карьерном автомобильном транспорте. Материалы международного научно-технического семинара*. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2003. — 270 с.
5. *Чаадаев А. С., Акишев А. Н., Бахтин В. Л., Бабаскин С. Л.* Схемы вскрытия и отработки глубоких горизонтов карьеров круто наклонными выработками // *Горная промышленность*. — 2008. — № 2. — С. 75–80.
6. *Смирнов В. П., Лель Ю. И.* Теория карьерного большегрузного автомобильного транспорта. — Екатеринбург: УрО РАН, 2002. — 355 с.
7. *Sorokova S. N., Efremkov E. A., Qi M.* Mathematical modeling of the state of the battery of cargo electric vehicles // *Mathematics*. 2023, vol. 11, article 536. DOI: 10.3390/math11030536.
8. *Кортелев О. Б., Ческидов В. И., Норри В. К.* Влияние параметров рабочей зоны на режим горных работ и границы карьеров // *ФТПРПИ*. — 2011. — № 5. — С. 53–59.
9. *Voitovich E. V., Kononenko R. V., Konyukhov V. Y., Tynchenko V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A.* Designing the optimal configuration of a small power system for autonomous power supply of weather station equipment // *Energies*. 2023, vol. 16, article 5046. DOI: 10.3390/en16135046.
10. *Uno K., Imaie K., Maekawa K., Smith G., Suyama A., Hatori J.* Development of mining machinery and future outlook for electrification // *Hitachi Review*. 2013, vol. 62, no. 2, pp. 99–106.
11. *Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M.* Review models and methods for determining and predicting the reliability of technical systems and transport // *Mathematics*. 2023, vol. 11, article 3317. DOI: 10.3390/math11153317.
12. *Хохряков В. С., Саканцев Г. Г.* Исследование точности технико-экономических показателей при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом // *Горный журнал*. — 1968. — № 5. — С. 5–21.
13. *Sorokova S. N., Qi M.* Mathematical modeling of the state of the battery of cargo electric vehicles // *Mathematics*. 2023, vol. 11, article 536. DOI: 10.3390/math11030536.
14. *Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko S. V., Klyuev R. V., Zagorodnii N. A., Tynchenko Y. A.* Study of supercapacitors built in the start-up system of the main diesel locomotive // *Energies*. 2023, vol. 16, article 3909. DOI: 10.3390/en16093909.
15. *Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M.* Review models and methods for determining and predicting the reliability of technical systems and transport // *Mathematics*. 2023, vol. 11, article 3317. DOI: 10.3390/math11153317.
16. *Ertugrul N., Kani A. P., Davies M., Sbarbaro D., Morán L.* Status of mine electrification and future potentials // *SGES 2020. International Conference on Smart Grids and Energy Systems*. 2020. DOI: 10.1109/SGES51519.2020.00034.
17. *Kuan-Hung Chen, Min Ji Namkoong, Vishwas Goel, Chenglin Yang* Efficient fast-charging of lithium-ion batteries enabled by laser-patterned three-dimensional graphite anode architectures // *Journal of Power Sources*. 2020, vol. 471. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228475.
18. *Gagandeep Sharma, Vijay K. Sood, Mohammad Saad Alam, Samir M. Shariff.* Comparison of common DC and AC bus architectures for EV fast charging stations and impact on power quality // *Transportation*. 2020, vol. 5. DOI: 10.1016/j.etrans.2020.100066.
19. *Tingting He, Jianguo Zhu, Dylan Dah-Chuan Lu, Linfeng Zheng, Mahlagha Mahdavi Aghdam, Jianwei Zhang* Comparison study of electric vehicles charging stations with AC and DC buses for bidirectional power flow in smart car parks // *IECON 2017. 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017. DOI: 10.1109/IECON.2017.8216794.
20. *Dominic Savio A., Verma R., Kanagaraj L., Giri Thulasi Raman S. R., Rajamanickam N., Chokalingam B., Sekar K. M., Mihet-Popa L.* Electric vehicles charging stations' architectures, criteria,

power converters, and control strategies in microgrids // *Electronics*. 2021, vol. 10, no. 16. DOI: 10.3390/electronics10161895.

21. Ganta Naveen, Tony Ho-Tung Yip, Yuyu Xie Modeling and protection of electric vehicle charging station / PIICON 2014. 6th IEEE Power India International Conference. 2014. DOI: 10.1109/POWERI.2014.7117733. **TMAS**

## REFERENCES

1. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of lithium-ion batteries in an electric transport complex. *Energies*. 2021, vol. 14, article 8072. DOI: 10.3390/en14238072.

2. Sakantsev G. G., Cheskidov V. I., Zyryanov I. V., Akishev A. N. Justification of the slope parameters of opening workings in open pit mining of deep-lying deposits. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2018, no. 1, pp. 87–96. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20180111.

3. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenk V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of methods for improving the energy efficiency of electrified ground transport by optimizing battery consumption. *Energies*. 2023, vol. 16, article 729. DOI: 10.3390/en16020729.

4. Sakantsev M. G. On the influence of capital ramp slopes on the average stripping ratio. *Energoberezhenie na kar'ernom avtomobil'nom transporte. Materialy mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminarra* [Energy saving in quarry motor transport. Materialy mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminarra], Ekaterinburg, IGD UrO RAN, 2003, 270 p.

5. Chaadaev A. S., Akishev A. N., Bakhtin V. L., Babaskin S. L. Schemes for opening and developing deep horizons of quarries by steeply inclined workings. *Russian Mining Industry Journal*. 2008, no. 2, pp. 75–80. [In Russ].

6. Smirnov V. P., Lel' Yu. I. *Teoriya kar'ernogo bol'shegruznogo avtomobil'nogo transporta* [Theory of quarry heavy-duty motor transport], Ekaterinburg, UrO RAN, 2002, 355 p.

7. Sorokova S. N., Efremkov E. A., Qi M. Mathematical modeling of the state of the battery of cargo electric vehicles. *Mathematics*. 2023, vol. 11, article 536. DOI: 10.3390/math11030536.

8. Kortelev O. B., Cheskidov V. I., Norri V. K. Influence of working area parameters on the mining mode and quarry boundaries. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2011, no. 5, pp. 53–59. [In Russ].

9. Voitovich E. V., Kononenko R. V., Konyukhov V. Y., Tynchenko V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Designing the optimal configuration of a small power system for autonomous power supply of weather station equipment. *Energies*. 2023, vol. 16, article 5046. DOI: 10.3390/en16135046.

10. Uno K., Imaie K., Maekawa K., Smith G., Suyama A., Hatori J. Development of mining machinery and future outlook for electrification. *Hitachi Review*. 2013, vol. 62, no. 2, pp. 99–106.

11. Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review models and methods for determining and predicting the reliability of technical systems and transport. *Mathematics*. 2023, vol. 11, article 3317. DOI: 10.3390/math11153317.

12. Khokhryakov V. S., Sakantsev G. G. Study of the accuracy of technical and economic indicators in the development of mineral deposits by open pit mining. *Gornyi Zhurnal*. 1968, no. 5, pp. 5–21. [In Russ].

13. Sorokova S. N., Qi M. Mathematical modeling of the state of the battery of cargo electric vehicles. *Mathematics*. 2023, vol. 11, article 536. DOI: 10.3390/math11030536.

14. Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko S. V., Klyuev R. V., Zagorodnii N. A., Tynchenko Y. A. Study of supercapacitors built in the start-up system of the main diesel locomotiv. *Energies*. 2023, vol. 16, article 3909. DOI: 10.3390/en16093909.

15. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review models and methods for determining and predicting the reliability of technical systems and transport. *Mathematics*. 2023, vol. 11, article 3317. DOI: 10.3390/math11153317.

16. Ertugrul N., Kani A. P., Davies M., Sbarbaro D., Morán L. Status of mine electrification and future potentials. *SGES 2020. International Conference on Smart Grids and Energy System*. 2020. DOI: 10.1109/SGES51519.2020.00034.

17. Kuan-Hung Chen, Min Ji Namkoong, Vishwas Goel, Chenglin Yang Efficient fast-charging of lithium-ion batteries enabled by laser-patterned three-dimensional graphite anode architectures. *Journal of Power Sources*. 2020, vol. 471. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228475.

18. Gagandeep Sharma, Vijay K. Sood, Mohammad Saad Alam, Samir M. Shariff. Comparison of common DC and AC bus architectures for EV fast charging stations and impact on power quality. *Transportation*. 2020, vol. 5. DOI: 10.1016/j.etrans.2020.100066.

19. Tingting He, Jianguo Zhu, Dylan Dah-Chuan Lu, Linfeng Zheng, Mahlagha Mahdavi Aghdam, Jianwei Zhang Comparison study of electric vehicles charging stations with AC and DC buses for bidirectional power flow in smart car parks. *IECON 2017. 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017. DOI: 10.1109/IECON.2017.8216794.

20. Dominic Savio A., Verma R., Kanagaraj L., Giri Thulasi Raman S. R., Rajamanickam N., Chokkalingam B., Sekar K. M., Mihet-Popa L. Electric vehicles charging stations' architectures, criteria, power converters, and control strategies in microgrids. *Electronics*. 2021, vol. 10, no. 16. DOI: 10.3390/electronics10161895.

21. Ganta Naveen, Tony Ho-Tung Yip, Yuyu Xie Modeling and protection of electric vehicle charging station. *PIICON 2014. 6th IEEE Power India International Conference*. 2014. DOI: 10.1109/POWERI.2014.7117733.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Бирюков Валерий Викторович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: vavib49@mail.ru,

Scopus Author ID: 14043188600, РИНЦ Author ID: 726879,

*Малозёмов Борис Витальевич*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: mbv5@mail.ru, Scopus Author ID: 10239844500,

Researcher ID: J-1723-2016, РИНЦ Author ID: 176629

ORCID ID: 0000-0001-8686-9556,

*Щуров Николай Иванович*<sup>1</sup> — д-р техн. наук,

профессор, e-mail: shhurov@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5459-9544,

*Сингизин Игорь Иванович*<sup>1</sup> — ассистент,

e-mail: i.singizin@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1135-4309,

*Латышев Роман Николаевич*<sup>1</sup> — ассистент,

e-mail: latyshev@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3920-8728,

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет.

**Для контактов:** Малозёмов Б.В., e-mail: mbv5@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.V. Biryukov*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: vavib49@mail.ru, Scopus Author ID: 14043188600,

Rins Author ID: 726879,

*B.V. Malozyomov*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: mbv5@mail.ru, Scopus Author ID: 10239844500,

Researcher ID: J-1723-2016, Rins Author ID: 176629,

ORCID ID: 0000-0001-8686-9556,

*N.I. Shchurov*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: shhurov@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5459-9544,

*I.I. Singizin*<sup>1</sup>, Assistant, e-mail: i.singizin@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1135-4309,

*R.N. Latyshev*<sup>1</sup>, Assistant, e-mail: latyshev@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3920-8728,

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia.

**Corresponding author:** B.V. Malozyomov, e-mail: mbv5@mail.ru.

Получена редакцией 19.06.2024; получена после рецензии 18.10.2024; принята к печати 10.11.2024.

Received by the editors 19.06.2024; received after the review 18.10.2024; accepted for printing 10.11.2024.