

## Научная статья

УДК 622.625.6

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-42-48

Арефьев Евгений Михайлович\*<sup>1</sup>, Рябко Константин Александрович<sup>2</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)<sup>2</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения

\*E-mail: elcross@mail.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ МОНОРЕЛЬСОВОГО ЛОКОМОТИВА С УЧЕТОМ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ****Информация о статье**

Поступила:

07 апреля 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 июня 2023 г.

Принята к печати:

27 июня 2023 г.

Опубликована:

11 июля 2023 г.

**Ключевые слова:**

шахтная монорельсовая дорога, монорельсовый локомотив, привод, рекуперация, энергоёмкость, аккумуляторная батарея

**Аннотация.**

Одним из путей снижения себестоимости добычи полезных ископаемых и повышения производительности труда на горных предприятиях является повышение энергоэффективности подвесных монорельсовых дорог. В общей структуре энергопотребления горных предприятий существенную долю составляет электротяга, поэтому вопрос рационального использования топливно-энергетических ресурсов на тягу шахтных монорельсовых локомотивов является актуальным. В работе рассмотрено влияние параметров монорельсового локомотива и условий его эксплуатации на энергоёмкость аккумуляторных батарей. Разработана математическая модель и алгоритм определения энергоёмкости аккумуляторной батареи монорельсового локомотива, работающего как в тяговом, так и в рекуперативном режиме с учетом условий эксплуатации и массогабаритных параметров. Расчеты, проведенные с использованием модели, показали, что рекуперация возможна при движении состава по наклонной выработке вниз при углах наклона пути свыше шести градусов. Установлено, что для типовой схемы вспомогательного транспорта, состоящей из трех участков длиной 1,5 км – двух горизонтальных и наклонного ( $\beta=10^\circ$ ), оборудованной монорельсовым аккумуляторным руднично-шахтным локомотивом «МАРШаЛ», применение рекуперативного привода позволит снизить энергоёмкость батареи или увеличить длительность автономной работы на 13,4%.

**Для цитирования:** Арефьев Е.М., Рябко К.А. Математическая модель определения энергоёмкости аккумуляторной батареи монорельсового локомотива с учетом рекуперации энергии // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 3 (167). С. 42-48. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-42-48, EDN: XMFBLX

**Постановка проблемы**

Снижение себестоимости производства и повышение производительности труда на горных предприятиях могут быть обеспечены за счет повышения эффективности шахтного вспомогательного транспорта и, в частности, за счет повышения энергоэффективности подвесных монорельсовых дорог.

Шахтные монорельсовые дороги обладают рядом существенных преимуществ, обуславливающих перспективность их использования: снижение площади сечения выработки за счет вынесения вспомогательного транспорта в ее верхнюю часть,

простота автоматизации и возможность повторного использования пути, низкий коэффициент тары.

Шахтный транспорт является одним из наиболее энергоёмких потребителей горных предприятий. Поскольку электротяга составляет существенную долю в общей структуре энергопотребления горных предприятий, а объемы электроэнергии, расходуемой на тягу, постоянно растут, следовательно, вопрос рационального использования топливно-энергетических ресурсов на тягу шахтных монорельсовых локомотивов является актуальным.

**Анализ последних исследований и публикаций**

Выполненный анализ технических и научных публикаций показывает, что в настоящее время аккумуляторный электрический привод находит все большее применение среди автономных горно-транспортных машин [1-3]. С развитием силовой электроники и применением новых литий-ионных электрохимических систем широкое распространение получило применение аккумуляторного привода на шахтных напочвенных локомотивах, карьерном специальном транспорте, подвесных монорельсовых дорогах [4-6]. Несмотря на значительный объем исследований в области синтеза и повышения эффективности работы горно-транспортных машин на аккумуляторной тяге, вопросам научно обоснованного определения мощности силовой установки и накопительного элемента с учетом условий эксплуатации и возможной рекуперации энергии торможения при движении на спусках уделено недостаточное внимание [7-10]. Также следует отметить, что задача рекуперации электрической энергии торможения транспортных средств, в том числе и шахтных монорельсовых локомотивов, находит все большую актуальность на сегодняшний день [11-14]. Однако в большинстве исследований и публикаций практически не рассматривается задача определения мощности силовой установки и накопительного элемента с учетом условий эксплуатации и их массогабаритных параметров при размещении на шахтном монорельсовом локомотиве.

#### Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка оптимизационной математической модели определения энергоемкости аккумуляторной батареи и мощности силовой установки шахтного монорельсового локомотива, работающего как в тяговом, так и в рекуперативном режиме с учетом условий эксплуатации и массогабаритных параметров.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- разработать математическую модель для определения энергоемкости аккумуляторной батареи монорельсового локомотива;
- разработать алгоритм расчета необходимой энергоемкости аккумуляторной батареи шахтного монорельсового локомотива;
- на основании научно-обоснованного подхода разработать рекомендации по работе электрического привода аккумуляторного монорельсового локомотива в режиме рекуперации.

#### Основной материал исследования

Входными данными для определения требуемой энергоемкости аккумуляторных батарей шахтного монорельсового локомотива являются его параметры и конфигурация пути, разбитого на определенные  $i$ -е участки.

В основе модели лежит принцип того, что энергоемкость аккумуляторной батареи  $E$  должна быть минимальной для расчетных значений потребляемой мощности  $N_i$  на определенных  $i$ -х участках пути длиной  $l_i$  и времени движения на этих участках  $\Delta t_i$  при условии обеспечения заданного эксплуатационного цикла [15-16]:

$$E(N_i, \Delta t_i) \rightarrow \min.$$

Система ограничений массогабаритных параметров модели имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{ab}(E) \leq m_{max} \\ V_{ab}(E) \leq V_{max} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где  $m_{ab}(E)$  – зависимость массы аккумуляторной батареи от его энергоемкости;

$V_{ab}(E)$  – зависимость объема аккумуляторной батареи от его энергоемкости;

$m_{max}$ ,  $V_{max}$  – предельные значения соответственно массы и объема свободного пространства локомотива для установки на нем аккумуляторной батареи.

Процедура решения этой задачи представлена на Рис. 1.

На первом этапе производится анализ пути движения состава и разбивка его на прямолинейные  $i$ -е участки, на которых масса перевозимого груза  $m_i$ , и угол наклона трассы  $\beta_i$  остаются постоянными.

На втором этапе определяется усилие на приводных колесах тягового устройства для каждого

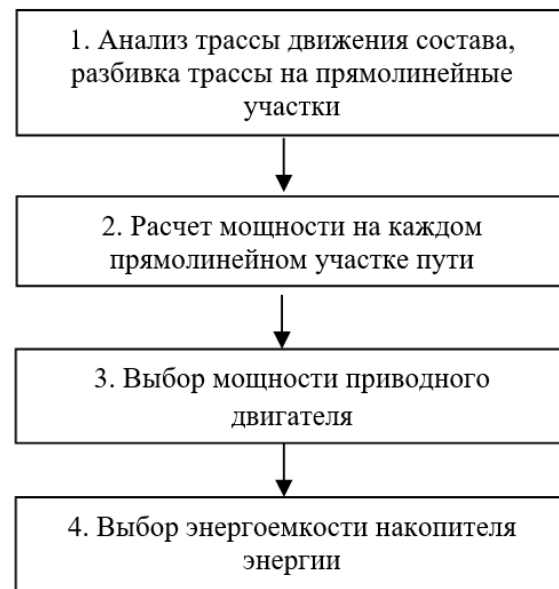


Рис. 1. Процедура определения энергоемкости аккумуляторной батареи шахтного монорельсового локомотива

Fig. 1. Procedure for determining the energy capacity of the battery of a mine monorail locomotive

участка:

$$F_i = (m_i + m_0)g(w' \cos \beta_i + \sin \beta_i) + Mg(w_x' \cos \beta_i + \sin \beta_i) + zPw_n', \quad (2)$$

где,  $m_0$  – собственная масса прицепной части поезда;

$g$  – ускорение свободного падения;

$M$  – масса локомотива;

$w'$  – коэффициент сопротивления движению ходовых колес прицепной части поезда с грузом;

$w_x'$  и  $w_n'$  – коэффициенты сопротивления движению ходовых и приводных колес локомотива соответственно;

$Z$  – количество приводных модулей;

$P$  – суммарное усилие прижатия пары приводных колес.

Мощность на  $i$ -том участке пути:

$$N_i = \begin{cases} \frac{F_i V_{cpi} K_3}{\eta_{npi}}, & \text{если } F_j \geq 0 \\ F_i V_{cpi} K_3 \eta_{npi}, & \text{если } F_j < 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где,  $V_{cpi}$  – средняя скорость движения состава на  $i$ -том участке трассы (определяется по рабочим характеристикам двигателя в зависимости от мощности  $N_i$ );

$K_3$  – коэффициент запаса мощности;

$\eta_{npi}$  – КПД привода локомотива на  $i$ -том участке трассы (определяется по рабочим характеристикам двигателя в зависимости от мощности  $N_i$ ).

Для расчета энергоемкости аккумуляторной батареи необходимо сформировать вектор необходимой энергоемкости  $E$ . Для этого определяем энергоемкость аккумуляторной батареи  $E_i$  на каждом этапе изменения требуемой мощности монорельсового локомотива.

Мощность привода шахтного монорельсового локомотива определяется из условия:

$$N = \max [N_i].$$

Вектор  $E$  формируется с учетом КПД разрядки  $\eta_{pi}$  и зарядки  $\eta_{zi}$  (в режиме рекуперации) аккумуляторной батареи для  $i$ -того участка трассы:

$$E_i = \begin{cases} \frac{N_i \Delta \tau_i}{\eta_{zi}}, & \text{если } N_i < 0 \\ \frac{N_i \Delta \tau_i}{\eta_{pi}}, & \text{если } N_i \geq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где  $\Delta \tau_i = l_i / V_{cpi}$ .

На основе вектора  $E$  определяется необходимая энергоемкость аккумуляторной батареи:

$$E_{a\delta} = N_u \sum_{i=1}^n E_i, \quad (5)$$

где  $N_u$  – количество циклов движения монорельсовой дороги за сутки;  
 $n$  – количество  $i$ -х участков трассы.

С учетом (1-5) получена математическая модель для определения энергоемкости аккумуляторной батареи монорельсового локомотива:

$$\begin{cases} F_i = (m_i + m_0)g(w' \cos \beta_i + \sin \beta_i) + Mg(w_x' \cos \beta_i + \sin \beta_i) + zPw_n'; \\ N_i = \begin{cases} \frac{F_i V_{cpi} K_3}{\eta_{npi}}, & \text{если } F_i \geq 0 \\ F_i V_{cpi} K_3 \eta_{npi}, & \text{если } F_i < 0; \end{cases} \\ E_i = \begin{cases} \frac{N_i \Delta \tau_i}{\eta_{zi}}, & \text{если } N_i < 0 \\ \frac{N_i \Delta \tau_i}{\eta_{pi}}, & \text{если } N_i \geq 0; \end{cases} \\ E_{a\delta} = N_u \sum_{i=1}^n E_i; \\ m_{a\delta}(E) \leq m_{max} \\ V_{a\delta}(E) \leq V_{max} \end{cases}$$

На основе вышеизложенного был составлен алгоритм расчета необходимой энергоемкости аккумуляторной батареи шахтного монорельсового локомотива (Рис. 2).

Предложенный алгоритм позволяет определить минимально необходимую энергоемкость аккумуляторной батареи  $E_{a\delta}$  в зависимости от выбранной мощности силовой установки.

Так, для типовой схемы вспомогательного транспорта, состоящей из трех участков длиной 1,5 км – двух горизонтальных и наклонного ( $\beta=10^\circ$ ), оборудованной монорельсовым аккумуляторным руднично-шахтным локомотивом «МАРШАЛ» [17], при транспортировке груза массой 5 т требуемая мощность приводных двигателей составила 60,4 кВт. Требуемая энергоемкость батареи при использовании безрекуперативного привода составила  $E_{a\delta}=40,2$ кВт·ч.

При рекуперации энергии на наклонном участке требуемая энергоемкость батареи составит за цикл  $E_{a\delta}=34,8$ кВт·ч.

Таким образом, применение рекуперативного привода для рассмотренной конфигурации трассы позволит снизить энергоемкость батареи или увеличить длительность автономной работы на 13,4%.

Зависимость тягового усилия от угла наклона пути монорельсового локомотива при движении состава по уклону представлена на Рис. 3.

Анализ зависимости показывает, что работа привода монорельсового локомотива в режиме ре-

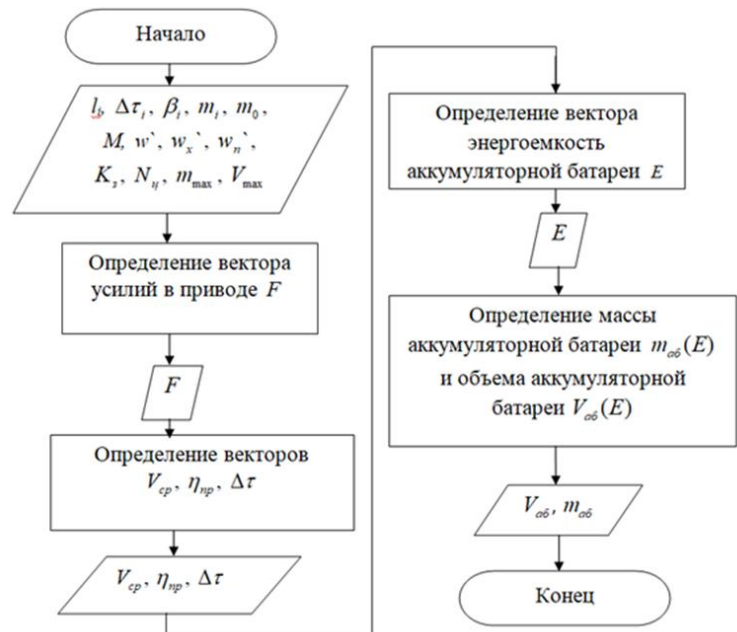


Рис. 2. Алгоритм расчета требуемой энергоемкости аккумуляторной батареи шахтного монорельсового локомотива  
Fig. 2. Algorithm for calculating the required energy capacity of the storage battery of a mine monorail locomotive

куперации возможна при движении состава по наклонной выработке вниз при углах наклона пути более 6 градусов. В дальнейшей работе будет проведена оценка области эффективного применения шахтных монорельсовых локомотивов с рекуперативным приводом.

#### Выводы

1. Разработана математическая модель и алгоритм определения энергоемкости аккумуляторной батареи монорельсового локомотива с учетом рекуперации энергии. Расчет с использованием модели показал, что рекуперация возможна при движении состава по уклону при углах наклона трассы свыше шести градусов.

2. Установлено, что для типовой схемы вспомо-

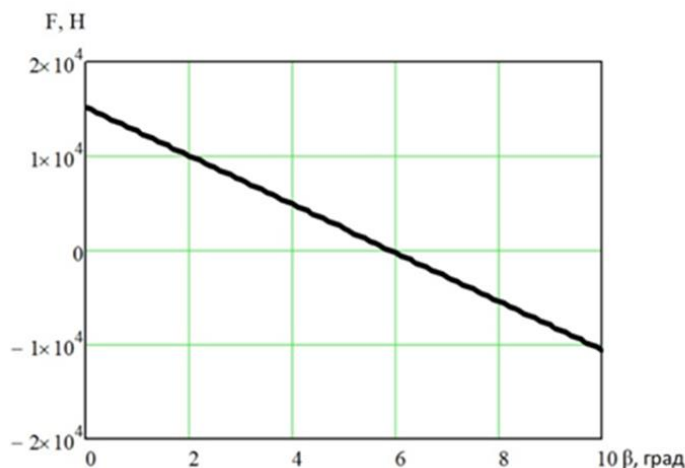


Рис. 2. Алгоритм расчета требуемой энергоемкости аккумуляторной батареи шахтного монорельсового локомотива  
Fig. 2. Algorithm for calculating the required energy capacity of the storage battery of a mine monorail locomotive

гательного транспорта, состоящей из трех участков длиной 1,5 км – двух горизонтальных и наклонного ( $\beta=10^\circ$ ), оборудованной монорельсовым аккумуляторным руднично-шахтным локомотивом «МАР-Шал», применение рекуперативного привода позволит снизить энергоемкость батареи или увеличить длительность автономной работы на 13,4%.

3. Установлено, что работа привода монорельсового локомотива в режиме рекуперации возможна при движении состава по наклонной выработке вниз при углах наклона пути более 6 градусов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко В. П. Пути повышения энергоэффективности и ресурсосбережения горного локомотивного // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 9. С. 128–137. EDN WRKLAJ.
2. Степаненко В. П. Определение параметров накопителей энергии комбинированных силовых установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 8. С. 166–174. EDN WJGFMZ.
3. Гутаревич В. О., Рябко К. А., Рябко Е. В., Захаров В. А. Обзор конструкций тяговых аккумуляторных батарей, применяемых на шахтных электровозах // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 2. С. 109–118. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-2-109-118. EDN YMLFKJ.
4. Kozłowski A., Bołoz Ł. Design and research on power systems and algorithms for controlling elec-

tric underground mining machines powered by batteries // Energies. 2021. Т. 14. №. 13. С. 4060.

5. Черепанов В. А. Особенности использования накопителей энергии на карьерном транспорте // Горнодобывающая промышленность в 21 веке: вызовы и реальность : Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА», Мирный, 15–16 сентября 2021 года. Мирный: Акционерная компания «АЛРОСА» (публичное акционерное общество), 2021. С. 44–45. EDN RYBWFY.

6. Зюзев А. М., Метельков В. П., Тарасов И. П., Тарасов А. П., Исаков М. В. Эффективность использования накопителей энергии для карьерного троллейвоза // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2010. № 2. С. 81–86. EDN ODBFCT.

7. Рябко К. А. Теоретическая оценка эффективности эксплуатации горнотранспортных монорельсовых локомотивов на аккумуляторной тяге // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 6. С. 72–82. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-6-72-82. EDN MCCUFZ.

8. Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Агунов А. В., Третьяков А. В. Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава. 2018. № 10. С. 55–59. EDN MAGDHY.

9. Степаненко В. П., Белозеров В. И. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок горнотранспортных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 2. С. 174–181. EDN TJUUQF.

10. Степаненко В. П., Белозеров В. И., Сорин Л. Н. Перспективы применения комбинированных накопителей энергии на карьерном железнодорожном транспорте // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 5. С. 317–322. EDN TWMUND.

11. Polnik V. [et al.] Energy recuperation as one of the factors improving the energy efficiency of mining battery locomotives // Management Systems in Production Engineering. 2020. Т. 28. №. 4. С. 253–258.

12. Рябко Е. В., Рябко К.А., Сацюк А.В. Повышение энергоэффективности моторвагонного подвижного состава за счет использования емкостного конденсаторного накопителя энергии // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2020. № 59. С. 7–82. EDN QCRZB.

13. Незвак В. Л., Расчет параметров и показателей работы системы накопления электроэнергии на участках с рекуперативным торможением электроподвижного состава // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1(81). С. 149–160. DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_149. EDN CSKNRJ.

14. Zhu L., Hu K. Research on battery-supercapacitor hybrid energy storage control scheme for mine electric locomotive // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. Т. 1303. №. 1. С. 012070.

15. Евстафьев А. М. Оценка энергоемкости бортового накопителя энергии для тягового подвижного состава // Бюллетень результатов научных исследований. 2018. № 2. С. 7–17. EDN XSMFYL.

16. Титова Т. С., Евстафьев А.М., Никитин В.В. Применение накопителей энергии для повышения энергетической эффективности тягового подвижного состава // 2018. № 10. С. 21–25. EDN VAKSSW.

17. Монорельсовый электровоз типа «МАР-ШаЛ». Электронный ресурс. <http://oaoex.ru/upload/docs/MARShaL.pdf>

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Арефьев Евгений Михайлович**, кандидат техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), (г. Санкт-Петербург, 190013, РФ, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49 литера А), e-mail: [elcross@mail.ru](mailto:elcross@mail.ru)

**Рябко Константин Александрович**<sup>2</sup>, кандидат техн. наук, доцент, Ростовский государственный университет путей сообщения, (филиал в г. Воронеж, 394026, РФ, г. Воронеж, ул. Урицкого 75а)

Заявленный вклад авторов:

Арефьев Евгений Михайлович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, выводы, сбор и анализ данных, написание текста.

Рябко Константин Александрович – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-42-48

**Evgeny M. Arefyev**<sup>\*1</sup>, **Konstantin A. Ryabko**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)

<sup>2</sup>Rostov State University of Railway Transport, branch in Voronezh

\*E-mail: [elcross@mail.ru](mailto:elcross@mail.ru)

## MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE ENERGY CAPACITY OF A MONORAIL LOCOMOTIVE BATTERY WITH ENERGY RECOVERY CONSIDERATION



### Article info

Received:

07 April 2023

Accepted for publication:

15 June 2023

Accepted:

27 June 2023

### Abstract.

*One of the ways to reduce the cost of mining and increase labor productivity at mining enterprises is to increase the energy efficiency of overhead monorails. In the general structure of energy consumption of mining enterprises, electric traction accounts for a significant share making the issue of rational use of fuel and energy resources for traction of mine monorail locomotives relevant. The paper considers the influence of the parameters of a monorail locomotive and its operating conditions on the energy intensity of batteries. A mathematical model and an algorithm for determining the energy intensity of the battery of a monorail locomotive operating both in traction and recuperative modes have been developed, taking into account operating conditions and weight and size parameters. Calculations carried out using the model showed that recuperation is possible when the train moves down an inclined working at angles of inclination of the path over six degrees. It has been established that for a typical scheme of auxiliary*

Published:  
11 July 2023

**Keywords:** mine monorail,  
monorail locomotive, drive,  
recuperation, energy intensity,  
battery

transport, consisting of three sections 1.5 km long: two horizontal and one inclined ( $\beta = 100$ ), equipped with a MARSHAL battery-powered monorail locomotive, the use of a regenerative drive will reduce the energy intensity of the battery or increase the duration battery life by 13.4%.

**For citation:** Arefyev E.M., Ryabko K.A. Mathematical model for determining the energy capacity of a monorail locomotive battery with energy recovery consideration. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2023; 3(167):42-48 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-42-48, EDN: XMFBLX

#### REFERENCES

1. Stepanenko V.P. Ways to improve energy efficiency and resource saving of a mining locomotive. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; 9:128–137.
2. Stepanenko V.P. Determination of the parameters of energy storage devices of combined power plants. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; 8:166–174.
3. Gutarevich V.O., Ryabko K.A., Ryabko E.V., Zakharov V.A. A review of the designs of traction batteries used in mine electric locomotives. *Mining magazine*. 2020; 2:109–118.
4. Kozłowski A., Boloz Ł. Design and research on power systems and algorithms for controlling electric underground mining machines powered by batteries. *Energies*. 2021; 14(13):4060.
5. Cherepanov V.A. Features of the use of energy storage devices in open-pit transport. *Mining industry in the 21st century: challenges and reality: Collection of abstracts of the international scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of the Yakutniproalmaz Institute of AK ALROSA*. Mirny, September 15–16, 2021. Mirny: Joint Stock Company "ALROSA" (Public Joint Stock Company), 2021; 44–45.
6. Zyuzev A.M., Metelkov V.P., Tarasov I.P., Tarasov A.P., Isakov M.V. Efficiency of using energy storage devices for a quarry trolley car. *News of higher educational institutions. Mining magazine*. 2010; 2:81–86.
7. Ryabko K.A. Theoretical evaluation of the efficiency of operation of battery-powered mining transport monorail locomotives. *Mining magazine*. 2022; 6:72–82.
8. Sharyakov V.A., Sharyakova O.L., Agunov A.V., Tretyakov A.V. Possibilities of rational use of braking energy of electric rolling stock. 2018; 10:55–59.
9. Stepanenko V.P., Belozerov V.I. The use of combined (hybrid) power plants for mining and transport machines. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 2:174–181.
10. Stepanenko V.P., Belozerov V.I., Sorin L.N. Prospects for the use of combined energy storage devices in quarry railway transport. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 5:317–322.
11. Polnik B. [et al.] Energy recuperation as one of the factors improving the energy efficiency of mining battery locomotives. *Management Systems in Production Engineering*. 2020; 28(4):253–258.
12. Ryabko E.V., Ryabko K.A., Satsyuk A.V. Improving the energy efficiency of multi-unit rolling stock through the use of a capacitive capacitor energy storage. *Collection of scientific works of the Donetsk Institute of Railway Transport*. 2020; 59:73–82.
13. Nezevak V.L. Calculation of parameters and indicators of the operation of the system of accumulation of electricity in areas with regenerative braking of electric rolling stock. *Bulletin of the Rostov State University of Communications*. 2021; 1(81):149–160.
14. Zhu L., Hu K. Research on battery-supercapacitor hybrid energy storage control scheme for mine electric locomotive. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*. 2019; 1303(1):012070.
15. Evstafiev A.M. Evaluation of the energy intensity of the onboard energy storage for traction rolling stock. *Bulletin of the results of scientific research*. 2018; 2:7–17.
16. Titova T.S., Evstafiev A.M., Nikitin V.V. The use of energy storage devices to improve the energy efficiency of traction rolling stock. 2018; 10: 21–25.
17. Monorail electric locomotive of the MARSHAL type. Electronic resource. <http://oaoex.ru/upload/docs/MARShAL.pdf>

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

**Evgeny M. Arefyev**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), (St. Petersburg, 190013, Russian Federation, Moskovsky av., 24-26/49 letter A), e-mail: elcross@mail.ru

**Konstantin A. Ryabko**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Rostov State University of Railway Transport, (branch in Voronezh, 394026, Russian Federation, Voronezh, st. Uritskogo 75a)

*Contribution of the authors:*

Evgeny M. Arefyev – formulation of a research task, scientific management, conclusions, data collection and analysis, writing a text.

Konstantin A. Ryabko – review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing text.

*Author have read and approved the final manuscript.*

