

В.П. Степаненко

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ГОРНОГО ЛОКОМОТИВНОГО ТРАНСПОРТА

Рассмотрены пути повышения энергоэффективности и ресурсосбережения горного локомотивного транспорта с использованием накопителей энергии. Определены энергоемкость, мощность и места размещения пяти типов накопителей энергии: электрохимических аккумуляторов, сверхпроводящих индуктивных накопителей, инерционных накопителей, суперконденсаторов, комбинированных накопителей, состоящих из электрохимических аккумуляторов и суперконденсаторов. Показаны преимущества использования в накопителях свинцово-кислотных батарей по сравнению с никель-железными. Определена потребность горного локомотивного транспорта России в суперконденсаторах. Установлено, что применение накопителей энергии позволит уменьшить расход энергии на 15–20% и снизить капитальные затраты. Большая часть снижения расхода энергии будет получена в системе тягового электроснабжения. Снижение капитальных затрат будет достигнуто за счет уменьшения длины контактных сетей, количества подстанций и электровозов.

Ключевые слова: энергоэффективность, ресурсосбережение, накопители энергии, суперконденсатор, аккумуляторная батарея, рекуперативное торможение, электровоз рудничный.

В настоящее время энергоэффективность и ресурсосбережение приобретают на горном транспорте особую значимость [1–9]. Одно из перспективных направлений в решении этой проблемы — это использование комбинированных энергосиловых установок (КЭСУ), совмещающих промышленные электрические сети, двигатели внутреннего сгорания, электродвигатели и мощные накопители электрической энергии — аккумуляторы и суперконденсаторы [1, 3, 4, 5, 11, 12]. Для горного транспорта необходимо разработать накопители электрической энергии двух исполнений: транспортного для установки на тяговом подвижном составе — электровозах, дизелевозах, тяговых агрегатах и колесных транспортных машинах с электрическим

приводом, и стационарного для установки в системах тягового электроснабжения, на тяговых подстанциях и распределительных постах, на постах секционирования контактных сетей и на передвижных накопительных подстанциях.

Системы тягового электроснабжения по мгновенным, динамическим и интегральным показателям неравномерности энергопотребления являются наиболее неблагоприятными. При отсутствии накопителей электрической энергии в системах тягового электроснабжения в случаях применения рекуперативного торможения дополнительно увеличивается неравномерность токовой нагрузки, что приводит к росту установленной мощности тяговых подстанций, трансформаторов, выпрямителей, увеличению потерь энергии в тяговой сети и в системах первичного электроснабжения [11].

Исследования показали, что экономический эффект от применения стационарных накопителей энергии в системах тягового электроснабжения намного выше, чем от установки на тяговом подвижном составе. Применение накопителей приводит к снижению установленной мощности тяговых подстанций, уменьшению потерь электрической энергии в тяговых трансформаторах, выпрямителях сети и в системах первичного электроснабжения от 5 до 12% [2, 5, 11]. В табл. 1 представлены значения энергоемкости и места рационального размещения на горнодобывающих предприятиях накопителей энергии пяти типов: СПИН – сверх-

Таблица 1

Энергоемкость и места размещения накопителей энергии

Типы накопителей энергии	Место размещения и энергоемкость накопителя			
	районная подстанция	тяговая подстанция	тяговая сеть	тяговый подвижной состав
Сверхпроводящие индуктивные СПИН	$\leq 10 \text{ГДж}$	—	—	—
Инерционные ИН	—	$\leq 100\text{--}200 \text{МДж}$	—	$\leq 7\text{--}10 \text{МДж}$
Суперконденсаторные КДЭС	—	$\leq 100 \text{МДж}$	$\geq 50 \text{МДж}$	$\leq 5\text{--}50 \text{МДж}$
Аккумуляторные батареи ЭХН	—	—	—	$\leq 2900 \text{МДж}$
Комбинированные КДЭС+ ЭХН	—	—	—	$\leq 3000 \text{МДж}$

проводящие индукционные; ИН – инерционные; КДЭС – конденсаторы с двойным электрическим слоем (суперконденсаторы); ЭХН – аккумуляторные батареи; комбинированные, состоящие из ЭХН и КДЭС.

В комбинированных накопителях энергоемкость суперконденсаторов выбирается равной не более 2–4% энергоемкости аккумуляторной батареи электровоза. В табл. 2 приведены типы электровозов, энергоемкость и среднее разрядное напряжение тяговых свинцово-кислотных и щелочных никель-железных аккумуляторных батарей. Из рассмотрения табл. 2 можно сделать два вывода.

1. При одинаковом количестве элементов в батареях энергоемкость свинцово-кислотных аккумуляторных батарей в 1,9–

Таблица 2

Характеристики тяговых свинцово-кислотных и щелочных никель-железных аккумуляторных батарей

Тип аккумуляторной батареи	Тип аккумуляторного электровоза	Среднее разрядное напряжение, В	Энергоемкость аккумуляторной батареи, кВтч/МДж
Свинцово-кислотная 50x7PzSL560	АРП7, АРВ7-900	100	63/226,8
Никель-железная 50 ТНЖШ-550	4АК-2у	60	33/118,8
Свинцово-кислотная 60 x7PzSL-805	АМ8-600	120	108,6/391,0
Никель-железная 60 ТНЖШ-550	5АРВ	72	39,6/142,56
Свинцово-кислотная 72 x7PzSL(430-805)	АМ8Д-900	130	130,32/469,15
Никель-железная 112 ТНЖ-450	АРМ8Д-900	130	47,5/171,0
Свинцово-кислотная 73 x7PzSL-805	АРП10-900	145	116,7/420,2
Никель-железная 126 ТНЖШ-550	АРП10-900	145	80,0/288,0
Свинцово-кислотная 93x7PzSL-805	АРП14-900	185	145/536
Никель-железная 161 ТНЖК-650	АРП14-900	185	120,0/432,9

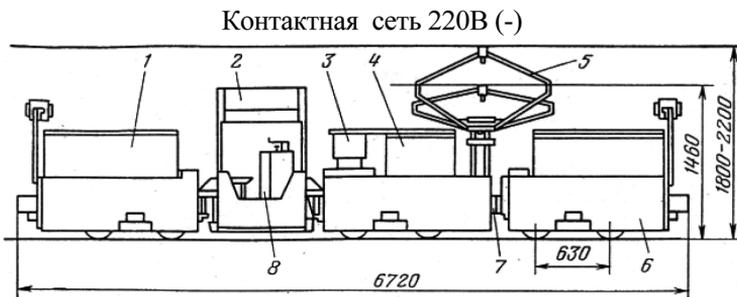


Рис. 1. Рудничный модульный контактно-аккумуляторный электровоз Фау-860: 1 – батарейный ящик; 2 – кабина машиниста; 3 – аппаратура управления и подзаряда накопителей энергии от контактной сети; 4 – реверсивный преобразователь постоянного тока; 5 – токосъемник; 6 – тяговая секция; 7 – сцепка тяговых секций; 8 – контроллер машиниста

3,27 раза выше, чем никель-железных. Приведенный к шинам переменного тока зарядных устройств кпд аккумуляторной откатки с использованием свинцово-кислотных батарей не превышает 15–17% и никель – железных – 13,5%.

2. При равном номинальном напряжении на свинцово-кислотной и никель-железной батареях энергоемкость свинцово-кислотной батареи на электровозе АРП14 будет выше, чем никель-железной на 21%. Для электровоза АРП10-900 этот показатель равен 45%.

На рис. 1 изображен немецкий модульный контактно-аккумуляторный электровоз Фау-860, оборудованный свинцово-кислотной батареей [6], на рис. 2 – отечественный контактно-аккумуляторный электровоз КА10-900 с никель-кадмиевой батареей [4].

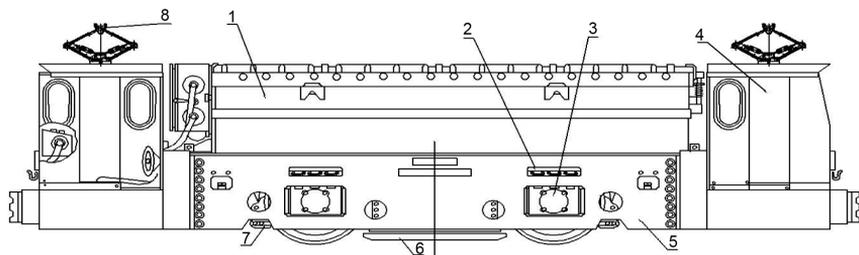


Рис. 2. Рудничный комбинированный электровоз КА10: 1 – батарейный ящик; 2 – кабина машиниста; 3 – сцепка; 4 – рама; 5 – сиденье; 6 – электромагнитный тормоз; 7 – тормозная гидравлическая система; 8 – токоприемник

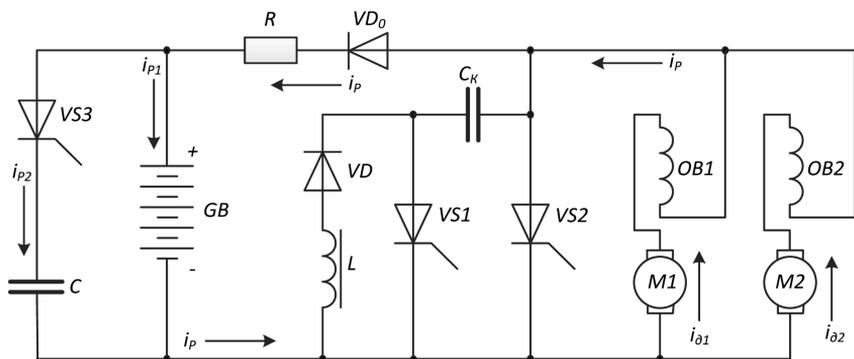


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема рекуперативного торможения электровоза с комбинированным накопителем электрической энергии: i_p – ток рекуперации; R – токоограничивающее сопротивление; C_k – коммутационный конденсатор; $VS3$ – тиристор; C – суперконденсатор; $M1$, $M2$ – обмотки якорей тяговых электродвигателей постоянного тока; $OB1$, $OB2$ – обмотки последовательного возбуждения

Переход от двухступенчатой откатки контактными и аккумуляторными электровозами к одноступенчатой откатке контактно-аккумуляторными электровозами позволяет уменьшить количество электровозов, аккумуляторных батарей, зарядных устройств, зарядных столов, численность обслуживающего персонала примерно в 2 раза, повысить средний срок службы аккумуляторов с 3 до 8 лет, уменьшить удельный расход энергии с 200 до 110–140 Вт·ч/т·км [4, 6].

На рис. 3 приведена принципиальная электрическая схема рекуперативного торможения электровоза, в которой суперконденсатор C и аккумуляторная батарея GB могут принимать энергию торможения вплоть до полной остановки электровоза [10].

За счет индуктивной энергии, накопленной в обмотках якорей тяговых двигателей постоянного тока $M1$, $M2$ и в обмотках последовательного возбуждения $OB1$, $OB2$ рекуперативное торможение тяговых электродвигателей может осуществляться до полной остановки электровоза. Электрический ток рекуперации при торможении подзаряжает аккумуляторную батарею GB и через тиристор $VS3$ суперконденсатор C .

Оценим потребность горного локомотивного транспорта России в суперконденсаторах транспортного исполнения зависит от количества и мощности электровозов, тяговых агрегатов и колесных транспортных машин с электрическим приводом. Потребность в суперконденсаторах стационарного исполнения

Таблица 3

Исходные данные при проведении оценки потребности в суперконденсаторах

Оборудование	Параметр
Подземный транспорт	
Количество рудничных электровозов	3000 шт.
Количество рудничных тяговых суперконденсаторных подстанций	1000 шт.
Средняя энергоемкость электровозного суперконденсатора	5 МДж
Средняя энергоемкость подземных накопительных подстанций	50 МДж
Карьерный транспорт	
Количество карьеров	100
Количество тяговых агрегатов на карьерах	800 шт.
Средняя энергоемкость суперконденсатора на тяговом агрегате	50 МДж
Количество самосвалов с электрическим приводом	150 шт.
Средняя энергоемкость суперконденсатора на самосвале	50 МДж
Среднее количество накопительных подстанций на одном карьере	10 шт.

определяется количеством тяговых преобразовательных подстанций, их мощностью и протяженностью контактных сетей. Исходные данные, принятые при проведении оценки потребности в суперконденсаторах, приведены в табл. 3.

Результаты оценки потребности горного локомотивного транспорта России в суперконденсаторах представлены в табл. 4.

В табл. 5 представлены параметры перспективного суперконденсаторного модуля МЛСК-130-57, разработанного ООО «ГЭЭМП», инвестором которого является группа «Ренова». Степень защиты корпуса модуля IP65. Для комплектации конденсаторного накопителя энергоемкостью 5 МДж необходимо 12 модулей, для комплектации накопителя энергоемкостью 50 МДж – 100 модулей МЛСК-130-57.

Применение гибридных накопителей позволит накапливать тормозную энергию в суперконденсаторах для последующего

Таблица 4

Оценка потребной энергоёмкости накопителей энергии

Оборудование	Энергоёмкость, МДж
Рудничные электровозы,	15,000
Рудничное тяговое электроснабжение	50,000
Итого на рудничном подземном транспорте	65,000
Тяговые агрегаты	40,000
Автосамосвалы с электрическим приводом	7,500
Система тягового электроснабжения карьеров	50,000
Итого на карьерном транспорте	97,500
ВСЕГО:	162 500

использования, снизить износ тормозных колодок, а также примерно вдвое уменьшить ёмкость и повысить срок службы аккумуляторных батарей комбинированных электровозов.

Таблица 5

Параметры суперконденсаторного модуля МЛСК-130-57

№ пп	Параметр	Величина
1	Рабочее напряжение	130 В
2	Ёмкость	57 Ф
3	Запасаемая энергия	0,5 МДж /0,150 кВтч
4	Номинальная мощность,	84 кВт
5	Максимальная мощность	560 кВт
6	Масса	50 кг
7	Габаритные размеры	1200х450х310мм
8	Объём	0,167 м ³
9	Рабочая температура	- 50 °С ... + 65 °С
10	Степень защиты корпуса	IP65
11	Ресурсы, циклы	100 000
12	Срок службы	10 лет
13	Тип электролита	органический
14	Изготовитель	ООО «ТЭЭМП», Москва

Выводы

1. Потребность в суперконденсаторных накопителях на горном локомотивном транспорте составляет 1 625 000 МДж. Для удовлетворения этой потребности потребуется 325,000 модулей МЛСК-130-57.

2. Для повышения энергоэффективности и ресурсосбережения горного локомотивного транспорта необходима замена никель-железных аккумуляторных батарей кислотнo-свинцовыми, более широкое применение контактно-аккумуляторных электровозов, создание и внедрение комбинированных энергосиловых установок с конденсаторно-аккумуляторными накопителями энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко В. П., Сорин Л. Н. Энергоэффективность подземной локомотивной откатки с гибридными накопителями энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 135–140.

2. Степаненко В. П., Сорин Л. Н. Актуальность ресурсо- и энергосбережения подземных рудничных локомотивов с комбинированными накопителями энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 5. – С. 323–328.

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

4. Степаненко В. П. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок в горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 322–328.

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

6. Степаненко В. П. Электровозная откатка на урановых рудниках Советско-германского акционерного общества «Висмут». 1980–1987 гг. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 141–150.

7. Степаненко В. П. Исследование зависимости коэффициента сцепления рудничных электровозов от абразивности горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 2. – С. 168–173.

8. Белозеров В. И., Степаненко В. П. Потребность создания карьерных локомотивов с накоплением энергии // Горная промышленность. – 2014. – № 5. – С. 76.

9. Варакин И. Н., Менухов В. В., Самитин В. В. Перспективы применения электрохимических конденсаторов в составе комбинированных энергосиловых установок на автосамосвалах // Горная промышленность. – 2008. – № 3. – С. 79–86.

10. *Маслий А. К.* Электрооборудование шахтной электровозной откатки. — М.: Недра, 1977. — С. 201.

11. *Шевлюгин М. В.* Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и в метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. — М.: МГУПС (МИИТ), 2009. — С. 51.

12. *Денищikov К. К.* Комбинированные энергетические установки на основе суперконденсаторов / Конференция ОВИТ РАН «Результаты фундаментальных исследований в области энергетики и их практическое значение». Москва, 22–26 марта 2008 г. — М., 2008. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Степаненко Валерий Павлович — кандидат технических наук, доцент, e-mail: valestepanenko@yandex.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 9, pp. 128–137.

UDC 620.9:
622.625.28

V.P. Stepanenko

WAYS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY AND RESOURCE SAVING MINING LOCOMOTIVE TRANSPORT

The article examines ways of improving energy efficiency and resource saving mining locomotive transport using energy storage. Defined energy, power and placement of the five types of energy storage: electrochemical batteries, superconducting inductive storage, inertial drives, superconductors, combo drives, which consists of electrochemical batteries and supercapacitors. The advantages of the use in the storage of lead-acid batteries compared with Nickel-iron. To determine the needs of the mining locomotive transport of Russia in supercondensators. It is established that the application of energy storage will reduce power consumption by 15–20% and reduce capital expenditures. Most of the decrease in power consumption is obtained in the traction electric supply system. Reduction of capital costs will be achieved by reducing the length of contact networks, number of substations and electric locomotives.

Key words: energy efficiency, resource conservation, energy storage, supercapacitor, battery, regenerative braking, electric mine.

AUTHOR

Stepanenko V.P., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: valestepanenko@yandex.ru, Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Stepanenko V. P., Sorin L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 6, pp. 135–140.
2. Stepanenko V. P., Sorin L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 5, pp. 323–328.

3. Stepanenko V.P., Belozеров V.I. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 2, pp. 174–181.
4. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 11, pp. 322–328.
5. Stepanenko V.P., Belozеров V.I., Sorin L.N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 5, pp. 317–322.
6. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 6, pp. 141–150.
7. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 2, pp. 168–173.
8. Belozеров V.I., Stepanenko V.P. *Gornaya promyshlennost'*. 2014, no 5, pp. 76.
9. Varakin I.N., Menukhov V.V., Samitin V.V. *Gornaya promyshlennost'*. 2008, no 3, pp. 79–86.
10. Masliy A.K. *Elektrooborudovanie shakhtnoy elektrovoznoy otkatki* (Electrical mine locomotive haulage), Moscow, Nedra, 1977, pp. 201.
11. Shevlyugin M.V. *Resurso- i energosberegayushchie tekhnologii na zhelezodorozhnom transporte i v metropolitenakh, realizuemye s ispol'zovaniem nakopiteley energii* (Resource-saving technologies in railway transport and in the subways that are implemented with the use of energy storage), Doctor's thesis, Moscow, MGUPS (МИИТ), 2009, pp. 51.
12. Denshchikov K.K. *Konferentsiya OVIT RAN «Rezul'taty fundamental'nykh issledovaniy v oblasti energetiki i ikh prakticheskoe znachenie»*. Moskva, 22–26 marta 2008 g. (The results of basic research in the field of energy and their practical value. Conference of Division of visual information technologies RAS. Moscow, 22–26 March 2008), Moscow, 2008.



**РУКОПИСИ,
ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»**

**ОБОСНОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ХРАНИЛИЩА ФОСФОГИПСА
ОАО «ВОСКРЕСЕНСКИЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ УДОБРЕНИЯ»**

(№ 1083/9-16 от 27 июня 2016 г., 10 с.)

Семенова Евгения Анатольевна – ведущий инженер,
e-mail: evgeniya270990@mail.ru, НИТУ «МИСиС».

Рассмотрены геомеханические процессы для действующего полигона складирования вторичных промышленных материалов ОАО «Воскресенские минеральные удобрения». Произведен расчет устойчивости и уплотнения данного отвального массива. Проанализированы результаты и предложены мероприятия по наращиванию полигона складирования отходов фосфогипса ОАО «Воскресенские минеральные удобрения».

Ключевые слова: консолидация, уплотнение грунтов, устойчивость отвалов, осадки, несущая способность.

**RATIONALE FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE STORAGE
OF PHOSPHOGYPSUM JSC «VOSKRESENSK MINERAL FERTILIZERS»**

Semenova E.A., Leading Engineer, e-mail: evgeniya270990@mail.ru,
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Considered geomechanical processes for the existing landfill secondary industrial materials of JSC «Voskresensk mineral fertilizers». The calculation of the stability and compaction of the dump of the array. Analyzed results and proposed capacity of the landfill of waste phosphogypsum JSC «Voskresensk mineral fertilizers».

Key words: consolidation, compaction of soils, stability of tailings, rainfall, carrying capacity.