

В.П. Степаненко, Л.Н. Сорин**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДЗЕМНОЙ
ЛОКОМОТИВНОЙ ОТКАТКИ
С ГИБРИДНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ**

Рассмотрены способы повышения энергоэффективности и экологической безопасности подземной локомотивной откатки с использованием комбинированных накопителей энергии. Применение гибридных накопителей энергии на электровозах позволит уменьшить расход энергии на 15–30%, на дизельных локомотива уменьшить расход топлива на 40–60%, выбросы в рудничную атмосферу концентратов веществ, сажи, окислов азота, продуктов неполного сгорания топлива и масла не менее, чем в три раза. При пиковой нагрузке, превышающей среднюю в 2–3 раза, рекомендуется использовать электрохимические накопители энергии ЭХН, при превышении в 5–7 раз – гибридные накопители энергии, состоящие из суперконденсаторов КДЭС и электрохимических накопителей энергии ЭХН.

Ключевые слова: энергоэффективность, локомотивная откатка, гибридные накопители энергии, суперконденсатор, расход топлива.

Энергоэффективность и экологическая безопасность общественного подземного транспорта значительно отстает от современных требований. Особенно низкой энергоэффективностью отличается локомотивная откатка, использующая аккумуляторные электровозы и дизелевозы. На перевозке полезного ископаемого и породы из очистных и подготовительных забоев обычно задействовано около 50% парка, локомотивы сцепной массой 8 и более тонн. Вторая половина парка, состоящая из локомотивов сцепной массой от 2 до 8 т, занята на вспомогательном транспорте – перевозке оборудования, людей и материалов [1, 2, 4, 7, 12].

Расход энергии за один рейс на крюке рудничного электровоза E [кВт·ч] определяется как сумма энергии, затраченной на транспортирование груженого E_r и порожнего E_n , составов, по формуле:

$$E = E_r + E_n = 2,72 \cdot 10^{-2} [(P_s + Q_r) \cdot (\omega_r - i) + (P_s + Q_n) (\omega_n + i)] L \cdot \alpha, \quad (1)$$

где P_s – сцепная масса электровоза т; Q_r, Q_n – масса груженого и порожнего

составов; ω_r, ω_n – основное удельное сопротивление движению груженых и порожних вагонеток, даН/т; i – уклон рельсового пути, ‰; L – длина откатки, км; α – коэффициент, учитывающий потери энергии при разгоне, торможении и маневрах.

Из формулы (1) следует, что для обеспечения высокой энергоэффективности локомотивной откатки необходимо проходить горизонтальные откаточные выработки с уклоном равного сопротивления движению, электровозы выбирать с системами плавного пуска и рекуперативного торможения, для которых коэффициент $\alpha = 1,05 - 1,15$, выбирать вагонетки с минимальным удельным сопротивлением движению ω [1, 4].

Энергоэффективность локомотивной откатки в значительной степени зависит от значений КПД оборудования подвижного состава и устройств электрооборудования. В табл. 1 приведены значения КПД тяговых электродвигателей постоянного тока, редукторов, систем управления, аккумуляторных батарей и устройств для их заряда, тяговых сетей и преобразовательных подстанций.

Таблица 1

Коэффициенты полезного действия

№№ пп	Коэффициенты полезного действия оборудования	Тип электровоза	
		аккумуляторный	контактный
1	Тяговых электродвигателей постоянного тока	82–85%	85–90%
2	Редуктора электровоза	94%	95%
3	Реостатной системы управления	85–95%	70–85%
4	Безреостатной системы управления	93–95%	90–92%
5	Устройств для заряда аккумуляторных батарей	92–97%	–
6	Тяговой подстанции (с учетом питающего трансформатора)	–	92–97%
7	Тяговой сети	–	80–95%
8	Потери энергии на собственные нужды	3%	4%
9	Потери энергии на буксование	10–20%	5–10%

Потери энергии на буксование электровозов, которые особенно велики в обводненных шахтах, добывающих коксующиеся угли, можно уменьшить не менее, чем вдвое, если последовательное возбуждение тяговых двигателей постоянного тока заменить на смешанное. Мощность тяговых двигателей рудничных электровозов не превышает 30–45 кВт, что позволяет вместо обмотки независимого возбуждения использовать постоянные (предпочтительно самарий-кобальтовые) магниты.

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики тяговых свинцово-кислотных панцирных аккумуляторных батарей и щелочных никель-железных в пятичасовом режиме разряда. Сравнимые аккумуляторные батареи взаимозаменяемые. Анализ табл. 2 показывает, что в пятичасовом режиме разряда энергия, отдаваемая кислотными аккумуляторами, в 1,9–3,27 раза выше, чем щелочными. С учетом всех потерь приведенный к шинам переменного тока зарядных устройств КПД

Таблица 2

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

Тип аккумуляторной батареи	Среднее разрядное напряжение, В	Емкость батарей, кВтч
Свинцово-кислотная 50х7PzSL560	101	63
Никель-железная 50 ТНЖШ-550	60	33
Свинцово-кислотная 60х7PzSL-805	120	108,6
Никель-железная 60 ТНЖШ-550	72	39,6
Свинцово-кислотная 72х7PzSL(430-805)	144	130,32
Никель-железная 72 ТНЖШ-550	86,4	47,5
Свинцово-кислотная 120х7PzSL-805	240	217,2
Никель-железная 120 ТНЖШ-550	144	79,2
Свинцово-кислотная 144х7PzSL-805	288	260,64
Никель-железная 144 ТНЖШ-550	172,8	95,4

Таблица 3

Характеристики электрохимических накопителей энергии ЭХН

Время разряда, ч	Отношение токов I_p/I_{pn}	Отдаваемая емкость, %	Отдаваемая энергия, %	КПД процесса разряда, %
5,0	1,0	100	100	42,00
4,0	1,25	0,85	83,6	35,1
3,0	1,66	70	67,1	28,11
2,0	2,50	55	49,5	20,7
1,5	3,33	47,5	40,375	17,1
1,0	5,0	40	28,13	12,3

аккумуляторной откатки с использованием свинцово-кислотных батарей не превышает 15–17% и никель-железных – 13,5%. Для уменьшения расхода энергии на зарядку аккумуляторных батарей не менее чем 1,5–2 раза в локомотивных депо необходимо отработавшие свой срок службы никель-железные аккумуляторные батареи заменить свинцово-кислотными.

В табл. 3. представлены характеристики электрохимических накопителей энергии ЭХН в относительных единицах. В качестве номинального режима был выбран пятичасовой разрядный режим ЭХН.

В тяговых расчетах средний удельный расход энергии контактной откатки принимается равным 120 Вт·ч/т·км, аккумуляторной – 240 Вт·ч/т·км. При использовании контактно-аккумуляторных электровозов удельный расход энергии снижается до 130–180 Вт·ч/т·км, срок службы аккумуляторных батарей повышается в 2 раза [1, 2, 4, 13]. Удельный расход топлива подземных дизелевозов находится в пределах 200–400 г/т·км. Использование комбинированных дизель-аккумуляторных локомотивов с накопителями энергии снижает мощность дизельного двигателя, расход топлива и выбросы канцерогенов, сажи, окислов азота, продуктов неполного сгорания топлива в рудничную атмосферу на 40–60% [1, 3, 14].

Указанные в табл. 2 и 3 значения отдаваемой при разряде энергии справедливы при температурах окружающего воздуха от 15 °С до 35 °С. Ниже температуры 15 °С отдаваемая энергия ЭХН резко падает. Например, при температуре ниже минус 25 °С кпд разряда аккумуляторных батарей не превышает 5–10%. При температуре выше плюс 55 °С аккумуляторные батареи не принимают заряд. При пиковом увеличении разрядного тока кпд и отдаваемая энергия ЭХН резко падает. При разрядном токе, в пять раз превышающем номинальное значение, кпд разряда снижается до 12,3%, а отдаваемая энергия до 28,13%. Для локомотивов, предназначенных для эксплуатации в условиях частой пиковой нагрузки, превышающей среднюю в 5–7 раз, предлагается использовать комбинированный накопитель, состоящий из аккумуляторной батареи ЭХН и конденсатора с двойным электрическим слоем КДЭС (см. табл. 4).

Электрические схемы накопителей на базе КДЭС будут проще, а кпд выше, чем в случае использования инерционных и других накопителей энергии. Гибридный накопитель, состоящий из аккумуляторной батареи ЭХН и КДЭС, можно устанавливать на контактных, аккумуляторных, контактно-аккумуляторных электровозах и дизелевозах. Величину энергоемкости КДЭС для установки на электро-

Таблица 4

Технические характеристики суперконденсаторного накопительного модуля 20х10ЭК303

Параметр	Величина
Тип	20х10ЭК303
Рабочее напряжение, В	275
Запасаемая энергия, МДж	7,5
Отдаваемая энергия, МДж	6,2
Максимальная мощность, МВт	0,56
Масса, кг	660
Объем, м ³	0,46
Время разряда, с	64
Время заряда, мин	15 – 40
Величина саморазряда	не выше 0,3% в сутки
Интервал рабочих температур	- 50...+70 °С
Срок службы	Свыше 15 лет
Изготовитель	ЗАО «Элтон», Россия, г. Троицк

возе можно выбрать порядка 2% от общей энергоемкости гибридного накопителя [1, 2, 3, 4]. Суперконденсаторы КДЭС можно использовать не только для сглаживания пиковых токов, но и для поддержания на удаленных участках контактных сетей постоянного напряжения, уменьшения скачков напряжения, снижения износа контактных проводов и искрения на токоприемниках электровозов.

В зависимости от схемы тягового электроснабжения для аккумулярования энергии торможения следует размещать КДЭС на электровозах, пунктах секционирования контактных сетей и на тяговых подстанциях. Расчеты показали, что на электровозе энергоемкость КДЭС достаточно иметь на уровне 1 МДж, на постах секционирования контактной сети – 5 МДж, на тяговой подстанции – 10 МДж.

Выводы

1. На электровозной откатке применение гибридных накопителей позволит уменьшить расход электроэнергии на 15–30%, на дизелевозной откатке – сократить расход топлива на 40–60%, выбросы канцерогенов, сажи, окислов азота, продуктов неполного сгорания топлива в рудничную атмосферу не менее, чем в 3 раза.

2. При пиковой нагрузке, превышающей среднюю в 2–3 раза, рекомендуется использовать ЭХН, в 5–7 раз – гибридный накопитель ЭХН и КДЭС.

3. Для установки на электровозе энергоемкость КДЭС можно выбрать не более 2% от энергоемкости гибридного накопителя, на постах секционирования контактной сети – 5 МДж, на тяговой подстанции – 10 МДж.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

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

Сорин Леонид Наумович – доктор технических наук, ООО «АВП Технология», e-mail: ocv@mail.ru.

1. Степаненко В.П. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок в горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 322–328.
2. Белозеров В.И., Степаненко В.П. Актуальность создания карьерных локомотивов с накопителем энергии // Горная промышленность. – 2014. – № 4. – С. 76.
3. Варакин И.Н., Менухов В.В., Самигин В.В. Перспективы применения электрохимических конденсаторов в составе комбинированных энергосиловых установок на автосамосвалах // Горная промышленность. – 2008. – № 3. – С. 79–86.
4. Степаненко В.П., Венцлафф В., Андросов Ф. Метод расчета локомотивной откатки с помощью номограмм // Бюллетень научно-технической информации СГАО Висмут. – 1982. – № 10. – С. 19–31.
5. Степаненко В.П., Венцлафф В., Андросов Ф., Кунерт Л., Василенко В.И. Переоборудование шахтных аккумуляторных электровозов в комбинированные. Бюллетень научно-технической информации СГАО Висмут. – 1984. – № 12. – 1984. – С. 14–22.
6. Степаненко В.П., Венцлафф В., Андросов Ф., Кунерт Л., Василенко В.И. Исследование принудительного воздушного охлаждения тяговых электродвигателей БМ-360 // Бюллетень научно-технической информации СГАО Висмут. – 1985. – № 5. – С. 6–11.
7. Степаненко В.П., Венцлафф В., Дейнеке Р., Василенко В.И. Разработка и испытание контактно-аккумуляторных электровозов V-860 // Уголь. – 1986. – № 12. – С. 32–33.
8. Степаненко В.П. Результаты разработки и внедрения шахтных комбинированных электровозов Фау-860 / Научные сообщения ИГД им. Скопинского. Актуальные вопросы электрификации горных предприятий. – М., 1977. – С. 103–108.
9. Степаненко В.П., Венцлафф В., Андросов Ф. Схема дистанционного управления электровозом, питающегося от аккумуляторной батареи. Патент ФРГ, класс B60L, 15/00, № 207523.
10. Степаненко В.П., Венцлафф В., Андросов Ф., Кунерт Л., Василенко В.И. Схема управления тяговыми двигателями комбинированного локомотива. Патент ФРГ, класс B60L 15/32, № 224280A1.
11. Степаненко В.П., Венцлафф В., Андросов Ф. Шахтный локомотив, питающийся от аккумуляторной батареи и контактной сети. Патент ФРГ, класс P61, № 2547983 от 21.10.1983.
12. Степаненко В.П., Синчук О.Н., Гузов Э.С. Шахтный контактно-аккумуляторный электровоз // Горный журнал. – 1988. – № 6. – С. 55–57.
13. Степаненко В.П. Особенности организации локомотивной откатки с использованием комбинированных электровозов / Научные сообщения ИГД им. Скопинского. Горная механика, рудничный транспорт, техническое обслуживание и ремонт ПШО. – М., 1988. – С. 123–130.
14. Степаненко В.П. Дизель-аккумуляторные подвесные монорельсовые локомотивы / Научные сообщения ИГД им. А.А. Скопинского. Выпуск 150. – М., 1975. – С. 80–83. **ГИАБ**

UDC 622.621.311.1

THE EFFICIENCY OF UNDERGROUND LOCOMOTIVE HAULAGE WITH HYBRID ENERGY STORAGE

Stepanenko V.P., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: valestepanenko@yandex.ru,
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia,
Sorin L.N., Doctor of Technical Sciences, AVP Technology, Moscow, Russia,
e-mail: ocv@mail.ru.

Methods for increasing energy efficiency and ecological safety of underground locomotive haulage using a combination of energy storages. The use of hybrid energy storage on the electric locomotives will reduce energy consumption by 15–30%, for diesel locomotive to reduce fuel consumption by 40–60%, emissions in the mine atmosphere cancerogenic substances, soot, nitrogen oxides, products of incomplete combustion of fuel and oil not less than three times. At peak load, exceeding the average by 2–3 times, it is recommended to use electrochemical energy storage AHN, exceeding 5–7 times and hybrid energy storage devices, consisting of supercapacitors CDEL and electrochemical energy storage ECHES.

Key words: energy efficiency, locomotive rollback, hybrid energy storage devices, supercapacitor, fuel consumption.

REFERENCES

1. Stepanenko V.P. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2014, no 11, pp. 322–328.
2. Belozеров V.I., Stepanenko V.P. *Gornaya promyshlennost'*. 2014, no 4, pp. 76.
3. Varakin I.N., Menukhov V.V., Samitin V.V. *Gornaya promyshlennost'*. 2008, no 3, pp. 79–86.
4. Stepanenko V.P., Ventslaff V., Andrees F. *Byulleten' nauchno-tekhnikeskoi informatsii SGAO Vismut*. 1982, no 10, pp. 19–31.
5. Stepanenko V.P., Ventslaff V., Andrees F., Kunert L., Vasilenko V.I. *Byulleten' nauchno-tekhnikeskoi informatsii SGAO Vismut*. 1984, no 12. 1984, pp. 14–22.
6. Stepanenko V.P., Ventslaff V., Andrees F., Kunert L., Vasilenko V.I. *Byulleten' nauchno-tekhnikeskoi informatsii SGAO Vismut*. 1985, no 5, pp. 6–11.
7. Stepanenko V.P., Ventslaff V., Deineke R., Vasilenko V.I. *Ugol'*. 1986, no 12, pp. 32–33.
8. Stepanenko V.P. *Nauchnye soobshcheniya IGD im. Skochinskogo. Aktual'nye voprosy elektrifikatsii gornyykh predpriyatiy* (Transactions of the Skochinsky Institute of Mining. Urgent issues of mine electrification), Moscow, 1977, pp. 103–108.
9. Stepanenko V.P., Ventslaff V., Andrees F. *Patent Germany, class B60L, 15/00, no 207523*.
10. Stepanenko V.P., Ventslaff V., Andrees F., Kunert L., Vasilenko V.I. *Patent Germany, class B60L 15/32, no 224280A1*.
11. Stepanenko V.P., Ventslaff V., Andrees F. *Patent Germany, class P61, no 2547983, 21.10.1983*.
12. Stepanenko V.P., Sinchuk O.N., Guзов E.S. *Gornyi zhurnal*. 1988, no 6, pp. 55–57.
13. Stepanenko V.P. *Nauchnye soobshcheniya IGD im. Skochinskogo. Gornaya mekhanika, rudnichnyi transport, tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont GShO* (Transactions of the Skochinsky Institute of Mining. Rock mechanics, mine transport, mine equipment repair and maintenance), Moscow, 1988, pp. 123–130.
14. Stepanenko V.P. *Nauchnye soobshcheniya IGD im. A.A. Skochinskogo* (Transactions of the Skochinsky Institute of Mining), issue 150, Moscow, 1975, pp. 80–83.



УМНАЯ КНИГА – ПРЕДМЕТ ПЕРВОЙ НЕОБХОДИМОСТИ

УСТРОЙТЕ НАМ ЭКСКУРСИЮ ПО ВАШЕМУ ИЗДАТЕЛЬСТВУ

Лучшими экспонатами издательского музея
будут выпущенные им книги.

Нетерпеливые последователи эффективных технологий хотят побыстрее разгадать секреты качественного книгоиздания, но не знают, с чего начать. Многим кажется, что хорошие книги получаются с помощью каких-то чудо-машин, и они готовы вкладывать любые средства в их приобретение. Разочарование таких начинающих издателей бывает написано на лице: что же это такое, никакого оборудования нет, а книги получаются хорошие. Действительно, редактор с карандашом и техред с простеньким компьютером не вызывают эмоций, но именно они своим мастерством добиваются чудесных результатов.

Наблюдая со стороны за последовательностью операций по превращению рукописи в оригинал-макет, а затем в тираж книги, многого не увидишь даже при очень большом внимании. Все работы выполняются в невяном виде, малопонятном для непосвященных. Тем не менее, интенсивная и квалифицированная работа ведется в творческих поисках, дискуссиях между авторами, редакторами, дизайнерами и другими специалистами. К тому же большая часть издательских специалистов работает на дому.

Для того чтобы не огорчать гостей, издатели устраивают посещения второстепенных инфраструктурных подразделений, участков оперативной полиграфии, выставок книг и дизайнерских проектов, книгохранилищ и т.д. Конечно, эти структуры не определяют успех издательского дела, но имеют зрелищную привлекательность. А для того чтобы передать технологии качественного книгоиздания, нужны годы интенсивной работы и специальные школы индивидуального мастерства.

Продолжение на с. 181