

В.П. Степаненко, В.И. Белозеров, Л.Н. Сорин

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НА КАРЬЕРНОМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Рассмотрены перспективы применения комбинированных накопителей энергии на карьерном железнодорожном транспорте на открытых горных работах. Для автономного питания и приема рекуперативной энергии на тяговых агрегатах рекомендуется использовать комбинированные накопители энергии. Комбинированные накопители энергии должны состоять из конденсаторов с двойным электрическим слоем, аккумуляторных батарей, реверсивных преобразователей инверторов и разделительных дросселей.

Ключевые слова: карьерный транспорт, комбинированные накопители энергии, аккумуляторные батареи, конденсаторы с двойным электрическим слоем.

В настоящее время современные накопители энергии широко используются на электромобилях [1, 2], в меньшем объеме на железнодорожном транспорте и метрополитене. Опубликованы работы по использованию накопителей энергии в системах тягового электроснабжения [3, 4]. В системе энергоснабжения тягового электроподвижного состава постоянного и переменного тока с помощью накопителей можно повысить качество электроэнергии, спланировать графики нагрузки, уменьшить скачки и провалы нагрузки подстанций, что будет способствовать лучшему использованию установленной мощности трансформаторов, снижению температуры полупроводниковых агрегатов. Применение накопителей повысит и стабилизирует напряжение в контактных сетях, уменьшит искрение на токоприемниках, создаст условия для устойчивого рекуперативного торможения до полной остановки поезда. Предпочтительней энергию рекуперации использовать для питания собственных нужд, что также уменьшит потери в тяговой сети. Электрохимические на-

копители энергии в длительных режимах разряда имеют высокую удельную энергоемкость и высокий коэффициент полезного действия кпд, но в пиковых и форсированных режимах, а также при температурах ниже 15 °С и выше 45 °С их кпд снижается. Суперконденсаторы и инерционные накопители имеют высокую удельную мощность, могут эксплуатироваться в пиковых и форсированных режимах в широком диапазоне температур от -65 °С до +70 °С, но их удельная энергоемкость ниже, чем у электрохимических аккумуляторных батарей [5, 6, 7, 8, 9]. С целью предотвращения крупных аварий в системах электроснабжения сверхпроводящие индукционные накопители целесообразно размещать на районных подстанциях в сетях напряжением 110–220 кВ. Емкостные накопители имеют кпд в пределах 0,8–0,98, инерционные – 0,86–0,9, сверхпроводящие индукционные накопители – 0,91 [3].

Выполним расчет энергоемкости и мощности накопителей энергии для карьерного ж.д. транспорта. Примем следующие исходные данные [7, 10].

Таблица 1

Размещение накопителей энергии на карьерах

Типы накопителей энергии	Место размещение накопителя энергии			
	Районная подстанция	Тяговая подстанция	Тяговая сеть	Тяговый подвижной состав
Сверхпроводящие индукционные	+	–	–	–
Инерционные	–	+	–	+
Суперконденсаторные	–	+	+	+
Комбинированные (электрохимические + суперконденсаторные)	–	–	–	+

1. Тяговый агрегат сцепной масса 360 т перевозит состав из 10 грузовых думпкаров грузоподъемностью 108 т каждый, собственная масса думпкара 48 т. Масса порожнего поезда равна 840 т, груженого – 1920 т. Расстояние транспортирования на поверхностном комплексе карьера принято равным 2 км, средняя скорость движения – 40 км/ч. Среднее расстояние транспортирования по горизонтальным путям отвалов, не оборудованных контактной сетью, принято равным 0,5 км, в забоях – 1 км. При погрузке и разгрузке вагонов поезд перемещается со скоростью 3 км/ч. Груженные и порожние поезда по забойным и отвальным передвижным неэлектрифицированным путям движутся с скоростью 15 км/ч.

2. Уклон рельсового пути в выездной траншее равен 40‰, глубина карьера рассмотрена по вариантам: 50, 100, 150, 200 и 250 м.

3. Скорость движения поезда на спуске принята равной 30 км/ч. Про-

должительность рекуперативного торможения принята на 3 мин меньше времени движения под контактной сетью на спуске.

4. Средняя продолжительность одного рейса выбрана равной 112 мин. В течение рейса накопители энергии, размещенные на борту тягового агрегата, разряжаются 30 мин при погрузке и 20 мин при разгрузке состава.

5. Коэффициент запаса энергии на маневровые работы K_m и на собственные нужды K_n равны: $K_m = K_n = 1,2$; КПД заряда электрических накопителей энергии принят равным 88%, инерционных – 84,5%.

6. Израсходованная в течение рейса энергия накопителя должна полностью компенсироваться во время движения поезда под контактной сетью.

В табл. 2 приведены результаты расчетов энергоемкости накопителя энергии для питания тягового агрегата на передвижных забойных и отвальных участках пути. Удельный расход энергии в расчетах был принят

Таблица 2

Зависимость расхода энергии от длины участка рельсового пути

Параметр	Величина			
Длина участка, м	250	500	750	1000
Расход энергии на перемещение состава, кВт·ч/МДж	11/39,6	22/79,2	33/118,8	44/158,4
Расход энергии на собственные нужды и маневровые работы, кВт·ч/МДж	8,75/31,5	16,5/63,0	22,25/94,5	33/126
Полный расход энергии, кВт·ч/МДж	19,75/71,1	38,5/142,2	58,25/213,3	77,0/284,4

Таблица 3

Зависимость величины рекуперативной энергии от глубины карьера

Параметр	Величина				
Глубина карьера, м	50	100	150	200	250
Длина тормозного пути, км	1,25	2,5	3,75	5,0	6,25
Время движения в тормозном режиме, мин.	2,4	4,8	7,2	9,6	12
Время движения под контактной сетью, ч.	5,4	7,8	10,2	12,6	15,0
Рекуперлируемая энергия, кВт·ч/МДж	97/349,2	194/698,4	291/1047,6	386/1389,6	485/1746

равным 0,2798 МДж (0,077 кВт·ч) на 1 погонный метр горизонтального рельсового пути. При возрастании длины участка рельсового пути от 250 м до 1000 м расчетная энергоемкость накопителя энергии увеличивается от 71,11 МДж (19,75 кВт·ч) до 284,4 МДж (77,0 кВт·ч).

Зависимость величины рекуперативной энергии от глубины карьера приведена в табл. 3.

Электрохимические аккумуляторы имеют невысокие кпд в форсированных и пиковых режимах нагрузки, когда амплитуда тока в 5–7 раз выше среднего значения. При температурах ниже 15 °С и выше 45 °С кпд и отдача аккумуляторов могут снизиться в 2–3 раза. Приведенные в табл. 4 относительные характеристики электрохимических накопителей энергии соответствуют температуре от 15 до 35 °С. Например, литий-ионные аккумуляторы

при разрядном токе равном $3E_n$ и нормальной температуре имеют кпд не более 65% вместо заявленных фирмами – изготовителями 95–97% [1, 2]. Из рассмотрения табл. 4 следует, что при токах, превышающих в 5 раз номинальное значение, кпд электрохимических накопителей энергии может уменьшиться до 12,3%, а отдача по емкости до 28,13%.

В горной промышленности применяются тяговые свинцово-кислотные аккумуляторы. Свинцово-кислотная аккумуляторная батарея 440x7PzSL805 на напряжение 880 В имеет энергоемкость 797,5 кВт·ч. Ее запас энергии достаточен для работы на передвижных путях в забоях и отвалах, т.к. 797,5 кВт·ч > > 77 кВт·ч.

Вычислим отдаваемую мощность этой же аккумуляторной батареи при массе груженого состава 1920 т и скорости движения 15 км/ч [10]:

Таблица 4

Относительные характеристики электрохимических накопителей энергии

Время разряда, ч	Отношение токов, I_p/I_{pn}	Отдаваемая емкость E_p , %	Напряжение на аккумуляторе, %	Отдаваемая энергия, $\mathcal{E}_p/\mathcal{E}_n$, %	КПД, %
5,0	1,0	100	100	100	42,00
4,0	1,25	0,85	98,33	83,6	35,1
3,0	1,66	70	95,83	67,1	28,11
2,0	2,50	55	90	49,5	20,7
1,5	3,33	47,5	85	40,37	17,1
1,0	5,0	40	73,33	28,13	12,3

$$N = (F V / 367 \eta_{\text{п}} \eta_{\text{р}}) + \Delta N \quad (1)$$

где: N – мощность, кВт, F – тяговое усилие, Н; V – скорость, км/ч.; $\eta_{\text{п}}$ – КПД электрической передачи, 0,88; $\eta_{\text{р}}$ – КПД разряда; ΔN – мощность, расходуемая на собственные нужды.

Примем величину ΔN равной 20% от мощности N . Рассчитанная при $\eta_{\text{р}} = 98\%$, мощность накопителя равна 460 кВт. При $\eta_{\text{р}} = 50\%$ мощность накопителя возрастает до 924 кВт. При глубине карьера 250 м энергия и мощность рекуперативного торможения состава достигают высоких значений: энергия – 485 кВт·ч, мощность – 2425 кВт. Для обеспечения надежного приема и отдачи энергии необходимо использовать комбинированный накопитель энергии, состоящий из аккумуляторной батареи и емкостного накопителя суперконденсатора КДЭС. В комбинированный накопитель энергии должны входить реверсивный преобразователь постоянного напряжения, автономный инвертор тока с промежуточным индуктивным звеном. Энергоемкость суперконденсаторного накопителя не превышает 1–2% энергоемкости аккумуляторной батареи.

Основной причиной низких энергетических показателей аккумуляторов является их высокое внутреннее сопротивление R , которое определяется как сумма омического сопротивления аккумулятора $R_{\text{о}}$ и сопротивления поляризации $R_{\text{п}}$. Сопротивление тяговой аккумуляторной батареи можно рассчитать по формуле [8, 9]:

$$R = [R_{\text{о}} + (1 - K_{\text{п}} I_{\text{а}}) R_{\text{п}}] N_{\text{ак}} \quad (2)$$

где: $K_{\text{п}}$ – коэффициент поляризации; $I_{\text{а}}$ – электрический ток, протекающий через аккумулятор, А; $N_{\text{ак}}$ – число элементов в аккумуляторной батарее, шт.

В табл. 5 приведены значения $R_{\text{о}}$, $R_{\text{п}}$ и коэффициента поляризации $K_{\text{п}}$ тяговых щелочных никель-железных аккумуляторов при температуре 15–45 °С. Значение $R_{\text{о}}$ остается постоянным в зарядном и разрядном режимах. Сопротивление поляризации $R_{\text{п}}$ изменяется. При разряде $R_{\text{п}}$ меньше, чем при заряде. При малых токах $R_{\text{п}}$ в 2–3 раза превышает $R_{\text{о}}$. С ростом температуры, разрядного и зарядного токов сопротивления $R_{\text{п}}$ уменьшается [8, 9].

В табл. 5 номинальные значения емкости аккумулятора в ампер-часах обозначено как $E_{\text{н}}$, текущее значение как E . Пределы изменения $R_{\text{п}}$ и $K_{\text{п}}$ указаны при зарядных и разрядных токах $0 < I_{\text{а}} < 2E_{\text{н}}$. Вследствие больших электрических потерь форсированные режимы заряда и разряда стабилизированными токами могут приводить к уменьшению КПД и перегреву аккумуляторов. Для карьеров необходимо разработать реверсивные импульсные разрядно-зарядные устройства, пригодные для размещения на тяговых агрегатах. С помощью этих устройств возможно значительно снизить сопротивление поляризации и поддерживать сопротивление аккумуляторных батарей в зарядных и разрядных режимах на уровне близком к величине омического сопротивления [11]. Конструк-

Таблица 5

Значения омического сопротивления, сопротивления поляризации и коэффициента поляризации щелочного тягового аккумулятора

Режим	Омическое сопротивление, $R_{\text{о}}$, мОм	Сопротивление поляризации, $R_{\text{п}}$, мОм	Коэффициент поляризации $K_{\text{п}}$
Заряд $E < 0,1E_{\text{н}}$	1,0	3,0–5,0	$(0,5–2,0) 10^{-3}$
Заряд $E > 0,1E_{\text{н}}$	1,0	1,5–2,0	$(0,3–0,4) 10^{-3}$
Разряд $E < 0,1E_{\text{н}}$	1,0	1,5–3,0	$(0,2–0,4) 10^{-3}$
Разряд $E > 0,1E_{\text{н}}$	1,0	0,4–1,2	$(0,1–0,15) 10^{-3}$

ция карьерных накопителей энергии должна быть передвижной модульной. В системе тягового электроснабжения в качестве накопительных подстанций целесообразно использовать передвижные суперконденсаторные модули. При разработке суперконденсаторных накопителей необходимо предусматривать возможность их подключения к источникам восстанавливаемой энергии.

Заключение

1. Мощность аккумуляторных батарей, которые можно разместить

на тяговых агрегатах, недостаточна для обеспечения требуемой скорости движения состава в забоях и отвалах.

2. Обеспечить необходимую скорость движения могут комбинированные накопители энергии, масса и габаритные размеры которых позволяют размещать их на тяговых агрегатах.

3. Передвижные инерционные накопительные модули целесообразно размещать на крупных тяговых подстанциях. Суперконденсаторные модули эффективнее использовать в системах электроснабжения в качестве накопительных подстанций.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

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

Белозеров Виктор Иванович – кандидат технических наук, ООО «Экопроекткарьер», e-mail: blzrv70@mail.ru,

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маматов А.И., Калинин Я.В., Давыдов В.В., Лаврентьев А.И. Математическое моделирование комбинированного тягового привода с маховичным накопителем для электромобиля // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – № 3 (74). – С. 41–46.

2. Голованов Л. Электропшник // Автореволю. – 2012. – № 3.

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

4. Деньшиков К.К. Комбинированные энергетические установки на основе суперконденсаторов / Конференция ОИВТ РАН «Результаты фундаментальных исследований в области энергетики и их практическое значение». Москва, 24–26 марта 2008 г. – М., 2008.

5. Белозеров В.И., Степаненко В.П. Актуальность создания карьерных локомотивов с накопителем энергии // Горная промышленность. – 2014. – № 4. – С. 76.

6. Степаненко В.П. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых уста-

новок в горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 322–328.

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

8. Степаненко В.П. Исследование рабочих режимов аккумуляторных электровозов. Сборник Транспорт шахт и карьеров. Выпуск 2. – М.: Недра, 1975. – С. 156–163.

9. Степаненко В.П. Исследование характеристик рудничных электровозов с тяговыми двигателями последовательного и независимого возбуждения / Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского. Выпуск 128. – М., 1975. – С. 122–130.

10. Потапов М.Г. Карьерный транспорт. – М.: Недра, 1980. – С. 262.

11. Степаненко В.П., Иващенко В.В., Чуприн В.П., Ремизов И.П. Патент SU 1700646 А1 Н 01 М 10/42 от 29.09.1989. Полезная модель. Способ подготовки разряженной шахтной аккумуляторной батареи к работе. **ФИПС**

PROSPECTS OF THE COMBINED ENERGY STORAGE ON THE CAREER TRAIN TRANSPORT

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

BelozeroV V.I., Candidate of Technical Sciences, EkoProektKarier LLC, Moscow, Russia,
e-mail: blzrv70@mail.ru,

Sorin L.N., Doctor of Technical Sciences, AVP Technology, Moscow, Russia, e-mail: ocv@mail.ru.

The article considers the prospects of the combined energy storage on the career of railway transport in surface mining. For autonomous power supply and reception of regenerative energy for traction units is recommended to use the combined energy storage. Combined energy storage should consist of a capacitor with a double electric layer capacitor, batteries, reversible converters and inverters dividing chokes.

Key words: real way, mining transport, combined energy storage devices, batteries, capacitors, electric double layer.

REFERENCES

1. Mamatov A.I., Kalinin Ya.V., Davydov V.V., Lavrent'ev A.I. Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov. 2012, no 3 (74), pp. 41–46.
2. Golovanov L. Avtorev'yu. 2012, no 3.
3. Shevlyugin M.V. Resurso- i energosberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuemye s ispol'zovaniem nakopitelei energii (Resource- and energy-saving technologies using energy storage units for surface and underground railway services), Doctor's thesis, Moscow, MGUPS (MIIT), 2009, pp. 51.
4. Den'shchikov K.K. Konferentsiya OIVT RAN «Rezul'taty fundamental'nykh issledovaniy v oblasti energetiki i ikh prakticheskoe znachenie». Moskva, 24–26 marta 2008 g. (Proceedings of Conference on Fundamental Research Findings in the Area of Power Engineering and Their Practical Importance held by the Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, 24–26 March 2008), Moscow, 2008.
5. BelozeroV V.I., Stepanenko V.P. Gornaya promyshlennost'. 2014, no 4, pp. 76.
6. Stepanenko V.P. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. 2014, no 11, pp. 322–328.
7. Stepanenko V.P., BelozeroV V.I. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. 2015, no 2, pp. 174–181.
8. Stepanenko V.P. Issledovanie rabochnikkh rezhimov akkumulyatornykh elektrovovozov. Sbornik Transport shakht i kar'eroV. Vypusk 2 (Analysis of operating behavior of accumulator locomotives. Collected book on surface and underground mine transport, issue 2), Moscow, Nedra, 1975, pp. 156–163.
9. Stepanenko V.P. Nauchnye soobshcheniya IGD im. A.A. Skochinskogo. Vypusk 128 (Transactions of the Skochinsky Institute of Mining, issue 128), Moscow, 1975, pp. 122–130.
10. Potapov M.G. Kar'ernyi transport), Moscow, Nedra, 1980, pp. 262.
11. Stepanenko V.P., Ivashchenko V.V., Chuprin V.P., Remizov I.P. Patent SU 1700646 A1 H 01 M 10/42, 29.09.1989.



**Проще всего сваливать все аварии в шахтах на святую
Варвару, но лучше искать просчеты в своих проектах.**