

**В.П. Степаненко**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ КОМБИНИРОВАННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК**

Рассмотрены пути повышения энергоэффективности и ресурсосбережения горного локомотивного транспорта и систем автономного электроснабжения с использованием различных типов накопителей энергии. Определена потребная суммарная энергоемкость накопителей энергии комбинированных силовых установок, тип и количество суперконденсаторных модулей. Рассмотрена возможность эффективного применения в горной промышленности возобновляемых источников: ветряных электрических генераторов, солнечных панелей. Установлено, что применение накопителей энергии позволит уменьшить расход энергии и капитальные затраты, повысить устойчивость и надежность систем электроснабжения. Ключевые слова: электроснабжение, горная промышленность, локомотивный транспорт, генератор, суперконденсатор, аккумуляторная батарея, накопители, возобновляемые источники энергии.

**П**овысить ресурсо- и энергосбережение в горной промышленности можно, используя комбинированные энерго-силовые установки КЭСУ [1–10].

В настоящее время КЭСУ с накопителями энергии применяются не только для обеспечения режима автономного питания тягового подвижного состава, но и для повышения ресурсосбережения, экологической безопасности и энергоэффективности систем электроснабжения. Эффективность КЭСУ зависит от мощности и энергоемкости накопителя энергии. Энергоемкость накопителя  $E$  и мощность  $N$  должны выбираться из условий обеспечения требуемой величины запаса энергии в установившихся режимах работы, а также мощности и величины зарядных и разрядных токов в период разгона и приема тормозной энергии. Развиваемая накопителем энергии мощность  $N$  при скорости движения  $V$  в автономном режиме питания определяется из выражения

$$N = (FV / 367\eta m\eta p) + \Delta N$$

где  $N$  – мощность накопителя энергии, кВт,  $F$  – тяговое усилие, Н;  $V$  – скорость, км/ч;  $\eta_n$  – КПД электрической передачи привода, 0,88;  $\eta_p$  – КПД разряда накопителя 0,95–0,98;  $\Delta N$  – мощность, расходуемая на собственные нужды; обычно  $\Delta N < 0,2N$ .

В качестве накопителей энергии возможно использование сверхпроводящих индукционных накопителей (СПИН), инерционных накопителей (ИНЭ), электрохимических накопителей (аккумуляторов ЭХН), конденсаторов с двойным электрическим слоем (КДЭС или суперконденсаторов). Наибольшей запасаемой энергией обладают СПИН накопители (более 10 ГДЖ). Запас энергии в инерционных накопителях ИНЭ до 100–150 МДж, КПД 86–90% [9]. Суперконденсаторные накопители можно использовать для поддержания на аккумуляторных батареях стабильного напряжения в течение рабочей смены электровоза. Применять гибридные накопители, состоящие из аккумуляторной батареи и суперконденсатора, рекомендуется, если пиковые значения токов нагрузки превышают средние значения не менее, чем в 5–7 раз. Гибридный накопитель, предпочтительно устанавливается на аккумуляторных, контактно – аккумуляторных электровозах и на тяговых агрегатах.

Для приема и хранения тормозной рекуперативной энергии суперконденсаторные накопители целесообразно размещать на электровозах, в пунктах секционирования контактных сетей, на тяговых и передвижных накопительных подстанциях.

Для установки на тяговом ЭПС на подземном транспорте в состав накопителей должны входить суперконденсаторы энергоемкостью 1–5 МДж, мощностью до 500 кВт, для карьерных тяговых агрегатов – энергоемкостью 10–50 МДж, мощностью до 3000 кВт, для установки на тяговых и накопительных подстанциях и постах секционирования контактных сетей подземного транспорта – энергоемкостью 8–24 МДж, мощностью до 1500 кВт, для питания контактных сетей карьеров – энергоемкостью 40–80 МДж, мощностью до 5000 кВт

В качестве ЭХН широко используются никель-железные, никель-кадмиевые, свинцово-кислотные аккумуляторные батареи, основными достоинствами которых являются невысокая стоимость и большая удельная энергоемкость [2]. В связи с высокой удельной стоимостью ионно-литиевых аккумуляторов в настоящее время их нельзя считать перспективными для условий горных предприятий. В табл. 1 приведены разрядные характеристики тяговых никель-железных аккумуляторов типа

Таблица 1

*Характеристики аккумуляторов ТНЖ-350*

Режим разряда	Время разряда, ч	Средний ток разряда, А	Отдаваемая емкость Е, А·ч	Время разряда, ч	Напряжение на аккумуляторе, В	Отдаваемая энергия, Эз/Эр
5-часовой	5,0	70,0	350	5,0	1,20	0,420
4-часовой	4,0	87,5	297	3,4	1,18	0,351
3-часовой	3,0	116,7	245	2,1	1,15	0,281
2-часовой	2,0	175,0	192	1,1	1,08	0,207
1,5-часовой	1,5	233,0	166	0,7	1,02	0,171
1-часовой	1,0	350,0	140	0,4	0,88	0,123

ТНЖ-350. В крайнем правом столбце таблицы под отдаваемой энергией принято отношение энергии, отданной аккумулятором в процессе разряда, к израсходованный при заряде.

Из рассмотрения табл. 1 следует, что при увеличении разрядного тока с 70 до 350 А уменьшаются напряжение на аккумуляторе (с 1,2 до 0,88 В), время разряда (с 5 до 0,4 ч), отдаваемая емкость  $E$  (с 350 до 140 А·ч), отдаваемая энергия в кВт·ч с 42% до 0,123. В 5-часовом 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 аккумуляторной откатки с использованием свинцово-кислотных батарей не превышает 15–17% и никель-железных – 13,5%. Замена тяговых никель-железных аккумуляторных батарей свинцово-кислотными или никель-кадмиевыми повысит энергоэффективность аккумуляторной откатки не менее, чем на 3–5%. Снижение удельного расхода энергии с 220 до 110–150 Вт·ч/т·км достигается заменой двухступенчатой откатки на одноступенчатую с использованием контактно-аккумуляторных или контактно-конденсаторных электровозов. При этом количество электровозов, аккумуляторных батарей, зарядных устройств и зарядных столов уменьшается примерно в 2 раза, срок службы аккумуляторов повышается до 7 лет [1, 2, 4, 6].

У всех типов аккумуляторных батарей отдаваемая при разряде энергия зависит от температуры и величины разрядного тока. В табл. 2 представлены характеристики аккумуляторных батарей в относительных единицах. В качестве номинального режима был выбран пятичасовой разрядный режим.

Таблица 2

**Относительные характеристики ЭХН**

Время разряда, ч	Отношение токов $I_p/I_{pн}$	Отдаваемая емкость, %	Отдаваемая энергия, %	КПД процесса заряд-разряд, %
5,0	1,0	100	100	42,00
4,0	1,25	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

При пиковом увеличении разрядного тока и отрицательных температурах КПД и отдаваемая энергия аккумуляторов резко уменьшаются, что является их существенным недостатком. Анализ табл. 2 свидетельствует, что при возрастании отношения разрядного тока аккумуляторной батареи  $I_p$  к номинальному  $I_{pн}$  от 2,5 до 5 отдаваемая энергия уменьшается с 49,5% до 28,13%, а КПД процесса заряд-разряд от 20,7% до 12,3%. Указанные в

Таблица 3

**Параметры суперконденсаторного модуля МЛСК-130-57**

№ пп	Параметр	Величина
1	Рабочее напряжение	130 В
2	Емкость	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	1200×450×310 мм
8	Объем	0,167 м <sup>3</sup>
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

табл. 1 и 2 значения отдаваемой при разряде энергии справедливы при температурах окружающего воздуха от + 15 °С до + 35 °С. Ниже температуры +15 °С отдаваемая энергия 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.

Этого недостатка лишены конденсаторы с двойным электрическим слоем КДЭС (суперконденсаторы). В табл. 3 приведены параметры перспективного суперконденсаторного модуля МЛСК-130-57 с органическим электролитом, разработанного ООО «ТЭЭМП», инвестором которого является группа «Ренова». Степень защиты корпуса модуля IP65.

Для комплектации конденсаторного накопителя энергоемкостью 5 МДж потребуется 12 модулей, для комплектации накопителя энергоемкостью 50 МДж – 100 модулей МЛСК-130-57. В табл. 4 представлена оценка потребности в суперконденсаторах горного локомотивного транспорта, в табл. 5 – инфраструктуры, освещения и аварийного питания горных предприятий России.

Горнодобывающие промышленные предприятия с каждым годом осваивают новые территории, находящихся в отдалении от традиционных источников энергии. Для строящихся горных предприятий и жилых поселков сооружают новые линии электропередач или объекты подключают к существующим сетям. Подключение дополнительной нагрузки к существующим сетям может привести к дефициту электроэнергии на горных

Таблица 4

**Оценка потребной энергоемкости накопителей энергии на горном транспорте**

Оборудование	Энергоемкость, МДж	Количество модулей МЛСК-130-57, шт.
Рудничные электровозы	15 000	30 000
Рудничное тяговое электроснабжение	50 000	100 000
Тяговые агрегаты	40 000	80 000
Автосамосвалы с электрическим приводом	7500	15 000
Система тягового электроснабжения карьеров	50 000	100 000
<b>ВСЕГО</b>	<b>162 500</b>	<b>325 000</b>

промышленных предприятиях и в населенных пунктах. Устранить дефицит можно использованием дизельных электростанций, что потребует доставки в отдаленные районы страны дорогостоящего дизельного топлива. Расход дизельного топлива и смазочных материалов особенно велик на электростанциях с двумя попеременно работающими дизельными генераторами. Уменьшить расход дизельного топлива и улучшить экологическую безопасность возможно при использовании в КЭСУ современных накопителей и возобновляемых источников энергии. В некоторых случаях автономные КЭСУ, использующие энергию из нескольких источников, является лучшим техническим решением, чем присоединение к электрическим сетям. Такие системы не требуют затрат на передачу электроэнергии, стимулируют использование энергосберегающих технологий и экологически безопасны. В настоящее время современные КЭСУ находят применение, в основном, для электроснабжения жилых домов и поселков. В комплект поставки автономных КЭСУ входят ветряные генераторы, электронные преобразователи, контроллеры, инверторы и аккумуляторные батареи ЭХН. Вследствие обильных снегопадов и низких температур использование солнечных батарей в качестве возобновляемого источника энергии в условиях Сибири и Крайнего Севера встречает серьезные трудности. Перспективы применения в горной промышленности имеют также солнечные вакуумные коллекторы и другие генерации источников тепловой энергии.

Мощность большей части электростанций для питания жилых домов и поселков колеблется от 0,6 кВт до 30 кВт, их запас энергии от 5 кВтч до 133 кВтч. Срок службы комплектующего оборудования различный: солнечные панели 35–40 лет, ветрогенератор горизонтальный, контроллер гибридный и инвертор — 15–20 лет. Наименьший срок службы у дизельных двигателей и аккумуляторных батарей — от 3 до 7 лет. До 40% стоимости комплекта составляют горизонтальные ветрогенераторы. При частом изменении направления ветра рекомендуется установка вертикальных ветрогенераторов, которые в 2–3 раза дороже горизонтальных. При отключении генератора электрическая энергия может поступать из аккумуляторной батареи, что уменьшает расход дизельного топлива. При неработающем дизельном двигателе аккумуляторная батарея может заряжаться от ветрогенератора и от солнечной батареи. По сравнению с использованием системы из двух дизельных генераторов снижение затрат может составлять от 30 до 70%.

Таблица 5

**Оценка потребной энергоемкости суперконденсаторных накопителей энергии**

Оборудование	Энергоемкость, МДж	Количество модулей МЛСК-130-57, шт.
Подъемные установки	60 000	120 000
Аварийное освещение	17 500	35 000
Жилые комплексы	40 000	80 000
Автономные электростанции	20 000	40 000
<b>ВСЕГО</b>	<b>137 500</b>	<b>275 000</b>

Анализ табл. 1 и 2 показывает, что батареи ЭХН при длительных 2–3 кратных и пиковых 5–7 кратных перегрузках не смогут обеспечить устойчивое электроснабжение от автономных электростанций. Для устранения этого недостатка необходимо применять комбинированные накопители энергии, состоящие из ЭХН и КДЭС [4, 5].

В табл. 5 приведена оценка потребной энергоемкости суперконденсаторных накопителей, необходимых для обеспечения устойчивого электроснабжения удаленных от электрических сетей горных предприятий в нормальных и аварийных режимах.

При оценке потребной суммарной потребной энергоемкости для табл. 5 энергоемкость конденсаторов КДЭС была принята равной 2% от энергоемкости аккумуляторных батарей ЭХН. В системах аварийного питания шахтного подъема КДЭС должны обеспечивать не менее двух циклов «спуск-подъем» клетьевого подъема и развивать мощность не менее 2000 кВт. Энергоемкость суперконденсаторных накопителей в системе освещения подземных горных выработок должна быть достаточной для обеспечения заряда индивидуальных головных светильников подземных рабочих в течение не менее трех суток.

**Выводы**

1. В статье рассмотрены перспективы применения в горной промышленности мощных накопителей КДЭС и восполняемых источников энергии.

2. Суммарная потребность в КДЭС накопителях для горного локомотивного транспорта, подъема и автономных электростанций составляет 300 000 МДж. Для удовлетворения этой потребности потребуется 600 000 модулей МЛСК-130-57 разрабо-

танных ООО «ТЭЭМП», инвестором которого является группа «Ренова».

#### 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. 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.

10. Денщикова 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. **ГИАС**

#### КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

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



**V.P. Stepanenko**

## **DESIGN OF ENERGY STORAGE UNITS FOR COMPOUND PROPULSION SYSTEMS**

Under analysis are the ways of improving efficiency and resource-saving capacity of mine locomotive transport and independent power supply systems using various models of energy storage units. The required energy content of energy storage units for compound propulsion systems, as well the type and amount of supercondenser modules are determined. The article discusses efficient applicability of renewable energy sources in mining industry: windmills, solar cell arrays. It has been found that the use of energy storage units will allow reducing energy consumption and capital costs, and elevating stability and endurance of electric power systems.

Key words: power supply, mining industry, locomotive transport, generator, supercondenser, accumulator battery, storage units, renewable energy sources.

### **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. Shevlyugin M. V. *Resurso- i energosberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i v metropolitenakh, realizuemye s ispol'zovaniem nakopiteley energii* (Resource- and energy-saving technologies in railway transport and underground railways using energy storage units), Doctor's thesis, Moscow, MGUPS (MIT), 2009, pp. 51.
10. Denshchikov K. K. Konferentsiya OVIT RAN «Rezultaty fundamental'nykh issledovaniy v oblasti energetiki i ikh prakticheskoe znachenie». Moskva, 22–26 marta 2008 (Fundamental research findings in power engineering and their practical importance: Conference proceedings. Department of Nano and Information Technologies, Russian Academy of Sciences. Moscow, 22–26 March 2008), Moscow, 2008.

